YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

304 KALİTE PASLANMAZ ÇELİK VE GALVANİZ SACLARIN BİÇİMLENDİRME KABİLİYETLERİNİN ÇEŞİTLİ YÖNLERİ İLE İNCELENEREK KARŞILAŞTIRILMASI

Mak.Müh. Gürhun ŞENYÜZ

FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Mehmet Emin YURCİ

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ v

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ xv

ÖNSÖZ xviii

ÖZET xix

ABSTRACT xx

1. GİRİŞ 1

2. PASLANMAZ ÇELİK ve GALVANİZ KAPLI SACLAR 6

2.1 Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması 9
2.1.1 Martenzitik Paslanmaz Çelikler 9
2.1.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler 13
2.1.3 Östenitik Paslanmaz Çelikler 17
2.1.4 Dubleks (Östenitik - Ferritik) Paslanmaz Çelikler 22
2.1.5 Çökelme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler 23
2.2 Kaplamalı Saclar 25
2.2.1 Çinko Kaplı Saclar 26
2.2.2 Sıcak Daldırma Yöntemi İle Çinko Kaplama (Galvanizleme) 27
2.2.3 Elektrolitik Çinko Kaplama 30
2.2.4 Çinko Püskürtme 32

3. PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN ÜRETİM TEKNOLOJİSİ 33

3.1 Çelikhane (Ergitme / Arıtma) 33
3.2 Sürekli Döküm 34
3.3 Taşlama 34
3.4 Sıcak Haddeleme 35
3.5 Tavlama ve Asit Banyosu 35
3.6 Soğuk Haddeleme ve Son İşlemler 37
3.7 Boy Kesme İşlemi 40
3.8 Dilme İşlemi 41
3.9 Taşlama ve Fırçalama İşlemleri 42
3.10 Yüzey Koruma 43

4. SAC ŞEKİLLENDİRMEDE KULLANILAN TEMEL KAVRAMLAR 45

4.1 Çekme Diyagramı 45
4.2 Elastik – Plastik Deformasyon 46
4.3 0,2 % Akma Mukavemeti 47
4.4 Kırılma Biçimleri 48

4.4.1 Gevrek Kırılma 48
4.4.2 Sünek Kırılma 49
4.5 Pekleşme, Süneklik, Tokluk ve Sertlik Tanımları 49
4.5.1 Pekleşme 49
4.5.2 Süneklik 50
4.5.3 Tokluk 50
4.5.4 Sertlik 50
4.6 Mühendislik Gerilme, Gerinim ve Gerçek Gerilme, Gerinim Tanımları 51
4.6.1 Mühendislik Gerinimi ve Gerçek Gerinim 51
4.6.2 Tek Eksenli Mühendislik Gerilmesi ve Gerçek Gerilme 54
4.6.3 Gerçek Gerilme – Gerçek Gerinim Eğrisi 54
4.7 Gerinim Hızı 56

5. SAC ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ 58

5.1 Kesme Yöntemi 58
5.2 Bükme Yöntemi 62
5.3 Sıvama Yöntemi 73
5.4 Gererek Biçimlendirme Yöntemi 74
5.5 Derin Çekme Yöntemi 78

6. ŞEKİLLENDİRME KABİLİYETİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER 95

6.1 Malzemenin Kimyasal Bileşiminin Şekillendirmeye Etkisi 96
6.2 Çelik Üretiminin Şekillendirmeye Etkisi 99
6.2.1 Sıcak Çekilmiş Saclar 99
6.2.2 Soğuk Çekilmiş Saclar 99
6.2.3 Gaz Giderilmiş Çelikler 100
6.2.4 Alüminyumla Söndürülmüş Çelikler 100
6.2.5 Kalıntı Elementi İçermeyen Çelikler 100
6.2.6 Yüzey Hazırlama 100
6.2.7 Derin Çekme Saclarının Üretiminde Uygulanan Özel Yöntemler 101
6.3 Malzeme Mikro Yapısının Şekillendirmeye Etkisi 103
6.3.1 Tane Boyutu 103
6.3.2 Ferrit Tanelerinin Şekli 104
6.3.3 Mikroyapılar 104
6.3.4 Tercihli Yönlenme 105
6.4 Malzeme Mekanik Özelliklerinin Şekillendirmeye Etkisi 107
6.4.1 Akma Mukavemeti 108
6.4.2 Plastik Anizotropi 109
6.4.2.1 Haddeleme Şartlarının Çekilebilirlik Oranına ($\overline{R}$) ve Düzlemsel Anizotropiye (ΔR) Etkisi 115
6.4.3 Elastisite (Young) Modülü (E) 118
6.4.4 Deformasyon Sertleşmesi Üssü – Pekleşme Üsteli (n) 119
6.4.5 Deformasyon Hızı Duyarlılığı Üssü – Gerinim Hızına Duyarlılık Üsteli (m) . 126
6.4.6 Üniform Uzama 132
6.5 Prosese Bağlı Parametrelerin Şekillendirmeye Etkisi 133
6.5.1 Levha Kalınlığı ve Tane Boyutu 133
6.5.2 Kalıp Dizaynı ve Geometrisinin Etkisi 134
6.5.3 Istampa ve Kalıp Ağzı Köşe Yuvarlatmaları 137
6.5.4 Yağlama , Operasyon Hızı ve Sıkıştırma Basıncı Etkisi 141

7 SACLARA UYGULANAN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK DENEYLERİ 147

7.1 Tek Eksenli Çekme Deneyi 147
7.1.1 Çekme Deneyinde Kullanılan Terimler ve Tarifler 153
7.2 Düzlemsel Gerinimli Çekme Deneyi 155
7.3 Sertlik Ölçme Deneyleri 156
7.3.1 Brinell Sertlik Ölçme Deneyi 156
7.3.1.1 Brinell Sertlik Ölçme İşlemi 158
7.3.2 Vickers Sertlik Ölçme Deneyi 159
7.3.2.1 Vickers Sertlik Ölçme İşlemi 160
7.3.3 Rockwell Sertlik Ölçme Deneyi 161
7.4 Bükme (eğme) ve Katlama Deneyleri 164
7.5 İki Eksenli Germe Deneyi 167
7.6 Derin Çekme Deneyleri 168
7.7 Çökertme Deneyleri 171
7.7.1 Cupping (Erichsen Çökertme) Testi 171
7.7.2 Olsen Çökertme Deneyi 174
7.8 Delik Genişletme Deneyi 174
7.9 Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Oluşturulması 175

8 304 KALİTE PASLANMAZ ÇELİK ve DX51 KALİTE GALVANİZ SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE DENEYSEL ÇALIŞMALAR 181

8.1 Vickers Sertlik Deneyleri 181
8.2 Çekme Deneyleri 184
8.2.1 Belli Bir Çekme Hızında Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi 186
8.2.2 Ani Hız Artırma Yöntemi ile Gerinim Hızına Duyarlılığın Belirlenmesi 209
8.2.3 Farklı Çekme Hızlarında Bazı Mekanik Özelliklerdeki Değişimlerin Belirlenmesi 231
8.2.4 Plastik Gerinim Oranının Belirlenmesi 240
8.3 Erichsen Çökertme Deneyleri 247
8.4 Derin Çekme Deneyleri 248
8.5 DX51 Kalite Galvaniz Sacın Kaplama Kalınlığının Belirlenmesi 250

9 304 KALİTE PASLANMAZ ÇELİK ve DX51 GALVANİZ SACIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ve ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI 252

10 GENEL SONUÇLAR 271

11 SONUÇ 275

KAYNAKLAR 277

ÖZGEÇMİŞ 281

SİMGE LİSTESİ

A_f	Çekmede kopan yüzeylerin alanı
b	Çekme numunesi genişliği
C	Malzeme sabiti
c	Istampa ile kalıp arasındaki boşluk
D_{max}	Başarılı derin çekilebilen en yüksek ilkel pul çapı değeri
D_0	İlkel pul çapı
d_k	Kalıbın delik çapı
d_o	Istampa çapı
E	Elastiklik modülü
e	% nominal gerinim
e	Nominal gerinim hızı
e_k	% kopma uzaması
e_u	Maksimum üniform uzama
F_{max}	Çekme deneyinde en yüksek kuvvet
F_N	Pot çemberi kuvveti
F_y	Derin çekme deneylerinde yırtılmanın meydana geldiği kuvvet
K	Dayanım katsayısı
k	Bükmede malzeme sabiti
L_f	Kopan parçaların bir araya getirilmesi ile ölçülen boy
L_0	Çekme deneyi numunesinin ilk ölçü boyu
l	Bükmeden önceki parça eni
m	Gerinim hızına duyarlılığı üsteli
N	Merdanelerin saca uyguladığı normal kuvvet
n	Pekleşme üsteli
p	Pot çemberi basıncı
R	Plastik anizotropi değeri
r_b	Bükme bölgesinde iç kısım yarıçapı
r_m	Kalıp köşe yuvarlatması yarıçapı
R_{45}	Haddeleme yönüyle 45^0 açı yapan doğrultunun plastik anizotropi değeri
R_{90}	Haddeleme yönüyle 90^0 açı yapan doğrultunun plastik anizotropi değeri
S	Nominal gerilme
S_A	% 0,2 uzamadaki nominal akma gerilmesi
$S_Ç$	Nominal çekme gerilmesi
t	Yassı ürün kalınlığı
$V_{çkm}$	Çekme hızı

V_{max}	Sıcak haddelemede en yüksek çalışma hızı
V_{min}	Sıcak haddelemede en düşük çalışma hızı
Z	Kopmada kesit büzülme yüzdesi
β	Gerinim oranı
ΔR	Düzlemsel anizotropi katsayısı
ε	Gerçek gerinim hızı
ε_1	Uzunluk gerinimi
ε_t	İncelme gerinimi
ε_u	% maksimum üniform gerinim
ε_w	Daralma gerinimi
η	Derin çekmede deformasyon verimliliği
θ	Bükme açısı
θ_b	Yerel boyunlanma açısı
μ	Sürtünme katsayısı
σ_A	% 0,2 uzamadaki gerçek akma gerilmesi
$\sigma_Ç$	Gerçek çekme gerilmesi
σ_f	Derin çekmede flanştaki akma gerilmesi
σ_r	Derin çekmede radyal gerilme
σ_t	Derin çekmede çevresel gerilme
σ_w	Derin çekmede cidardaki akma gerilmesi

KISALTMA LİSTESİ

ASSDA	Australian Stainless Steel Development Association
AISI	American Iron and Steel Industry
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing and Materials
AOD	Argon Oxygen Decarburization
BS	British Standards
CVD	Chemical Vapour Deposition
DDQ	Deep Draw Quality
DQ	Draw Quality
DR	Draw Ratio
EAF	Electric Arc Furnace
ELC	Extra Low Carbon
EÇD	Erichsen Çökertme Deneyi
EN	Euronorm
EP	Paslanmaz Çelik Yağlayıcılar
FCCV	Fukui Conical Cup Value
FLC	Forming Limit Curve
FLD	Forming Limit Diagram
GBO	Gererek Biçimlendirme Oranı
HRB	Hardness of Rockwell B
HV	Hardness of Vickers
IF	Interstitial Free
JIS	Japanese Industrial Standards
KHM	Kübik Hacim Merkezli
KYM	Kübik Yüzey Merkezli
LDH	Limiting Dome Height
LDR	Limiting Draw Ratio
PLC	Programmable Logic Controller
PE	Polietilen
PVC	Poli Vinil Klorür
OÇD	Olsen Çökertme Deneyi
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Paslanmaz çelik yüzeyinin kendi kendini onarması ... 2
Şekil 2.1 Schaeffler diyagramı ... 7
Şekil 2.2 Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları ... 9
Şekil 2.3 Martenzitik iç yapı ... 10
Şekil 2.4 Martenzitik paslanmaz çelikler ... 12
Şekil 2.5 Ferritik paslanmaz çelikler ... 14
Şekil 2.6 Ferritik iç yapı ... 16
Şekil 2.7 Östenitik iç yapı ... 17
Şekil 2.8 Östenitik paslanmaz çelikler ... 20
Şekil 2.9 Dubleks iç yapı ... 22
Şekil 2.10 Dubleks paslanmaz çelikler ... 23
Şekil 2.11 Çökelme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler ... 24
Şekil 2.12 Paslanmaz çeliklerin iç yapıları ... 24
Şekil 2.13 Galvaniz üretim hattı ... 28
Şekil 2.14 Elektrolitik çinko kaplamada kullanılan iletken makara ve kaplama ünitesi ... 31
Şekil 3.1 Çelikhane ve sürekli döküm ünitesi üretim aşamaları ... 33
Şekil 3.2 Sürekli slab döküm ve sıcak haddeleme ünitesi ... 34
Şekil 3.3 Sıcak haddeleme ile şekil değiştirme ... 35
Şekil 3.4 İkili hadde (2HI) çalışma düzeni ... 36
Şekil 3.5 Dörtlü hadde (4HI) çalışma düzeni ... 36
Şekil 3.6 Altılı hadde (6HI) çalışma düzeni ... 37
Şekil 3.7 Soğuk haddeleme ile şekil değiştirme ... 37
Şekil 3.8 Soğuk haddelenmiş çelik üretim hattı ... 38
Şekil 3.9 Boy kesme hattı ... 40
Şekil 3.10 Dilme hattı ... 41
Şekil 3.11 Rulo ve levha taşlama, fırçalama hattı ... 43
Şekil 3.12 Boy kesme hattı ... 44
Şekil 4.1 Sünek bir metalin mühendislik çekme diyagramı ... 46
Şekil 4.2 Yük – uzama eğrisi ... 46
Şekil 4.3 Deformasyon bölgelerinin mühendislik gerilme-gerinim diyagramı ve test parçası ile ilişkisi ... 47
Şekil 4.4 0,2 % akma mukavemeti ... 48
Şekil 4.5 Çekme deneyinde kırılma tipleri, (a) Çok kristalli metallerde gevrek kırılma, (b) Sünek tek kristallerde kayma kırılması, (c) Çok kristalli metallerde sünek çanak - koni tipi kırılma, (d) Çok kristalli metallerde tam sünek kırılma ... 48
Şekil 4.6 Çekme kuvveti uygulanan parça ... 51
Şekil 4.7 Yük-uzama eğrisi ... 52
Şekil 4.8 Gerçek ve nominal gerilme - gerinim eğrilerinin karşılaştırılması ... 55
Şekil 4.9 Büyük deformasyon durumunda elastik deformasyonun durumu ... 56
Şekil 5.1 Sac metalin kesilmesi ... 58
Şekil 5.2 Sac kesme kalıbı ... 59
Şekil 5.3 Adımlı delme ve kesme kalıbı ... 61
Şekil 5.4 Büküm bölgesinin geometrisi ... 63
Şekil 5.5 Bükme işleminde tarafsız eksenin yer değiştirmesi ve kesit distorsiyonu ... 64
Şekil 5.6 Bükme yönteminin şematik gösterilişi ... 65
Şekil 5.7 Bükme işlemi ve kullanılan terimlerin tanımı ... 67
Şekil 5.8 Bükme işleminde genişlik / kalınlık oranının iki eksenli gerilme hali ve dolayısıyla malzemenin bükülebilme kabiliyetine (% e_b) etkisi ... 68
Şekil 5.9 Geriye yaylanma (springback) olayının şematik gösterilişi ... 68

Şekil 5.10 Geri yaylanma faktörü 69
Şekil 5.11 V bükmede iş parçasında geri yaylanmayı giderebilmek için 90° yerine 88° bükülmesi 70
Şekil 5.12 Bükme ıstampası ile büküm bölgesini ezerek geri yaylanmayı azaltma yöntemi . 70
Şekil 5.13 Preste bükme işlemlerine ait örnekler 71
Şekil 5.14 Metalik saclara bükme yolu ile dikiş atma (kenetleme) işlemine ait örnekler 71
Şekil 5.15 Sacların büküm yönünün şekillendirmeye etkisi 72
Şekil 5.16 Karmaşık şekilli bir parçanın kademeli bükme işlemlerine ait örnek 72
Şekil 5.17 Metalik sacların sıvama işlemlerine ait örnekler 73
Şekil 5.18 Kesme kuvveti ile sıvama işleminde kullanılan makinelerin şematik gösterilişi .. 74
Şekil 5.19 Yarıküresel uçlu ıstampayla gererek biçimlendirme işlemi 75
Şekil 5.20 Gererek biçimlendirme oranı 76
Şekil 5.21 Sürtünmeli ve sürtünmesiz şartlarda yarıküresel bir ıstampayla yapılan germe işleminde sac kalınlığındaki gerinimin dağılımı 77
Şekil 5.22 Germede yırtılma bölgesi 77
Şekil 5.23 Silindirik bir kabın derin çekilmesi 78
Şekil 5.24 Derin çekmede ilk aşama olan kabartma aşaması 79
Şekil 5.25 Derin çekmede ikinci aşama olan çekme aşaması 80
Şekil 5.26 Derin çekmede flanş bölgesinde malzeme akışı ve oluşan gerilmeler 81
Şekil 5.27 Derin çekilen bir kabın değişik bölgelerindeki deformasyon durumu 82
Şekil 5.28 Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki gerilme durumu 83
Şekil 5.29 Pot çemberi kuvvetinin sınır derin çekme oranına ve kusur bölgelerine etkisi 83
Şekil 5.30 Derin çekmenin herhangi bir anında, flanştaki bir elemanın pozisyonu ve kalıp içine akışta eksen takımının rotasyonu 84
Şekil 5.31 Derin çekme işleminde kalınlığın bölgelere göre değişimi 87
Şekil 5.32 Değişik cidar ütüleme yöntemleri 87
Şekil 5.33 Derin çekilmiş bir kabın dört kademede ütülenmesi ile cidar kalınlığında meydana gelen incelmeler 88
Şekil 5.34 Derin çekme işlemi esnasında uygulanan kuvvetin zımbanın ilerleme mesafesine göre değişimi 89
Şekil 5.35 Yeniden derin çekme işlemlerine ait örnekler 89
Şekil 5.36 Akma ve kopma dayanımlarının karşılaştırılması 91
Şekil 6.1 Sürekli tavlama işlemi şeması 101
Şekil 6.2 Ilık haddeleme ile derin çekme saclarının üretim yöntemi şeması 102
Şekil 6.3 Dört adet düşük karbonlu çelik levhanın (%70 soğuk hadde + tavlama) $\overline{R}$ tane boyutuyla değişimi 103
Şekil 6.4 Yüzey tane boyutunun şekillendirmeden sonra yüzey görünümüne etkisi 104
Şekil 6.5 Çelikte ortalama çekilebilirlik oranına etki eden kristallografik yönlenmenin 3 esas tipinin şematik gösterilişi 105
Şekil 6.6 Ortalama çekilebilirlik oranı ve tekstür' ün soğuk deformasyon ile değişimi 106
Şekil 6.7 Aynı akma mukavemetine sahip farklı akma karakteristiği gösteren çelik levhalar için yük- uzama eğrisi 108
Şekil 6.8 Haddeleme yönü ile 0^0, 45^0 ve 90^0' lik açılardaki çekme numunelerinden $\overline{R}$ değerinin hesaplanması 110
Şekil 6.9 Çeşitli malzemelerin deneysel olarak belirlenen $\overline{R}$ değerleri ile sınır derin çekme oranının ilişkilendirilmesi 111
Şekil 6.10 Bazı sac malzemelerin tipik $\overline{R}$ değer aralıkları ve sınır derin çekme oranları ... 111
Şekil 6.11 Üç farklı yönde yapılan derin çekme numuneleri ve kulak oluşum yönlerinin değişimi 112
Şekil 6.12 Kulaklanmanın veya kap cidar yüksekliklerinin (h) haddeleme yönüne (θ) göre açısal değişimi 113

Şekil 6.13 Mekanik fiberleşme mikro yapısı 114
Şekil 6.14 Tavlama öncesi yapılan soğuk deformasyon miktarının ortalama çekilebilirlik oranına ($\overline{R}$) etkisi 115
Şekil 6.15 Söndürülmemiş ve söndürülmüş çelik için farklı son sıcak haddeleme sıcaklığı ile soğuk deformasyon miktarının ortalama çekilebilirlik oranına etkisi 116
Şekil 6.16 Bir söndürülmemiş ve iki Al ile söndürülmüş çelikte bobin sargı sıcaklığının $\overline{R}$ değerine etkisi 116
Şekil 6.17 Söndürülmüş bir çelikte tavlama öncesi soğuk deformasyonun kulaklanmaya etkisi 117
Şekil 6.18 Söndürülmemiş ve söndürülmüş çelikte farklı sargı sıcaklıklarında, soğuk deformasyon ile ΔR' nin değişimi 117
Şekil 6.19 Çelik levhada normal anizotropiyle ($\overline{R}$), ortalama elastisite modülü ($\overline{E}$) değişimi 118
Şekil 6.20 Düzlemsel anizotropi (ΔR) ve düzlemsel elastisite modülü (ΔE) arasındaki değişim 119
Şekil 6.21 Malzemenin diğer özelliklerinin ve çekme hızının sabit kalması şartıyla, pekleşme üstelinin artımı ile maksimum üniform uzamadaki artımın örneklenmesi 120
Şekil 6.22 Pekleşme üsteli ile homojen (üniform) bölgedeki gerinimin (ε_h) ve süreksizlik arz eden bölgedeki (boyundaki) gerinimin (ε_i) değişimi 121
Şekil 6.23 " n " değerinin kritik deformasyon miktarına etkisi 121
Şekil 6.24 Pekleşme üstelinin çökertme yüksekliğine etkisi 122
Şekil 6.25 Çeliklerde akma dayanımı ile pekleşme üstelinin değişimi 122
Şekil 6.26 Pekleşme üstelinin η = 0,75 deformasyon verimliliğinde ve değişik α gerilme oranlarında sınır derin çekme oranına etkisi 123
Şekil 6.27 Pekleşme üstelinin, derin çekmede ortaya çıkan maksimum kuvveti geciktirici etkisi 124
Şekil 6.28 Pekleşme üstelinin ütülemedeki kesit redüksiyonuna etkisi 125
Şekil 6.29 Derin çekmede " n " değerinin şekillendirmeye etkisi 125
Şekil 6.30 " m " değerinin üniform uzamayla değişimi 126
Şekil 6.31 Malzemenin diğer özelliklerinin ve çekme hızının sabit kalması şartı ile, gerinim hızına duyarlılık üstelinin artımı ile boyunlanma sonrası uzama ve toplam uzamadaki artımın örneklenmesi 127
Şekil 6.32 Derin çekme hızının ıstampa kuvvetine etkisi 127
Şekil 6.33 Tek eksenli çekmede (a) ve iki eksenli çekmede (b) artan " m " değerleri ile boyun büyümesinin yavaşlaması ve üniform gerinim alanının artması 128
Şekil 6.34 Gerinim hızına duyarlılık üsteli ile homojen (üniform) bölgedeki gerinimin (ε_h) ve süreksizlik arz eden bölgedeki (boyundaki) gerinimin (ε_i) değişimi 129
Şekil 6.35 Maksimum yükten sonraki uzamanın (boyunlanma sonrası uzamanın), " n " ve "m" değerleri ile değişimi 129
Şekil 6.36 Malzemelerin gerinim hızına duyarlılık üsteli ile kopma uzaması arasındaki ilişki 130
Şekil 6.37 Gerinim hızına duyarlılık üstelinin şekillendirme sınır eğrilerine etkisi 131
Şekil 6.38 α - princi ve E-5 kalite çelik levhada kalınlık yönündeki şekil değiştirme ile kapta belirlenen bir noktadan itibaren boyun vermenin değişimi 131
Şekil 6.39 Çeşitli levhalar için erichsen kap yüksekliği, levha kalınlığı arasındaki ilişki 133
Şekil 6.40 Çelikte FLD – levha kalınlığı ilişkisi 134
Şekil 6.41 Küresel tabanlı bir parçanın biçimlendirme işlemine ait örnek 136
Şekil 6.42 Istampa köşe yuvarlatma yarıçapının sac kalınlığındaki gerinim yığılmasına etkisi 137
Şekil 6.43 Kalıp ağzı köşe yuvarlatması ile derin çekme kuvvetlerinin değişimi 139

Şekil 6.44 Kalıp ağzı köşe yuvarlatması ile kap cidarındaki kritik bölgedeki incelme derecesinin değişimi 139
Şekil 6.45 Kalıp ağzı köşe yuvarlatmasının sac kalınlığına göre seçimi 140
Şekil 6.46 Istampa ve kalıp ağzı köşe yuvarlatmasının sınır derin çekme oranına etkisi..... 140
Şekil 6.47 Kuru ve yağlı E5 kalite çelik ile α-princi'nin 27 mm. kap yüksekliği için deformasyon dağılımı 141
Şekil 6.48 Yağlamanın derin çekme kuvvetine etkisi..... 141
Şekil 6.49 Şekillendirme sırasında deformasyon bölgesinin yağlamayla değişimi..... 142
Şekil 6.50 Yağlayıcıların gerinim dağılımına etkisi 142
Şekil 6.51 Deformasyon yöntemlerinde yağlamanın birim şekil değiştirme üzerindeki tesiri 144
Şekil 6.52 Aynı kuru yağlayıcı malzeme kullanıldığında, paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin sürtünme miktarlarının mukayesesi (a) Sürtünme miktarının kuru yağlayıcı malzeme ile değişebilme olasılığı (b) 145
Şekil 7.1 Kalınlığı 0,1 mm ile 3 mm arasında olan yassı numuneler 148
Şekil 7.2 Sac çekme numunelerinin deney makinasına tutturulma yöntemleri ve çeşitli kavrama çeneleri 150
Şekil 7.3 ASTM E 8M standardına göre, tek eksenli çekme deney numunesinin boyutlandırılması 150
Şekil 7.4 ASTM standardıma göre çekme deney numunesi boyutları..... 151
Şekil 7.5 Çekme deneylerinde kullanılan INSTRON 4505 üniversal çekme cihazı 152
Şekil 7.6 Çekme deney numunelerinin deney öncesi ve sonrası durumları 153
Şekil 7.7 Düzlemsel gerinimli çekme deneyi numunesi..... 155
Şekil 7.8 Brinell-Rockwell-Vickers sertlik ölçüm cihazı 158
Şekil 7.9 Vickers deneyinde kullanılan elmas uç ve sertliği ölçülecek malzemeye batırılış şekli..... 159
Şekil 7.10 Vickers deneyinin prensibi 160
Şekil 7.11 Rockwell sertlik deneyinde kullanılan kavramlar 163
Şekil 7.12 Brinell, vickers ve rockwell sertliklerinin birbirine dönüşümü..... 164
Şekil 7.13 ASTM E 290 standardına göre bir ucu mengeneye sıkıştırılmış sac numunenin, ucu belli bir yarıçapta yuvarlatılmış blok üzerinde bükülmesi..... 164
Şekil 7.14 Destekler arası eğme..... 165
Şekil 7.15 Sacların bir blok üzerinde, kollarının açık ve birbirine paralel olarak 180° (a) ve kendi üzerine 180° (b) katlanması 166
Şekil 7.16 Tepe açısı 60° olan bir V blok üzerinde sac numunenin bükülmesi 166
Şekli 7.17 İleri - geri eğme düzeneği 167
Şekil 7.18 Malzemenin iki eksenli gerinim durumunu yansıtan hidrolik şişirme deneyi..... 168
Şekil 7.19 Düz tabanlı ıstampa ile yapılan Swift derin çekme deneyi düzeneği 169
Şekil 7.20 Fukui konik derin çekme düzeneği ve deney sonrası yırtılmış bir numune 170
Şekil 7.21 Genişliği 90 mm'den daha dar sacların çökertme muayenesinde kullanılan cihazın anaparçaları ve deney düzeneği 172
Şekil 7.22 Genişliği 90 mm'den daha geniş sacların çökertme muayenesinde kullanılan cihazın anaparçaları ve deney düzeneği 173
Şekil 7.23 Cupping test makinası ve test sonu numuneleri 173
Şekil 7.24 Olsen çökertme deney düzeneğinin elemanları 174
Şekil 7.25 Delik genişletme deney düzeneği 175
Şekil 7.26 Şekillendirme öncesinde yüzeye uygulanan dairesel ağ görüntüsü ve deformasyon sonrasında bunların dönüştükleri elipslerin boyutları..... 176
Şekil 7.27 Değişik gerilme ve gerinim halleri için grid deformasyonu..... 177
Şekil 7.28 Şekillendirme sınır eğrilerini elde etmek için kullanılan, yarıküresel uçlu ıstampayla germe deney düzeneği ve değişik endeki sac numunelerin şişirilmesi deneyi..... 178

Şekil 7.29 Çeşitli boyutlardaki sac deney levhaları ve çeşitli yağlayıcılar kullanılarak elde edilen bir şekillendirme sınır diyagramı 179
Şekil 7.30 Şekillendirme sınırının bir band ile gösterilmesi 180
Şekil 8.1 Vickers ölçme işlemi için numune sac kalınlığına göre yük seçimi 182
Şekil 8.2 Sertlik deneyi için kullanılan Vickers sertlik ölçme cihazı ile SuperRockwell sertlik ölçme cihazı 183
Şekil 8.3 Çekme numunelerinin çıkarılmasında kullanılan Alfa Laser kesme cihazı 185
Şekil 8.4 Çekme deneylerinde kullanılan INSTRON 4505 universal çekme cihazı 185
Şekil 8.5 Çekme deneyinde kullanılan ve deney sonucunda kopan numuneler 187
Şekil 8.6 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.1) 194
Şekil 8.7 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.2) 195
Şekil 8.8 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.3) 196
Şekil 8.9 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.4) 197
Şekil 8.10 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.5) 198
Şekil 8.11 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.1) 199
Şekil 8.12 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.2) 200
Şekil 8.13 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.3) 201
Şekil 8.14 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.4) 202
Şekil 8.15 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.5) 203
Şekil 8.16 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.1) 204
Şekil 8.17 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.2) 205
Şekil 8.18 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.3) 206
Şekil 8.19 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.4) 207

Şekil 8.20 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri (Deney No.5) 208

Şekil 8.21 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.1) 216

Şekil 8.22 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0° ' lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.2) 217

Şekil 8.23 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.3) 218

Şekil 8.24 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.4) 219

Şekil 8.25 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.5) 220

Şekil 8.26 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.1) 221

Şekil 8.27 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.2) 222

Şekil 8.28 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.3) 223

Şekil 8.29 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.4) 224

Şekil 8.30 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.5) 225

Şekil 8.31 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 90°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.1) 226

Şekil 8.32 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.2) 227

Şekil 8.33 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.3) 228
Şekil 8.34 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.4) 229
Şekil 8.35 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.5) 230
Şekil 8.36 Farklı pul çaplarına göre yapılan derin çekme testleri..... 249
Şekil 8.37 SEM Cihazında kaplama kalınlığı ölçülen DX51 kalite galvaniz sac..... 251
Şekil 9.1 304 kalite paslanmaz çelik sacda, akma dayanımının haddeleme yönüne göre değişimi..... 252
Şekil 9.2 DX51 kalite galvaniz sacda, akma dayanımının haddeleme yönüne göre değişimi..... 253
Şekil 9.3 304 kalite paslanmaz çelik sacda, çekme dayanımının (a) ve maksimum yükteki gerçek gerilmenin (b) haddeleme yönüne göre değişimi..... 254
Şekil 9.4 DX51 kalite galvaniz sacda, çekme dayanımının (a) ve maksimum yükteki gerçek gerilmenin (b) haddeleme yönüne göre değişimi..... 254
Şekil 9.5 304 kalite paslanmaz çelik sacda, çekme deneylerinden elde edilen maksimum üniform gerinimin (a) ve kopmadaki uzama yüzdesi değerlerinin (b), haddeleme yönüne göre değişimi 255
Şekil 9.6 DX51 kalite galvaniz sacda, çekme deneylerinden elde edilen maksimum üniform gerinimin (a) ve kopmadaki uzama yüzdesi değerlerinin (b), haddeleme yönüne göre değişimi 255
Şekil 9.7 304 kalite paslanmaz çelik sacda, plastik gerinim oranının haddeleme yönü ile değişimi..... 256
Şekil 9.8 DX51 kalite galvaniz sacda, plastik gerinim oranının haddeleme yönü ile değişimi..... 256
Şekil 9.9 Paslanmaz çelik sacda, pekleşme üstelinin (n) haddeleme yönüne göre değişimi..... 257
Şekil 9.10 Galvaniz sacda, pekleşme üstelinin (n) haddeleme yönüne göre değişimi 258
Şekil 9.11 304 kalite paslanmaz çelik sacda, gerinim hızına duyarlılık üstelinin (m) haddeleme yönüne göre değişimi 258
Şekil 9.12 DX51 kalite galvaniz sacda, gerinim hızına duyarlılık üstelinin (m) haddeleme yönüne göre değişimi..... 259
Şekil 9.13 Paslanmaz çelik sacda, haddeleme yönüne göre farklı doğrultulardaki akma dayanımının, çekme hızı ile değişimi. 260
Şekil 9.14 Paslanmaz çelik sacda, haddeleme yönüne göre farklı doğrultulardaki çekme dayanımının, çekme hızı ile değişimi 261
Şekil 9.15 Galvaniz sacda, haddeleme yönüne göre farklı doğrultulardaki akma dayanımının, çekme hızı ile değişimi 262
Şekil 9.16 Galvaniz sacda, haddeleme yönüne göre farklı doğrultulardaki çekme dayanımının, çekme hızı ile değişimi 263
Şekil 9.17 304 kalite paslanmaz çelik saca uygulanan çekme deneylerinde, hız ile pekleşme üsteli arasındaki ilişkinin logaritmik eğilimi 264
Şekil 9.18 DX51 kalite galvaniz saca uygulanan çekme deneylerinde, hız ile pekleşme üsteli arasındaki ilişkinin logaritmik eğilimi..... 265

Şekil 9.19 304 kalite paslanmaz çelik sacdan farklı çaplarda kesilen ilkel pulların, kuru ve gres yağlamalı olarak değişik hızlarla derin çekilmesinde oluşan maksimum derin çekme kuvvetleri 267
Şekil 9.20 DX51 kalite galvaniz sacdan farklı çaplarda kesilen ilkel pulların, kuru ve gres yağlamalı olarak değişik hızlarda derin çekilmesinde oluşan maksimum derin çekme kuvvetleri 268
Şekil 9.21 304 kalite paslanmaz çelik saca kuru ve grafitli gres ile yağlamalı olarak uygulanan Erichsen çökertme deneylerinde, ölçülen maksimum çökertme kuvvetlerinin hıza göre değişimi 270
Şekil 9.22 DX51 kalite galvaniz saca kuru ve grafitli gres ile yağlamalı olarak uygulanan Erichsen çökertme deneylerinde, ölçülen maksimum çökertme kuvvetlerinin hıza göre değişimi 270

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Bazı paslanmaz çelik kaliteleri ve kimyasal bileşimleri 8
Çizelge 2.2 Martenzitik paslanmaz çelikler 11
Çizelge 2.3 Ferritik paslanmaz çeliklerin C – Cr oranları 16
Çizelge 2.4 Östenitik paslanmaz çeliklerin C- Cr oranları 19
Çizelge 2.5 Galvaniz kaplı sacların mekanik değerlerinin karşılaştırılması 27
Çizelge 2.6 EN 10327' ye göre sıcak daldırma ile Zn kaplama miktar aralıkları ve kısa gösterilişleri 30
Çizelge 2.7 Elektrolitik Zn kaplanmış soğuk saclarda yüzey durumu sembolleri 31
Çizelge 6.1 Sıcak haddelenmiş sacların tipik mekanik özellikleri 107
Çizelge 6.2 Soğuk haddelenmiş sacların tipik mekanik özellikleri 107
Çizelge 7.1 Kalınlığı 0,1 mm ile 3 mm arasında olan yassı çekme deneyi numuneleri 149
Çizelge 7.2 Brinell sertlik ölçme deneyinde parça kalınlığına bağlı bilye çapı seçimi 157
Çizelge 7.3 Rockwell sertlik deneyinde kullanılan semboller ve kısaltmalar 162
Çizelge 7.4 Rockwell Skalaları 163
Çizelge 7.5 Muayene cihazı parçalarının boyutları ve bu boyutlara ait toleranslar 173
Çizelge 8.1 304 kalite paslanmaz çelik sacın, 10 farklı noktada ölçülen Vickers sertlik değerleri ve ortalaması 182
Çizelge 8.2 DX51 kalite galvaniz sacın, 10 farklı noktada ölçülen Vickers sertlik değerleri ve ortalaması 183
Çizelge 8.3 304 kalite paslanmaz çelik sacın, 10 farklı noktada ölçülen SuperRockwell sertlik değerleri ve ortalaması 184
Çizelge 8.4 DX 51 kalite galvaniz sacın, 10 farklı noktada ölçülen SuperRockwell sertlik değerleri ve ortalaması 184
Çizelge 8.5 304 kalite paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 0°' lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikler 188
Çizelge 8.6 304 kalite paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 45°' lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri 189
Çizelge 8.7 304 kalite paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 90°'lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri 190
Çizelge 8.8 DX 51 kalite galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0°' lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri 191
Çizelge 8.9 DX 51 kalite galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45°' lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri 192
Çizelge 8.10 DX 51 kalite galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90°' lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri 193
Çizelge 8.11 304 kalite paslanmaz çelik sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 0° 'lik doğrultuda belirlenen, e=%15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) 210
Çizelge 8.12 304 kalite paslanmaz çelik sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 45°'lik doğrultuda belirlenen, e=%15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) 211
Çizelge 8.13 304 kalite paslanmaz çelik sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 90°'lik doğrultuda belirlenen, e=%15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) 212
Çizelge 8.14 DX 51 kalite galvaniz sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 0°'lik doğrultuda belirlenen, e=%15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) 213

Çizelge 8.15 DX 51 kalite galvaniz sacın,çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 45°'likdoğrultuda belirlenen, e=%15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) 214
Çizelge 8.16 DX 51 kalite galvaniz sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 90°'lik doğrultuda belirlenen, e=%15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) 215
Çizelge 8.17 304 kalite paslanmaz çelik sacın hadde yönüne 0° ' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler 232
Çizelge 8.18 304 kalite paslanmaz çelik sacın hadde yönüne 45°' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler 233
Çizelge 8.19 304 kalite paslanmaz çelik sacın hadde yönüne 90°' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler 234
Çizelge 8.20 DX51 kalite galvaniz sacın hadde yönüne 0°' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler 235
Çizelge 8.21 DX51 kalite galvaniz sacın hadde yönüne 45°' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler 236
Çizelge 8.22 DX51 kalite galvaniz sacın hadde yönüne 90°' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler 237
Çizelge 8.23 304 kalite paslanmaz çelik sacın Vçek = 32 mm / dak ve Vçek = 96 mm/ dak' lık hız değerleri altında uygulanan çekme deneylerine göre, değişik uzama değerlerinde hesaplanan gerinim hızına duyarlılık üstelleri 238
Çizelge 8.24 DX51 kalite galvaniz sacın Vçek = 32 mm / dak ve Vçek = 96 mm/ dak' lık hız değerleri altında uygulanan çekme deneylerine göre, değişik uzama değerlerinde hesaplanan gerinim hızına duyarlılık üstelleri 239
Çizelge 8.25 304 kalitesindeki paslanmaz çelik saca, hadde yönü 0° ' lik doğrultuda uygulanan çekme deneyylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_0) belirlenmesi 241
Çizelge 8.26 304 kalitesindeki paslanmaz çelik saca, hadde yönü 45° ' lik doğrultuda uygulanan çekme deneyylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_{45}) belirlenmesi 242
Çizelge 8.27 304 kalitesindeki paslanmaz çelik saca, hadde yönü 90° ' lik doğrultuda uygulanan çekme deneyylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_{90}) belirlenmesi 243
Çizelge 8.28 DX51 kalite galvaniz sacın, hadde yönü 0° ' lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_0) belirlenmesi. 244
Çizelge 8.29 DX51 kalite galvaniz sacın, hadde yönü 45° ' lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_{45}) belirlenmesi. 245
Çizelge 8.30 DX51 kalite galvaniz sacın, hadde yönü 90° ' lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_{90}) belirlenmesi 246
Çizelge 8.31 304 kalite paslanmaz çelik saca, kuru ve grafitli gres yağı ile yağlamalı olarak değişik hızlar altında uygulanan çökertme deneylerinden elde edilen Erichsen çökertme değerleri ve maksimum çökertme kuvvetleri 247

Çizelge 8.32 DX 51 kalite galvaniz saca, kuru ve grafitli gres yağı ile yağlamalı olarak değişik hızlar altında uygulanan çökertme deneylerinden elde edilen Erichsen Çökertme değerleri ve maksimum çökertme kuvvetleri 248
Çizelge 8.33 304 Kalite paslanmaz çelik sac için farklı hızlarda ve koşullardaki maksimum derin çekme kuvveti 249
Çizelge 8.34 DX51 Kalite galvaniz sac için farklı hızlarda ve koşullardaki maksimum derin çekme kuvveti 250

ÖNSÖZ

Otomotiv ve beyaz eşya başta olmak üzere imalat sanayiinin büyük bir kısmında yarı mamul olarak kullanılmakta olan sac malzemeler içerisinde paslanmaz çelik ve galvaniz kaplamalı sacların şekillendirilmesi konusu; maliyet ucuzlatma çalışmaları, artan rekabet ortamı, yükselen müşteri kalite beklentileri ve fark yaratan tasarımların ön plana çıkması neticesinde her geçen gün daha da önem arz etmekte ve araştırmaların kapsamı genişletilmektedir.

Bu malzemelerin mekanik karakteristiklerini belirlemek, buna göre de şekillendirilebilirlik özelliklerini ve çeşitli koşullarda pres altındaki davranışlarını tahmin edebilmek, malzeme ve plastik şekil verme konuları üzerine geniş bir bilgi birikimi ve derinlemesine çalışmalar gerektirmektedir. “ 304 Kalite Paslanmaz Çelik ve Galvaniz Sacların Biçimlendirme Kabiliyetlerinin Çeşitli Yönleri İle Karşılaştırılması “ adı altında hazırlamış olduğum yüksek lisans tez çalışmamda şekillendirmeye etki eden başlıca konulara değinmeye çalıştığıma inanıyorum.

Yüksek lisans eğitimimde gerek ders gerekse tez aşamalarında danışmanlığımı yürüten, çalışmalarımda yardımlarını benden esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Mehmet Emin YURCİ’ ye teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarıma, malzeme, ekipman ve literatür olarak destek veren ARÇELİK A.Ş.’ ye ve bu kurumun AR-GE Malzeme Ailesindeki yönetici, mühendis ve teknisyenlerine, başta Sibel ODABAŞ ve Dr. Feriha Sertçelik BİROL olmak üzere teşekkürlerimi buradan bir kez daha ifade etmeyi görev bilmekteyim.

En zor anlarımda daima sevgilerini hissederek destek bulduğum annem Fatma ŞENYÜZ, babam Sebahattin ŞENYÜZ ve bu çalışmanın her safhasında bana daima destek veren biricik eşim Ebru ŞENYÜZ’ e sevgilerimi ve teşekkürlerimi buradan bir kez daha sunarım.

Saygılarımla,

Gürhun ŞENYÜZ

ÖZET

Paslanmaz çelik ve galvaniz saclar, birçok sanayi dalında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle beyaz eşya ve otomotiv endüstrisi başta olmak üzere bu malzemelerin tercih edilmesinin başlıca nedeni optimuma yakın bir şekillendirilebilirlik, dayanım ve yüzey kalitesi kombinasyonu sağlamasıdır. Şekillendirme işlemi sırasında sacda meydana gelen yırtılma veya bölgesel boyunlanma gibi nedenlerle oluşan ıskartalar, imalatın sürekliliğini, ekonomikliğini ve kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Sac malzemelerin kalite sınıfları, gerek kimyasal birleşim gerekse üretim proseslerindeki farklılıklar nedeni ile metalurjik ve mekanik özellikler bakımından belirgin değişimler göstermekte ve bu değişimler pres altında şekillendirilebilirliği ve ürün kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir.

Paslanmaz çelik ve galvaniz sacların büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir.

Bu çalışmada ilk olarak paslanmaz çelik ve galvaniz sacların genel özellikleri incelenmiş ve çeşitli standartlara göre ele alınmıştır. Bununla birlikte çeşitli sac şekillendirme yöntemlerinin esaslarına değinilmiştir. Sac malzemelerin şekillendirme işlemlerindeki davranışını tahmin etmek ve özelliklerinin işlemlerdeki etkisini belirleyebilmek için şekillendirilebilirlik teorilerine temel oluşturan bazı mekanik ve metalurjik kavramlar incelenmiştir. Sacların şekillendirilebilirlik özelliğini değerlendirmeye yönelik olan bazı deney yöntemleri incelenmiş ve mekanik özelliklerin çelik sac şekillendirilebilirliğine etkisi anlatılmıştır.

Son bölümde, 304 paslanmaz çelik ve DX51 galvaniz saclar için, haddeleme yönü ile değişik açılarda uygulanan çekme deneyleri ile, malzemenin mekanik özellikleri ve bunların gerinim hızı ile göstermiş olduğu değişim belirlenmiştir. Farklı hız değerleri altında kuru ve yağlamalı olarak uygulanan Erichsen çökertme deneylerinde, çökertme değerlerinin ve maksimum çökertme kuvvetinin değişimi belirlenmiştir. Benzer şartlarda gerçekleştirilen derin çekme deneylerinde de, sınır derin çekme oranının ve maksimum derin çekme kuvvetinin değişimi belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Paslanmaz çelik, galvaniz sac, şekillendirme kabiliyeti, mekanik testler, mekanik ve metalurjik özellikler

ABSTRACT

Stainless steel and galvanized sheets have a wide usage in many industries. The main reason of this preference, particularly in white goods and automotive industries, is providing a nearly optimum combination of strength, formability and surface quality. The scrapping caused by the breaking or the localized necking of the sheet during the forming process affects the continuity, economy and quality of the production in a negative way.

Both chemical composition and processes in the production cause some differences in metallurgical and mechanical properties between the quality grades of sheet products. These differences significantly affect the formability under press and the product quality.

The most of stainless steel and galvanized sheets are hardened by the cold forming which provides increase in strength. In this way, the thickness of the goods can be decreased and considerable saving in the total weight and cost can be obtained.

In this study, the general properties of stainless steel and galvanized sheets and its classification according to several standards were studied first. In addition to this, principles of several sheet metal forming methods were mentioned. To understand the act of the properties of sheet metal in the forming operations and to determine the formability of material, some metallurgical and mechanical concepts, constituting the base of formability theories were studied. Some mechanical test methods to evaluate formability of sheet metal were studied and the affects of mechanical properties to steel sheet formability were explained.

In the last part, the mechanical properties and their changes with strain rate were determined by tensile tests in different angles to the rolling direction for 304 stainless steel and DX51 galvanized sheets. The differences in cupping values and maximum cupping forces were determined by Erichsen cupping tests, carried out in dry and lubricated conditions under different testing speed. The changes in the limiting draw ratio and maximum drawing forces were determined by deep drawing tests in similar conditions.

Keywords: Stainless steel, galvanized sheet, formability, mechanical tests, mechanical and metallurgical characteristics

1. GİRİŞ

Çelik, metalik demir elementinin, karbon, manganez, silisyum, fosfor, kükürt ve birçok elementlerle bileşim, alaşım ve karışımı ile oluşan bir malzemedir. Dünya metal üretiminin yaklaşık % 95' i demir olup demirin karbon ile yaptığı alaşımlar en yaygın kullanılan mühendislik malzemelerini oluşturmaktadır. Bunun başlıca nedeni, demirin kristal yapısının sıcaklığa bağlı olarak değişen (allotropik) bir metal olması ve demir-karbon alaşımlarına ısıl işlemler ve alaşımlama yoluyla çok farklı özellikler kazandırılabilmesidir.

20. yüzyılın başında 28 milyon ton olan dünya demir çelik tüketimi bu yüzyılın sonunda 780 milyon tona ulaşmıştır. 2007 yılında dünya ham demir çelik üretimi 1 milyar 343 milyon tondur. Bugün dünyada üretilen demir ve çeliğin üçte biri Çin' de üretilmektedir (Kayır, 2007).

Çelik sacların yüzeylerinde, kullanım alanlarına ve yerlerine bağlı olarak zamanla, çeşitli problemlerle karşılaşılabilmektedir. Bu problemlerin önüne geçebilmek ve çelik malzemelerin performanslarını arttırabilmek için, çelik yüzeylerine birbirinden farklı çözümler uygulanmakta ve saclar kaplanmaktadır. İşte bu tür çözümlerin uygulandığı çelik sac türlerine kaplı saclar denilmektedir.

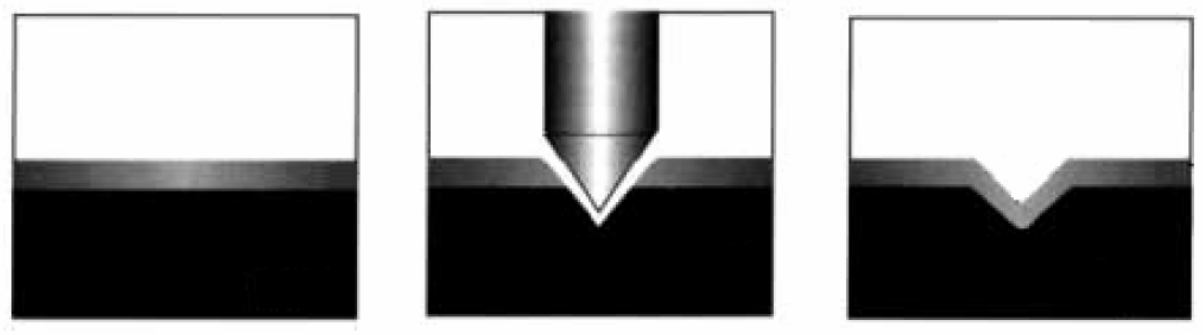
Metallerin, bulundukları ortam ile girdikleri kimyasal ya da elektro kimyasal reaksiyonlar sonucu, özelliklerinde meydana gelen olumsuz etkilere korozyon denmektedir. Korozyon, çok sık karşılaşılan, istenmeyen, ancak önlenmesi mümkün bir oluşumdur. Gündelik hayatta yaygın kullanım alanına sahip olan çeliklerden alaşımsız ya da az alaşımlı olanları korozif etkilere karşı istenen davranışı sergileyemezken, başka bir grup çelik türü ise korozyona karşı mükemmel dayanım göstermektedir. Bunlar paslanmaz çeliklerdir**.** Çelikte korozyon ve oksidasyona karşı mukavemeti arttıran ve katılması mutlak gereken alaşım elementi kromdur. Çağımız endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasına giren paslanmaz çeliklerin her geçen gün kullanım alanlarının artmasının temel nedeni korozif ortamlarda mekanik özelliklerini yitirmeden gösterdikleri yüksek korozyon dirençleri ile her türde ve biçimde bulunabilen paslanmaz çeliklerin kolaylıkla şekillendirilebilmeleridir.

Paslanmaz çeliklere**,** bu korozyon dayanım özelliğini veren, yüzey üzerinde kendiliğinden oluşan pasif film tabakasıdır ve bu film tabakasının kalınlığı milimetrenin binde biri mertebesindedir. Bu koruyucu tabaka sayesinde, reaksiyon eğilimi olan elementler bağlanarak pasifleştirilmektedirler. Böylece çelik yüzeyi, bulunduğu ortamdan

izole edilmekte ve ortamla doğrudan teması önlenmektedir (Tülbentçi ve Kaluç, 1995).

Bu pasif film yok olduğunda ve yeniden oluşması için gerekli koşulların bulunmaması halinde paslanmaz çelik, normal karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler gibi korozyona uğrayabilir. İşte bu bakımdan paslanmaz çeliğin korozyon direncinin oluşabilmesi için en az % 12 Cr içermesi ve ortamda da oksijen bulunması gerekmektedir.

Paslanmaz çeliklere paslanmazlık özelliğini kazandıran ve böylece diğer çelik türlerinden ayrılmasını sağlayan alaşım elementi kromdur. Paslanmaz çeliğin yapısına başka bir metal türü olan krom en az % 12 oranında katıldığında, ortamdaki oksijenle reaksiyona girerek krom oksit meydana getirmektedir. Krom oksit, paslanmaz çeliklerde pasif film olarak adlandırılan koruyucu tabakayı oluşturmaktadır. Bu koruyucu tabaka süreklilik arz etmektedir, öyle ki, metal yüzeyindeki bu oksit tabakası parçalanmaya çalışılsa da, ortamda oksijen var oldukça koruyucu film kendisini yenileyecektir. (Colombier ve Hochmann)



Şekil 1.1 Paslanmaz çelik yüzeyinin kendi kendini onarması (ASSDA, 2006)

Paslanmaz çeliğin ilk üretimi İngiltere ve Almanya' da 1910' lu yıllarda başlamıştır. 1950' li yılların başında 1 milyon ton civarında olan dünya paslanmaz çelik üretimi, 20. yüzyılın sonunda 20 milyon tona ulaşmıştır. 2010 yılında dünya paslanmaz çelik üretiminin 30 milyon tona yükseleceği tahmin edilmektedir. Kişi başına paslanmaz çelik tüketimi, gelişmiş ülkelerde 6,5 – 7 kilogram, ülkemizde ise 1,5 kilogram civarındadır. (Dervişoğlu, 2008)

Paslanmaz çeliğin bu kadar çok tercih edilmesinin sebebi yalnızca yüksek korozyon dayanımına sahip olması değildir. Paslanmaz çelikler aynı zamanda, farklı sıcaklıklarda kullanılabilen, şekil verilebilirliği iyi, diğer alternatif malzemelere nazaran daha dayanımlı, mekanik özellikleri bakımından kullanıcı ihtiyacına cevap verebilecek olan, estetik görünümlü malzemelerdir. Daha çok yassı mamul biçiminde üretilen paslanmaz çelikler, diğer çeliklere göre pahalı olmalarına rağmen, bakımlarının kolaylığı ve uzun ömürleri

sayesinde ön plana çıkmaktadırlar.

Paslanmaz çelik sacların dışındaki metal malzemelerin yüzeylerini etkileyen çok çeşitli korozif faktörler bulunmaktadır. Atmosferdeki oksijen, tuzlu deniz suyu, nem, sıcaklık farklılıkları, hava kirliliği bu faktörlerin ön plana çıkanlarındandır. Bu faktörler çelik sacların kullanım performanslarını ve malzeme kalitelerini olumsuz etkilemektedir. Bahsedilen bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için metal yüzeylerine uygulanan kaplamalardan faydalanılmaktadır. Bu kaplamalar birer bariyer görevi görerek, metalin atmosfer, su ve diğer korozif ortamlara karşı olan davranışını iyileştirmektedirler.

Sac yüzeylerinin koruyucu katmanlarla kaplanması, rulo halindeki sac malzemelere üretim süreçlerine dahil edilmeden önce uygulanan işlemlerle gerçekleştirilmektedir. Çelik üreticileri tarafından kaplanan bu saclar, ilave yüzey kaplama işlemlerine gerek duyulmayacak şekilde kullanıcıya teslim edilmektedir. Böylece sac malzemeler üretime doğrudan dahil edilebilmektedirler. Çok çeşitli alanlarda kullanılmakla birlikte, kaplı sacların en çok uygulama alanı bulduğu yerlerin başında otomotiv sektörü, dayanıklı tüketim ürünleri ve ev aletleri imalatı gelmektedir.

Kaplı saclar daha ziyade ticari kalite ürünler olarak nitelendirilebilirler. Çelik üreticisi firmaların birbirinden farklı ürünleri bulunmaktadır. Çelik yüzeylerine kullanım amacına ve yerine göre metalik ve metalik olmayan (organik esaslı) kaplamalar uygulanabilmektedir. Metalik kaplamaların en yaygın kullanılanı çinko (Zn) kaplamalardır. Bu kaplamalar sıcak daldırma ile yapılabildiği gibi elektrolitik olarak da uygulanmaktadır. Zn kaplamalar dışında alüminyum, alüminyum + çinko, çinko + demir, alüminyum + silis gibi farklı kaplamalar da uygulanmakta ve ticari olarak çeşitli şekillerde adlandırılmaktadır.

Alaşım elementi olarak çeliğin içinde % 12’ yi aşan miktarda kromun bulunması, çeliği atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, HNO_3 (Nitrik Asit) gibi oksitleyici asitlere karşı da korur, buna karşın yalnız krom içeren çelikler HCl (Hidroklorik Asit) ve H_2SO_4 (Sülfirik Asit) gibi asitlere karşı dayanıklı değildirler. Bu asitler yüzeyi koruyan krom oksit tabakasını ortadan kaldırır ve dolayısı ile çelik korumasız kalır. Günümüz endüstrisinde redükleyici asitlere karşı da iyi bir direnç gösteren, içinde nikel, molibden gibi alaşım elementleri bulunan paslanmaz çelikler üretilmektedir. Bu tür çelikler yapılarında kromun yanısıra yüksek miktarlarda nikel ve molibden içerirler; bu alaşım elementleri çeliklerin mikroyapılarını etkin biçimde değiştirebilir, bu durum paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasına yardımcı olur (Outokumpu, 2004).

Sac metalden imal edilen parçanın şekillendirilebilirliğini etkileyen bir çok faktör

vardır. Bunlar, işlem faktörleri ve malzeme faktörleri olarak iki ana gruba ayrılabilir. İşlem faktörleri ; kalıp - ıstampa geometrisi, pres değişkenleri, sıcaklık ve yağlama gibi faktörleri içererek, genelde saca uygulanacak olan zorlanmanın cinsini saptar. Malzeme faktörleri ise; mekanik özellikler, sac geometrisi, kimyasal ve metalurjik özellikleri kapsayarak, bu zorlanmaya karşı dayanabilecek malzemenin cinsini saptamaktadır. Dolayısıyla, zorlanmanın cinsi veya malzemenin cinsi, hangisi değiştirilecek olursa olsun parçanın şekillendirilebilirliği etkilenecektir.

Sacların mekanik özellikleri, şekillendirilebilirliği etkileyen en önemli faktörlerdir. Malzemenin kimyasal bileşimi, üretim yöntemleri ve üretim safhalarında uygulanan işlemler, sac kalitesindeki mekanik özellik farklılıklarını tayin eden başlıca etkenlerdir. Bu nedenlerden ötürü, çelik sacların birbirlerinden farklılaşmalarının, şekillendirme açısından ele alınıp karşılaştırılmalarına olanak sağlayan şekillendirme karakteristikleri ve malzemenin temel mekanik özellikleri, çeliğin tek eksenli çekme testinden elde edilen mekanik özelliklerinin analizi vasıtasıyla belirlenmektedir. Basit çekme testinden elde edilen mekanik özellikler; akma dayanımı, çekme dayanımı, % uzama (maksimum üniform uzama ve kopma uzaması), elastiklik modülü, pekleşme üsteli, plastik anizotropi katsayısı, gerinim hızına duyarlılık üsteli ve dayanım katsayısından ibarettir. Bu deneylerde sünekliği doğrudan ifade eden uzama değerlerinin artması şekillendirilebilirlikteki artışın en belirgin göstergesidir. Süneklik ile dayanım (özellikle akma dayanımı) ve sertlik genelde ters orantılıdır. Dayanım ve uzamanın yanı sıra, sac malzemelerin pekleşme üsteli (n), gerinim hızına duyarlılığı (m) ve anizotropi katsayısı R, şekillendirilebilirliği artırıcı rol üstlenen diğer mekanik karakteristikler olmaktadır. (Dieter, 1988)

Saclarda germe ile şekillendirilebilirliği yansıtan en önemli mekanik karakteristik, malzemenin pekleşme kapasitesini yansıtan “ n “ değeridir. Bir çekme deneyinde $\sigma = K.\varepsilon^n$ davranışını sergileyen malzemelerde, maksimum yükün meydana geldiği ve kesitte yayılı boyunlanmanın başladığı andaki maksimum üniform gerinim $\varepsilon_u = n$ olmaktadır. Buradan anlaşıldığı üzere, malzemenin pekleşme üstelinin artması ile kesitteki kritik bölgelerde oluşan pekleşmenin derecesi de artmakta ve boyunlanmaya karşı daha yüksek bir direnç meydana gelmektedir. Böylece üniform gerinim alanı da büyümektedir. Gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) ise, özellikle boyun oluştuktan sonra uzamayı artırıcı etkisi önemlidir. (Hosford ve Duncan, 1999)

Anizotropi katsayısı (R), sacların derin çekilebilirliğini ifade eden diğer bir mekanik karakteristiktir. Bu oran daralma gerinimi / incelme gerinimi olarak hesaplanmakta ve sacın

incelmeye karşı direncini göstermektedir. R değeri, belli bir tekstüre sahip sac malzemede anizotropinin kalınlık yönündeki etkisini yansıttığından, “ normal anizotropi büyüklüğü “ olarak da adlandırılmaktadır. Bu oranın derin çekme özelliğini arttırıcı etkisi, artan R değerleri ile akma düzleminin deforme olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek R değerine sahip bir sacdan derin çekilen bir kapta, cidardaki gerilme haline göre dayanım artmakta ve incelme eğilimi azalmaktadır. Flanşta ise dayanım düşmekte ve sacın bu bölgede büzülerek kalıbın içerisine akışı kolaylaşmaktadır.

Sac parçanın kullanımı sırasında, ondan asgari olarak bir dayanım değerine sahip olması beklendiğinden dolayı, isteklerle en iyi şekilde örtüşen uzama değeri ile dayanıma aynı anda sahip çelik sacın seçilmesi gereklidir. Sac malzemenin kimyasal bileşimi ve alaşım elemanlarının oranı, slab üretiminden sıcak ve soğuk haddelemeye kadar üretim proseslerinin koşulları, üretim sırasında sıcaklık değişimleri, tavlama, soğutma şartları, rulo sarma aşamaları ile ürünlerin pres operasyonlarında şekillendirilmesine kadar depolarda bekletilme koşulları ve süreleri, çelik sacların mekanik özelliklerinin değişimlerinin en genel nedenleridir.

Şekillendirme işlemlerinde, malzemenin plastik akışının kolaylaşması, şekillendirilebilirlikteki artışın nedeni olmaktadır. Sacların malzeme özelliklerini tanımak ve hangi şartlar altında nasıl değiştiklerini bilmek, malzeme özelliklerine uygun işlem parametreleri ve tasarımlarla çalışmak, sac şekillendirmede meydana gelen problemleri anlama ve üstesinden gelme adına en doğru yöntemdir.

2. PASLANMAZ ÇELİK ve GALVANİZ KAPLI SACLAR

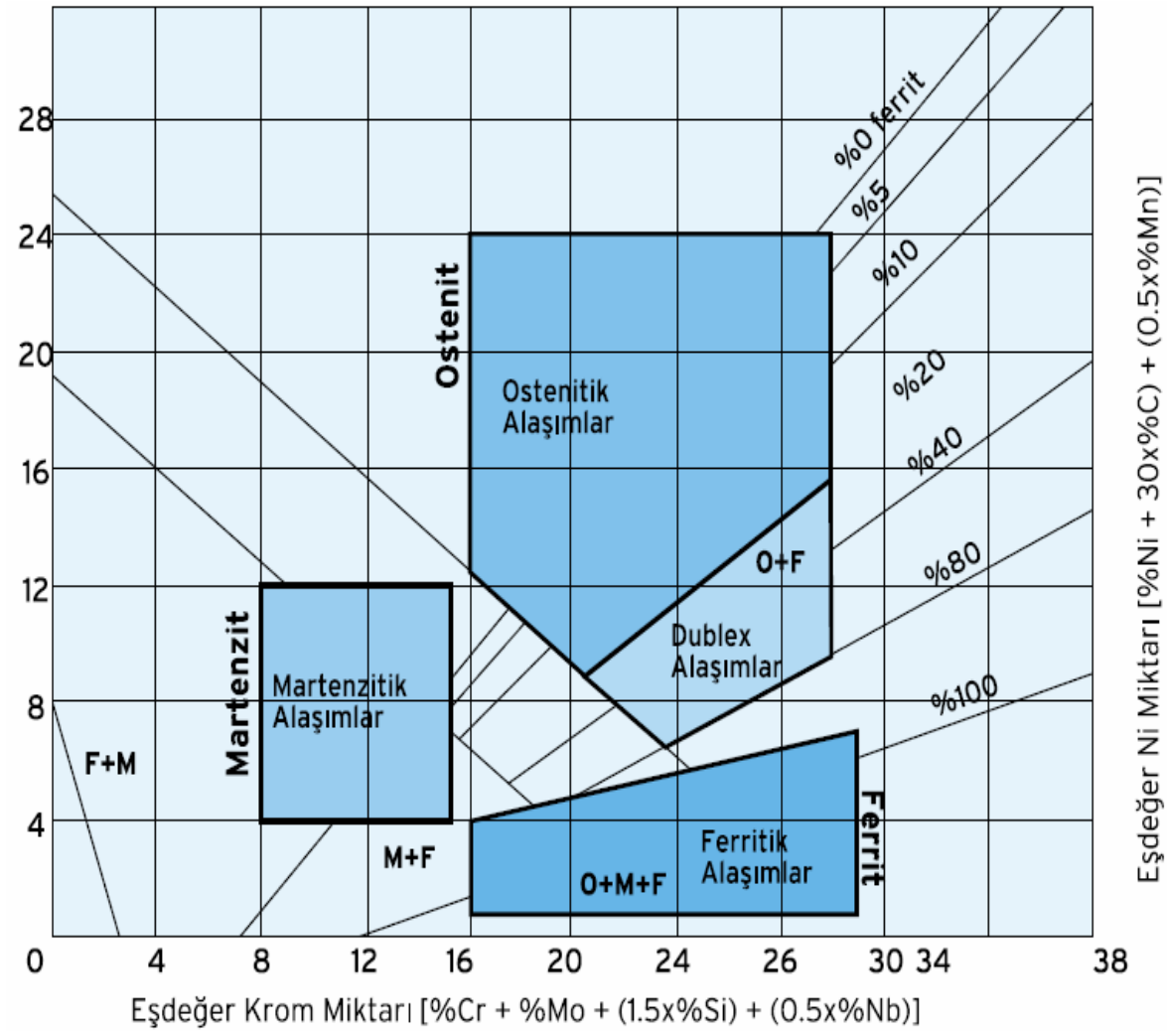
Maksimum % 2,06 karbon içeren demir karbon alaşımları çelik olarak adlandırılır. Çelikler yalın karbonlu olabileceği gibi, çeşitli özelliklerin geliştirilebilmesi için bazı alaşım elementleri de içerebilirler. Normal alaşımsız ve az alaşımlı çelikler korozif etkilere karşı dayanıklı olmadıklarından, bu tür uygulamalar için genellikle paslanmaz çeliklerin kullanılması gerekir. Paslanmaz çelikler bileşimlerinde en az % 11 krom içeren bir çelik ailesidir. Bu çeliklerin yüksek korozyon dayanımını sağlayan unsur; yüzeye kuvvetle tutunmuş, yoğun, sünek, çok ince ve saydam bir oksit tabakasının bulunmasıdır. Çok ince olan bu amorf tabaka sayesinde paslanmaz çelikler kimyasal reaksiyonlara karşı pasif davranarak indirgeyici olmayan ortamlarda korozyona karşı dayanım kazanırlar. Söz konusu oksit tabakası, oksijen bulunan ortamlarda oluşur ve dış etkilerle (aşınma, kesme veya talaşlı imalat vb.) bozulsa dahi kendini onararak eski özelliğine tekrar kavuşur. Paslanmaz çeliklerin diğer çelik saclara göre bir takım üstünlükleri söz konusudur.

Bütün paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı yüksektir. Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı türleri ise asit, alkali çözeltileri ile klorür içeren ortamlara karşı dayanıklıdır. Bu çelikler ayrıca yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilir. Bazı paslanmaz çelik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda bile tufallanma ve malzemenin mekanik dayanımında önemli bir düşme görülmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşmezler ve tokluklarını korurlar. Bunun yanında hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak, soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirilebilirler. Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Bazı türlerde ise ısıl işlemler ile malzemeye çok yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür. Çok farklı yüzey kalitelerinde temin edilebildikleri gibi bu yüzeylerin görünümü, kalitesi ve bakımı kolay olduğundan uzun süreler korunabilir. Kolay temizlenebilir olmaları sebebiyle, hastahane, mutfak, gıda ve ilaç sanayiinde yaygın olarak kullanılırlar. Paslanmaz çelikler dayanıklı ve bakımı kolay malzemeler olduklarından, üretilen parçanın tüm kullanım ömrü dikkate alındığında oldukça ekonomik malzemelerdir.

Paslanmaz çelikler bahsedilen bu özellikleri, yapılarına dahil edilen alaşım elementleri sayesinde kazanmaktadırlar ve kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilir. Krom miktarı yükseltilerek, nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı arttırılabilir.

Bu şekilde makine tasarımcıları ve imalatçıları değişik kullanımlar için en uygun paslanmaz çeliği seçme şansına sahip olurlar. Paslanmaz çeliklerde iç yapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunlardan öncelikle krom ve nikel iç yapının ferritik veya östenitik olmasını belirler.

Schaeffler diyagramı çeşitli paslanmaz kalitelerinin bileşim açısından yerini gösterir. Ferrit stabilizatörleri; ferrit faz alanını genişleten silikon, krom, molibden, vanadyum, niyobyum ve titanyum gibi karbür oluşturan metallerdir. Östenit stabilizatörleri ise; östenit faz alanını genişleten nikel, mangan, karbon ve nitrojen gibi elementlerdir.



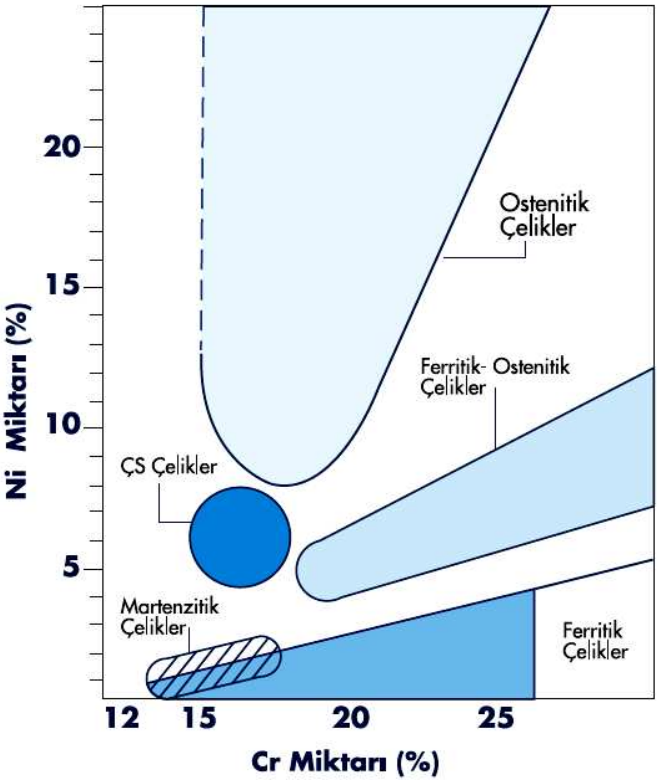
Şekil 2.1. Schaeffler Diyagramı (Temel ve Aran, 2004)

Çizelge 2.1 Bazı paslanmaz çelik kaliteleri ve kimyasal bileşimleri. (Aran, 2005)

ASTM	**EN Malzeme No.**	**Kimsayal Bileşim ağırlıkça % max**									
		C	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**N**	**Diğer**
Ferritik Paslanmaz Çelikler											
409	1.4512	0.08	1.0	1.00	0.045	0.03	10.5-11.75	-	-	-	(6xC)Ti
430	1.4016	0.12	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-18.0	-	-	-	-
430Ti	(1.450)	0.10	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-19.5	0.75	-	-	(5xC)Ti
439	1.4510	0.07	1.0	1.00	0.04	0.03	17.0-19.0	0.5			0.2+4(C+N) Ti
Martenzitik Paslanmaz Çelikler											
410	1.4006	0.15	1.0	1.00	0.04	0.03	11.5-13.0	-	-	-	-
420	1.4021	0.15 min	1.0	1.00	0.04	0.03	12.0-14.0	-	-	-	-
440A	-	0.6-0.75	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-19.5	-	0.75	-	-
440C	1.4125	0.95-1.2	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-18.0	-	0.75	-	-
Dublex Paslanmaz Çelikler											
2205	1.4462	0.03	2.0	1.0	0.03	0.02	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.2	-
329	1.446	0.20	1.0	0.75	0.04	0.03	23.0-28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	-	-
Östenitik Paslanmaz Çelikler											
201	1.4372	0.15	5,5-7,5	1.00	0.06	0.03	16.0-18.0	3.5-5.5	-	0.25	-
301	1.431	0.15	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	6.0-8.0	-	-	-
304	1.4301	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-10.5	-	-	-
304L	1.4306	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	-	-	-
304LN	1.4311	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	-	0.1-0.16	
309	1.4828	0.20	2.00	1.00	0.045	0.03	22.0-24.0	12.0-15.0			
309S	1.4833	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	22.0-24.0	12.0-15.0			
310	1.4841	0.25	2.00	1.50	0.045	0.03	24.0-26.0	19.0-22.0			
310S	1.4845	0.08	2.00	1.50	0.045	0.03	24.0-26.0	19.0-22.0			
316	1.4401	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316L	1.4404	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316LN	1.4406	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	0.1-0.16	
316Ti	1.4571	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	5x(C+N)Ti
321	1.4541	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	17.0-19.0	9.0-12.0	-	-	(5xC)Ti
347	1.4550	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	17.0-19.0	9.0-13.0	-	-	(10xC)Nb
Çökelme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler											
631	1.4568	0.09	1.0	1.0	0.04	0.04	16.0-18.0	6.5-7.5	-	-	0.75-1.5 Al
632	1.4532	0.09	1.0	1.0	0.04	0.03	14.0-16.0	6.5-7.5	2.0-3.0	-	0.75-1.5 Al

2.1. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

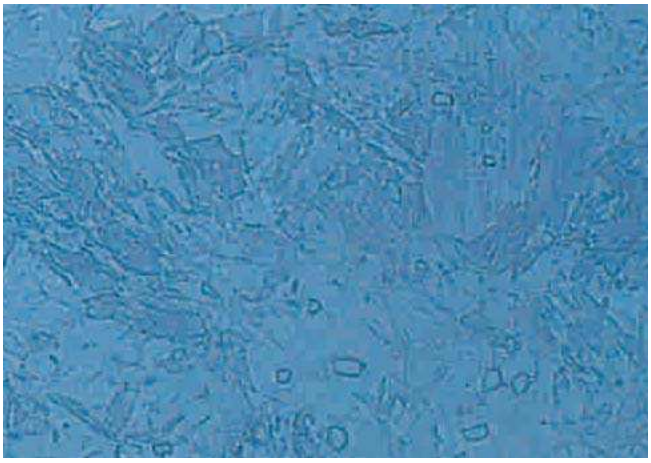
Paslanmaz çelikler genel olarak 5 ana başlıkta toplanabilirler. Sınıflandırılmalarında esas olarak iç yapıları rol oynamaktadır. Buna göre paslanmaz çelikler; martenzitik paslanmaz çelikler, ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çelikler, dubleks (östenitik - ferritik) paslanmaz çelikler ve çökelme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar.



Şekil 2.2 Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları. (Temel ve Aran, 2004)

2.1.1 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Bu çelikler esas olarak % 11,5 – 18 Cr içeren krom çelikleridir. Paslanmaz çeliklerin martenzitik tipleri magnetiktir, özellikle düşük karbonlu olanlar bir zorluk çıkarmadan soğuk işlenebilirler, iyi bir sertliğe sahiptirler, bazı kimyasal maddelere ve havaya karşı iyi korozyon dayanımı gösterirler ve kolayca sıcak işlenirler. 950 – 1050 °C sıcaklıklarda % 0,1 ‘ den daha fazla karbon içeren çeliklerin östenitik yapıya sahip oldukları görülmektedir. Bu sıcaklıklara ulaşmış olan çeliklere aniden su verildiği takdirde, çeliğin iç yapısı değişikliğe uğramakta ve martenzitik bir hal almaktadır. İç yapıları bu şekilde martenzitik bir hal alan paslanmaz çeliklere, martenzitik paslanmaz çelikler denmektedir.



Şekil 2.3 Martenzitik iç yapı (Aran, 2005)

Martenzitik paslanmaz çelikler, genel olarak % 6' dan daha az krom ihtiva ederler, bileşimlerindeki karbon miktarı ise % 0,1 ile % 1,2 arasında değişmektedir. Daha yüksek miktarlarda karbon içeren martenzitik paslanmaz çeliklerle de karşılaşılmaktadır. Bu gibi çeliklerde krom miktarları da % 18' lere kadar çıkabilmektedir.

Martenzitik paslanmaz çelikler 800°C sıcaklıklara kadar paslanmazlık özelliklerini korumaktadırlar. Ancak bu sıcaklık değerlerine çok uzun süre maruz kalırlarsa, metalde korozyon başlangıcı görülebilmektedir. Bu nedenle martenzitik paslanmaz çelikler genellikle 700 °C sıcaklığın üzerindeki uygulamalarda çok fazla tercih edilmemektedirler.

Martenzitik iç yapılar, östenitik halden daha sert ve gevrek yapıda bir karakter göstermektedirler. Arzu edilen iç yapı özelliklerinin elde edilebilmesi için, martenzitik çeliklerin bazı ısıl işlemlere tabi tutulmaları gerekir. (östenitleme, temperleme, su verme) Martenzitik paslanmaz çelikler, orta derecede bir korozyon dayanımı sergilemektedirler. Korozif ortamlarda östenitikler kadar direnç gösterememektedirler. Korozyon dayanımlarını ve tokluğu arttırabilmek için alaşıma nikel ve molibden eklenir. Ancak nikel ve molibden östenit yapıcı elementler olduklarından, su verme işlemi uygulandıktan sonra martenzite dönüşmemiş artık östenitlerin oluşumunu engellemek için, bu alaşım elementlerinin miktarları sınırlı tutulmalıdır. Manyetiklik özellikleri mevcuttur. Kaynak kabiliyetlerinin ise düşük olduğu bilinmektedir.

Aşağıdaki tabloda martenzitik paslanmaz çeliklerin ASTM' ye göre isimlendirilişleri ve içerdikleri karbon ve krom yüzdeleri görülmektedir.

Çizelge 2.2 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

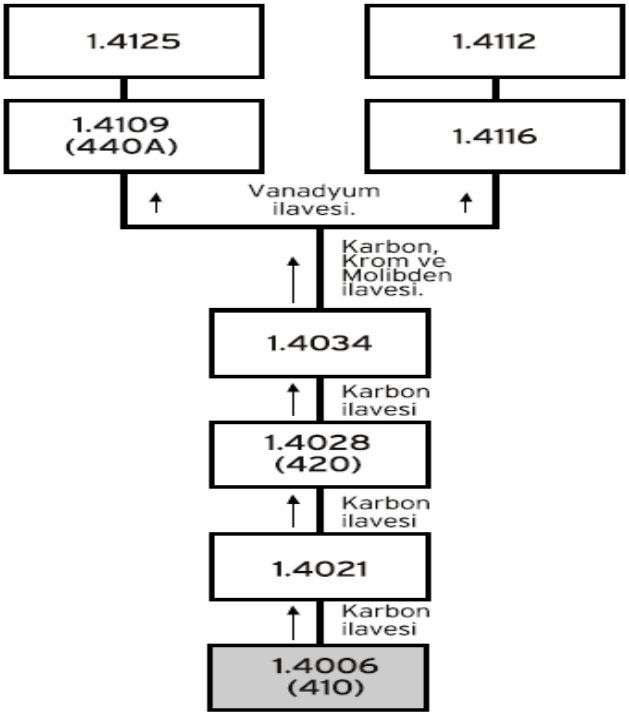
Martenzitik Paslanmaz Çelikler

ASTM	**% C**	**% Cr**	**ASTM**	**% C**	**% Cr**
403	0,15	11,5-13,0	**440A**	0,60-0,75	16,0-18,0
410	0,15	11,5-13,0	**440 B**	0,75-0,95	16,0-18,0
414	0,15	11,5-13,5	**440 C**	0,95-1,20	16,0-18,0
416	0,15	12,0-14,0	**501**	>0,10	4,0-6,0
416Se	0,15	12,0-14,0	**501A**	0,15	6,0-8,0
420	>0,15	12,0-14,0	**501B**	0,15	8,0-10,0
420F	>0,15	12,0-14,0	**502**	0,1	4,0-6,0
422	0,20-0,25	11,0-13,0	**503**	0,15	6,0-8,0
431	0,2	15,0-17,0	**504**	0,15	8,0-10,0

Martenzitik çelikler, yüksek sıcaklıklarda sahip oldukları yüzey merkezli kübik kafese sahip östenitin hızlı soğutma sonucu hacim merkezli tetragonal kafese sahip martenzit yapıya dönüşümü ile elde edilir. Bu çeliklerin iç yapısında tavlanmış halde yumuşak ferritik faz da bulunur. Bu gruptaki çelikler % 16 ile % 18 krom içeren 440A, 440B ve 440C kaliteleri dışında, en çok % 14 krom içerirler. Bunun yanında, % 0,60 ile %1,20 oranında yüksek karbon içeren 440 serisi dışında karbon miktarları düşük veya orta derecedir. Krom ve karbon miktarları martenzit oluşumunu sağlayacak şekilde dengelenir. Temperleme özelliklerini ayarlamak üzere niyobyum, volfram ve vanadyum ilave edilebilir. Tokluğu ve bazı ortamlarda korozyon dayanımını iyileştirmek için ise az miktarda nikel eklenir.

İstenen iç yapı ve özellikleri elde etmek için martenzitik çeliklerin alaşım çeliklerine benzer biçimde ısıl işleme (yani östenitleme, su verme ve temperleme) tabi tutulmaları gerekir. Östenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950 - 1050 °C arasındadır. Bu sıcaklıkta çeliğe su verilirse martenzitik bir iç yapı elde edilir. Su verme ve temperleme sonrası mekanik özellikler temelde karbon miktarına bağlıdır.

Elde edilen sertlik ve mukavemet, karbon yüzdesi ile birlikte artar. Bileşimindeki krom miktari % 16 ve karbon miktarı % 0,6 - % 1,1 olan çelikler 60 HRC sertlik ve 1900 MPa akma dayanımı gösterebilirler. Bu çeliklerin sertliğinin yüksek oluşu, aşınma dayanımını da iyileştirebilir. % 1,1 karbon içeren 440C kalitesi mükemmel aşınma dayanımı gösterirken, % 0,1 karbon içeren 410 kalitenin aşınma dayanımı düşüktür.



Şekil 2.4 Martenzitik Paslanmaz Çelikler (Temel ve Aran, 2004)

Korozyon dayanımını ve tokluğunu arttırmak için alaşıma molibden ve nikel eklenir. Nikel içeren martenzitik çeliklerde karbonun görevini nikel üstlenir. Bu şekilde karbonun bazı olumsuz etkileri (karbür çökeltileri, aşırı sertlik gibi) ortadan kaldırılabilir. Nikel aynı zamanda yüksek miktarda kromun etkisini dengeleyerek iç yapıyı serbest ferritlerden korur. Ayrıca sertleşme kabiliyeti ve su verme derinliği arttığından, iri parçalara da ıslah işlemleri uygulanabilir. Molibden ve nikel ilavesi, su verme sonrasında martenzite dönüşmemiş artık östenitlerin oluşmasını önlemek için sınırlı tutulmak zorundadır. Bu nedenle korozyon dayanımı ancak orta düzeyde kalır.

Martenzitik çelikler yüksek çekme, sürünme ve yorulma dayanımı gerektiren, orta derecede korozif ve en çok 650 °C'a kadar sıcaklıktaki uygulamalarda tercih edilirler. Örnek olarak düşük ve orta miktarda karbon içeren 410 kalite çelik ve türevleri, buhar ve gaz türbinlerinde ve jet motorlannda kullanılır. 420 ve benzeri alaşımlar bıçak ve diğer kesici aletlerde, vana parçalarında, dişli, rulman ve millerde tercih edilir. Martenzitik çelikler petrol ve petrokimya makina teçhizatında da kullanılır. 420 kaliteye ek olarak, 440 ve benzeri alaşımlar cerrahi ve dişçilik aletlerinin, makas, yay, kam ve rulman bilyalarının en çok tercih edilen malzemeleridir.

Ürün tipine bağlı olarak martenzitik çelikler tavlanmış veya ıslah edilmiş durumda pazara sunulur. Tavlanmış olarak alınan ürünler şekil verildikten sonra ıslah işlemine (su verme + temperleme) tabii tutulur. Temperleme sıcaklığı değiştirilerek çeşitli özellik

kombinasyonları elde edilir. En iyi korozyon dayanımını elde etmek için tavsiye edilen ısıl işlem sıcaklıklarına tam olarak uyulması çok önemlidir.

2.1.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çeliklerin bileşimlerinde % 16 ile % 30 arasında değişen miktarda krom bulunmaktadır. İç yapıdaki karbon miktarı ise % 0,05 ile % 0,25 arasında değişmektedir. Bu tip çelikler oda sıcaklığında ferritik bir iç yapıya sahip olan çeliklerdir ve ferrit-östenit dönüşümü göstermezler. Sahip olduklan iç yapıdan kaynaklanan mekanik özellikleri ise ısıl işlemler uygulayarak değiştirmek mümkün değildir. Katı halde herhangi bir faz dönüşmesi meydana gelmediğinden su verme yolu ile sertleştirilememektedirler. Sertleştirilmeleri ancak soğuk şekillendirme ile mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla iyi bir dayanım elde etmek için tane büyüklükleri ile oynanmalıdır. İstenen dayanım özellikleri ince taneli bir iç yapı ile mümkün olabilmektedir. Ancak bu sertleştirme işlemi, aynı zamanda çeliğin şekillendirilebilirliğini olumsuz yönde etkilediğinden, kullanım alanları sınırlanmaktadır.

Ferritik çelikler hem oda sıcaklığında hem de daha yüksek sıcaklıklarda demir elementinin sahip olduğu hacim merkezli kübik kristal yapısına sahiptirler ve östenit ferrit dönüşümü göstermezler. Dolayısıyla iç yapılarını ve mekanik özelliklerini ısıl işlemlerle etkilemek mümkün değildir. Tavlanmış halde akma gerilmeleri 275 ile 350 MPa arasındadır. Düşük toklukları ve gevrekleşme hassasiyetleri nedeniyle, makina parçası olarak kullanımları özellikle kaynaklı montajlar ve kalın kesitler için sınırlıdır.

Atmosferik korozyona ve oksidasyona karşı olan dayanımları ise önemli avantajlarıdır. Ferritik çelikler manyetiktirler ve ısıl işlemlerle mekanik özellikleri değiştirilemediğinden iyi bir dayanıma sahip olmaları için ince taneli bir iç yapı şarttır. Ferritik çelikler % 10,5 ile 30 arasında krom ve az miktarda karbon, azot ve nikel gibi östenit yapıcı elementler ihtiva ederler. Kuvvetli östenit yapıcı olan karbon belirli bir miktara ulaşınca kromun ferrit yapıcı etkisi ortadan kalkar, dolayısıyla perlitik veya martenzitik paslanmaz çelikler ortaya çıkar. Öte yandan karbon yüzdesi arttırıldığı durumlarda ferritik iç yapı isteniyorsa, krom yüzdesinin de arttırılması gerekir. Ferritik çeliklerin kullanım yerleri tamamen krom miktarına bağlıdır. Bu bakımdan, başlıca üç ana gruba ayrılabilir:

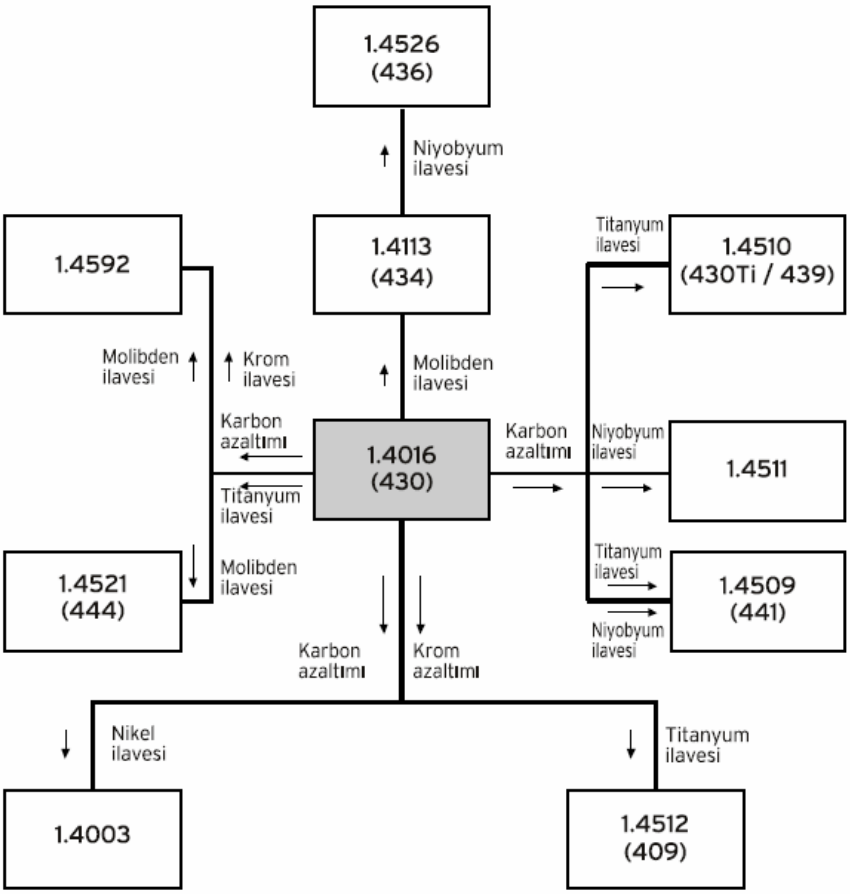
- Krom miktarı % 11 – 13 arasında olanlar (405 ve 409 kaliteleri)

- Krom miktarı yaklaşık % 17 olanlar (430 ve 434 kaliteleri)

- Yüksek kromlular % 19 – 30 (süperferritikler 442 ve 446 kaliteleri)

Krom oranı düşük olan birinci grup orta derecede korozyon ve oksidasyon dayanımı yanında düşük fiyat ve iyi imalat özelliklerine sahiptir. Otomotiv ve egzoz parçalarında tercih edilen bu grup içinde en çok kullanılanı 409 kalitedir. Orta derecede krom içeren ve otomotiv sac parçaları ve mutfak gereçleri yapımında kullanılan ikinci grup, düşük tokluk ve düşük kaynak kabiliyeti ile göze çarpar. Yüksek kromlu üçüncü grup ise süperferritikler diye adlandırılır ve yüksek korozyon ve oksidasyon dayanımı gereken yerlerde tercih edilirler. Genellikle düşük karbon ve azot içeren bu alaşımlarda, gevrekleşme hassasiyetini azaltmak ve kaynaklı konstrüksiyon dayanımını arttırmak amacıyla titanyum ve niyobyum gibi stabilizatör elementler katılır. Ayrıca aluminyum ve molibden de içerirler. Süperferritikler yerel korozyon söz konusu olduğunda (örneğin suda çözünmüş klorüre karşı) östenitik çeliklere kıyasla çok daha iyi bir dayanım gösterirler. Bundan dolayı buhar kazanları, ısı değiştiricileri, klorür taşıyan boru hatları ve deniz suyu uygulamalarında tercih edilirler.

Ferritik çelikler hacim merkezli kübik bir kafes yapısına sahip olduklarından, düşük sıcaklıklarda gevrek davranış gösterirler. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda tutma süresine de bağlı olarak aşağıda açıklanan üç gevrekleşme olayı görülebilir:



Şekil 2.5 Ferritik Paslanmaz Çelikler (Temel ve Aran, 2004)

400 – 455 °C arasında uzun süre kalmış veya yüksek sıcaklıktan yavaş soğutulmuş % 15’ ten fazla krom içeren paslanmaz çeliklerde çökelmelerin yol açtığı 475 °C gevrekleşmesi görülür. Bunu gidermek için gevrekleşmiş çelik 650 – 750 °C arasındaki bir sıcaklığa ısıtılıp hızla soğutulursa bu etki giderilmiş olur.

Çelikler 600-800 °C arasında uzun süre tutulursa yüksek kromlu ferritik ve bazı östenitik çeliklerde sigma ara fazı oluşabilir. Soğuk şekil verme bu dönüşümü kolaylaştırır. Sigma fazı 950 °C üzerinde yapılacak bir tavlama ve bunu izleyen su verme ile yok edilebilir.

950 °C’ nin üzerinde tane irileşmesi görülür ve tane sınırlarında krom karbür çökeltileri ortaya çıkar. Titanyum veya tantal / niyobyum gibi stabilizatörlerin katılmasıyla tane irileşmesi ile karbür oluşumu engellenebilir.

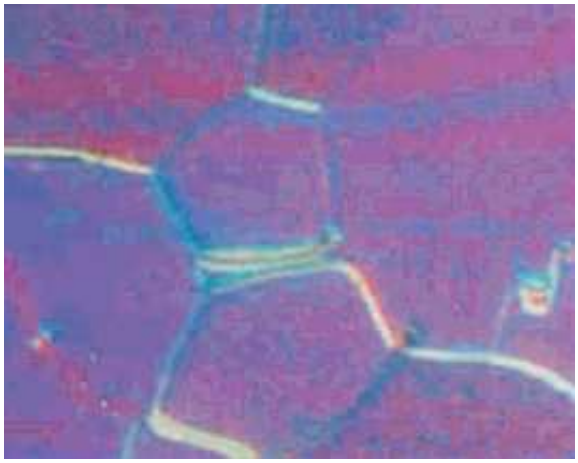
Öte yandan stabilize edilmemiş çeliklerin özellikle kaynak bağlantılarında 700 – 800 °C arasında yapılacak bir tavlama, krom karbürleri küreleştirdiği gibi olası martenzit fazını da temperleyerek tokluğun daha da düşmesini önler. Ayrıca tane sınırları yakınındaki krom dağılımı yayınma ile bir miktar düzgünleştirilir, pasiflik sınırına (% 11) yeniden ulaşılmış olur. Bu nedenlerle ferritik çeliklerde kaynak bağlantıları, östenitik çeliklerden daha sorunlu olup, şu tedbirlerin alınması gerekir.

- Başlangıç tokluğunu arttırmak üzere 150-200 °C arasında ön ısıtma ve kaynak sonrası 700-800 °C sıcaklık aralığında uygulanacak bir tavlama yapılmalıdır.

- Tane irileşmesini ve karbür çökelmesini önlemek için kaynak işleminde ısı girdisi düşük tutulmalıdır.

Ferritik paslanmaz çeliklerin, gevrekleşmeye olan eğilimleri nedeni ile makina parçası olarak kullanımları kısıtlanmaktadır. Sahip oldukları yüksek korozif dayanım özellikleri ise en büyük avantajlarındandır. İç yapılarında bulunan karbon, östenit yapıcı niteliktedir. Dolayısıyla, karbon miktarı belli bir değere ulaştığında, yapıdaki diğer bir element olan kromun ferrit yapıcı özelliği ortadan kalkmaktadır. Böyle bir durumda, mevcut yapının ferritik olması isteniyorsa, karbon miktarı arttırılırken aynı zamanda krom miktarı da arttırılmalıdır.

Ferritik paslanmaz çeliklerde, iki önemli problemle karşılaşılabilmektedir. Bunlardan birincisi, sigma (σ) ara fazı oluşumudur. Bu tip çelikler ve aynı zamanda bazı östenitik çelikler, 400 ile 800 °C arasında uzunca bir süre tutulurlarsa sigma ara fazı ortaya çıkmaktadır. Bu durum 950 °C üzeri sıcaklıklara çıkılarak yapılan bir tavlama ve hemen ardından beklenmeden gerçekleştirilecek olan bir su verme işlemi ile önlenebilmektedir.



Şekil 2.6 Ferritik İç Yapı (Aran, 2005)

Bir diğer problem ise tane irileşmesidir. 950 ile 1150 °C sıcaklık aralıklarına kadar malzeme ısıtılırsa, malzemenin iç yapısında aşırı bir tane büyümesi görülmektedir. Bu tip çeliklerde östenit - ferrit dönüşümü de gerçekleşemediğinden, bir ısıl işlem yardımı ile taneleri küçültmek mümkün olmamaktadır. Azot, titanyum ya da niyobyum gibi elementlerin alaşım yapısına dahil edilmesi ile tane irileşmesi oluşumlarının engellenebildiği görülmektedir.

Aşağıdaki tabloda ferritik paslanmaz çeliklerin ASTM' ye göre isimlendirilişleri ve içerdikleri karbon ve krom yüzdeleri görülmektedir.

Çizelge 2.3 Ferritik Paslanmaz Çeliklerin C – Cr Oranları

Ferritik Paslanmaz Çelikler

ASTM	**% C**	**% Cr**	**ASTM**	**% C**	**% Cr**
405	0,08	11,5-14,5	**430FSe**	0,12	16,0-18,0
409	0,08	10,5-11,75	**434**	0,12	16,0-18,0
429	0,12	14,0-16,0	**436**	0,12	16,0-18,0
430	0,12	16,0-18,0	**442**	0,2	18,0-23,0
430 F	0,12	16,0-18,0	**446**	0,2	23,0-27,0

Bu paslanmaz çelikler magnetiktir ve soğuk veya sıcak işlenebilir, fakat maksimum yumuşaklık, kolay biçim verilebilme ve korozyon direnci tavlama durumunda iyileşir. Tavlanmış durumda bu çeliklerin gücü, karbon çeliklerinkinden yaklaşık % 50 daha yüksektir, korozyon direnci ve işlenebilirliği martenzitik paslanmaz çeliklerden daha üstündür. Ferritik çelikler kolaylıkla soğuk şekillendirilebilmelerinden ötürü, büyük oranda kimya ve yiyecek endüstrisindeki kaplar gibi derin çekilmiş parçalarda, dekoratif

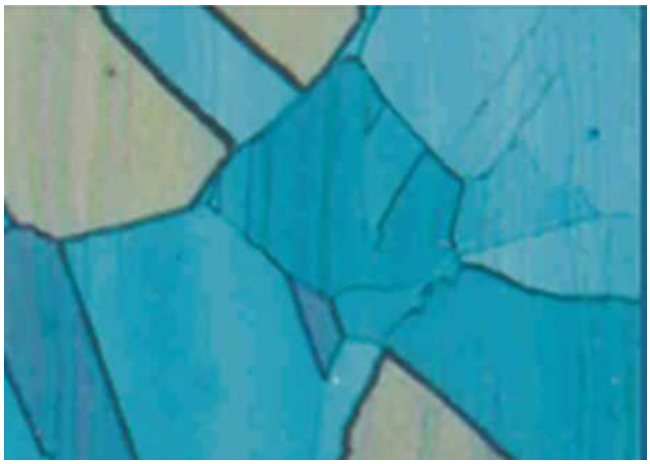
uygulamalarda, otomobil şasi parçaları, egzos elemanları ve sıcak su tankları gibi parçalarda kullanılır.

2.1.3 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Gerek kullanım, gerekse alaşım kalitelerinin çokluğu açısından en zengin grup östenitik çeliklerdir. Manyetik olmayan bu çelikler hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezle kübik kafese sahip östenitik iç yapılarını koruduklarından, normalleştirme ve sertleştirme ısıl işlemi yapılamaz. Tavlanmış halde süneklikleri, toklukları ve şekillendirilebilme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Mukavemetleri ancak soğuk şekillendirme ile arttırılabilir. Östenitik paslanmaz çelikler genellikle % 16 ile % 26 krom, % 35'e kadar nikel ve % 20' ye kadar mangan içerirler. Nikel ve mangan temel östenit oluşturuculardır.

Östenitik paslanmaz çeliklerin bileşiminde % 12 ile % 25 arasında değişen miktarlarda krom ve % 8 ile % 25 arasında değişen miktarlarda da nikel bulunmaktadır. Bilindiği üzere nikel kuvvetli bir östenit yapıcıdır. Bileşimdeki nikel sayesinde katılaşma esnasında ortaya çıkan östenit, oda sıcaklığından daha düşük sıcaklık değerlerinde dahi dönüşmeden kalmaktadır. Soğuma esnasında östenit - ferrit dönüşümü gerçekleşmediğinden, su verme yolu ile sertleştirilememektedirler.

Östenitik paslanmaz çelikler manyetik değillerdir. Sünek ve tok bir yapıya sahiptirler. Mukavemetleri, genellikle soğuk şekillendirme uygulanarak arttırılabilmektedir. Bir diğer yöntem ise metale alaşımlandırma yapmaktır. Bu açıdan karbon ve azot en etkili elementlerdir.



Şekil 2.7 Östenitik iç yapı (Aran, 2005)

Östenitik paslanmaz çeliklerde iki tür problemle karşılaşılabilmektedir. Bunlardan birincisi delta (δ) ferrit fazının oluşmasıdır. Bu tip çelikler sıvı halden itibaren katılaşmaya bırakıldıklarında, iç yapıda östenit ve ferrit taneleri oluşmaktadır. Ancak bu ferrit, östenit dönüşümü sonucu oluşan ferritten farklıdır. Bu yapı, östenit taneleri arasında serpiştirilmiş ferrit taneciklerinden oluşmaktadır ki, bu da metal malzemeyi sıcak dövme ve haddeleme için uygun olmayan bir hale sokmaktadır. Sonuç olarak, imalat esnasında malzemede çatlak oluşumuyla karşılaşılmaktadır. Bu tip bir problemi engellemek için malzeme ya çok yavaş soğutulmalıdır ya da uzun bir süre 1100 °C mertebelerindeki sıcaklıklarda tavlandıktan sonra hızlı bir biçimde soğutulmalıdır. Ayrıca yapıya nikel ilavesi de ferrit oluşumunu önlemeye yardımcı olacaktır.

2XX serisinde, en çok % 7 nikel, % 5 ile % 20 arasında mangan bulunur ve azotun östenit içinde çözünürlüğü sayesinde dayanım arttırılabilir. Katı çözeltide bulunan kristal kusurların içine yerleşen azot, östenit iç yapının mukavemetini arttırır.

3XX serisi ise daha fazla nikel ve en çok % 2 mangan içerir. 301 ve 304 kaliteleri en az alaşımlı olan türlerdir ve 3XX serisinin temel alaşımları olarak kabul edilirler. Mükemmel şekillendirilebilirliği, sünekliği ve yeterli korozyon dayanımı ile 304 kalite östenitik çelik en yaygın olarak kullanılan paslanmaz çeliktir. Tavlanmış, 3XX serisi çeliklerin akma dayanımı 200 - 275 MPa arasında iken yüksek azotlu 2XX serisinde akma dayanımı 500 MPa değerine kadar yükselir. Bu çeliklerde korozyonu önlemek için gerekli olan kromun ferrit yapıcı etkisi, östenit yapıcı alaşım elementleri katılarak giderilir. 304 kalite çeliklere molibden katılarak 316 ve 317 kaliteleri üretilir ve klorürlü ortamda noktasal korozyona dayanım sağlanır. 309 ve 310 kaliteleri gibi yüksek kromlu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda ve oksitleyici ortamlarda kullanılır. Yüksek oranda nikelli alaşımlar ise indirgeyici asidik ortamlarda tercih edilirler. Ancak bu amaçla, kuvvetli bir östenit yapıcı olmasına karşın karbon miktarı arttırılamaz, çünkü bu element karbür oluşturarak korozyon dayanımını zayıflatır. Bunun yerine aynı zamanda oksitleyici ve indirgeyici asitlere de dayanıklı olan nikelden yararlanılır. Yüksek oranda nikel ve yaklaşık % 6 azot içeren alaşımlara süperöstenitikler de denir. 321 ve 347 kalitelerde karbonu stabilize etmek ve dolayısıyla yüksek sıcaklıkta tanelerarası korozyonu önlemek amacıyla titanyum ve niyobyum eklenir. " L " ve " S " uzantılı alaşımlarda (304L, 309S gibi) tanelerarası korozyonu önlemek için karbon oranını düşük tutma yoluna gidilmiştir. Östenitik paslanmaz çeliklerde mukavemeti arttırmak için genellikle soğuk şekillendirmeden yararlanılır. Bu çeliklerde pekleşme, ferritiklerden daha fazladır. Bu arada şekil değiştirme martenziti de oluşabilir ve malzeme manyetiklik kazanır. Mukavemeti arttırmak için bir diğer yol da alaşımlama yapmaktır. Bu açıdan karbon ve azot en etkili elementlerdir. Kükürtsüz olan

korozif ortamlarda östenitik çelikler, ferritiklerden daha iyi sonuç verirler. Molibden katılması ile organik ve çeşitli mineral asitlere karşı dayanımları artar. Tam östenitik çelikler ısıya ve asitlere dayanıklı, yüksek sıcaklık özellikleri iyi olan malzemelerdir. Ancak sıcak yırtılma eğilimi gösterirler.

Östenitik çelikler sünek ve toktur, ayrıca ısı etkisiyle sertleşmediklerinden, kaynak bağlantıları için uygundur, ancak ısınan ve soğuyan bölgede karbür çökelmesi oluşmaması için stabilize edilmiş türleri seçilmelidir. Öte yandan ısı iletimleri düşük, genleşmeleri yüksek olduğundan kaynakta çarpılmayı önlemek için ısı girdisi düşük tutulmalıdır. Östenit fazı içeren çeliklerde en büyük sorun, krom karbür çökelmesidir. Krom ve karbon 1100 °C sıcaklıkta östenit içerisinde çözülmektedirler ve bu sıcaklıktan hızla soğutulurlar. Bu çözülme sonucu, krom ve karbonun çökelme tehlikesi ortadan kalkmaktadır. Oda sıcaklıklarında da karbonun difüzyon hızı çok düşük olduğundan çalışma esnasında çökelme meydana gelmemektedir.

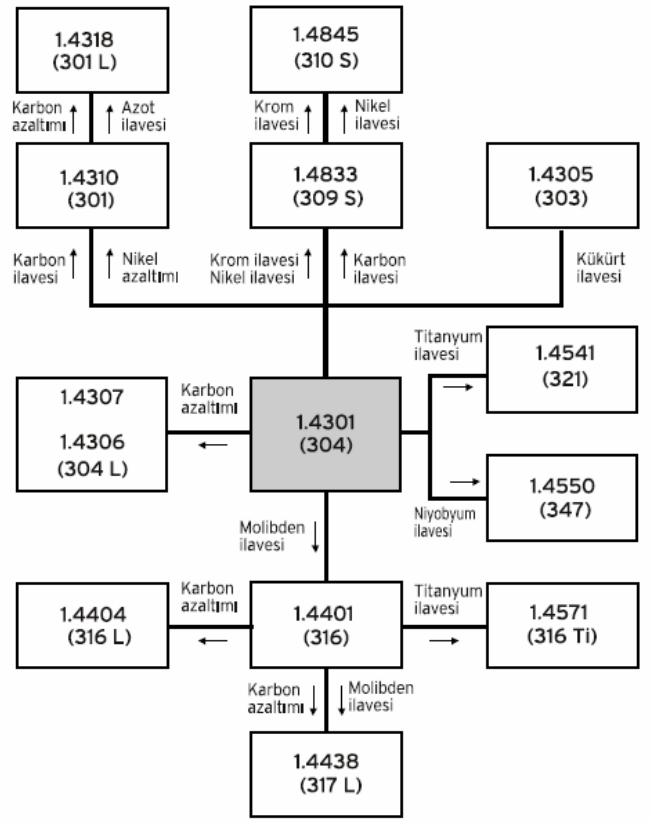
Çizelge 2.4 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin C – Cr Oranları

Östenitik Paslanmaz Çelikler

ASTM	**% C**	**% Cr**	**ASTM**	**% C**	**% Cr**
201	0,15	16,0-18,0	**310S**	0,08	24,0-26,0
202	0,15	17,0-19,0	**314**	0,25	23,0-26,0
205	0,12-0,25	16,5-18,0	**316**	0,08	16,0-18,0
301	0,15	16,0-18,0	**316F**	0,08	16,0-18,0
302	0,15	17,0-19,0	**316H**	0,04-0,10	16,0-18,0
302 B	0,15	17,0-19,0	**316L**	0,03	16,0-18,0
303	0,15	17,0-19,0	**316LN**	0,03	16,0-18,0
303 Se	0,15	17,0-19,0	**316N**	0,08	16,0-18,0
304	0,08	18,0-20,0	**317**	0,08	18,0-20,0
304 H	0,04-0,10	18,0-20,0	**317L**	0,03	18,0-20,0
304 L	0,03	18,0-20,0	**321**	0,08	17,0-19,0
304 LN	0,03	18,0-20,0	**321 H**	0,04-0,10	17,0-19,0
S30430	0,08	17,0-19,0	**329**	0,1	25,0-30,0
304 N	0,08	18,0-20,0	**330**	0,08	17,0-20,0
305	0,12	17,0-19,0	**347**	0,08	17,0-19,0
308	0,08	19,0-21,0	**347 H**	0,04-0,10	17,0-19,0
309	0,2	22,0-24,0	**348**	0,08	17,0-19,0
309 S	0,08	22,0-24,0	**348 H**	0,04-0,10	17,0-19,0
310	0,25	24,0-26,0	**384**	0,08	15,0-17,0

Kritik sıcaklıklar olarak nitelenen 400 ile 850 °C arasında yüksek enerjili tane sınırları boyunca ayrışarak yan yana dizilen kromca zengin karbürler, malzemenin korozif ortamlarda bulunması halinde tanelerarası korozyona ve tane ayrılmasına yol açarlar. Bunun nedeni karbür bünyesine geçen krom nedeniyle, katı çözeltideki krom miktarının korozyona dayanıklılık sınırının (< % 12) altına düşmesidir.

Bu durumu engellemek için çeliğe stabilizatörler ilave edilmektedir. Karbonun kroma karşı ilgisinden daha yüksek bir ilgiye sahip bir elementin, çeliğin bileşimine katılması ile stabilizasyon gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda, bileşimdeki karbon ile bu yeni element bileşik oluştururlar ve dolayısıyla iç yapıda meydana gelen krom azalması görülmez. Karbona ilgileri kromunkinden daha fazla olan elementler titanyum, tantal ve niyobyumdur. Bunların ilavesi sonucunda oluşan karbürler, tane sınırları boyunca yer almamakta, östenit taneleri içinde ince zerrecikler halinde dağılmış olarak bulunmaktadırlar. Bu dağılımın, çeliğin mekanik davranışlarında bir değişiklik meydana getirmediği görülmektedir. ELC (extra low carbon - çok düşük karbonlu) çelikler kullanılabilir. Östenitik çeliklerde 650 °C sıcaklıkta çözünebilen karbon miktarı yaklaşık % 0.05' tir. Karbon miktarı bu değerden az olursa çözünen karbon, karbür oluşturamaz. Çözme tavı uygulanabilir. 1050-1150 °C arasında tavlayarak çökelmiş karbürler çözündürülür. Hızlı soğutularak yeniden çökelme önlenir.



Şekil 2.8 Östenitik paslanmaz çelikler (Temel ve Aran, 2004)

Östenitik paslanmaz çelikler iç yapılarına göre stabl veya metastabl östenitik paslanmaz çelikler olarak iki grupta incelenirler. Metastabl östenitik paslanmaz çelikler soğuk şekillendirme sonucu iğnemsi veya martenzitik türde bir iç yapı gösterirler. Stabl östenitik paslanmaz çelikler ise oldukça yüksek derecede soğuk şekil değiştirme sonucunda bile östenitik iç yapılarını korurlar. Bu iki tür arasındaki belirgin fark, gayet açık bir biçimde bunların çekme diyagramlarından görülebilir. Stabl östenitik paslanmaz çeliklere örnek olan AISI 304 çeliği normal gerilme – genlenme diyagramında bir östenitik davranış gösterir. Çekme eğrisinin parabolik değişimi gerilme uygulandıkça şekil değiştirme sertleşmesinin devam ettiğinin işaretidir. Buna karşın, AISI 301 östenitik paslanmaz çeliği metastabl östenitik paslanmaz çeliklere güzel bir örnek olmaktadır. Yaklaşık olarak % 10 – 15’ lik bir yüzde uzamadan sonra şekil değiştirme sertleşmesi hızlanan bir şekilde kendini belli eder. Metastabl östenitik paslanmaz çeliklerde şekil değiştirme sertleşmesinde görülen bu artış doğrudan östenitin dengesizliğinin bir göstergesidir. Burada plastik şekil değiştirme sonucu martenzit oluşmaya başlamıştır.

Toplam paslanmaz çelik üretimi içinde östenitik çeliklerin payı % 70’ tir ve aralarında en çok kullanılan 304 kalitedir.

Manyetik olmayan bu çeliklere, östenitik iç yapıları dönüşüm göstermediği için normalleştirme veya sertleştirme ısıl işlemleri uygulanmaz, mekanik dayanımları ancak soğuk şekillendirme ile arttırılabilir.

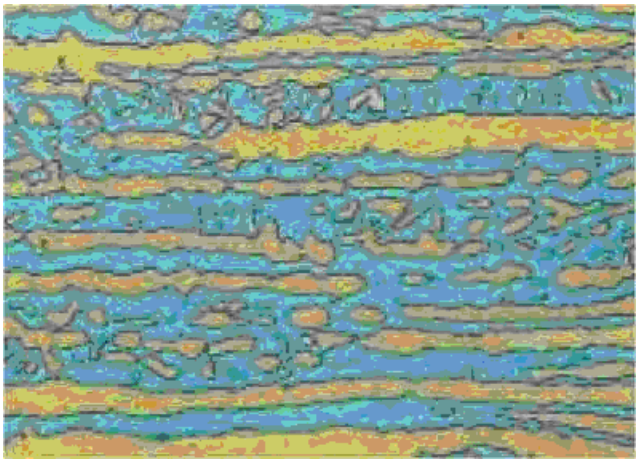
Östenitik paslanmaz çelikler mükemmel korozyon dayanımı ve kaynak edilebilme kabiliyetine sahiptirler. Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilirler ve yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir. Dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilir.

Şekil değiştirme sırasında oluşarak östenitik paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerini etkileyen martenzitik oluşumunun çeliğin kimyasal bileşimine ve özellikle şekil değiştirmenin yapıldığı sıcaklığa bağlı olduğu birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda bu çeliklerdeki martenzitik oluşumunun yalın karbonlu çeliklerdekine benzer olması ilginçtir. Çeliğin kimyasal bileşimindeki elementlerin etkileri de araştırıldığında bunların martenzitik dönüşüm sıcaklığını düşürdükleri dolayısı ile de östenitin stabilitesini arttırdıkları görülmüştür.

2.1.4 Dubleks (Östenitik – Ferritik) Paslanmaz Çelikler

Bu tip paslanmaz çeliklerin yapısında, östenit ve ferrit fazı birlikte bulunmaktadır. Böylelikle her iki tip paslanmaz çeliğe göre, özellikleri iyileştirilmiş yeni bir paslanmaz çelik türü elde edilmektedir.

Dubleks paslanmaz çelikler, genellikle bileşimleri % 50 östenit ve % 50 ferritik faz olacak şekilde üretilmeye çalışılan çelik türleridir. Ancak günlük uygulamalarda bu oranların % 40 ile % 60 arasında değiştiği görülmektedir. Nikel ve molibden temel alaşım elementlerini oluşturmaktadır. Yapıdaki krom miktarı % 18 ile % 28 arasında değişmektedir. Nikel miktarı % 8’ i geçmezken, molibden miktarı da en fazla % 5 olmaktadır.

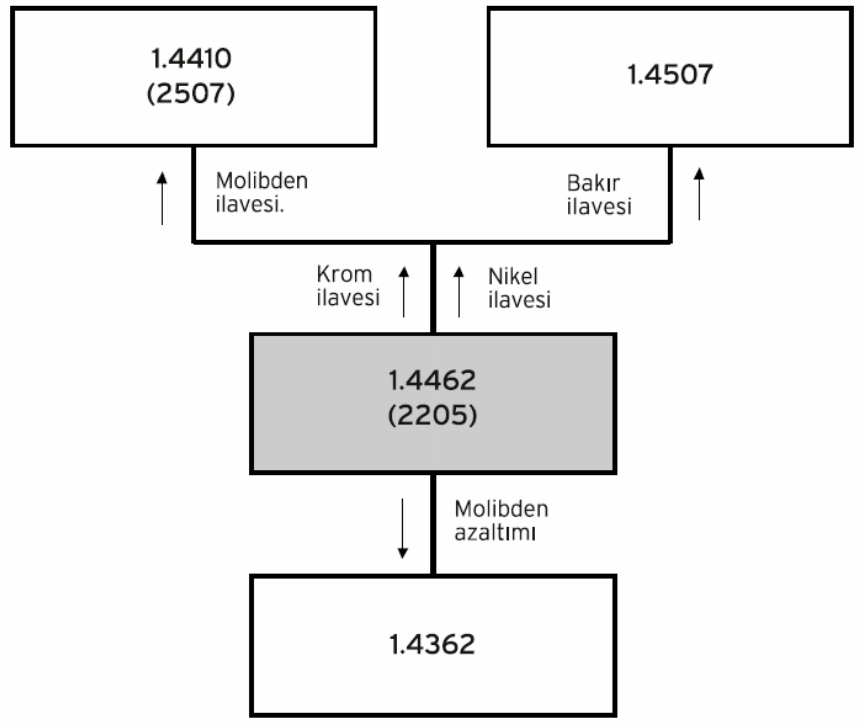


Şekil 2.9 Dubleks iç yapı (Aran, 2005)

Dubleks paslanmaz çelikler, östenitiklere oranla daha iyi gerilme korozyonu dayanımına sahiptir. Bu çelikler, ferritik olanlarla kıyaslandığında ise tokluk ve sünekliklerinin daha iyi olduğu görülmektedir. Östenitik ve ferritik fazların aynı anda tek bir yapıda olması sonucu da, dubleks paslanmaz çeliklerin akma dayanımlarının diğer tek fazların bulunduğu çeliklerinkinden yaklaşık iki kat fazla oldukları görülmektedir. Dubleks paslanmaz çelikler, içerdikleri ferritik fazın manyetiklik özelliğini de kazanmış bulunmaktadırlar.

Dubleks paslanmaz çeliklerin, optimum özelliklerin elde edilmesi gibi avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Bu tip çeliklerin akma ve çekme dayanım değerleri oldukça yüksek olduğundan, haddeleme ve bükme işlemlerinde problemlerle karşılaşılabilmektedir. Şekil verilen parçalar, bahsedilen bu yüksek değerlerden ötürü, geri yaylanma eğilimindedirler. Kimi zaman parçaların yeniden şekillendirilmesi gerekmektedir.

Gerilmeli korozyona karşı yüksek dayanıklılığa sahiptirler. Klor iyonunun bulunmadığı ortamlarda daha yüksek korozif dayanım gösterirler. Östenitik ve ferritik çeliklerden daha yüksek mekanik dayanım sağlarlar. İyi kaynak edilebilirlik ve şekil alma kabiliyeti vardır. Deniz ve tuzlu su ortamında, özellikle orta sıcaklıklarda, ısı değiştiricilerinde, petrokimya tesislerinde sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 2.10 : Dubleks paslanmaz çelikler (Temel ve Aran, 2004)

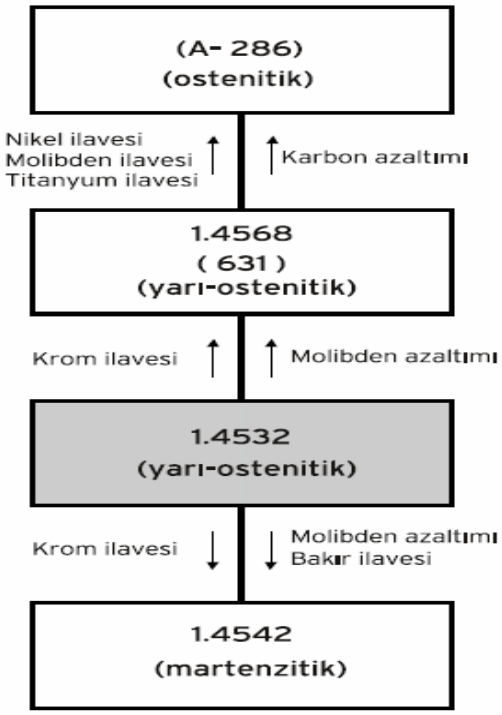
2.1.5 Çökelme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler

Bu tip paslanmaz çelikler, yaşlandırma işlemi uygulanabilen çelikler olarak bilinmektedirler. İç yapıları incelendiğinde, östenitik, martenzitik ya da yarı östenitik olduğu görülebilmektedir. Malzemenin sertliği, içerdikleri karbon miktarının azlığı nedeniyle oldukça düşüktür. Martenzitik olanlarında bile sertleşme ancak çökelmeye bağlı olarak gerçekleşmektedir. Çökelme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çeliklerde, çökelmenin oluşabilmesi için yapıya alaşımlama elementleri dahil edilmektedir. Bu elementlere aluminyum, titanyum, bakır ve niyobyum örnek olarak gösterilebilir. Bu tip çeliklerin süneklik ve toklukları iyi seviyedeyken, korozyon dayanımları da orta seviyelerde izlenmektedir.

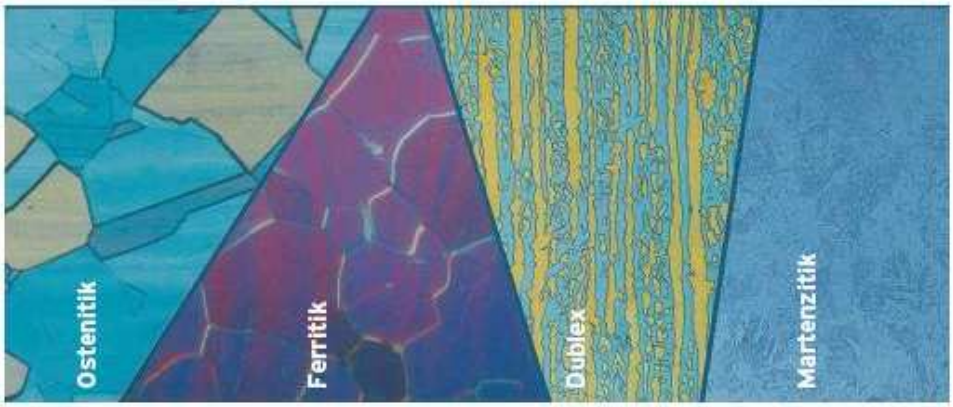
Çökelme sertleştirmeli paslanmaz çelikler düşük karbon oranlarının yanı sıra yüksek miktarda alaşım elementleri içermektedir. Bu durum, çeliklerin dayanım ve korozyon

değerlerini iyileştirmektedir. Bu tip çelikler martenzitik paslanmaz çeliklerle kıyaslandıklarında, dayanım ve korozyon değerlerinin bu sayede optimize edildikleri görülmektedir.

Oldukça yüksek akma dayanımı değerlerine sahip olan (~1700 Mpa) çökelme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler, daha ziyade yüksek teknolojinin uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar. En yaygın olarak karşılaşılan türü olan 630 çeliğine, uçak - uzay sektöründe sıkça rastlanılmaktadır.



Şekil 2.11 Çökelme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler. (Temel ve Aran, 2004)



Şekil 2.12 Paslanmaz çeliklerin iç yapıları (Aran, 2005)

2.2 Kaplamalı Saclar

Çelik sacların yüzeylerinde, kullanım alanlarına ve yerlerine bağlı olarak zamanla, çeşitli problemlerle karşılaşılabilmektedir. Bu problemlerin önüne geçebilmek ve çelik malzemelerin performanslarını arttırabilmek için, çelik yüzeylerine birbirinden farklı çözümler uygulanmakta ve saclar kaplanmaktadır. İşte bu tür çözümlerin uygulandığı çelik sac türlerine kaplı saclar denilmektedir.

Metal malzemelerin yüzeylerini etkileyen çok çeşitli korozif faktörler bulunmaktadır. Atmosferdeki oksijen, tuzlu deniz suyu, nem, sıcaklık farklılıkları, hava kirliliği bu faktörlerin ön plana çıkanlarındandır. Bu faktörler çelik sacların kullanım performanslarını ve malzeme kalitelerini olumsuz etkilemektedir. Bahsedilen bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için metal yüzeylerine uygulanan kaplamalardan faydalanılmaktadır. Bu kaplamalar birer bariyer görevi görerek, metalin atmosfer, su ve diğer korozif ortamlara karşı olan davranışını iyileştirmektedirler.

Sac yüzeylerinin koruyucu katmanlarla kaplanması, rulo halindeki sac malzemelere üretim süreçlerine dahil edilmeden önce uygulanan işlemlerle gerçekleştirilmektedir. Çelik üreticileri tarafından kaplanan bu saclar, ilave yüzey kaplama işlemlerine gerek duyulmayacak şekilde kullanıcıya teslim edilmektedir. Böylece sac malzemeler üretime doğrudan dahil edilebilmektedirler. Çok çeşitli alanlarda kullanılmakla birlikte, kaplı sacların en çok uygulama alanı bulduğu yerlerin başında dayanıklı tüketim ürünleri ve ev aletleri imalatı gelmektedir.

Kaplı sac malzemelerin kullanımları ile birlikte getirdikleri belli başlı avantajlar bulunmaktadır. Sac malzeme üzerine uygulanan kaplama işlemleri, şekillendirme sonrası uygulanan boyama işlemlerine göre daha üretken olmaktadır. Dolayısıyla, bu durum organik kaplama işlem maliyetlerini azaltmaktadır. Üstelik boyama işlemi yerine rulo kaplama yapılması, ihtiyaç duyulan proses hattı sayısını azaltmakta ve sonuç olarak uygulanması gereken ekstra proses aşamaları elenmektedir. Kaplı sac rulo kullanımı ile imalat süreci yalınlaştırılırken, üretim maliyetleri, enerji tüketim miktarları, imalat süresi ve stok maliyetleri de azaltılmaktadır. Ayrıca, bu sayede atık yönetimi ile ilgili masrafların da önüne geçilmektedir.

Çevre ile ilgili bugüne ve geleceğe ait kaygıları en iyi karşılayabilecek olan çelik türlerinin başında kaplı çelikler gelmektedir. Bu tip çeliklerin üretiminde, çevreye zarar verebilecek olan prosesler belirlenmekte ve çevresel düzenleme ve yükümlülükler çerçevesinde iyileştirilmektedirler. Üstelik, yüzey işlemleri ve boyamada kullanılan kimyasallar gibi zararlı bileşenlerin tüketimi ortadan kalkmaktadır. En önemli avantajlarının

başında ise, ömrünü tamamlamış olan kaplı sacların geri dönüştürüldükten sonra yeniden kullanılabilmeleri gelmektedir.

Kaplı çeliklerin temel avantajı, tutarlı bir kaliteye sahip olmalarıdır. Yani, istenilen özelliklerdeki bir ürün aynı boya kalınlığında, aynı renk uyumunda, aynı yüzey görünümünde ve aynı toleranslarda defalarca üretilebilmektedir. Bu tutarlılık, farklı yüzey görünüm ve kalitelerindeki kaplı çeliklerin üretiminde esneklik sağlamaktadır.

Bahsedilen bu avantajlarının yanı sıra, kaplı sacların kullanımları ile ilgili bazı kısıtlar da söz konusudur. Ürünlerin kaplama işlemleri öncesinde gösterilmesi gereken özen oldukça önem kazanmaktadır. Çünkü, ezilmiş, çizilmiş, hasar görmüş yüzeylerin kaplama işlemleri, hasarsız bir sac yüzeyine uygulanandan çok daha zor olmaktadır. Aynı zamanda üretim yöntemlerinde de problemlerle karşılaşılmaktadır. Derin çekme, bükme gibi şekillendirme işlemlerinde kaplama faktörü göz önünde bulundurulmalıdır. Bükme yarıçapı gibi parametrelerin tayininde yüzeye uygulanan kaplama özellikleri önemli rol oynamaktadır.

Kaplı saclar daha ziyade ticari kalite ürünler olarak nitelendirilebilirler. Çelik üreticisi firmaların birbirinden farklı ürünleri bulunmaktadır.

Çelik yüzeylerine kullanım amacına ve yerine göre metalik ve metalik olmayan (organik esaslı) kaplamalar uygulanabilmektedir.

Metalik kaplamaların en yaygın kullanılanları çinko (Zn) kaplamalardır. Bu kaplamalar sıcak daldırma ile yapılabildiği gibi elektrolitik olarak da uygulanmaktadır. Zn kaplamalar dışında alüminyum, alüminyum + çinko, çinko + demir, alüminyum + silis gibi farklı kaplamalar da uygulanmakta ve ticari olarak çeşitli şekillerde adlandırılmaktadır. Organik kaplamalı saclar ise metalik kaplamalı saclardan çok daha spesifik olarak bulunmakta, çok çeşitli ticari adlarla pazara sunulmaktadır.

2.2.1 Çinko Kaplı Saclar

Galvanizleme, paslanmaya karşı koruyucu tabaka oluşumunu sağlayan kaplama yöntemlerinden bir tanesidir. Yapılan bu kaplama işlemi neticesinde, metal malzeme yüzeyinin pas oluşumuna karşı gösterdiği direnç artmaktadır.

Galvanizleme işlemi, sac yüzeyi üzerine çinko metalinin uygulanması ile gerçekleştirilmektedir. Bugün birçok uygulamada, üretilen birçok sanayi ürününde galvanizleme işlemi ile karşılaşmak mümkündür. Isıtma işlemi sonucunda ara yüzeydeki kaplamanın çinko - demir alaşım tabakasına dönüştürülmesi ile galvanize yassı çelikler üretilmektedir. Uluslararası standartlarda yüzey durumu A, B, C (en iyi) olarak sembolize

edilen galvanize çelikler, başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörde tercih edilmektedirler.

Galvanizleme olarak adlandırılan çelik ve demir yüzeyine çinko kaplama işlemi üç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir:

- Sıcak Daldırma ile çinko kaplama
- Elektrolitik olarak çinko kaplama
- Püskürtme ile çinko kaplama

Çinko kaplı sacların mekanik özellikleri, uygulanan kaplama yöntemine göre farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle her bir yöntem için ayrı standartlar söz konusudur.

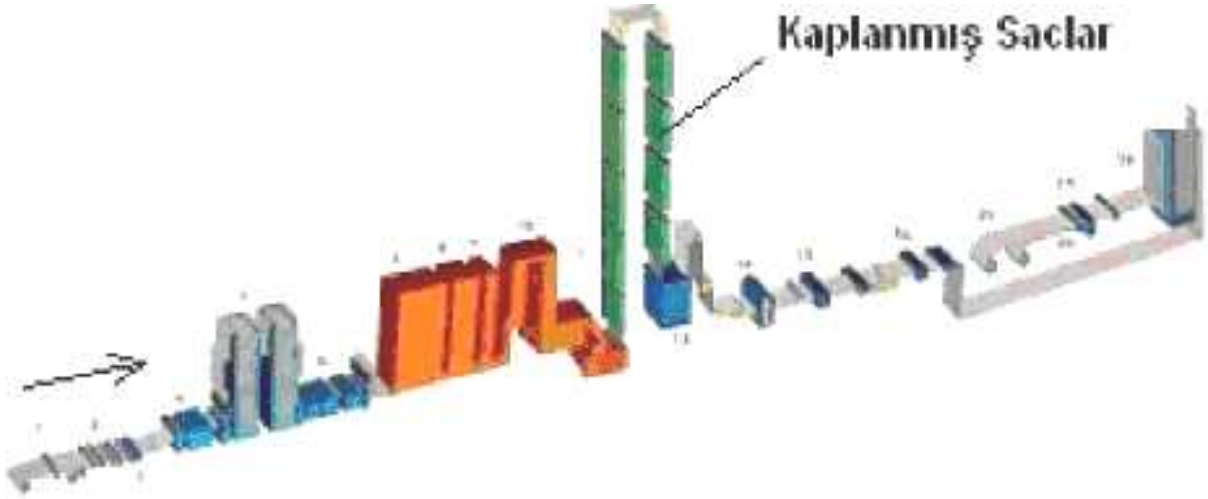
Çizelge 2.5 Galvaniz kaplı sacların mekanik değerlerinin karşılaştırılması

Çelik Türü	**Akma Dayanımı MPa**	**Çekme Dayanımı Mpa**	**Uzama (50 mm ' de %)**
Ticari Kalite			
Sıcak daldırma ile galvanizlenmiş	276	352	34
Elektrogalvanizlenmiş	234	331	38
Kaplanmamış soğuk haddelenmiş	234	331	38
Çekilebilir Kalite			
Sıcak daldırma ile galvanizlenmiş	255	345	37
Elektrogalvanizlenmiş	207	324	39
Kaplanmamış soğuk haddelenmiş	207	324	39

2.2.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Çinko Kaplama (Galvanizleme)

Bu işlem sacın erimiş çinko banyosuna daldırılmasıyla, metal malzeme yüzeyinde çinko tabakası oluşturulması ve demir - çinko alaşımının geliştirilmesi ilkesine dayanmaktadır.

Çinko kaplı sacların büyük bir çoğunluğu bu yöntemle üretilmektedir. Bu işlemle metalin her iki tarafı da çinko kaplanmaktadır. Sac malzemelerin her iki yüzeyi kaplanabildiği gibi sadece tek bir yüzeyinin kaplanması da mümkün olmaktadır. Sac yüzeyinden metal içerisine işleyen çinko, demir elementi ile bağ oluşturarak koruyucu tabakayı meydana getirmektedir.



Şekil 2.13 Galvaniz üretim hattı (Kerim Çelik, 2007)

Galvanizleme işlemi temel olarak yukarıdaki şekilde gösterilen aşamaları içermektedir. Rulo açıcılar sayesinde açılan sac malzeme, öncelikle temizleme ünitesine sevk edilmektedir. Kaliteli bir kaplama elde edebilmek için yüzeyin tamamen temizlenmiş olması gerekmektedir. Temizleme işleminden sonra fırına gönderilen sac metale, kaplama prosesine katılmadan önce burada istenilen mekanik özellikler kazandırılmaktadır. Hemen ardından ergimiş metal banyosuna daldırılan sac kaplanmakta ve kaplama sonrası istenilen kalınlık değerlerine erişmek için hava bıçağına (air knife) iletilmektedir. Ergimiş metalin operasyon sıcaklığı 445 ile 465 °C aralıklarında değişmektedir. Daha sonra soğutma kulelerinde soğutulan kaplı sac, çinko metalinin sac yüzeyi üzerine tam olarak yapışmasının ardından gerçekleştirilen birkaç iyileştirme ile birlikte, tekrar rulo olarak sarılmaktadır.

Ergimiş çinko banyosundaki daldırma işlemi sonrasında, metalik kaplamanın kalınlığını kontrol etmek mümkün olmaktadır. Bu işlem için hava bıçaklarından ya da haddelerden faydalanılmakta ve istenilen kalınlık değerlerine erişilebilmektedir. Kalınlığı ayarlanmış olan sac malzemeler daha sonra soğutma işlemine tabi tutulmaktadırlar. Belirlenen hızlarda soğutulan bu saclar ilerleyen aşamada tekrar rulo olarak sarılmakta ya da istenen uzunluklarda kesilmektedirler. Sonuç olarak kaplamanın karakteristiği ve kalınlığı, galvanizleme işleminin uygulandığı çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Çinko kaplamanın kalınlığı (ağırlığı), yapışkanlığı ve sünekliği, sac malzeme üzerindeki bu kaplamanın servis ömrünü ve korozyona karşı olan dayanıklılığını tayin eden önemli parametrelerden bazılarıdır. Bu parametrelerin belirlenmesinde bazı standart test

metotlarından faydalanılmaktadır. Kaplama kalınlığının belirlenmesi için aşağıdaki test yöntemleri kullanılmaktadır:

- Mikroskobik kesit ölçümü. (ASTM B487)

- Kaplamanın sac yüzeyi üzerinde belirli bir alandan sıyrılarak kaldırılması. (ASTM A90 veya EN 10327 Ek-A)

- Belli bir alanın elektrokimyasal olarak sıyrılması. (ASTM B504)

- Kaplama altına nüfuziyet süresinin damlama testi yardımı ile tayini. (ASTM B555)

- Diğer manyetik ve elektromanyetik ölçümler. (ASTM E376, A386, B499, D1186)

Sac malzeme üzerine kaplanan çinko miktarı, kaplama kalınlığından ziyade ağırlık göz önünde bulundurularak ölçülmektedir. Bir ya da üç noktadan alınan numunelerle gerçekleştirilen bu yöntemde, öncelikle kaplı metal tartılmaktadır. Daha sonra asit banyosuna daldırılan metal, yüzeydeki kaplamanın çözünmesinin ardından tekrar tartılmaktadır. Böylelikle kaplama miktarı tayin edilebilmektedir. (ASTM A90, A525)

Üç noktadan alınan ölçümlerde, bu üç değerin ortalamaları alınarak kaplama miktarı belirlenmektedir.

Sıcak daldırma ile Zn kaplanmış saclar üç farklı yüzey kalitesi ile temin edilebilirler :

Kaplandığı haldeki durum**:** Küçük çukurlar, pul boyutlarında değişimler, koyu renkli lekeler, yol yol izler ve hafif pasivasyon lekeleri gibi kusurlara izin verilebilir. Gererek düzleştirme kırıkları veya çinkonun akış izleri görülebilir. Ayrıca katlanma izleri ve Luders çizgileri de görülebilir.

Gelişmiş Yüzey Kalitesi**:** B yüzey kalitesi son paso işlemiyle elde edilebilir. Bu yüzey kalitesinde, gererek düzeltmeden kaynaklanan kırışıklıklar, son paso izleri, çizikler, çöküntüler, pullu yapı, çinko akması ve hafif pasivasyon izleri gibi küçük kusurlara izin verilebilir.

En iyi kalite yüzey: Yüzey Kalitesi C, son paso işlemiyle elde edilebilir. Kontrollü yüz, homojen görünüşlü yüksek sınıf boya uygulamasını mümkün kılmalıdır. Diğer yüz en azından Yüzey Kalitesi B' nin özelliklerine sahip olmalıdır.

Çizelge 2.6 EN 10327' ye göre sıcak daldırma ile Zn kaplama miktar aralıkları ve kısa gösterilişleri

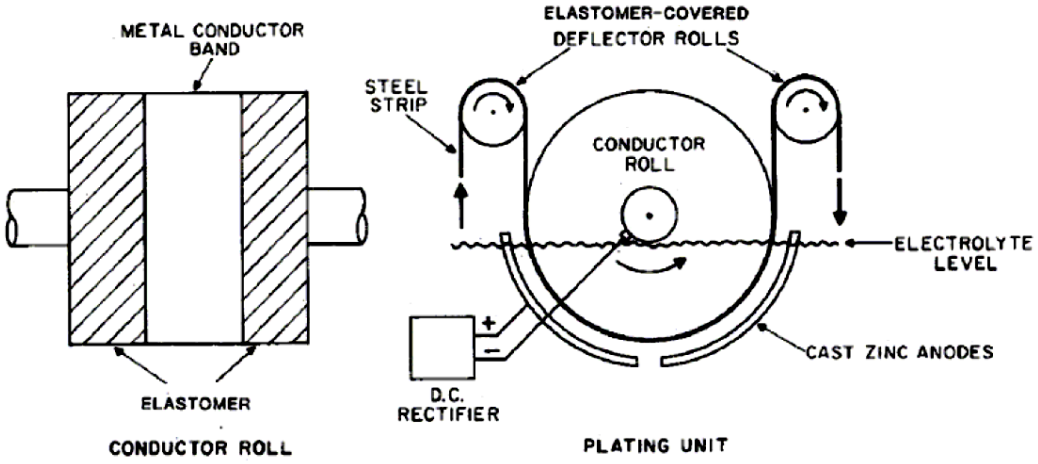
Kaplamanın kısa gösterilişi	**Asgari kaplama kütlesi , g/m^2 iki yüzün toplamı**		**Tek nokta deneyinde yüzey başına kaplama kalınlığı için kuramsal değerler**		**Yoğunluk g/cm^3**
	Üç nokta deneyi	**Tek nokta deneyi**	**Tipik değer**	**Aralık**	
Çinko Kaplama Kütleleri (Zn)					
Z100	100	85	7	5 - 12	7,1
Z140	140	120	10	7 - 15	
Z200	200	170	14	10 - 20	
Z225	225	195	16	11 - 22	
Z275	275	235	20	15 - 27	
Z350	350	300	25	19 - 33	
Z450	450	385	32	24 - 42	
Z600	600	510	42	32 - 55	

2.2.3 Elektrolitik Çinko Kaplama

Boyama ve derin çekme gibi şekillendirme işlemleri için uygun çinko kaplı sacları elektrolitik galvanizleme işlemi ile elde etmek mümkün olmaktadır. Bu yöntemle, saf çinko metalinin sac metal yüzeyine mükemmel bir şekilde yapışması ve oldukça ince bir tabakanın oluşması sağlanmaktadır. Daha iyi bir yüzey kalitesinin istendiği durumlarda, elektrolitik galvanizleme işleminin kullanılması uygun olacaktır.

Elektrolitik galvanizleme işleminde kullanılan saf çinkonun yapışma özelliği, sıcak daldırma ile gerçekleştirilen galvanizleme işleminden çok daha iyidir. Kaplama kalınlıklarının azalmasına rağmen, korozyon dayanım performanslarında kayda değer bir kayıp yaşanmamaktadır. Elektrolitik galvanizleme işlemi, sıcak daldırma yöntemi ile galvanizlemede olduğu gibi, sürekli bir rulo proses hattında gerçekleşmektedir. Rulo açıcılarda açılmış olan sac, yüzey temizliklerinin gerçekleşmesinden sonra iletken makaralara gönderilmektedir. Burada kaplaması gerçekleştirilen sac malzeme daha sonra su ile durulanmakta ve kurulanmaktadır. Sac üzerine uygulanan kaplama kalınlıkları, iletken olan bu makaralardan geçirilen akım miktarları ile kontrol edilebilmektedir. Elektrolitik kaplama yöntemleri çelik üreticisi firmalar arasında farklılık gösterebilmektedir. Ancak yöntem, temel olarak aynı prensip üzerine kurulmaktadır. İletken makaralardan geçirilen akım, erimiş çinko metalinin mükemmel bir şekilde sac üzerine yapışmasını sağlamaktadır.

Aşağıdaki resimde, U.S. Steel firmasına ait elektrolitik kaplamada kullanılan iletken makara ve kaplama ünitesi görülmektedir.



Şekil 2.14 Elektrolitik çinko kaplamada kullanılan iletken makara ve kaplama ünitesi (Lankford, 1985)

Elektrolitik kaplama, erimiş metal banyosuna daldırılamayacak olan sac malzemelerin çinko kaplanmasında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıkların sac malzemeye zarar verdiği durumlarda tercih edilmektedir. Elektrolitik kaplamanın en önemli avantajlarından biri ise sac malzeme yüzeyine soğuk olarak uygulanabilmesi ve dolayısıyla malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilememesidir.

Elektrolitik Zn kaplamalar tek yüzey ve çift yüzey kaplama olarak pazarda bulunabilmekte ve farklı kaplama kalınlıklarında üretilmektedir.

Çizelge 2.7 Elektrolitik Zn kaplanmış soğuk saclarda yüzey durumu sembolleri (EN 10152)

Sembol	**İşlem Tipi**
P	Fosfatlanmış
PC	Fosfatlanmış ve kimyasal olarak sızdırmazlık yapılmış
C	Kimyasal olarak pasivasyona tabi tutulmuş
PCO	Fosfatlanmış, kimyasal olarak sızdırmazlık yapılmış ve yağlanmış
CO	Kimyasal olarak pasivasyona tabi tutulmuş ve yağlanmış
O	Yağlanmış
S	Sızdırmaz
U	Kaplandığı durumda, işlem görmemiş

2.2.4. Çinko Püskürtme

Çinko püskürtme işlemi, ergitilmiş sıvı metalin, önceden hazırlanmış yüzeye püskürtülmesi işlemidir. Ancak bu yöntemle gerçekleştirilen kaplama işlemlerinde, gözenekli ve pürüzlü yüzeyler elde edilmektedir. Malzeme yüzeyinde bulunan bu gözenekler, zamanla korozif parçacıklarla dolabilmektedir. Ayrıca, kaplı yüzeyin pürüzlülüğü, metalin boyanabilirliğini iyileştirmektedir.

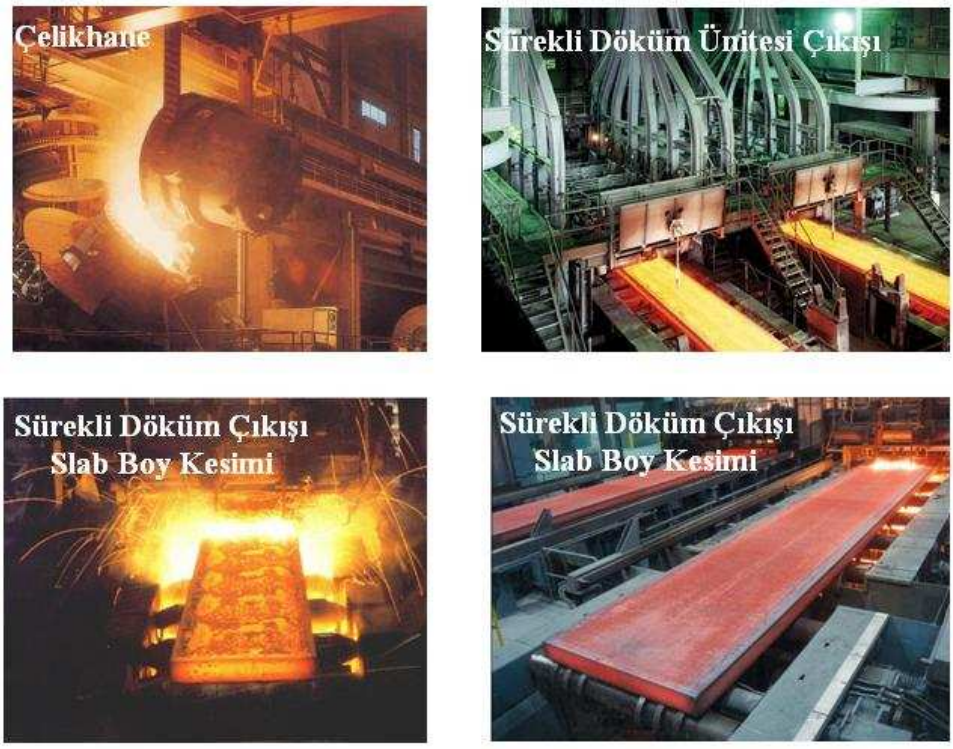
Çinko püskürtme işlemi, her boyuttaki ve şekildeki bitmiş ürünlerin neredeyse tamamına uygulanabilmektedir. Özellikle daldırma yöntemi ile galvanizleme işleminin gerçekleştirilemediği durumlarda, püskürtme galvanizleme yöntemi tercih edilebilmektedir. Püskürtme galvanizleme ile daha kalın kaplama kalınlıkları elde etmek mümkündür.

3. ÜRETİM TEKNOLOJİSİ

Paslanmaz çelik üretimi büyük yatırım ve uzmanlık gerektiren bir teknolojidir. Bu çeliklerin ergitme ve arıtma işlemleri genellikle " Elektrik ark ocağı / Argon oksijen karbon giderme " yöntemleriyle yapılır. (EAF / AOD : Electric Arc Furnace / Argon Oxygen Decarburization) 1970' li yıllarda geliştirilen ve dünyada paslanmaz çelik üretiminin % 80' inin gerçekleştirildiği yöntem sayesinde, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve kalitenin yükseltilmesi mümkün olmuştur. Daha farklı üretim teknikleri de mevcut olmasına rağmen, EAF / AOD yöntemi verimlilik ve kalite açısından en uygun olanıdır. (Kaluç, 2002)

3.1 Çelikhane (Ergitme / Arıtma)

Ergitme işleminin yapılacağı bazik astarlı elektrik ark ocağına uygun paslanmaz çelik hurdası, karbon çelik hurdası, ferrokrom alaşımları ve gerektiğinde nikel ve molibden gibi alaşım elementleri yüklenir. Dikkatlice tartılan ve özel kasalarda çelikhaneye taşınan malzemeler, ergitme ocağına konmadan önce belirli bir süre kurutma fırınında tutulur. Ardından malzemeler alaşımlanmanın yapıldığı elektrik ark ocağında ergitilir.



Şekil 3.1 Çelikhane ve sürekli döküm ünitesi üretim aşamaları (Borçelik, 1999)

Bu üretimde en önemli adım " Argon Oksijen Karbür Gidericisi " nde yapılan işlemdir. (AOD) Burada paslanmaz çelik, adım adım istenen kimyasal bileşime ulaştırılır.

Önce oksijen ve argon gazları eriyiğe yan memelerden ve üstten üflenir. Bu aşamada alaşımın bileşimindeki karbon yakılarak gerekiyorsa % 0,02' ye kadar düşürülebilir. Krom oksitlenmeye hassas olduğundan, bu sırada bileşimdeki kromun bir kısmı da cürufa geçer. Bu nedenle alaşıma kromun katılması büyük oranda karbür gidermenin tamamlanmasından sonra yapılır. Üçüncü aşamada ise alaşımdaki kükürt oranı düşürülür.

Bileşim ve sıcaklık istenilen seviyeye ulaştığında, eriyik döküm potasına aktarılır ve son ayarlamalar yapılır. Bu aşamada da alaşıma bazı elementler ilave edilir ve eriyiğin homojenleştirilmesi argon gazı üflenerek sağlanır.

3.2 Sürekli Döküm

Hazırlanan alaşım potadan bir tava aracılığıyla katılaşmanın başladığı su soğutmalı bir bakır kalıp içine dökülür. Katılaşan yassı kütük (slab), bükme ve düzeltme merdanelerinin bulunduğu kısma aktarılır ve bu işlem sonunda malzeme, alev ile istenen boya kesilir. Bu teknoloji ile çeliğin slab halinde kesintisiz olarak dökülmesi mümkündür.

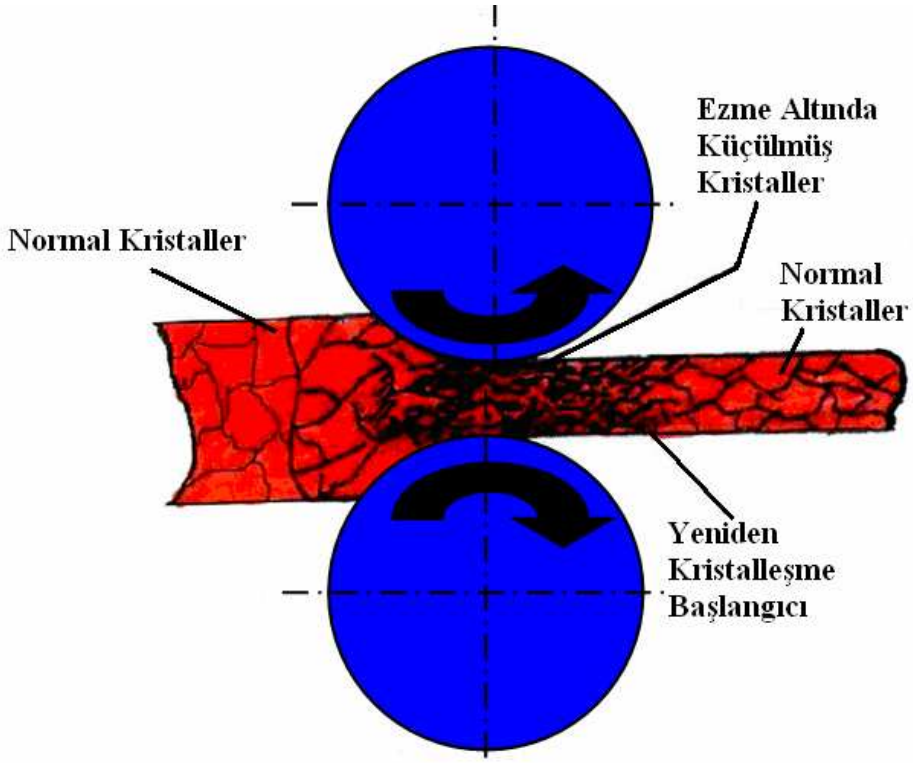
Şekil 3.2 Sürekli slab döküm ve sıcak haddeleme ünitesi (Borçelik, 1999)

3.3 Taşlama

Döküm sırasında slab yüzeylerinde çeşitli kusurlar ortaya çıkabilir. Bekletilerek soğutulan yassı kütüklerin yüzey kusurları, değişik ebatlardaki taşlama tezgahlarında yerel olarak veya yüzey tamamen taşlanarak giderilir.

3.4 Sıcak Haddeleme

Sıcak haddeleme öncesinde ilk işlem yassı kütüklerin konveyörlü fırında ve koruyucu atmosferde 1250 °C sıcaklığa ısıtılmasıdır. Kaba haddeleme ile malzeme kalınlığı yaklaşık 25 mm' ye indirilir. Bu işlem sonrası malzemenin sıcaklığı 11OO °C civarındadır. Kaba haddeleme sonucunda uzunluğu artan yassı ürün, bobin halinde sarılır ve ileri - geri haddeleme işlemleri ile malzeme kademeli olarak inceltilir. Rulo sarıcılar 950 °C sıcaklıkta bulunan özel fırınlar içine yerleştirilmişlerdir. Dörtlü ve altılı merdane grupları yardımıyla yapılan bu haddelemede kalınlık hassas olarak kontrol edilir. Malzemenin istenilen kalınlığa ulaştığı son pasodan sonra sıcak sac bir soğutucu içinden geçirilerek rulo sarıcıya beslenir. Paslanmaz çeliklerin sıcak haddeleme sonrasında pazarlanmaları enderdir, dolayısıyla sıcak haddelenmiş bu yarı mamul genellikle bir sonraki işlemler dizisi için soğuk haddeleme ünitesine aktarılır.

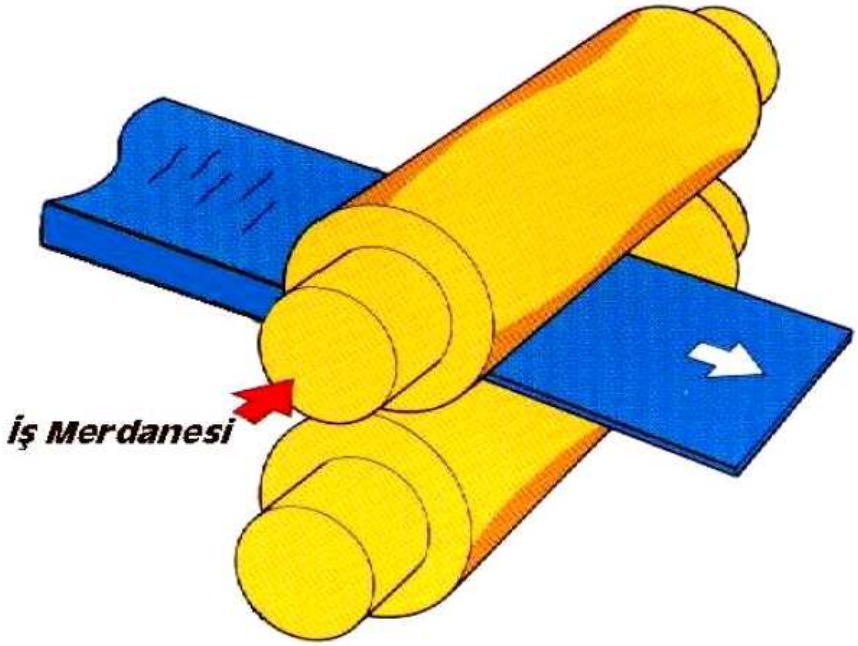


Şekil 3.3 Sıcak haddeleme ile şekil değiştirme (Borçelik, 1999)

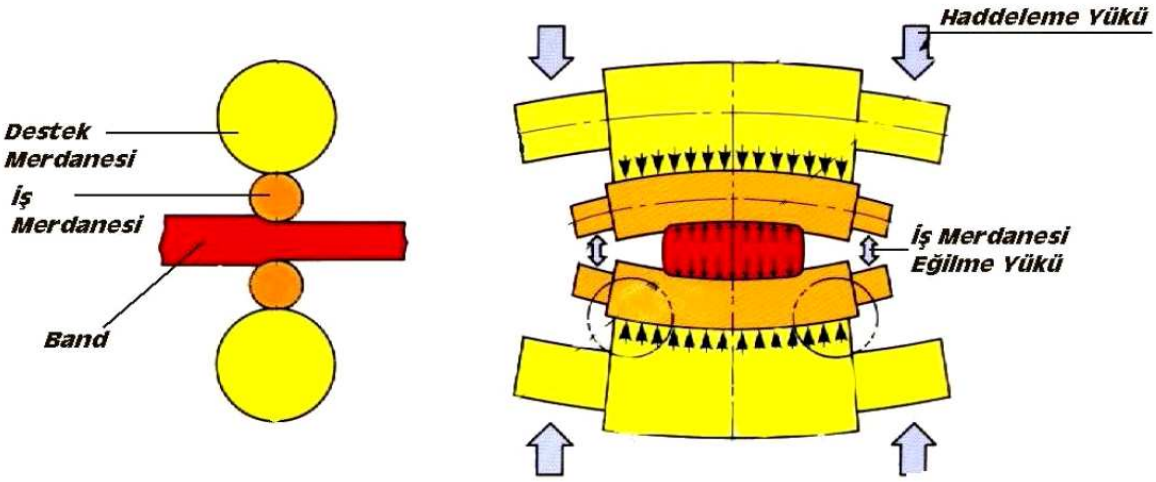
3.5 Tavlama ve Asit Banyosu

Sıcak haddeleme sonrasındaki yapılan ilk işlemler; malzemenin kontrolü, küçük rulolarda sarılı olan malzemelerin uçlarından kaynakla birleştirilerek daha büyük ruloların oluşturulması ve gerekirse şerit kenarlarının tıraşlanarak tesviyesidir. Ardından; tavlama ısıl işlemi ile çeliğin yumuşatılması ve iç yapısının homojenleştirilmesi, asit banyosu ile yüzeylerin temizlenmesi işlemleri gerçekleştirilir. Bu işlemler ardışık sürekli hatlar üstünde yapılır. Bu

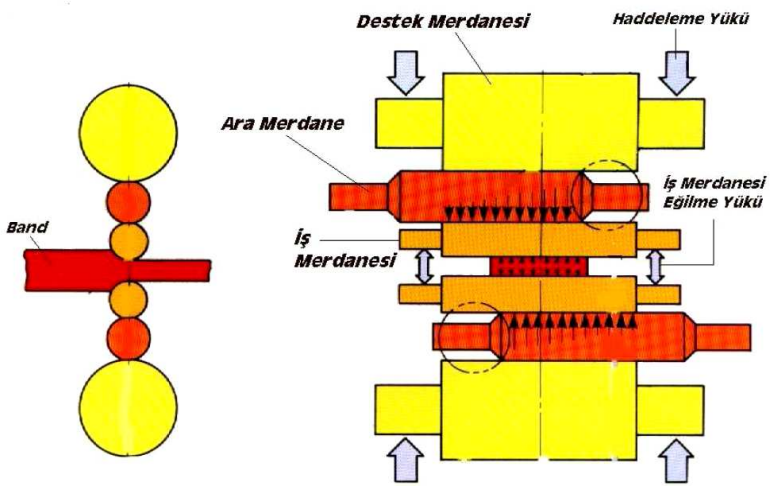
hatlar üstünde fırınlar, kumlama ve asit banyosu üniteleri mevcuttur. Asit banyosunda malzeme yüzeyinin temizlenmesi ve istenen yüzey özelliklerinin kazandırılması işlemi, soğuk haddeleme öncesinde olduğu gibi, sıcak haddelenmiş olarak satışa sunulacak malzeme üzerinde de uygulanır. Soğuk haddeleme öncesinde yapılan en son işlem, sıcak haddeleme ve diğer işlemlerden kalma yüzey kusurlarının taşlama hattında giderilmesidir. Ayrıca, satışa sunulacak sıcak haddelenmiş bu ürünün müşteri istekleri doğrultusunda yüzey özelliklerini kazandırmak üzere parlatılması da yapılabilir.



Şekil 3.4 İkili hadde (2HI) çalışma düzeni (Kerim Çelik, 2007)



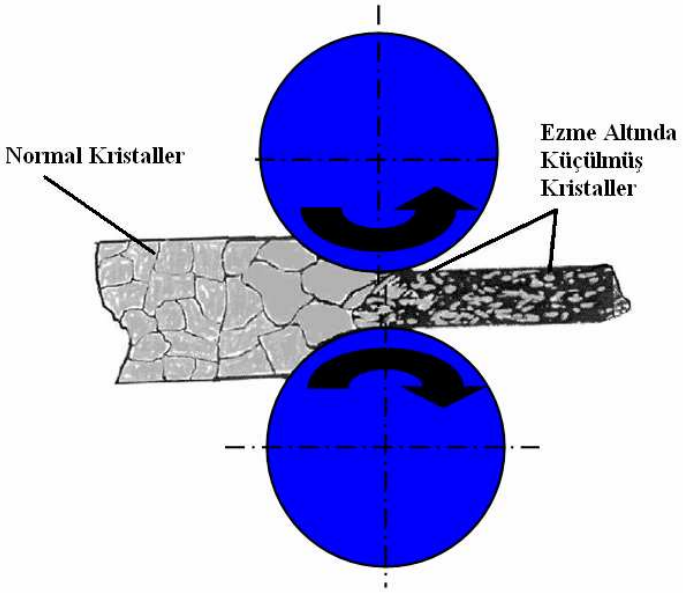
Şekil 3.5 Dörtlü hadde (4HI) çalışma düzeni (Kerim Çelik, 2007)



Şekil 3.6 Altılı hadde (6HI) çalışma düzeni (Kerim Çelik, 2007)

3.6 Soğuk Haddeleme ve Son İşlemler

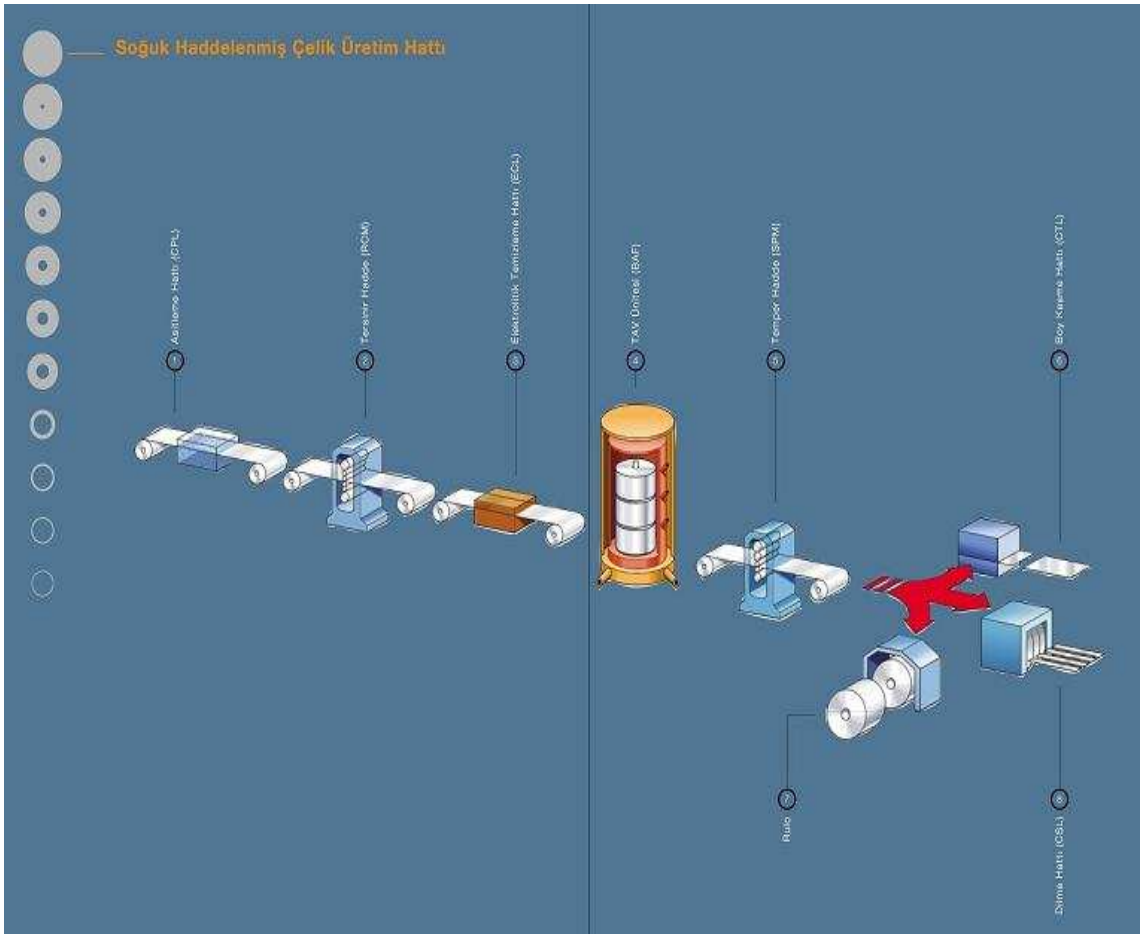
Soğuk haddeleme sürecinde paslanmaz çelik sac, ileri - geri hareket özelliğine sahip hadde tezgahında birbiri ardına uygulanan pasolar ile inceltilerek, kalınlıkta % 80' e varan azalmalar sağlanabilir. Haddelenmeye devam etmek, yani parçayı daha fazla inceltmek gerekiyorsa, bir ara tavlama yapılması, yüzeyin tekrar asit banyosunda temizlenmesi ve ancak daha sonra yeniden haddelemeye devam edilmesi gerekir.



Şekil 3.7 Soğuk haddeleme ile şekil değiştirme (Borçelik, 1999)

Soğuk haddelenme tamamlandığında, sıcak haddelemede olduğu gibi yeniden tavlama ve asit banyosu işlemleri gerekir. Asit banyosunu takiben ikili merdane düzenine sahip bir tezgahta çok küçük bir paso ile son haddeleme işlemi yapılır. Burada amaç şeridin yassılığını ve yüzey özelliklerini istenen seviyeye getirmektir. Bazı türlerde, özellikle 0,5- 2,0 mm gibi saclarda

özel tezgahlarda gerdirmeli kalınlık ayarı (tension leveling) yapılarak kalite daha da iyileştirilir. Satışa sunulan paslanmaz çelik, rulo halinde veya servis merkezlerinden özel tezgahlarda dar boyut toleranslarında, istenen boy ve genişlikte kesilmiş ve dilinmiş olarak temin edilebilir. Servis merkezleri aynı zamanda talep edilen yüzey kalitesini de sağlamak üzere özel tezgahlarla donatılmışlardır.



Şekil 3.8 Soğuk haddelenmiş çelik üretim hattı (Kerim Çelik, 2007)

Dünyada paslanmaz çelik tüketimi ve bu çeliğin kullanım alanı sürekli bir artış göstermektedir. Paslanmaz çeliğin tüketimi; uygulama alanları dikkate alındığında, çok küçük miktarlardan büyük tonajlara çok geniş bir aralıkta gerçekleşmektedir. Öte yandan uygulama alanının fazlalığı ve bu ailenin sahip olduğu geniş ürün yelpazesi; paslanmaz çelik ticaretini, klasik satış, işleminin ötesine, bir hizmet olgusu ile güçlendirilmiş pazarlama işlevine dönüştürmektedir. Tüketicinin bu denli yoğun hizmet ihtiyacını üretici firmaların doğrudan karşılaması artık mümkün olamamaktadır. Bu nedenle paslanmaz çeliğin üretiminden tüketimine kadar olan süreçte, " Servis Merkezi " olarak adlandırılan bir ara kademe oluşmuştur. Böylece üretici firmalar daha çok üretim fonksiyonuna yoğunlaşmakta, standart ebat ve kalitelerde üretimlerle, üretim maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedirler.

Öte yandan paslanmaz çeliklere üretim sonrasında dekoratif uygulamalar amacı ile çeşitli yüzey özellikleri kazandırmak da mümkün olmaktadır. Üretim teknolojisinden tamamen ayrı olan bu işlemler özel merkezlerde gerçekleştirilmektedir. Paslanmaz çelikler standart genişliklerde rulo olarak üretilirler. Bu üretimde genişlik, genellikle standart ölçüden daha büyük gerçekleştirilir. Örneğin 1000 mm standart genişlikte üretilecek bir rulo için üretim sonrasındaki genişlik 1050 mm olabilir. Bu malzeme " Mill Edge" olarak tanımlanır. Üretilen rulo daha sonra dilme hatlarında standart boyutlara düşürülür. Paslanmaz çeliğin üretiminde piyasada kabul gören standart genişlikler 1000 mm, 1250mm, 1500 mm ve 2000 mm' dir. Levha halindeki paslanmaz çeliklerde ise boy standartları 2000 mm, 2500 mm, 3000 mm, 4000 mm ve 6000 mm şeklindedir.

Standart ebatlarda üretilen paslanmaz çeliğin kullanımında çoğunlukla özel ebatlara ihtiyaç duyulmakta, ancak bu işlemler ise genellikle paslanmaz çelik üreticileri tarafından gerçekleştirilmemektedir. Bundaki temel neden üreticilerin kullanıcılara olan coğrafi uzaklıkları ve kendilerini üretim proseslerinde yoğunlaştırmalarıdır. Dolayısıyla üretici firmalar tarafından standart ebat ve yüzey kalitelerinde üretilen paslanmaz çeliklerin tüketicinin ihtiyacı doğrultusunda boyutlandırılması ve yüzey işlemlerinin yapılması servis merkezleri tarafından sağlanmaktadır.

Servis merkezleri, müşterinin malzeme üzerindeki bu fiziksel beklentilerini karşılamanın yanında onlara bir çözüm ortağı olarak da hizmet verebilmektedir. Böylece pek çok proje, ortak çalışmalarla daha etkin olarak hayata geçirilebilmektedir. Klasik bir servis merkezinde " Boy Kesme, Dilme, Yüzey Taşlama ve Fırçalama " işlemlerini yapacak özel üretim hatları bulunur. Bunun yanında plazma kesme, lazer kesme gibi imkanlar da sunulabilmektedir.

Servis merkezlerinde kalite ve boyut olarak geniş bir stok bulunur ve gerek duyulan malzeme en kısa sürede temin edilir.

Servis merkezleri en uygun ekonomik malzemenin seçimi konusunda ve çıkan sorunların çözümünde de destek sağlarlar.

Servis merkezlerinde var olan, boy kesme, dilme, zımparalama, taşlama ve koruyucu film kaplama gibi olanaklar sayesinde, istenilen boy, kalınlık ve yüzey özelliklerine sahip ürünler hazırlanabilir. Kalitesi sertifikalarla garanti edilmiş ürünler satın alınabilir. Satın alınan ürünlerle ilgili en uygun ambalaj ve sevk koşulları sağlanır.

3.7 Boy Kesme İşlemi

Servis merkezlerinde bugün için verilen en önemli hizmet, üretici firmalardan temin edilen ruloların müşterinin ihtiyacı doğrultusunda levhalar haline dönüştürülmesi ve istenilen boylarda kesilmesidir. Günümüzde tamamen PLC kontrollü olarak tasarlanan özel üretim hatları ile bu işlemler artık çok hassas bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Şekil 3.9 Boy kesme hattı (Temel ve Aran, 2004)

Boy kesme hatları esas olarak bir rulo açıcı, düzeltici, giyotin ve istifleme ünitesinden oluşmaktadır. Bunlara ilave olarak kağıt sarıcı, kağıt verici, plastik koruyucu film uygulama ünitesi gibi donanımlar da mevcuttur. Paslanmaz çelikler için kullanılan boy kesme hatları normal karbon çelikler için kullanılanlara şekil olarak bir benzerlik gösterse de, önemli farklılıklar içermektedir. Bu farklılık öncelikle malzeme yüzeyinin korunmasına gösterilen özende yatar. Bu nedenle bu hatlarda bulunan merdaneler ya özel kauçuk veya poliüretan malzemelerle kaplı, ya da krom kaplı yüzeylere sahiptirler. Ayrıca istifleme ünitesinin de malzemeyi çizmeyecek şekilde dizayn edilmiş olması gerekmektedir. Bir boy kesme hattının en hassas bölümlerinden biri, düzeltme işleminin yapıldığı ünitedir. Bu hatlarda straightener, flattener veya leveler adı verilen üniteler yer alabilir. Bunlar içerisinde leveler ünitesi en hassas düzeltme işlemini yapanıdır. Leveler, işlenecek malzemenin kalınlığına göre özel olarak dizayn edilmiş ve üretilmiştir. Leveler ayrıca düzeltme esnasında paslanmaz çelikte üretim sonrasında var olan iç gerilmeleri giderici bir işlemi de uygular. Leveler üniteleri kendi aralarında dört ve altı kademeli olarak iki ayrı tipe sahiptirler. Altı kademeli leveler genellikle 6 mm ve altındaki soğuk çekme malzemeler için ideal bir düzeltme

imkanı sunar. Dört kademeli leveler ise 6 - 13 mm kalınlık aralığındaki ve daha ziyade sıcak çekme malzemeler için tercih edilirler. Kesim işleminin yapıldığı giyotin de diğer önemli bir ünitedir. Bu giyotin günümüzde uçar - makas veya dönel - makas olmak üzere iki ayrı tipte olabilir. Paslanmaz çeliğin boy kesme hatlarında kesilmesi esnasında süreklilik önemli bir unsurdur. Zira her duruşunda düzeltme işlemini sağlayan leveler, malzeme üzerinde bazı izlerin kalmasına neden olabilir. Bu nedenle paslanmaz çelik boy kesme hatlarında kesim işlemi bu özel makaslar yardımı ile yapılır.

3.8 Dilme İşlemi

Servis merkezlerinin sunduğu bir diğer hizmet de standart genişliklerde üretilen malzemelerin ihtiyaç duyulan ene düşürülmesidir. Dilme hatları genellikle bir açıcı, kesme ünitesi, gergi ünitesi ve sarıcıdan oluşmaktadır. Yine bu hatlarda kağıt sarıcı, kağıt verici ve plastik film uygulama üniteleri de bulunmaktadır.

Şekil 3.10 Dilme hattı (Kerim Çelik, 2007)

Bu hatlar da yine paslanmaz çeliğin yüzeyinin korunması için özel dizaynlara sahiptirler. Merdaneler yine genellikle kauçuk esaslı veya poliüretan malzemelerle kaplıdır. Dilme işleminde dairesel bıçaklar kullanılır. Kalınlıkları son derecede hassas olarak işlenmiş olan ara parçalar yardımı ile dilme işlemi sonrasında şerit genişliklerinin çok hassas olarak elde edilmesi mümkün olmaktadır. Özellikle kalıp kullanılan imalat prosesleri için malzemenin boyut hassasiyeti, önemli avantajlar sağlar.

3.9 Taşlama ve Fırçalama İşlemleri

Paslanmaz çelikler günümüzde dekoratif uygulamalar için de yaygın olarak kulanılmaktadır. Kullanım alanlarına örnek olarak, asansör kapı ve kabinleri, bina dış cephe kaplamaları, sütun giydirmeleri ve mutfak ekipmanları (buzdolabı, fırın vb) verilebilir. Ancak bu tür uygulamalarda standart özelliklerde üretilen paslanmaz çeliklerin sahip oldukları yüzeyler yeterli kalitede bir görünüm sağlayamamaktadır. Bu nedenle paslanmaz çeliklere taşlama ve fırçalama gibi işlemlerle farklı yüzey görünümleri kazandırılabilir. Taşlama, daha çok östenitik çelikler için uygulanan bir yüzey işlemidir. Bu işlemlerde ıslak ve kuru olmak üzere iki temel proses uygulanabilmektedir. Islak proseslerde kendi içinde kullanılan sıvıya göre farklılıklar göstermektedir. Taşlama işlemi temel olarak malzemenin belirli bir hızla hareketi esnasında yüzeyinin geniş bir zımpara ile üniform bir şekilde zımparalanması işlemidir. Bu işlemi yapan üretim hatlarında genellikle iki taşlama kafası bulunur. Böylece farklı değerlerdeki zımparalar kullanılarak değişik yüzeyler elde edilebilir.

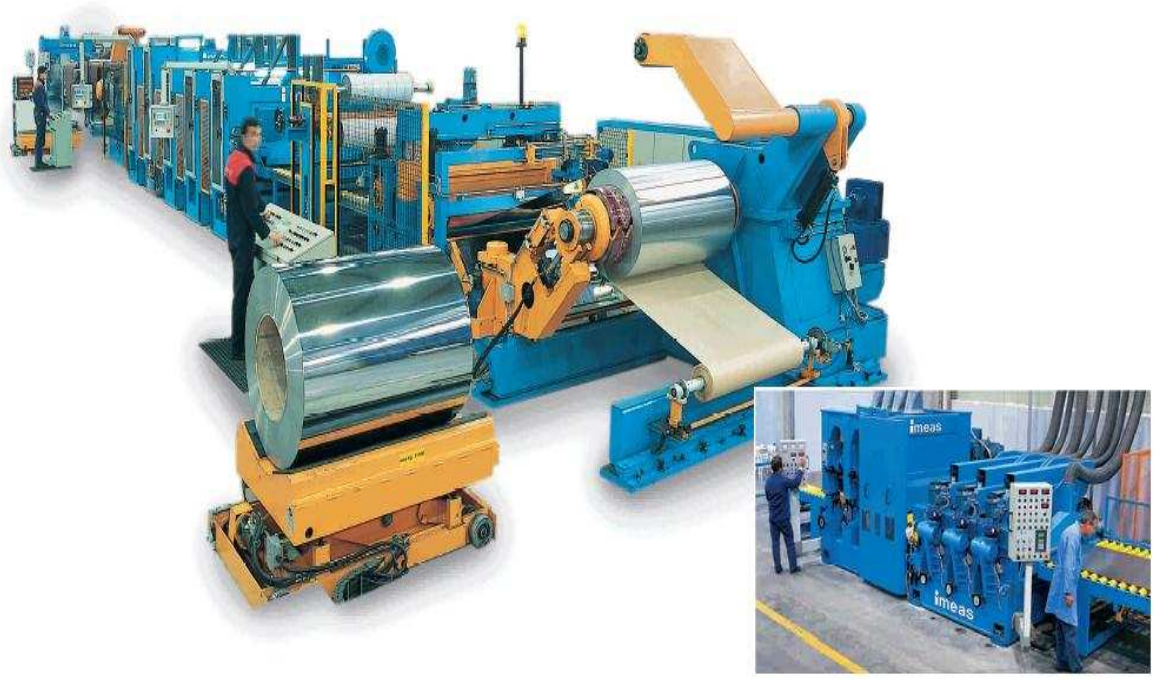
Kullanılacak zımparaların aşındırıcılarının demir içermemesi gerekmektedir. Paslanmaz çeliklerin taşlanmasında kullanılan zımparalar genellikle alüminyum oksit, silisyum karbür veya zirkonyum esaslı aşındırıcılara sahiptir. Alüminyum oksit zımparalar kırmızı renkli, silisyum karbür zımparalar ise siyah renkli olarak bilinir. Alüminyum oksit zımparalar daha mat bir yüzey sağlarken, silisyum karbür zımparalarla daha parlak bir yüzey elde etmek mümkündür. Ancak silisyum karbür zımparalarla yapılan taşlama işlemlerinin maliyeti daha fazladır.

Zımparaların ek yerlerinin düzgünlüğü ve bir zımparadaki ek yeri sayısının azlığı zımparalama kalitesine etki eden önemli faktörlerdir. Zımparalama işlemi için tercih edilen aşındırıcı numaraları ise 100 - 320 grid arasındadır.

Taşlama işleminde, zımpara tipi, zımpara dönüş hızı, malzeme ilerleme hızı ve zımpara ile yüzey arasındaki sürtünme kuvveti değişik değerlere getirilerek farklı amaçlar için farklı yüzeyler elde edilebilir. Fırçalama işleminde ise aşındırıcı sentetik bir malzeme olup silindirik bir fırça şeklindedir. Fırça kendi ekseni etrafında dönerken aynı zamanda ileri-geri bir hareketle (osilasyon) malzeme yüzeyinde çizgiler oluşmasını sağlar. Bu işlem esnasında malzeme belirli bir hızla hareket ettirilir.

Kullanılan fırçalar ise yine alüminyum oksit ve silisyum karbür aşındırıcılara sahip olabilir. Bu fırçalar da taşlamadakine benzer şekilde farklı yüzey parlaklığı sağlarlar. Fırçalama işleminde de malzeme ilerleme hızı, fırça dönüş hızı, osilasyon genliği ve frekansı yüzeydeki izlerin şeklini belirleyen önemli parametrelerdir. Gerek taşlama ve gerekse fırçalama işlemleri

sonrasında malzeme yüzeyini korumak amacı ile plastik esaslı bir film (PE, PVC) uygulaması yapılır. Böylece hassas bir şekilde oluşturulmuş yüzeyler, çeşitli üretim prosesleri sırasında oluşabilecek hasarlara karşı korunmuş olurlar.



Şekil 3.11 Rulo ve levha taşlama, fırçalama hattı (Temel ve Aran, 2004)

3.10 Yüzey Koruma

Paslanmaz çeliklerde kimyasal ve mekanik özellikler yanında yüzey özellikleri de önem taşımaktadır. Paslanmaz çeliklerin nihai kullanım yerlerinde, yüzeyleri boya ve macun gibi işlemlerle örtülmez. Ancak yüzeyler çizilmelere karşı önemli bir hassasiyete sahiptir ve taşlanmış, fırçalanmış, veya parlak yüzeyli malzemelerin gelişigüzel çizilmesi arzu edilmez. Öte yandan çeşitli üretim prosesleri sırasında yüzeylerin bu tür hasarlara maruz kalma tehlikesi çok yüksektir. Bu nedenle özellikle gıda sektörü ve dekoratif uygulamalarda imalat proseslerindeki olası problemler nedeni ile yüzeyin korunması gerekir.

Bunu sağlamak için kullanılan yaygın yöntem yüzeyin kendinden yapışkan bir PE veya PVC folyo ile kaplanmasıdır. Günümüzde bu amaçla üretilen folyolar kauçuk veya akrilik esaslı yapıştırıcılara sahiptir. Bu tür yapıştırıcılar, folyo paslanmaz çelikten söküldüğünde yüzeyde herhangi bir iz veya kalıntı bırakmazlar. Folyolar değişik kalınlıkta ve özelliklerde temin edilebilirler. Derin çekme uygulamaları, kolay sökülebilme, dış mekan uygulamalarında ultraviyole ışınlara dayanım, lazerle kesmeye uygun olma gibi pek çok farklı beklentileri karşılayan değişik folyolar mevcuttur.

Yüzeyi koruma amaçlı bu folyolar, belirli bir dayanım süresine sahiptirler ve amaçları

üretim prosesleri esnasında oluşabilecek yüzey hasarlarını engellemektir. Bu nedenle imalat işlemleri sonrasında mümkün olan en kısa sürede yüzeyden sökülmeleri gerekmektedir.

Şekil 3.12 Boy kesme hattı (Kerim Çelik, 2007)

4. SAC ŞEKİLLENDİRMEDE KULLANILAN TEMEL KAVRAMLAR

Üretilen çelik sacların sonraki şekillendirme işlemlerinin gerçekleştirilmesi veya kullanılacakları yerlerde arzu edilen özellikleri sağlayarak, örneğin dış zorlanmalara karşı dayanabilmelerinin sağlanması amacıyla mekanik özelliklerinin önceden bilinmesinin önemi büyüktür. Sacların şekillendirilme kabiliyetini belirleyebilmek ve analiz edebilmek için, bazı temel kavramların iyi anlaşılması ve özümsenmesi gerekmektedir.

4.1 Çekme Diyagramı

Sünek bir metalin (Alüminyum, bakır veya benzeri) yük uzama diyagramı ya da tipik mühendislik gerilme - mühendislik gerinim diyagramı Şekil 4.1' de verilmiştir. Aynı şeklin (b) bölümünde ise doğrusal olan başlangıç bölgesi büyütülerek verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, gerinim başlangıçta gerilme ile doğrusal olarak artar. Bu bölgede şekil değişimi elastiktir, yani yükün boşaltılması ile parça başlangıçtaki boyutlarını alır.

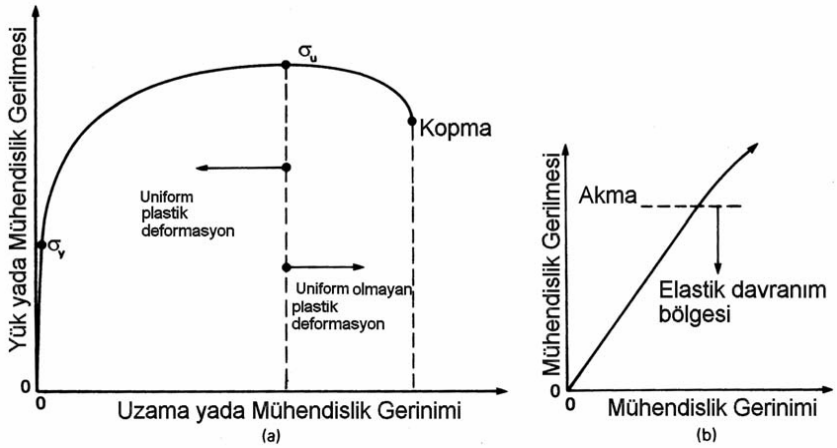
Doğrunun (Hooke doğrusu) eğimi E ile gösterilir ve elastiklik modülü (Young modülü) adını alır. Doğru boyunca Hooke kanunu geçerlidir.

$$\sigma = E.\varepsilon \tag{4.1}$$

Çekme deneyinde parça uzarken kesit yüzeyi de azalır. Deney çubuğunun eksenine dik doğrultudaki birim şekil değiştirme (en veya kalınlık doğrultusu) ile eksenel (boyuna) doğrultudaki birim şekil değiştirme arasındaki oranın mutlak değerine Poisson oranı denir ve υ ile gösterilir.

σ_y olarak belirtilen akma mukavemeti noktasından sonra gerilme - gerinim ilişkisi doğrusal olarak devam etmez, yani artık Hooke kanunu geçersizdir. σ_y noktası elastiklik sınırıdır. Tarif olarak elastiklik sınırı, çekme yükü kaldırıldığı zaman malzemede kalıcı (plastik) şekil değişiminin görülmediği en büyük gerilmedir.

Şekilde 4.1'de σ_u ile gösterilen tepe noktası maksimum yükün uygulandığı ya da maksimum mühendislik gerilme değerine ulaşıldığı noktadır. Bu noktadan sonra yük boşaltılmadıkça azalan yükte malzeme kopma noktasına kadar gider. Şekilde belirtildiği gibi σ_u noktasına kadar olan bölge üniform plastik deformasyon bölgesi, sonrası ise üniform olmayan plastik deformasyon bölgesi olarak adlandırılır.

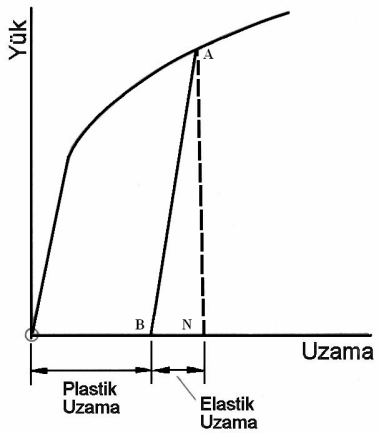


Şekil 4.1 Sünek bir metalin mühendislik çekme diyagramı (Can, 2006)

4.2 Elastik - Plastik Deformasyon

Deneyler göstermiştir ki tek eksenli yüklemede belirli bir gerilme değerine karşılık gelen gerinim iki kısımdan oluşur: Geri kazanılabilen elastik gerinim ve geri kazanılamayan plastik gerinim. Elastiklik sınırı aşıldığında plastik şekil değişimi başlar. Plastik alanda, çekme eğrisinin (Şekil 4.1) σ_u maksimum tepe noktasından önce bir A noktasında yük boşaltıldığı takdirde, ideal durumda geriye dönüş elastik çizgisine paralel AB doğrusu boyunca olur. (Şekil 4.2) Şekil 4.2' de görülebileceği gibi BN arası mesafe geri kazanılan elastik deformasyon bölgesidir. OB arasındaki mesafe ise malzemede kalıcı olarak kalan plastik deformasyon miktarıdır.

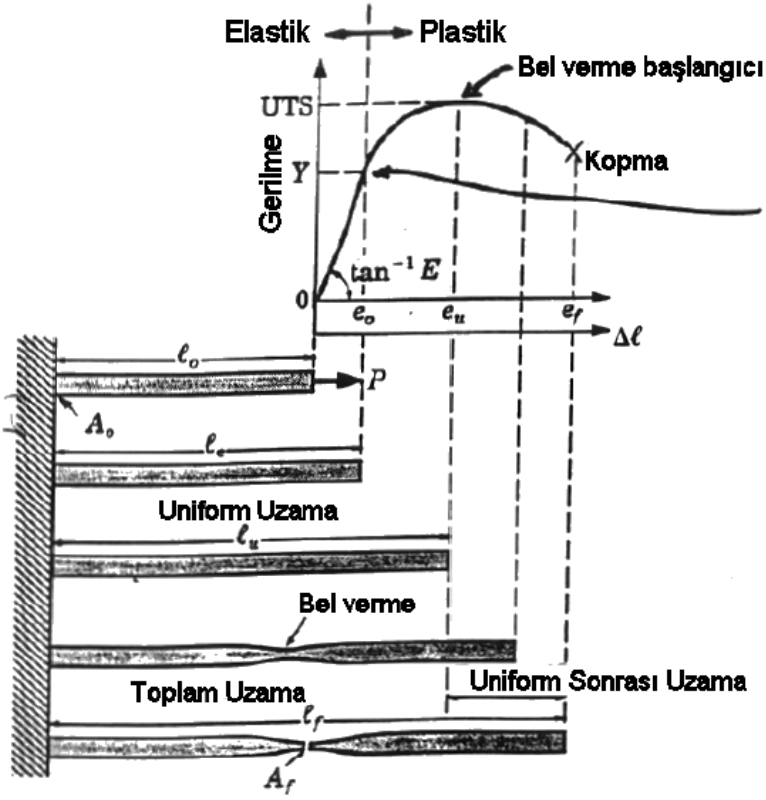
Elastik deformasyonda yük; kaldırıldıktan sonra sıfıra iner. Plastik deformasyonda ise yük kaldırıldıktan sonra sıfıra inmez, belli bir değerde kalır. Şekil 4.3, tek eksenli çekme mühendislik gerilme - mühendislik gerinimi eğrisini ve çeşitli gerinim seviyelerinde numunenin durumunu gösterir.



Şekil 4.2 Yük - uzama diyagramı (Çapan, 2003)

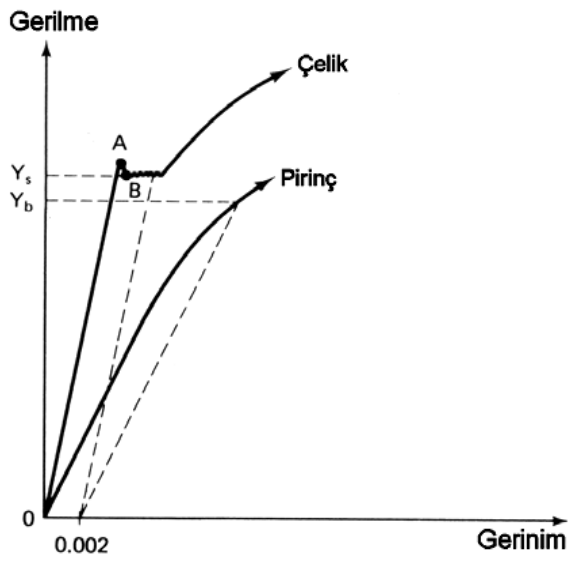
4.3 0,2 % Akma Mukavemeti

Akma sınırının Şekil 4.4' de olduğu gibi belirgin olmadığı hallerde % 0.2 plastik gerinimin meydana geldiği mühendislik gerilme değeri akma sınırı olarak kabul edilir. Bu gerilme değerinin bulunması için e = 0.002 noktasından Hook doğrusuna paralel çizilir ve gerilme gerinim eğrisini kestiği noktadaki gerilme değeri akma mukavemet değeri olarak alınır.



Şekil 4.3. Deformasyon bölgelerinin mühendislik gerilme-gerinim diyagramı ve test parçası ile ilişkisi (Çapan, 2003)

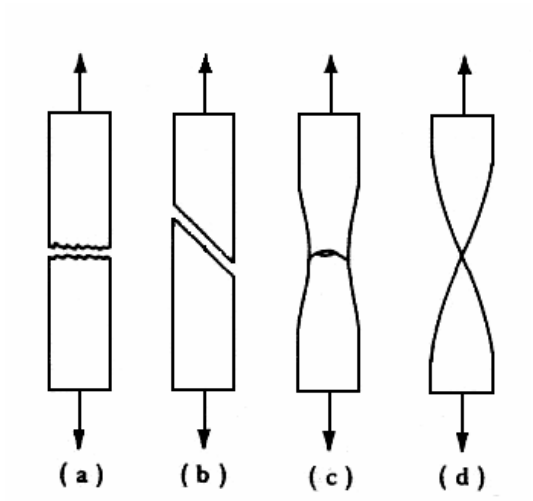
Mühendislik çekme diyagramındaki maksimum nominal gerilmeye malzemenin çekme dayanımı (mukavemeti) denir. Nominal gerilmenin maksimum değerini aldığı bu noktaya kadar (Şekil 4.1 σ_u noktası) şekil değişimi homojendir (üniformdur) yani deney çubuğunun çekme doğrultusuna dik kesiti çubuk boyunca her yerde aynı oranda azalır. Çekme dayanımının aşılması ile birlikte deney çubuğu bir noktadan büzülmeye başlar ve çekme dayanımından daha düşük bir nominal gerilme değerinde kopar.



Şekil 4.4 0,2 % akma mukavemeti (Hosford ve Caddell, 1983)

4.4 Kırılma Biçimleri

İç veya dış çatlama sonucunda malzeme ayrılması kırılma olarak adlandırılır. Kırılma, sünek ve gevrek olmak üzere ikiye ayrılır. Aşağıda çekme deneyindeki kırılma biçimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Çekme deneyinde kırılma tipleri, (a) Çok kristalli metallerde gevrek kırılma, (b) Sünek tek kristallerde kayma kırılması, (c) Çok kristalli metallerde sünek çanak - koni tipi kırılma, (d) Çok kristalli metallerde tam sünek kırılma (kesit daralması % 100)

4.4.1 Gevrek Kırılma

Gevrek kırılmada malzeme, çok az plastik şekil değiştirdikten sonra veya hiç plastik şekil değiştirmeden iki veya daha çok parçaya ayrılır. Çekme deneyinde bu ayrılma genellikle ayrılma düzlemleri boyunca oluşur. Ayrılma, normal gerilmenin maksimum olduğu kristal

düzlemleri boyunca meydana gelir. Çekmeye zorlanan çok kristalli bir metalde, gevrek kırılma yüzeyi makroskopik olarak çekme gerilmesine diktir ve çatlağın taneden taneye yayılması sırasında ayrılma düzlemlerinin doğrultusu değiştiği için de parlak taneli bir görünüme sahiptir.

Genel olarak düşük sıcaklık ve yüksek şekil değiştirme hızı, özellikle bazı sıkı düzen hegzagonal ve birçok hacim merkezli kübik metalde, gevrek kırılmayı teşvik eden faktörlerdir. Gerilme hali de kırılma tipine etki eder. Örneğin hidrostatik basınç sünekliği arttırır. Yüzey merkezli kübik metaller genellikle gevrek kırılmazlar. Buna karşılık hacim merkezli kübik ve bazı sıkı düzen hegzagonal metallerde ayrılma kırılması görülür.

4.4.2 Sünek Kırılma

Sünek kırılma belli bir miktar plastik şekil değişiminden sonra oluşur. Sünek malzemelerin gerilme - gerinim eğrileri altındaki alan büyüktür yani sünek kırılma gevrek kırılmaya kıyasla oldukça büyük enerji yutar. Altın ve kurşun gibi çok sünek malzemelerin çekme deneyinde, kopmadan önce, büzülen kesitin çok küçülmesine ve hemen hemen bir noktaya dönüşmesine karşılık (Şekil 4.5 d) çoğunlukla kesit belirli bir değere düşünce kopma olur. Sünek kırılma genellikle kayma gerilmesinin maksimum olduğu düzlemler boyunca oluşur. Sünek kırılmalarda oluşan kırılmaya şeklinden dolayı çanak - koni tipi kırılma denir. Kırılma yüzeyinin kenarlarındaki ve çekme doğrultusuyla 45° açı yapan yüzeye de kayma yanakları adı verilir. Oksit, sülfür, karbür, silikat gibi bileşikler olan kalıntılar metal ve alaşımlarda boşluk oluşumuna, dolayısıyla süneklik ve sünek kırılmaya negatif yönde etki ederler. Bu etki malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyeti bakımından olumsuzdur. Benzer şekilde örneğin dökümde oluşan boşluk ve gözenekler de sünekliğin azalmasına yol açar. Çeliklerdeki mangan sülfür gibi yumuşak ve dolayısıyla kolay şekillendirilebilen kalıntılar şekil verme işlemini doğrudan engellemeyerek iş parçasının şekil değişimine uyarlar. Fakat bu kalıntılar daha sonra malzemenin kullanım özelliklerini etkilerler.

4.5 Pekleşme, Süneklik, Tokluk ve Sertlik Tanımları

4.5.1 Pekleşme

Metallerin uygulanan yükler altında elastik bölgeyi geçerek kalıcı şekil değişimine uğraması ve buna bağlı olarak mukavemet ve sertlik değerlerinin artmasına pekleşme adı verilir.

4.5.2 Süneklik

Kopma noktasına kadar olan uzama yüzdesi sünekliğin bir ölçütüdür. Uzama yüzdesi ne kadar fazla ise malzeme o kadar sünektir. Sünek malzemenin karşıtı kırılgan (brittle) malzeme olarak adlandırılır. Süneklik şu şekilde tanımlanabilir:

Kırılmadaki % Uzama $\frac{\ell_f - \ell_0}{\ell_0}$ x 100 (4.2)

veya alan kullanarak kırılmada % kesit azalması : $\frac{A_0 - A_f}{A0}$ x 100 (4.3)

olarak yazılır. Burada;

A_0 : İlk kesit alanı

A_f : Son alan

ℓ_0 : İlk uzunluk

ℓ_f : Son uzunluk, değerlerini ifade etmektedir.

Genellikle sertlik artınca, süneklik azalır. Malzemeleri sünek yapmak için:

a - Sıcaklık yükseltilir

b - Hidrostatik basınç yükseltilir.

Çok yüksek hidrostatik basınç uygulaması kopmayı da geciktirir.

4.5.3 Tokluk

Malzemeyi kopma noktasına getirmek için gerekli enerji miktarı tokluğun bir ölçütüdür. Eşdeğer gerilme - eşdeğer gerinim eğrisi altındaki alan tokluğu verir. Bir malzeme hem tok hem de kırılgan olamaz.

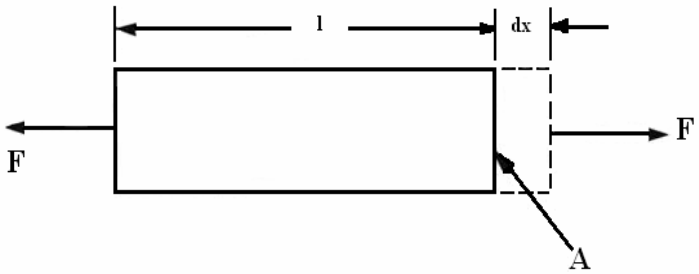
4.5.4 Sertlik

Malzemenin batmaya karşı olan direncidir. Yüksek akma mukavemeti olan metaller yüksek sertlik değerine sahiptirler. Fakat akma mukavemet değerinden sertlik değeri hesaplanamaz.

4.6 Mühendislik Gerilme, Gerinim ve Gerçek Gerilme, Gerinim Tanımları

4.6.1. Mühendislik Gerinimi ve Gerçek Gerinim

Gerçek gerinim tanımını elde etmek amacıyla aşağıdaki Şekil 4.6' da gösterilen parçaya F çekme kuvveti uygulanmaktadır. Aşağıdaki prosedür sonucu sadece gerçek gerinim tanımı elde edilmekle kalınmamakta aynı zamanda çekme işlemi boyunca gerilme artışı hızı ile alan daralış hızı ilişkilendirilmektedir.



Şekil 4.6 Çekme kuvveti uygulanan parça

$$F = \sigma . A \tag{4.4}$$

$$\ln F = \ln \sigma + \ln A \tag{4.5}$$

$$\frac{dF}{F} = \frac{d\sigma}{\sigma} + \frac{dA}{A} \tag{4.6}$$

Maksimum kuvvette ($F = F_{max}$) (Maksimum çekme dayanımında)

$$\frac{dF}{F} = 0 \quad \text{dır} \tag{4.7}$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dA}{A} \tag{4.8}$$

Yukarıdaki denklem (4.8) maksimum kuvvet noktasında gerilimin artış hızının

alanın azalış hızına eşit olduğunu göstermektedir. Burada;

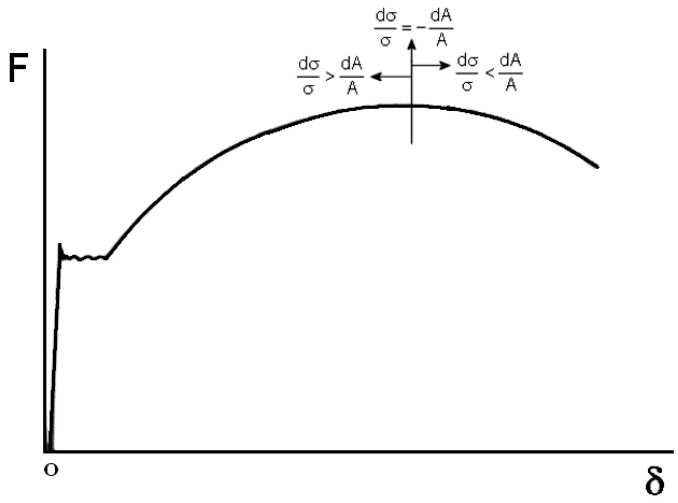
A_0: İlk kesit alanı

A: Güncel kesit alanı

ℓ_0 : İlk uzunluk

ℓ : Güncel uzunluk,

değerlerini ifade etmektedir



Şekil 4.7. Yük-uzama eğrisi (Marciniak ve Duncan, 1992)

Hacim sabitliği;

$$V=A_0\,\ell_0=A\,\ell \tag{4.9}$$

$$\ln V=\ln A+\ln \ell \tag{4.10}$$

$$\frac{dV}{V}=\frac{dA}{A}+\frac{d\ell}{\ell} \tag{4.11}$$

Hacim sabit olduğuna göre hacim değişimini ifade eden terim;

$$\frac{dV}{V}=0 \quad \text{olur.} \tag{4.12}$$

$$\frac{dA}{A}=-\frac{d\ell}{\ell} \tag{4.13}$$

(4.8) ile (4.13) eşitlenirse;

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{d\ell}{\ell} = d\varepsilon \tag{4.14}$$

elde edilir.

Mühendislik gerinim tanımı :

$$e = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} \tag{4.15}$$

Gerçek gerinim ya da logaritmik gerinim ise (4.14)'den

$$d\varepsilon = \frac{d\ell}{\ell} \tag{4.16}$$

olarak tanımlanır. dl uzamadaki diferansiyel değişimi ifade eder. (4.16) Aşağıdaki formlarda kullanılır.

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L} d\varepsilon = \int_{L_0}^{L} \frac{d\ell}{\ell} \tag{4.17}$$

$$\varepsilon = \ln \frac{\ell}{\ell_0} \tag{4.18}$$

Mühendislik gerinimi elastik sınırlar içerisinde geçerlidir ve genel olarak gerinimin % 1' den az olduğu durumlarda kullanılmalıdır. Mühendislik gerinimi ile gerçek gerinimi ilişkilendirmek mümkündür :

$$e = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\ell}{\ell_0} - 1 \rightarrow \frac{\ell}{\ell_0} = e + 1 \rightarrow \tag{4.19}$$

$$\ln\left(\frac{\ell}{\ell_0}\right) = \ln(e+1) \rightarrow \tag{4.20}$$

$$\varepsilon = \ln(e+1) \tag{4.21}$$

Hacim sabitliği kullanılarak asal yönlerdeki gerinimlerin toplamının sıfır olduğu bulunur;

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \tag{4.22}$$

Aynı zamanda hacim sabitliğinden mühendislik gerinimi içeren;

$$(1+e_1)(1+e_2)(1+e_3)=1 \tag{4.23}$$

ifadesi elde edilir.

4.6.2 Tek Eksenli Mühendislik Gerilmesi ve Gerçek Gerilme

Tek eksenli nominal ya da mühendislik gerilmesi yükün orijinal kesit alanına bölünmesiyle elde edilir;

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \tag{4.24}$$

Tek eksenli gerçek gerilme ise yükün, yük değeri hesaplandığı andaki alana bölünmesiyle elde edilir;

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{4.25}$$

İki tanımı kolaylıkla ilişkilendirmek mümkündür;

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{A}\frac{A}{A_o} = \sigma\frac{A}{A_o} \tag{4.26}$$

4.6.3 Gerçek Gerilme - Gerçek Gerinim Eğrisi

Şekil 4.8’ de alttaki eğri direkt olarak tek eksenli yük - deformasyon verisine dayanarak oluşturulan mühendislik gerilmesi - mühendislik gerinimi diyagramını göstermektedir. Mühendislik geriniminin ve mühendislik gerilmesinin büyük deformasyon bölgelerinde kullanılması uygun değildir. Gerçek gerilme değerini bulmak için iki yol izlenebilir:

Birinci yol; (4.25) ($\sigma = \frac{F}{A}$) denleminden yararlanarak gerçek gerilme değerinin bulunmasıdır.

İkinci yol ise denklem (4.26) kullanılarak ;

$$\sigma = \sigma_0 \frac{A_0}{A} = \frac{\ell_0}{\ell} = \sigma_0(1+e) \tag{4.27}$$

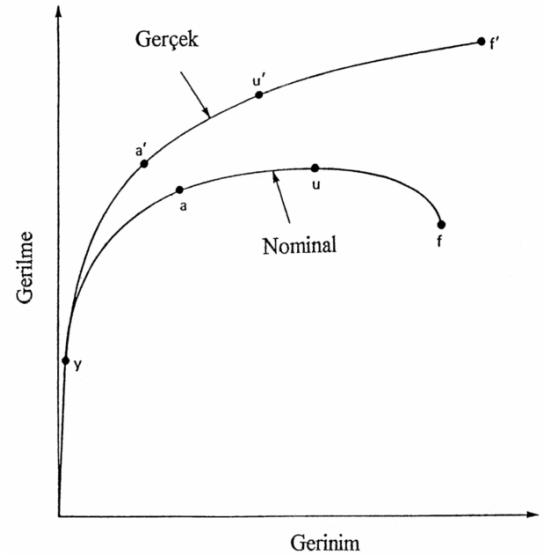
ifadesinden nominal gerilme ve nominal gerinim değerinin bulunmasıdır. Gerçek gerinim değeri ve mühendislik gerinim değeri ya;

$$\varepsilon = \ln\frac{\ell}{\ell 0} = \ln\frac{A0}{A} \quad \text{ifadesinden , ya da} \tag{4.28}$$

$$\varepsilon = \frac{\ln \ell}{\ell 0} = \ln\left(1 + \frac{\ell - \ell 0}{\ell 0}\right) = \ln(1 + e) \tag{4.29}$$

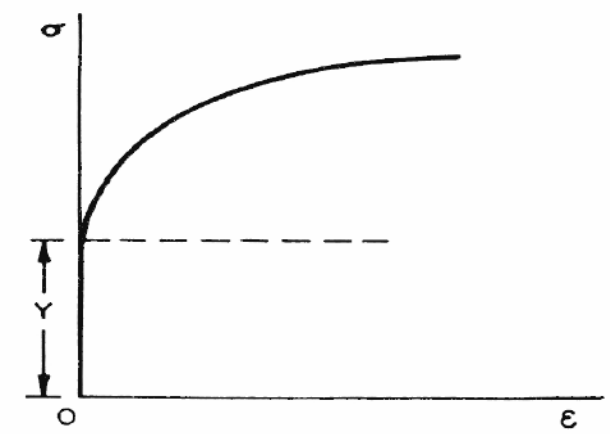
ifadesi ile nominal gerinim değeri kullanılarak bulunur.

Gerçek gerilme ve gerçek gerinim değerleri hesaplanırken eğer nominal gerinim değerleri kullanır ise maksimum gerilme noktasına denk gelen tepe notasından sonraki üniform olmayan bölgede bu değerler geçerli değildir.



Şekil 4.8. Gerçek ve nominal gerilme-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması (Hosford ve Caddell, 1983)

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi mühendislik gerilmesi - mühendislik gerinimi diyagramında bir tepe noktası oluşmasına karşın gerçek gerilme - gerçek gerinim diyagramında tepe noktası oluşmaz, kopma noktasına kadar gerilme değeri artarak devam eder. Bu nokta gerçek gerilme tanımından kaynaklanmaktadır; yani kuvvet sürekli olarak anlık alana bölündüğü ve alanın da sürekli azalmasından dolayı gerilme değeri azalmamakta artmaktadır. Büyük deformasyon bölgelerinde genellikle elastik deformasyonlar ihmal edilebilir. Böyle bir grafikte ilk elastik bölge görünmezdir ve gerilme eğrisi ilk akma gerilmesi Y'ye dikey olarak zıplar. (Şekil 4.9)



Şekil 4.9. Büyük deformasyon durumunda elastik deformasyonun durumu
(Hosford ve Caddell, 1983)

4.7. Gerinim Hızı

Gerinimin zamana karşı değişimi gerinim hızı olarak adlandırılır.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{4.30}$$

Gerçek gerinim hızı ;

$$\dot{\varepsilon} = \frac{dH / H}{dt} = -\frac{1}{H}\frac{dH}{dt} = -\frac{V}{H}(boyut : zaman^{-1}) \tag{4.31}$$

olarak bulunur. Basma işlemi için presin sabit hızında artan gerinim hızı elde edilir. Gerinim hızını sabit tutmak için pres hızını düşürmek gerekir. Çekme işlemi için tersi geçerlidir.

Gerçek gerinim hızı gibi mühendislik gerinim hızı da tanımlanabilir.

$$\dot{e} = \frac{dH / H_0}{dt} = -\frac{1}{H_0}\frac{dH}{dt} = -\frac{V}{H_0} \tag{4.32}$$

İşlem boyunca gerçekleşen gerinim hızı ortalaması şu şekilde hesaplanabilir;

Ortalama gerçek gerinim hızı;

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_0}{T} = \frac{\varepsilon_0}{(H_0 - h)/(V_0 / 2)} = \frac{\varepsilon_0 V_0}{2(H_0 - h)} \tag{4.33}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{V_0}{2} \frac{\ln\left(\frac{H_0}{h}\right)}{(H_0 - h)} \tag{4.34}$$

olarak hesaplanır. Burada ;

h : İşlemin bittiği andaki yükseklik,

V_0 : İlk pres hızı

H_0 : İlk yükseklik

T : Basma operasyonunun tamamlandığı zamandır.

Ortalama mühendislik gerinim hızı ise ;

$$\bar{e} = \frac{e_0}{T} = \frac{e_0}{(H_0 - h)/(V_0/2)} = \frac{(H_0 - h)/H_0}{(H_0 - h)/(V_0/2)} \tag{4.35}$$

$$\bar{e} = \frac{V_0}{2H_0} \tag{4.36}$$

Gerinim hızı hassasiyeti yüksek sıcaklıklarda daha fazla olur. Gerinim hızının artırılmasının gerilme – gerinim eğrisine etkisi sıcaklık etkisinden daha azdır.

Gerinim hızının, yükleme veya deformasyon hızı (v) ile karıştırılmaması gerekir. Tek eksenli bir çekme deneyi gözönüne alınırsa, numunenin başlangıçtaki ölçme uzunluğu L_0 ve çekme hızı Vçek olduğuna göre, nominal gerinim hızı ($\dot{e}$), 4.37 eşitliği ile hesaplanmaktadır. Deformasyonun herhangi bir safhasında ölçme uzunluğu L değerine ulaştığında, bu noktadaki gerçek gerinim hızı ($\dot{\varepsilon}$) ise (4.38) eşitliği ile hesaplanır. Deformasyonun sabit çekme hızı altında artması ile $\dot{\varepsilon}$ azalmaktadır. (Gillis ve Gross, 1985)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_{çek}}{L_0} \tag{4.37}$$

$$\dot{\varepsilon} = \left(\frac{L_0}{L}\right)\dot{e} = \frac{V_{çek}}{L} \tag{4.38}$$

5. SAC ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

Sac şekillendirme, sac malzemeyi bir çatlama, yırtılma ve aşırı bir lokal incelme olmaksızın istenen şekle sahip bir parça haline getirme işlemi veya işlemleridir. Metalik sacların şekillendirilmesi günümüzde genellikle mekanik veya hidrolik preslerde yapılmaktadır. Bükme (eğme), germe, derin çekme, sıvama en genel sac şekillendirme yöntemleridir.

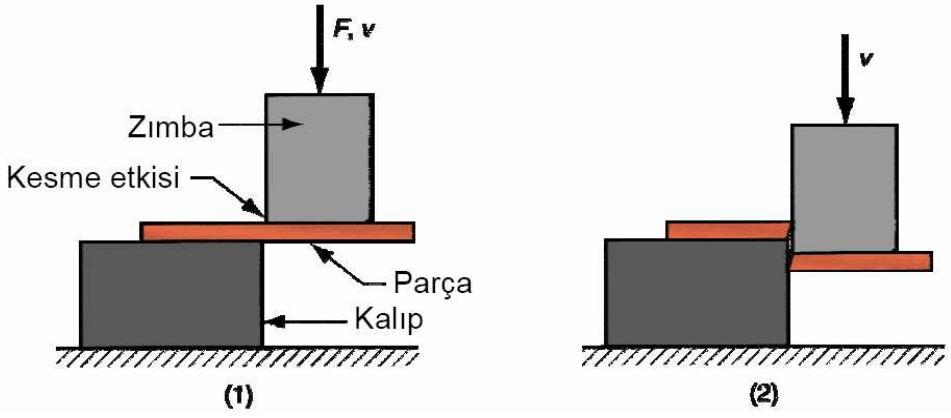
Sac malzemenin şekillendirme sırasında gerinim dağılımının tek biçim olması ve bu gerinimlerin her malzeme ve yöntem için farklılaşan sınır değerleri aşmaması gerekmektedir. Gerekli olan şekillendirilme kabiliyeti, parça şekline göre değişmektedir. Çünkü bir uygulama için mükemmel şekillendirilebilirliğe sahip olan bir çelik sac, başka bir uygulamada şekillendirilebilme açısından zayıf kalabilmektedir.

Bu bölümde, tipik bazı sac şekillendirme yöntemleri olan kesme, bükme, germe, derin çekme, ütüleme ve tekrar çekme (kademeli çekme) yöntemlerinin esaslarına kısaca değinilmektedir.

5.1 Kesme Yöntemi

Sac ve levhaların dilme, ayırma, taslak kesme, delme, çentik açma, yarma, çapak alma gibi işlerinde kesme yöntemi kullanılır.

Dilme işleminde metalik bant veya sac, metal kaybı olmadan belirli şekillerde kesilir. Ayırma işlemi dilmeye benzer, fakat arka arkaya kesilen iki yararlı parçanın kesilen kenarları birbiri ile uyum göstermez. Taslak kesme, parçanın tüm çevresince kesilerek elde edildiği işlemdir.



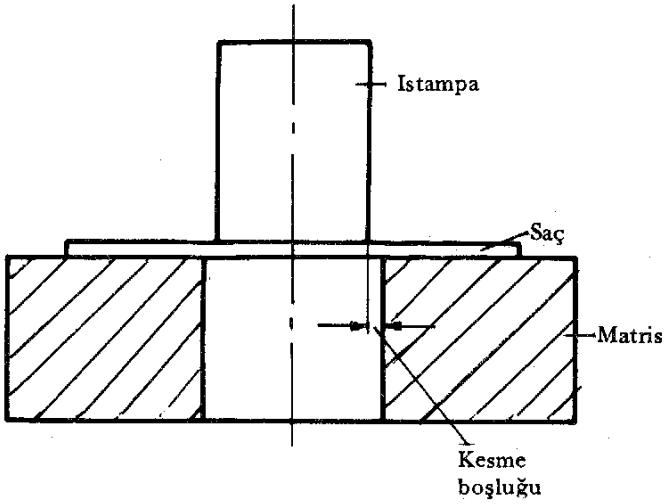
Şekil 5.1 Sac metalin kesilmesi (Vural, 2003)

Genelde malzeme prese bant halinde beslenir ve artık malzeme iskelet halinde çıkar. Delme işlemi, taslak kesme işlemine benzer ancak taslak kesme işleminde kalıbın dışında kalan parçalar, delme işleminde ise kalıbın içinde kalan parçalar atılır.

Çentik açma işleminde sac parçanın köşelerinde ufak metal parçaları kesilerek daha sonraki şekillendirme işlemine hazırlanır. Yarma işleminde sacın bir bölümünde metal kaybı olmadan daha sonraki kademeye hazırlık olarak basit bir kesme işlemi yapılır. Çapak kesme, şekillendirilmiş parçanın son boyutlarına getirilmesi için uygulanan bir işlemdir.

Bir sacın kalıpla kesilmesi sırasında, ıstampa ve matris tarafından metale birbirine eşit fakat aksi yönde ve aralarında kesme boşluğu kadar uzaklık bulunan kesme (makaslama) gerilmeleri uygulanır. Böylece matris deliğinin ve ıstampanın çevresi şeklinde bir sac parça kağıdın makasla kesilmesine benzer şekilde kesilir. (Çapan, 2003)

Saclar, preslerde kalıpla kesilerek istenen çevre şeklinde parçalar elde edilir. Sac kesme kalıpları en basit şekilleriyle bir kesme matrisi ve ıstampadan ibarettir. (Çapan, 2003)



Şekil 5.2 Sac kesme kalıbı (Çapan, 2003)

Kesme işlemi her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Kalite açısından yüzey düzgünlüğüne, boyutsal hassasiyetine ve kesilen parçanın çarpılma miktarına dikkat edilir. Kesme yüzeyinin sac düzlemine mümkün olduğunca dik olması, çapak ve çift kesme bandından yoksun olması, en az köşe yuvarlanmasına ve en küçük kırılma açısına sahip olması istenir. Kaba kesme yüzeylerinde traşlama yapılarak düzeltmeler yapılır.

Kalıpta kesmede, ıstampa ile matris arasında belirli bir boşluk bırakılmalıdır. Bu boşluk W ile gösterilirse, kalınlığı 3 mm’ ye kadar olan saclar için,

$$W = 0{,}005.\ t.\ \sqrt{\tau} \qquad (5.1)$$

3 mm’ den kalın saclar için,

$$W = (0{,}01.t - 0{,}015).\sqrt{\tau} \qquad (5.2)$$

alınabilir.

Kesme boşluğunu sadece sac kalınlığına bağlı olarak veren formüller de vardır;

Düşük karbonlu çelik ve pirinç için

$$W = \frac{1}{40}.t \qquad (5.3)$$

Yüksek karbonlu çelik için

$$W = \frac{1}{30}.t \qquad (5.4)$$

Alüminyum için

$$W = \frac{1}{20}.t \qquad (5.5)$$

olarak alınmalıdır.

Çevre kesildiği takdirde, matris kesilecek çevre boyutlarında işlenerek ıstampa küçük alınır, buna karşılık delik delindiği takdirde, ıstampa, delinecek delik boyutunda alınarak matris büyük işlenir. (Çapan, 2003)

Kesme Kuvveti :

$$F_k = l . t . \tau \qquad (5.6)$$

denkleminden ya da

$$F_k = 0{,}7 . \sigma_Ç . t . l \qquad (5.7)$$

denkleminden hesaplanabilir.

Bu ifadede;

l = kesilecek malzemenin çevre uzunluğu,

t = sac kalınlığı,

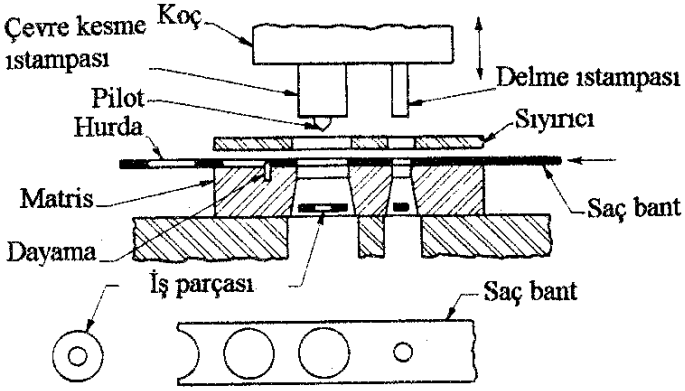
τ = kesilecek malzemenin kayma mukavemeti,

$\sigma_ç$ = malzemenin çekme gerilmesi

Malzeme özellikleri arasında kesme yüzeyi kalitesinde en etkili olanlar malzemenin kalınlığı ve mekanik özellikleridir. Belirli bir zımba – kalıp arası açıklık için malzemenin yumuşak olması, köşelerdeki yuvarlanma miktarının artmasına neden olur. Ayrıca malzeme kalınlığı arttıkça yuvarlanmış bölge derinliği artar. Belirli bir kalınlık ve belirli zımba - kalıp arası açıklık için, malzeme sünekliği arttıkça, kesme bandı derinliği artar, yumuşak malzemelerde çapak yüksekliği sert malzemelere oranla daha fazla olur. Kalınlığın artması da çapak yüksekliğini arttırır.

Kalıp özellikleri arasında kesme yüzey kalitesini en fazla etkileyen faktör zımba - kalıp arası açıklıktır. Önemi dolayısıyla zımba - kalıp arası açıklığı çoğu kez kesme yüzeyi kalitesini kontrol eden yegane faktör gibidir. Genelde bu açıklığın seçimi tecrübelere bağlı kabullere göre yapılmaktadır. % 2 - 7 arasında değişen söz konusu açıklık, sünek malzemeler için küçük, sert ve kırılgan malzemelerde daha büyük tutulmaktadır. Belirli kalınlıkta ve belirli özellikteki malzeme için, zımba - kalıp arası açıklık arttıkça kırılma açısı büyür, yuvarlanmış bölge genişler, kesilen parçanın çarpılma miktarı artar, çapak yüksekliğinde artış görülür. Zımba - kalıp arası açıklık yeterli değilse kesme yüzeyinde ikinci bir kesme bandı oluşarak, yüzey düzgünlüğünü bozar. Zımba ve kalıp kenarlarının keskinliği de kesme yüzeyi kalitesini etkiler. Keskinliğini kaybetmiş kenarlar, çapak yüksekliği ve yuvarlanmış bölge derinliğinin artmasına sebep olur.

Kesme işleminde ekonomikliğin sağlanması, iyi bir tasarımla artık metalin azaltılmasıyla gerçekleştirilebilir. Ayrıca sürekli malzeme beslenerek, preslerin yüksek hızlarda çalıştırılması da kesme maliyetini azaltır. Birleşik özel kalıplarla değişik kesme işlemleri aynı anda yapılabilir. Ayrıca adımlı kalıplar kullanarak da malzeme preste ilerlerken adım adım farklı kesme eğimlerine uğratılabilir.



Şekil 5.3 Adımlı delme ve kesme kalıbı (Çapan, 2003)

Istampa ve matrisler, bir süre çalıştıktan sonra körlenir. Bu durumda, kesici ağızlar sivriliklerini kaybederek yuvarlaklaştıklarından kesilen parçalar çapaklı çıkar. Körlenen kalıplar sökülerek ıstampa ve matris satıh taşlama tezgahında taşlanır. (Yurci, 1991)

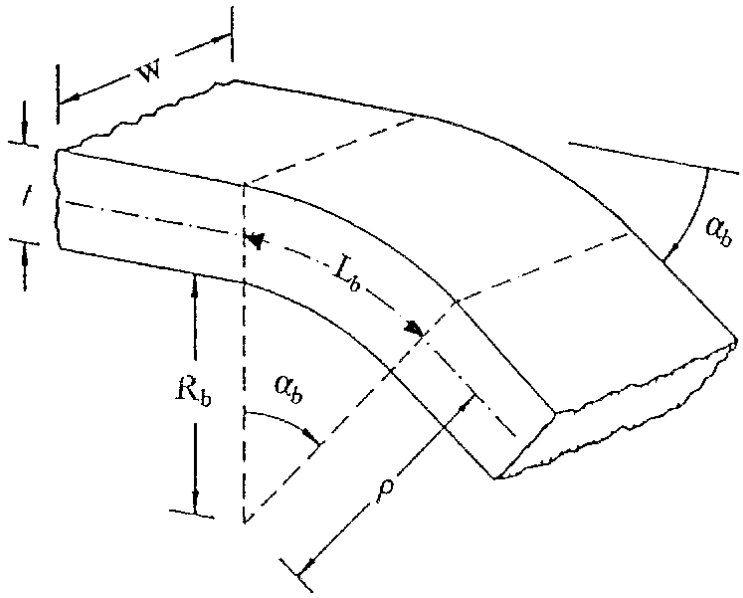
Kesmede son kesilen parça daha öncekileri iterek aşağı düşmelerini sağlar. Matris deliği 4 - 5 mm boyunda silindirik bir kısımdan sonra konik olarak işlenir. Böylece kesilen parçaların matris içinde yığılmaları önlenmiş olur. Konik kısmın eğimi % 5 alınabilir.

Paslanmaz çelik sacların kesilmesi, pekleşme özelliklerinden dolayı eşdeğer karbonlu saclara göre daha fazla kuvvet gerektirir. Malzeme sünek olduğundan kesme boşluğu dar olmamalıdır. 2 mm' den kalın saclarda kalınlığın % 5' i, daha ince saclarda kalınlığın % 3' ünün kesme boşluğu olarak alınması tavsiye edilir. (Temel ve Aran, 2004)

Paslanmaz çelikler, kalıpta yağlayıcı kullanmadan da kesilebilir. Yağlayıcı kullanılması halinde kuvvet ve güç ihtiyacı düşer, dolayısıyla takım ömrü artar. Kesme boşluğunun doğru ayarlanması çok önemlidir. Dar boşluklar hassas ayar gerektirir ve kalıp aşınmasını arttırır. Gereğinden büyük boşluklar ise sünek paslanmaz çeliklerde kesme yüzeyinin bozulmasına yol açar. En uygun boşluk, kullanılan takım, iş parçası geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı olarak ayarlanır. Delme ve pul kesme kalıpları da karbon çelikleri için yapılanlara kıyasla daha hassas yapılmalıdır. Kesme boşluğu kalınlığın % 10' unu geçmemelidir. 1 mm ve daha ince saclarda, tavsiye edilen kesme boşluğu (her tarafta) 0,025 ile 0,035 mm arasındadır. Kesme kuvvetinin düşürülmesi için kalıp veya zımbanın açılı yapılması gerekebilir. Zımba üstüne malzemenin kaynamasının önlenmesi için yüksek viskoziteli yağlayıcılar kullanılabilir. Delik delme işlemlerinde, en düşük çap sac kalınlığının 2 katından az olmamalıdır. Birden fazla delik olduğunda, delikler arası uzaklık en az sac kalınlığı kadar olmalıdır. (Temel ve Aran, 2004)

5.2 Bükme Yöntemi

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan sac şekillendirme yöntemlerinden bir tanesi de bükme işlemidir. Bükme, bir sac parçasının bir kısmının, bulunduğu düzlemle verilmiş bir açı yapan başka bir düzleme gelmesini sağlamak için yapılan işlem olarak tanımlanmaktadır. Belirli oranda bükülmüş bir sac parçada, büküm bölgesinin geometrisi Şekil 5.4' de görülmektedir. Bu bölgenin geometrisini sac kalınlığı (t), sac genişliği (w), büküm açısı (α_b), büküm yarıçapı (R_b), tarafsız (nötr) eksenin yarıçapı (ρ) ve nötr eksende büküm yayının uzunluğu (L_b) oluşturmaktadır. Büküm derecesinin artması demek, büküm yarıçapının (R_b) azalması ve büküm açısının (α_b) artması demektir.



Şekil 5.4 Büküm bölgesinin geometrisi (Marciniak ve Duncan, 1992)

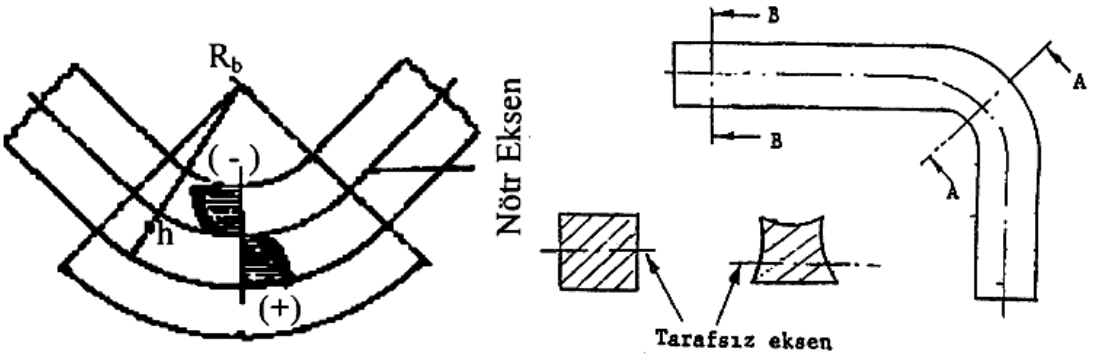
Uygulanan bükme işlemlerinde, düzlemler arasında açılar oluşturulabileceği gibi, eğrilik yarıçapı da verilebilmektedir. Böylece, eğri bükülmüş parçalar da elde edilebilir.

Bükme işleminin temelini, basma ve çekme gerilmelerinin bir arada mevcut bulunduğu plastik şekillendirme işlemi oluşturmaktadır. Bükülen parçanın dış tarafında malzeme uzamaya çalışmakta ve çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu sırada, parça kalınlığına da bağlı olarak, parça iç yüzeyinde basma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu bölgede malzeme, basma gerilmelerinin de etkisiyle kısalmaya çalışmaktadır. Belli kalınlıktaki bir sac malzeme için çekme ve basma gerilmeleri, azalan şekillendirme yarıçapı ile artmaktadır. Belli bir yarıçap değerine kadar, şekillendirme işlemi elastik bölgede kalırken, sınır bir yarıçap değerinden sonra plastik şekillendirme bölgesine girilmektedir. Dolayısıyla, bu noktada metal malzemeler için bükülebilirlik olarak ifade edilen bir kavram önem kazanmaktadır. Bir malzemenin herhangi bir kopma olmadan durabileceği en küçük bükme çapı, o malzemenin bükülebilirlik derecesini tanımlamaktadır. (Çapan, 2003)

Bir eğme momentinin tatbik edilmesi ve bükme derecesinin artması ile, başlangıçtaki büküm kesitinin ortasında kalan tarafsız eksen iç yüzeye doğru yaklaşmakta ve ρ yarıçapı azalmaktadır. Gerinimin tarafsız eksenden uzaklık ile orantılı olmasından dolayı, çekme gerilmelerine maruz kalan dış yüzeydeki lifler, basma gerilmelerine maruz kalan iç yüzeydeki liflerden daha fazla gerinirler. Bu durumda, hacim sabitliğinin korunmasından dolayı sac kalınlığının azalması gerekmektedir. (Dieter, 1988)

Bükülebilirlik işleminde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer kavram da

tarafsız eksendir. Herhangi bir şekillendirme işlemine tabi tutulmamış olan düz bir levhanın tam ortasından, levha yüzeyine paralel olacak şekilde, tarafsız bir eksenin geçtiği varsayılmaktadır. Böyle bir varsayım, şekillendirme işlemlerini matematiksel olarak inceleme kolaylığı sağlamaktadır. Bu tarafsız eksen, bükme işlemi öncesi ve sonrası uzunluğunu korumakta ve sabit kalmaktadır. Değişen tek şey, bu eksenin merkeze olan mesafesidir. Küçük bükme çaplarında çalışıldığı durumlarda, tarafsız eksen merkezden iç kısma, basma gerilmelerinin olduğu kısma doğru kaymaktadır. Tarafsız eksenin hareketi, sac kalınlığının bir fonksiyonudur ve tarafsız eksenin iç yüzeyden olan mesafesi, ince saclarda kalınlığın 0,5' i, orta kalınlıktaki saclarda (t = 0,75 – 3 mm) 0,4' ü olarak alınabilir. Bükme işleminde ortaya çıkan kesit distorsiyonu ve tarafsız (nötr) eksenin iç yüzeye yaklaşması açıkça görülmektedir. (Yurci, 1997)



Şekil 5.5 Bükme işleminde tarafsız eksenin yer değiştirmesi ve kesit distorsiyonu (Yurci, 1997)

Birçok parça, sacların bir veya birkaç yerinden basit şekilde bükülmesi ile şekillendirilir. Belirli bir malzeme kalınlığı için, bükme yarıçapı azaldıkça, dış yüzeydeki çekme birim şekil değişimi artar. İri tane boyutuna sahip malzemede dış yüzeydeki aşırı birim şekil değiştirme, portakal yüzeyi gibi pürüzlü bir yüzeyin elde edilmesine yol açar. Minimum bükme yarıçapı (R_b) veya bükme yarıçapı / kalınlık oranı (R_b / h) iki koşula bağlı olarak tayin edilir.

Birinci koşulda kriter olarak boyun verme olayı göz önünde tutulur. Bükme esnasında dış yüzeydeki uzama, hacim sabitliğinden dolayı kalınlığın azalmasına yol açar. Bükme yarıçapı küçüldükçe malzeme kalınlığı daha fazla incelir. Dış yüzeydeki e_t uzama miktarı, malzemenin çekme deneyindeki e_h homojen uzama miktarını aşmamalıdır. Aksi halde bölgesel boyun verme olayı sonunda malzemede zayıflama, dolayısıyla çatlama görülebilir.

Dış ve iç yüzeylerde birim şekil değiştirmeler mutlak değer olarak eşittir ve

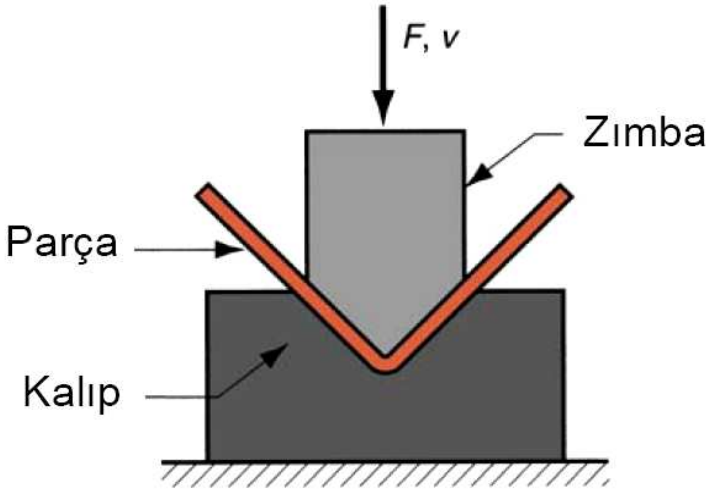
$$t_{dıı} = -t_{iç} = \frac{1}{\left(\frac{2R_b}{t}\right)+1} \tag{5.8}$$

denklemiyle hesaplanır. Bu denklemden $t_{iç}$ için elde edilen değerle, deney sonuçları birbirine yakındır. Buna karşılık $t_{dış}$ değerleri deneysel sonuçlardan küçüktür. (Çapan, 2003)

Çoğu şekillendirme uygulamalarında, bükme işleminin neden olduğu bazı olumsuzluklarla karşılaşmak mümkün olmaktadır. Bunlardan bir tanesi, metal yüzeyinin portakal kabuğu görünümüne sahip olmasıdır. Uygun olmayan içyapı özelliklerine sahip metal malzemelerin kullanılması sonucu gerçekleştirilen bükme işlemlerinde, bu tip bir kusurla karşılaşmak olasıdır. Bu durum, ince taneli bir içyapıya sahip metal malzemelerin kullanılması ile önlenebilmektedir.

Bir diğer husus ise en küçük bükme yarıçapı değeri ile ilgilidir. En küçük bükme yarıçapı değeri iki kritere bağlıdır. Çekme gerilmeleri sonucu malzemenin düzgün uzama değerlerinin aşılması, lokal bölgelerde boyun vermeye neden olabilmektedir. Ayrıca kırılma, bükme işlemleri için limit oluşturmaktadır. Bu durum, doğrudan alanda meydana gelen azalma ile alakalıdır. Çekme gerilmelerine haiz bölgede, gerilme şiddetine bağlı olarak, alanda azalma meydana gelmesi sonucu parça hasara uğrayabilmektedir.

Son olarak da ezilme kavramından bahsedilebilir. Bükme işlemi uygulanan parçanın iç yüzeyinde, çok sıkı bükme yarıçapları kullanılması neticesinde, ezilmeler görülebilmektedir. Bunun önüne geçmek için yapılması gereken, yine daha uygun bükme çaplarının seçilmesi olacaktır.



Şekil 5.6 Bükme yönteminin şematik gösterilişi (Vural, 2003)

Malzemenin çatlamadan bükülmesi için bükme yarıçapı belirli bir değerin altında olamaz. Bu değer genellikle malzeme kalınlığına göre belirlenir. Bükme işleminde, bükme yarıçapı şekillendirme sınırını oluşturur. Bu sınır malzemeden malzemeye değişir. Aynı malzemenin soğuk işlem görmüş durumunda R_b daha büyük seçilmelidir. Bazı metallerde bükme yarıçapı sıfır alınabilir, yani malzeme kendi üzerine katlanabilir. Ancak kalıp ve zımbayı hasara uğratmamak için bükme yarıçapı 0,8 mm' den küçük tutulmaz. Yüksek mukavemetli malzemelerde ise bükme yarıçapı kalınlığın en az 5 katı seçilir. Bükme yarıçapının tayininde daha etkin sınırlandırıcı koşul malzemenin kırılma olayıdır. Burada malzemenin çekme deneyindeki kesit daralması değeri r = (A_o - A_s) x A_o kriter olarak kullanılmaktadır. Bu durumda minimum bükme yarıçapı aşağıdaki bağıntılara göre seçilir :

$$R_b = h.\left(\frac{1}{r} - 1\right) \qquad r < 0{,}2 \text{ için} \qquad (5.9)$$

$$R_b = h.\frac{(1-r)^2}{2r - r^2} \qquad r > 0{,}2 \text{ için} \qquad (5.10)$$

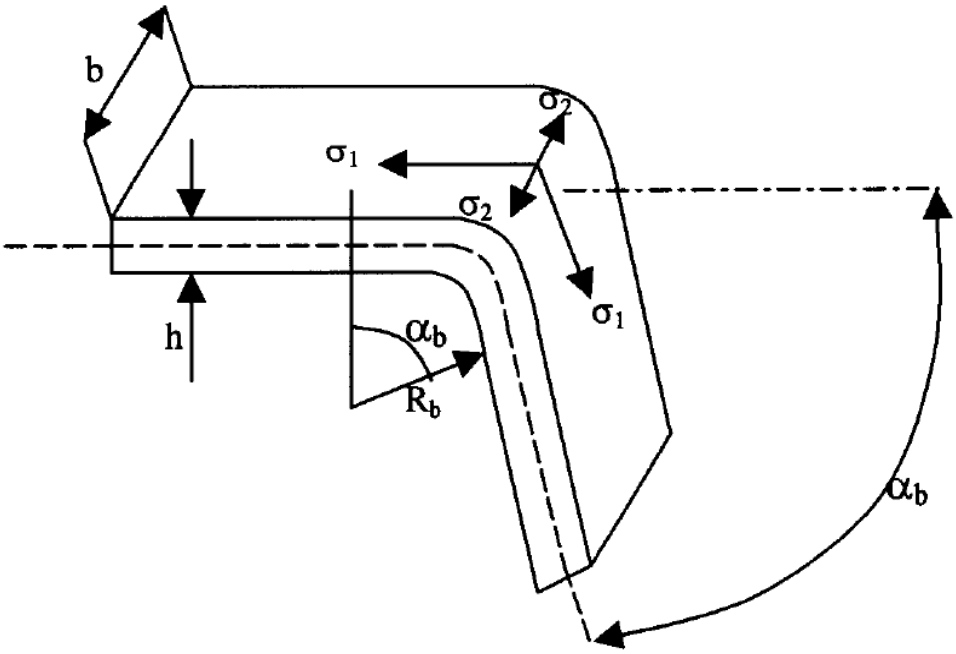
Soğuk plastik şekil değiştirmeye uğramış malzemelerde taneler yönlenmiş olduğundan, mekanik özellikler de yönlere göre farklılık gösterir. Bu durumlarda daha fazla bükme yapabilmek için bükme ekseni daha önceki plastik şekil değiştirme yönüne dik tutulmalıdır. Eğer eğme uzunluğu (eğme açısına paralel yönde) kalınlığın 8 katından fazla olursa sabit bir minimum eğme açısına ulaşılabilir.

Metalin temperlenmesi minimum eğme açısını etkiler. Yüksek sıcaklıkta temperlenmiş çelik (düşük sertlik yüksek süneklik) 180 ^{o}’ ye kadar çatlamadan yada yırtılmadan bükülebilir. Eğme açısı hadde yönüne dik yöndeki eğmelerde, hadde yönüne paralel eğme açısından daha düşüktür.

Düşük karbonlu çeliklerin eğme işleminde eğme eksenine dik olan kenarlarda etki azdır, fakat kesme sırasında (gazla yada elektrik ark ile) deformasyon sertleşmesine yada sıcaklık nedeniyle sertleşme gösterebilecek malzemelerde kenar etkisi fazladır. Bu tür malzemelerde, eğme bölgesine denk gelecek yanık yerleri ve sertleşmiş bölgeleri kaldırmak kırılmayı engellemek açısından gereklidir. Eğme için köşelerin yüzeye paralel olarak düzleştirilmesi gereklidir. Yanmanın olduğu tarafın dış kısımda kalması eğme işlemi sırasında kırılma riskini arttırır.

Hadde yönüne dik yöndeki eğmeler hadde yönüne paralel yönden daha keskin olarak yapılabilir.

Bükme işleminde dış yüzeyin şekil değiştirme kabiliyeti, yüzeydeki gerilme - birim şekil değiştirme durumuna bağlıdır. Daha önce belirtildiği gibi iki eksenli çekme gerilmesinin oluştuğu durumlarda, metalin şekil değiştirme kabiliyeti oldukça azalır. Bükülen parçada genişlik / kalınlık (b / h) oranı arttıkça, iki eksenli çekme gerilmesinde σ_2 / σ_1 oranı artar. Burada σ_1 çevresel çekme gerilmesi, σ_2 ona dik yöndeki çekme gerilmesidir.

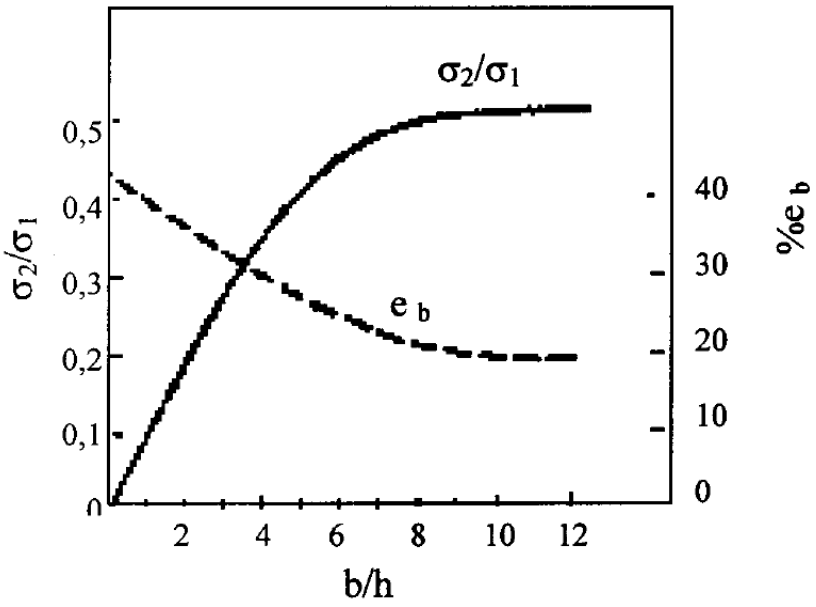


Şekil 5.7 Bükme işlemi ve kullanılan terimlerin tanımı (Çapan, 2003)

Şekil 5.7' de görüldüğü gibi b / h oranı küçük iken gerilme durumu daha çok tek eksenli çekme haline benzer durumdadır. b / h oranı arttıkça σ_2 / σ_1 oranı artar. Sonunda b / h = 8 değerinden sonra σ_2 / σ_1 = 0,5 sabit değerine ulaşır. Kırılma olmaksızın malzemeden sağlanabilen maksimum plastik şekil değiştirme miktarı ise b / h ile ters orantılı olarak değişir. b / h oranı büyük ise aşırı plastik şekil değiştirme durumunda çatlak, bükme genişliğinin orta kısmında görülür. Ancak malzemenin kenarları düzgün işlenmeyip kaba durumda ise kenar çatlaklarına da rastlanabilir. Genişliği az olan malzemelerin bükülmesinde çatlak oluşursa, genellikle kenar çatlağı halindedir. Çünkü bu durumda genişliğin orta kısmında iki eksenli çekme gerilmesi durumu ihmal edilecek kadar zayıftır.

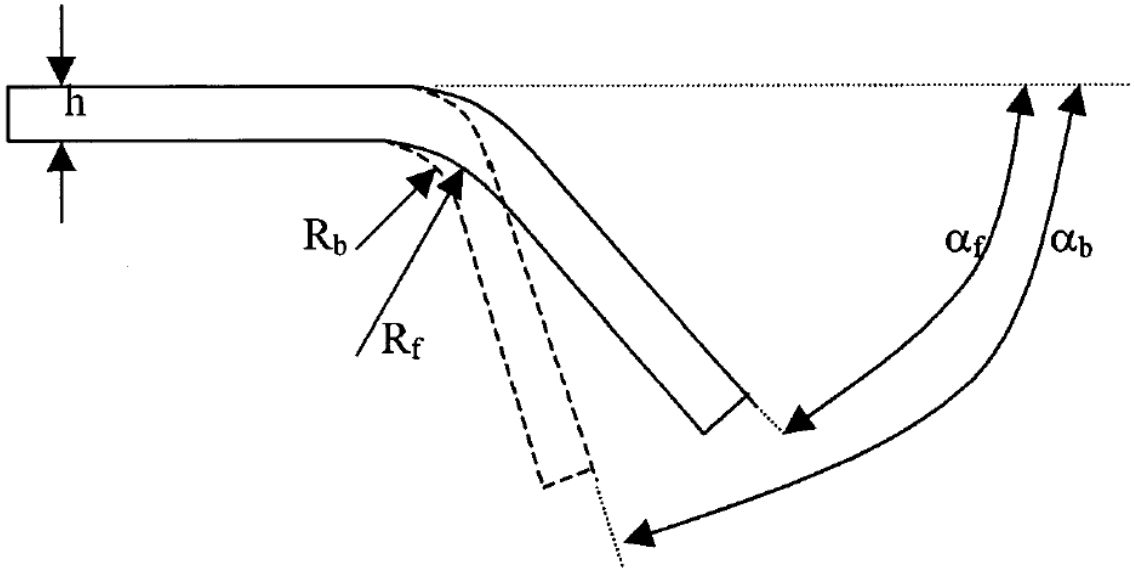
b / h > 8 durumunda minimum bükme yarıçapı R_b oldukça küçük değerler alır. b / h < 8 için genellikle daha büyük bükme yarıçaplarına gerek vardır. Malzemenin bükülebilme kabiliyetini artırmak için, bükülecek malzeme kenarlarının keskin, çapaklı ve pürüzlü

olmamasına dikkat edilmelidir.



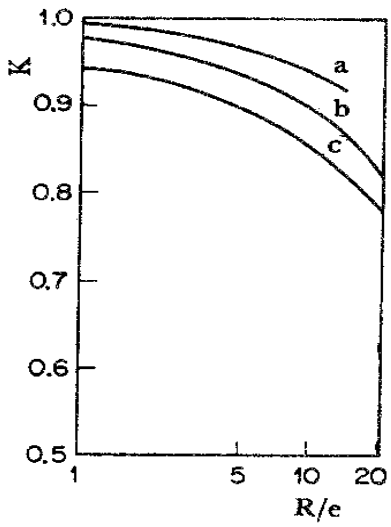
Şekil 5.8 Bükme işleminde genişlik / kalınlık oranının iki eksenli gerilme hali ve dolayısıyla malzemenin bükülebilme kabiliyetine (% e_b) etkisi (Kayalı ve Ensari, 1986)

Bükme işleminde gerilme durumu oldukça karmaşıktır. Ancak nötr düzlemde malzeme elastik davranış gösterir. Bükme kuvveti malzemeye uygulandığı sürece nötr düzlemde var olan elastik gerilme, kuvvet kalkınca yok olur. Böylece bükülen parçada, bükme kuvvetinin kalkması ile geriye yaylanma görülür. Bu arada bükme açısı ve bükme yarıçapı da büyür.



Şekil 5.9 Geriye yaylanma (springback) olayının şematik gösterilişi (Çapan, 2003)

K, geri yaylanma faktörü olarak adlandırılır. K = 1 geri yaylanma olmadığını, K = 0 ise kalıcı şekil değişimi olmadığını gösterir. Şekil 5.10' da geri yaylanma faktörünün bazı malzemelere göre değerleri görülmektedir.



Şekil 5.10 Geri yaylanma faktörü. K (a) 7075-O alüminyum, (b) Östenitik paslanmaz çelikler, (c) 2024-T alüminyum (Çapan, 2003)

Bükme miktari az (R_b / h oranı büyük) ise elastik bölge daha yaygın, geriye yaylanma olayı daha fazla olur. Malzemenin $\sigma_{0,2}$ akma gerilmesi büyüdükçe ve E elastiklik modülü küçüldükçe elastik gerilme daha büyük olur. Bu durumlarda geriye yaylanma olayı 5.11' deki yaklaşık bağıntılara göre daha fazla olur. (Çapan, 2003)

$$\frac{R_b}{R_f} = 4\left(\frac{R_b\sigma_{0,2}}{h.E}\right)^3 - 3\left(\frac{R_b\sigma_{0,2}}{h.E}\right) + 1 \qquad (5.11)$$

R_b = Bükme kalıbının yarıçapı.

R_f = Parçanın geriye yaylanmadan sonraki yarıçapı.

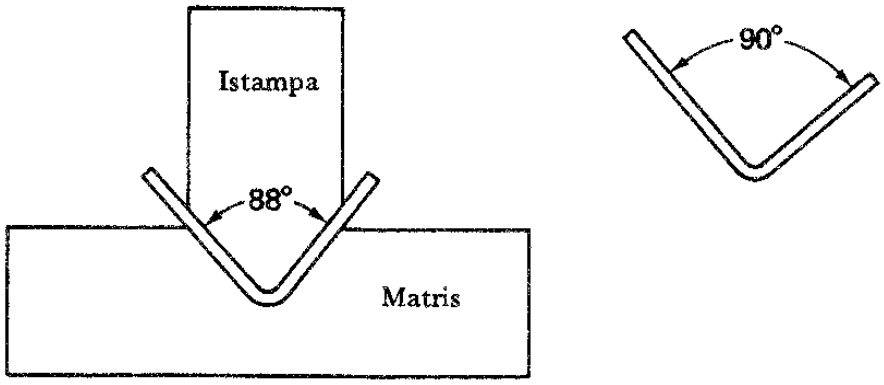
Nötr düzlem boyunun bükme esnasında değişmediği kabul edilirse, bükme açısı α_b olduğunda, geriye yaylanma olayından sonraki α_f açısı da yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$\alpha_f \ (R_f + h / 2) = \alpha_b \ (R_b + h / 2) \qquad (5.12)$$

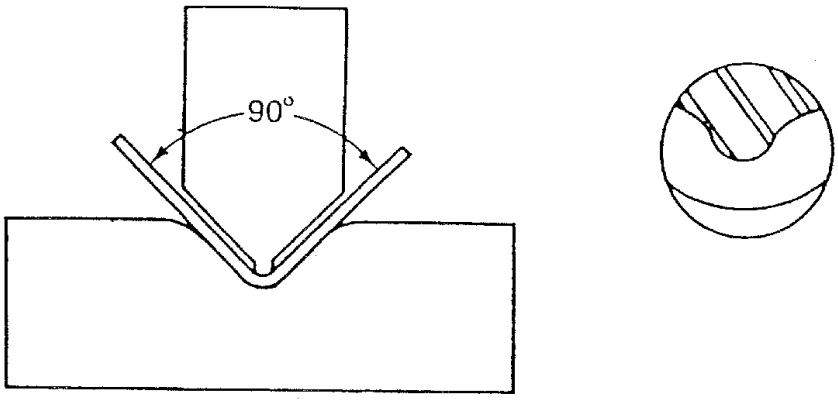
Metalik sacın kalınlığı ve malzeme özelliği homojen ise 5.11 ve 5.12 bağıntıları yardımı ile geriye yaylanma açısı hesaplanır. Malzeme, hesaplanan açı farkı kadar daha

fazla bükülerek sınama yanılma yoluyla geriye yaylanma olayı engelenerek, arzu edilen bükme açıları elde edilir. Uygun kalıp sistemi kullanılarak, bükme işlemi sonunda, malzemenin tüm kalınlığına basma gerilmeleri uygulanarak elastik gerilmeler giderilebilir. Bazı bükme sistemlerinde, parçaya sürekli basma gerilmeleri uygulanarak bükme açısının sabit kalması sağlanır. Bu arada plastik şekil değiştirme bölgesinde oluşan hidrostatik basınç, 5.9 ve 5.10 bağıntılarının ötesinde, malzemenin bükülme kabiliyetini arttırır.

Geri yaylanmanın giderilmesi amacıyla çeşitli yöntemler uygulanır. Bunlardan biri sacı gereğinden biraz fazla bükmektir. Böylece geri yaylanmadan sonra istenen bükme açısı elde edilir. Bu yöntemde parçanın ne kadar fazla büküleceği deneme - yanılma yoluyla bulunur.



Şekil 5.11 V bükmede iş parçasında geri yaylanmayı giderebilmek için 90° yerine 88° bükülmesi (Çapan, 2003)

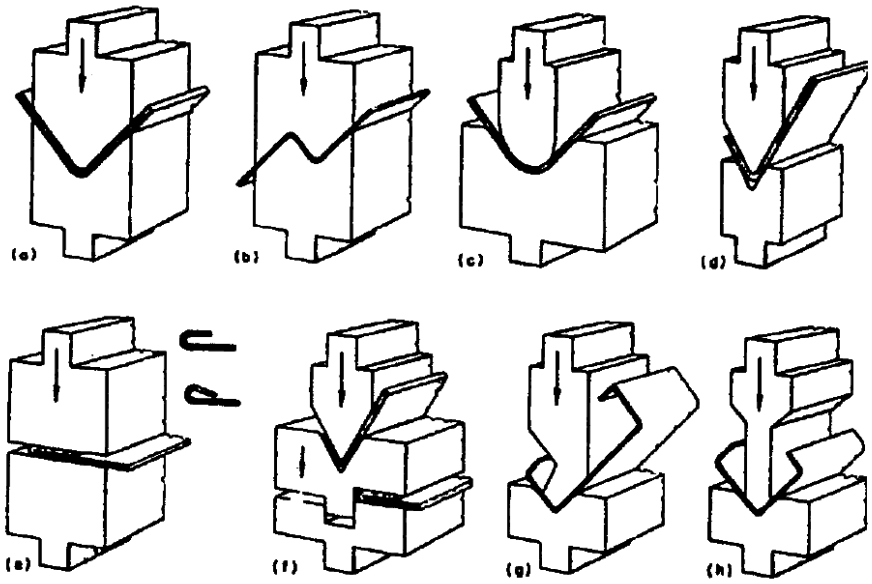


Şekil 5.12 Bükme ıstampası ile büküm bölgesini ezerek geri yaylanmayı azaltma yöntemi (Eary ve Reed, 1974)

Bükme için kullanılan cihaz ve aletlerin seçimi bükülecek parçanın boyutlarına (özellikle uzunluğuna) göre yapılır. Küçük parçalar mekanik preslerde, parçanın şekline göre bir veya birden fazla kalıp sistemleri ile şekillendirilir.

Uzun parçalar için uzun şasili özel preslere gerek vardır. Burada basit kalıp sistemleri

ile parça bir kaç kademede şekillendirilebilir. Şekil 5.13' de presde bükme işlemlerine ait tipik örnekler vermektedir. Bazı durumlarda kalıp maliyetini azaltma amacıyla dişi kalıp yerine kauçuk blok da kullanılabilir.

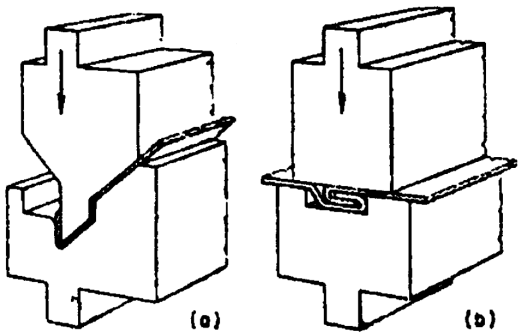


Şekil 5.13 Preste bükme işlemlerine ait örnekler (a) 90° V bükme, (b) Zigzag bükme, (c) Yuvarlatılmıs 90° lik bükme, (d) Kenar bükme, (e)180° lik kenar bükme, (f)Bükme ve yassılaştırma (g) ve (h)çok kenarlı parça bükme . (Çapan, 2003)

Sac metallerin bükülebilirliğinin arttırılması için sünekliklerinin arttırılması gereklidir. Bu amaçla malzeme ısıtılabilir ya da hidrostatik gibi yüksek basınç ortamlarında işlem yapılabilir.

Bükmede oluşan gerilme durumu dış yüzeydeki sünekliği etkiler. Tek eksenli gerilme etkisindeki metalde süneklik, iki eksenli gerilme halindekine göre daha fazladır.

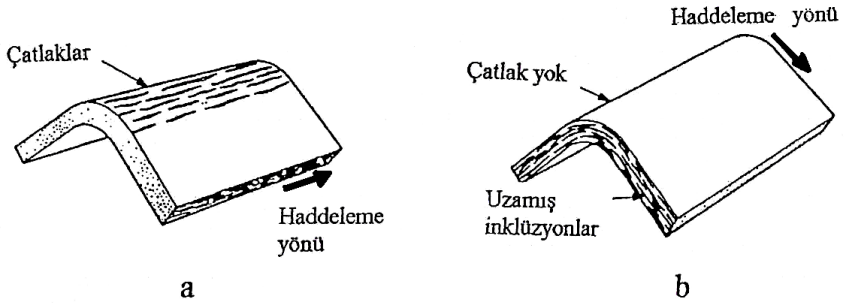
Bükmede parça eni arttıkça gerilme tek eksenli durumdan iki eksenli duruma doğru geçerek malzemede sünekliğin azalmasına neden olur (Çapan, 2003).



Şekil 5.14 Metalik saclara bükme yolu ile dikiş atma (kenetleme) işlemine ait örnekler

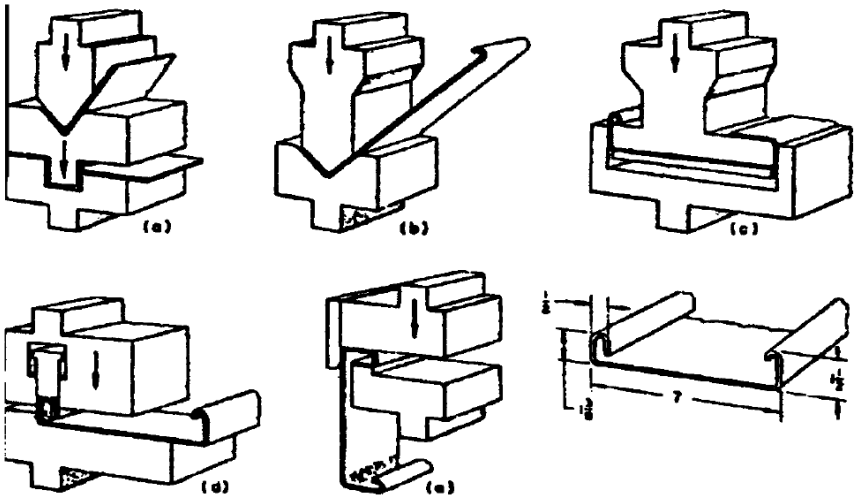
Sacın kenar koşulları da bükülebilirliği etkiler. Kaba ve pürüzlü kenarlar, gerilme birikimi bölgeleridir ve kenar pürüzlülüğü arttıkça bükülebilirlik düşer. Bükülebilirliği azaltan ve kenar çatlaklarına neden olan diğer önemli etkenler, kalıntı miktarı ve şekli ile kesme – dilme işlemleri sırasında kenarların soğuk şekillendirmeye maruz kalmasıdır.

Bükülebilmede anizotropi önemli bir etkendir. Malzeme içerisinde bulunabilen kalıntı, katışkı ve boşluklar gibi süreksizliklerin soğuk haddelemede sıralanması, tercihli yönlenme ve mekanik fiberleşme olarak ortaya çıkan anizotropiyi oluşturur. Hadde yönüne dik yapılan bükme işleminde, malzemede çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı süneklik azalır. Bu nedenle bükme kıvrımı, sacın haddeleme yönüne dik olmalıdır. (Yurci, 2008).



Şekil 5.15 Sacların büküm yönünün şekillendirmeye etkisi (Yurci, 2008)

Bükme işleminde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da, bükme yönünün haddeleme yönü ile yaptığı açıdır. Sacların haddelenmesi esnasında, malzeme yapısında bulunan inklüzyon, empürite ve boşluklar haddeleme yönünde dizilerek lifli bir yapı oluşturmaktadır. Sacın büküm yönü haddelemeye paralel olduğunda (Şekil 5.15 a) bu lifler süreksizlik göstermekte ve malzemenin çatlama riski artmaktadır. Bükmede en ideali, büküm yönünün haddeleme yönüne, Şekil 5.15 b' deki gibi dik olmasıdır.



Şekil 5.16 Karmaşık şekilli bir parçanın kademeli bükme işlemlerine ait örnek (Çapan, 2003)

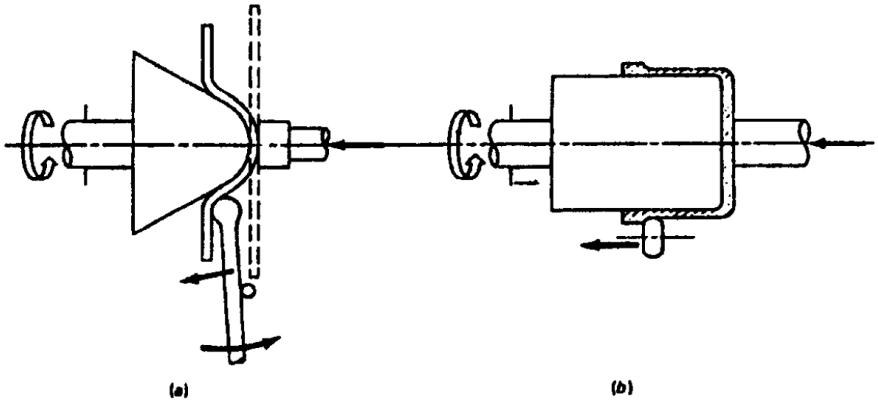
5.3 Sıvama Yöntemi

Dairesel simetriye sahip derin parçalar, metalik düz sacın, üretilecek parça şeklindeki dönen bir kalıp üzerine bastırılması yoluyla elde edilebilir. Bu sac biçimlendirme işlemine sıvama denir. Sıvama işlemi " Elle Sıvama " ve " Kesme Kuvveti ile Sıvama " diye iki türde yapılabilir.

Genellikle el sanatı olarak uzun yıllardan beri uygulanan elle sıvama yöntemi günümüzde de uygulama alanı bulmaktadır. Bu yöntemle biçimlendirilen parçalara örnek olarak tabak, tencere gibi metalik mutfak eşyaları, araba farlarının reflektörü, sıvı tanklarının küresel yan kapakları, uçak gövdesine ait bazı parçalar sayılabilir. Üretim hızı yavaş olmasına rağmen, makine ve kalıp yatırımının oldukça düşük olması, elle sıvama yöntemini sayıca az olan parçaların sacdan biçimlendirilmesinde ekonomik kılmaktadır.

Düşük karbonlu çelik saclar 3 mm kalınlığa kadar insan kuvveti ile biçimlendirilebilmekte, biçimlendirilen metalik sacın boyutu 2 metreye varabilmektedir. Alüminyum saclarda 6 mm kalınlığa kadar insan kuvveti ile sıvama yapmak mümkündür. Sıvama işleminde malzemenin sünekliliği ve yumuşaklığı sıvanabilme kabiliyetini tayin eder. Elle sıvamada daha fazla kuvvete gerek görüldüğünde mekanik sistemlerle kuvvet uygulanabilir.

Şekil 5.17 a metalik sacların elle sıvama işlemine ait bir örneği göstermektedir. Burada malzemenin kalınlığında önemli bir değişme olmadan biçimlendirme gerçekleştirilir. Şekil 5.17 b' de izlenebileceği gibi biçimlendirilecek sac, kalıbın simetri eksenine dik olacak şekilde kalıba doğru sıkıştırılır. Daha sonra kalıp dönme hareketi yaparken, metalik sac bir mandrel yardımı ile kalıbın üzerine bastırılarak kalıbın şeklini alması sağlanır.

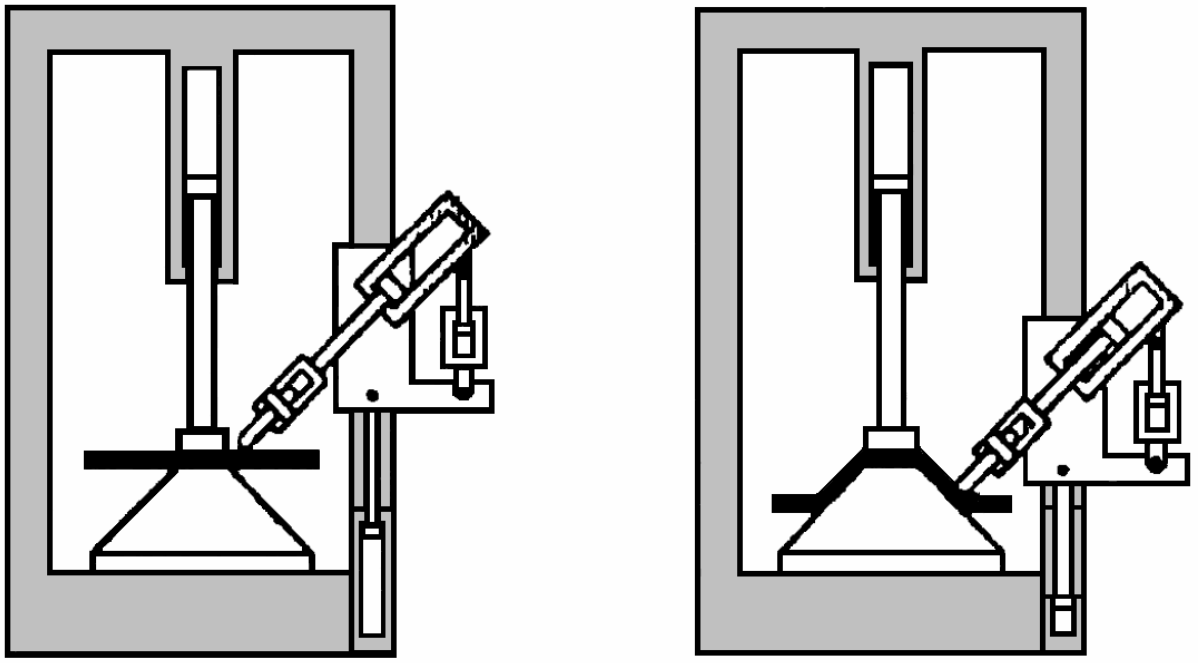


Şekil 5.17 Metalik sacların sıvama işlemlerine ait örnekler (Keeler ve Brazier, 1977)
a) Elle sıvama b)Kesme kuvveti ile sıvama

Elle sıvama yöntemiyle, metalik sacdan dikişsiz olarak, içi boş silindir, koni, küre, çan ve diğer dairesel sekilli parçaları elde etmek mümkündür. Burada insan beceri ve tecrübesinin önemi büyüktür.

Kesme kuvveti ile sıvama işleminde metalik sacın kalıbın şeklini alması sağlanırken, kalınlığı da inceltilir. Kalınlığı inceltme metalin sünekliliğine bağlı olarak yapılabilir. Bu işlem daha çok koni veya tüp şeklindeki parçaların üretiminde kullanılır. 25 mm. kalınlığa kadar malzemelere, oda sıcaklığında, kesme kuvveti ile sıvama işlemi uygulanabilir. Biçimlendirilecek sac boyutu 6 metreye kadar çıkabilir. Kesme kuvveti ile sıvama işlemleri için genellikle amaca uygun olarak yapılmış özel makineler kullanılır.

Sıvama işlemleri genellikle oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Ancak biçimlendirme kabiliyetini arttırmak veya biçimlendirme kuvvetini azaltmak amacıyla malzeme uygun sıcaklığa ısıtılabilir.



Şekil 5.18 Kesme kuvveti ile sıvama işleminde kullanılan makinelerin şematik gösterilişi (Bodur, 1975)

5.4 Gererek Biçimlendirme Yöntemi

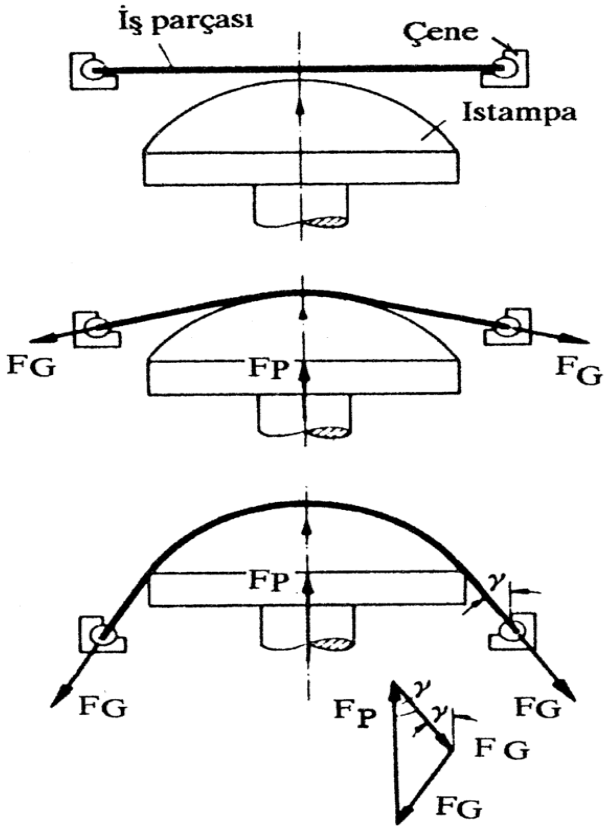
Gererek biçimlendirme işleminde metalik sac iki ucundan veya çevresi boyunca hiç hareket etmeyecek şekilde bağlanır. Daha sonra biçimlendirme kalıbı saca doğru ilerleyerek, malzemenin gerilmesini ve kalıbın şeklini almasını sağlar. Bu arada malzeme akma noktasının ötesinde genellikle % 2 - 4 oranında plastik şekil değişimine uğrar.

Gererek biçimlendirme işleminde boyun verme olayı sınırlandırıcı faktördür. Parça geometrisinden dolayı sadece tek eksenli çekme gerilmesi söz konusu ise çekme deneyindeki boyun verme noktasına ait homojen plastik şekil değiştirme oranı (ε_h) kriter olarak kullanılır. Parça geometrisi iki eksenli çekme gerilmesine yol açıyorsa, boyun verme olayı gecikir. Bu durumda metalik sacın kalınlığını daha fazla inceltmek mümkündür. İki eksenli çekme gerilmesi halinde, şekil değiştirme sınırı " Biçimlendirme sınır diagramları " ile belirlenir. Eğrilik yarıçapı büyük olan geniş parçalar, gererek biçimlendirme yöntemiyle kolay ve ekonomik olarak elde edilirler.

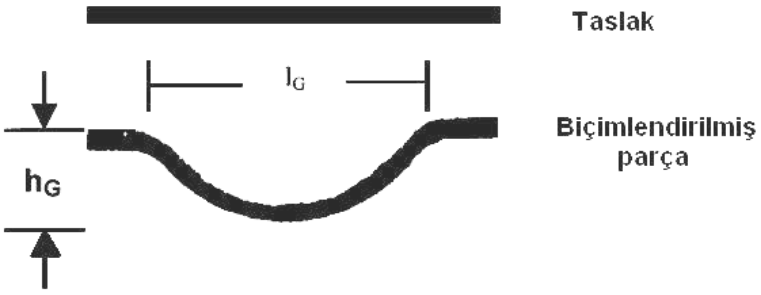
Gerilmelerin parçaya homojen olarak dağılması nedeniyle, gererek biçimlendirme işleminde geriye yaylanma olayı büyük oranda önlenmiştir.

Genellikle çekme gerilmelerinin etkin olduğu bu şekillendirme yönteminde işlemin başarılı olabilmesi için malzemenin yeteri kadar sünek olması gerekir.

Gererek biçimlendirme yönteminde, diğer sac biçimlendirme yöntemlerine göre % 10 - 15 oranında daha az malzeme kullanılır. Kullanılan kalıbın basit olması nedeniyle uygulanan kuvvet de yaklaşık % 70 oranında daha azdır. Makine ve kalıp yatırımının da düşük olması, gererek biçimlendirme işlemini cazip kılmaktadır.



Şekil 5.19 Yarıküresel uçlu ıstambayla gererek biçimlendirme işlemi (Çapan, 2003)



Şekil 5.20 Gererek biçimlendirme oranı

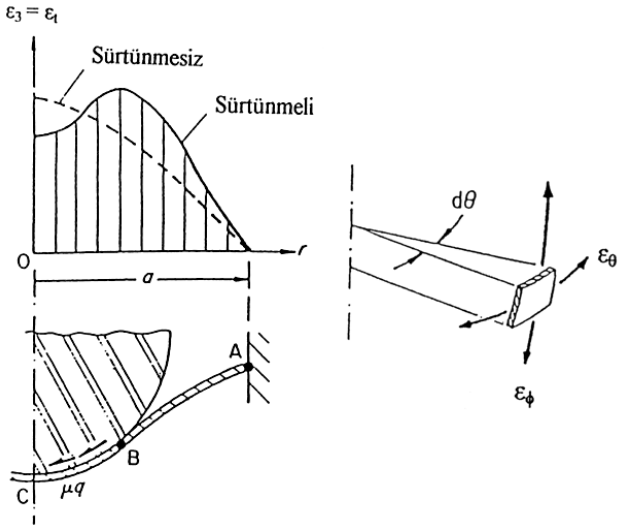
Gererek biçimlendirme oranı : (G.B.O) ;

$$G.B.O. = h_G / l_G \tag{5.13}$$

bağıntısıyla tanımlanmaktadır.

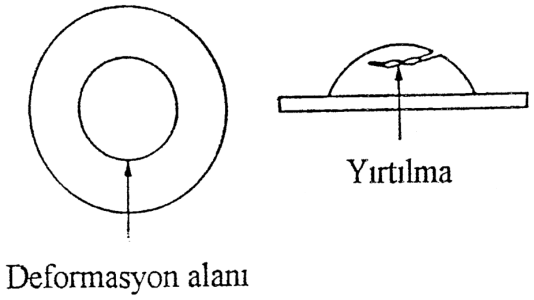
Gererek biçimlendirme oranı, malzeme özellikleri ve işlem koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu işlemde, malzeme kalınlığından kaybederek biçimlendiği için bölgesel boyun verme olayı (hızlı kalınlık azalması) önlenmeli veya geciktirilmelidir. Belirli bir malzeme icin kalınlık arttıkça G.B.O. artar, çünkü malzeme çatlamadan daha fazla şekil değiştirebilir. Malzemenin tane yapısının ince olması, kalıntılardan arındırılmış olması, tek fazlı olması G.B.O.' nın artmasına neden olur. Gererek biçimlendirme işleminde malzeme ile ilgili en etkin parametreler deformasyon sertleşmesi üssü (n) ile deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m)' dir. Deformasyon sertleşmesi üssü (n) yüksek olan malzemelerde, şekil değişimine uğrayan bölge sertleşir ve bu bölgede boyun verme olayına direnç gösterir. Bu durumda uygulanan gerilme altında plastik şekil değiştirme bitişik bölgelere doğru ilerler ve birim şekil değistirme homojen olarak dağılmış olur. (n) değeri küçük olan malzemelerde boyun verme olayı belirli bir bölgede başlar ve o bölgede yoğunlaşır. Kalınlığın hızla azalması sonucunda çatlak erken oluşur. Deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m) pozitif ve yüksek olan malzemelerde boyun verme olayından sonraki şekil değiştirme miktarı artar. Bu tür malzemelerde boyun verme bölgesinde plastik gerilme artar ve boyun verme olayının etrafa yayılmasını sağlar. Böylece kalınlık incelmesinin sadece bir bölgede yoğunlaşmayıp mümkün mertebe tüm malzemede homojen olarak gelişmesi sağlanır ve çatlak oluşumu geciktirilmiş olur. " m " değerinin plastik gerilmeye, dolayısıyla boyun verme bölgesindeki birim şekil değiştirmeye etkisi yüksek sıcaklıklarda daha fazladır. Ancak m > 0,02 için oda sıcaklığında bile küçük.miktarlarda olumlu etkiler görülmektedir.

Germe işleminde, üniform deformasyon sahasının artmasını sağlayan pekleşme üsteli (n) ile sürtünme katsayısını düşürüp yapışma sürtünmesinin oluşumunu azaltarak, gerinimin üniform dağılmasına yardımcı olan yağlama çok önemlidir. Sürtünme katsayısının yüksek olduğu işlemlerde, yapışma bölgelerinde ve desteksiz bölgelerde düzlemsel gerinim ve buna yakın gerinim halleri söz konusuyken, sadece kubbe formun tepesinde dengeli iki eksenli çekme haline yaklaşılır. Oysa ıstampa yerine bir hidrolik akışkan ile germe yapılırsa (hidrolik şişirme işlemleri), sürtünme çok az olacağından, dengeli çekme ve kesitte üniform bir incelme sonucu daha yüksek germe oranları elde edilebilir. (Marciniak ve Duncan, 1992)



Şekil 5.21 Sürtünmeli ve sürtünmesiz şartlarda yarıküresel bir ıstampayla yapılan germe işleminde sac kalınlığındaki gerinimin dağılımı (Marciniak ve Duncan, 1992)

Şekil 5.21' de yarıküresel uçlu bir ıstampayla germe işleminin herhangi bir anında, sac kesitinde kalınlık boyunca oluşan gerinim dağılımı görülmektedir. Bu şekle göre, en yüksek kalınlık gerinimi B noktasında meydana gelmekte ve dolayısıyla bu noktayla beraber, merkez noktadan aynı uzaklığa sahip noktaların oluşturduğu bir yay boyunca boyunlanma oluşmakta ve sonunda da yırtılma meydana gelmektedir. (Kalpakjian ve Schmid, 2001)

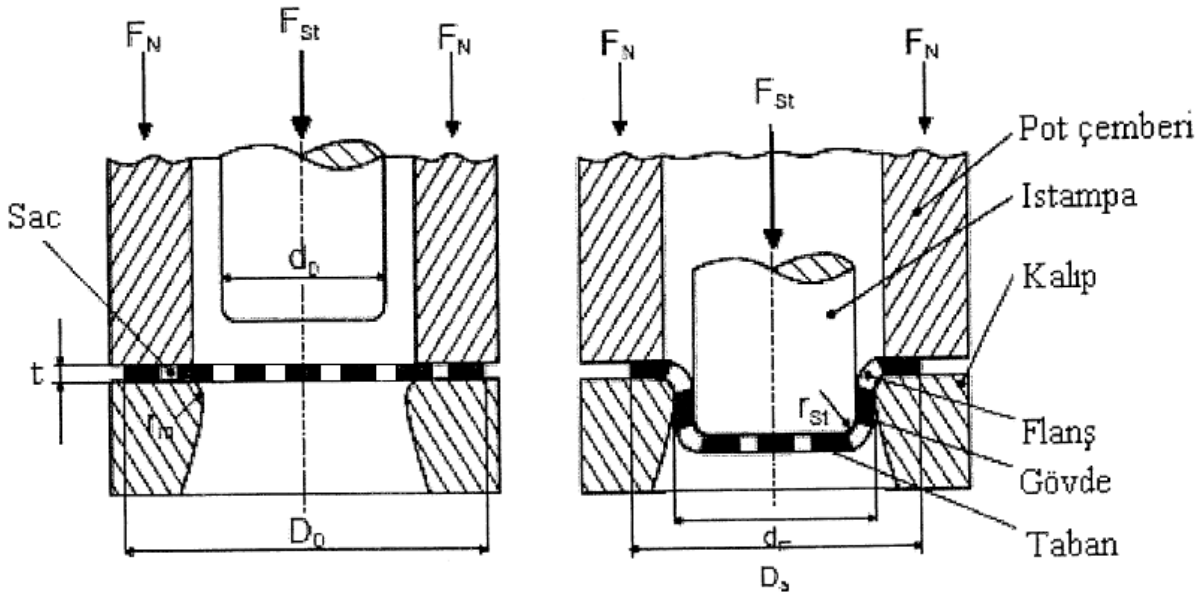


Şekil 5.22 Germede yırtılma bölgesi (Kalpakjian, 1991)

5.5 Derin Çekme Yöntemi

Derin çekme işlemi, yassı bir metalik sacdan üç boyutlu derin bir kab elde etme işlemi olarak tanımlanabilir. Derin çekme işlemlerinde zımbanın, dolayısıyla elde edilen ürünün tabanı düzdür. DIN 8584 standardına göre derin çekmenin tanımı şöyledir; derin çekme, düz bir sacın, sac kalınlığında kasti bir değişim beklenmeden, bir tarafı açık oyuk bir yapıya, çekme – basma gerilme esaslı şekillendirilmesi işlemidir.

Derin çekmenin uygulandığı temel teorik yöntemde dairesel metal sac, çembersel kalıp boşluğunun üst kısmında yer alır ve pot çemberi denilen bir üst kalıp ile belli bir kuvvetle sıkıştırılır. Düz silindirik ıstampa, sıkıştırılan sacı kalıp boşluğuna doğru iterek silindirik bir kap oluşturur. Küresel veya daha karmaşık taban şekline sahip parçalarda, derin çekme işlemi ile beraber aynı zamanda gererek biçimlendirme işlemi de uygulanır.

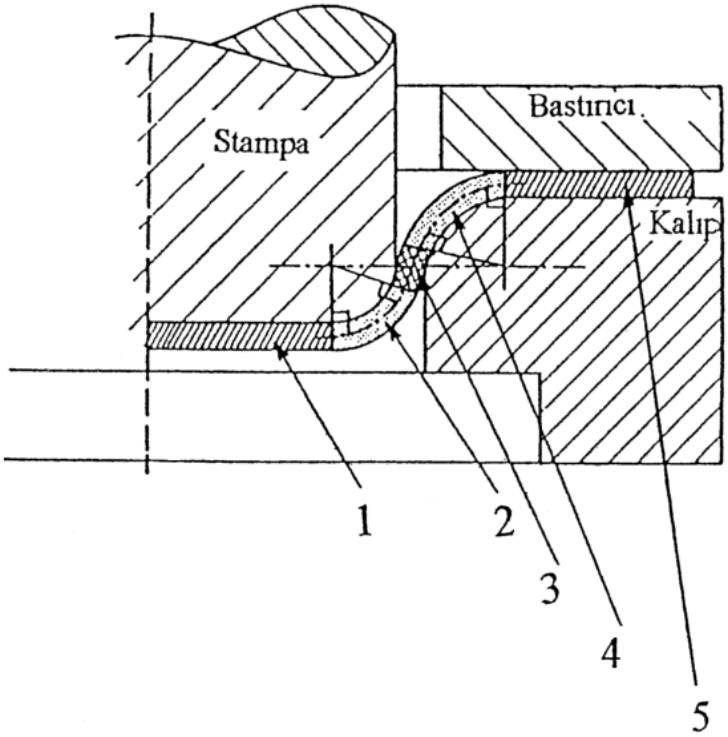


Şekil 5.23 Silindirik bir kabın derin çekilmesi (Çapan, 2003)

Şekil 5.23 derin çekme işlemini tanımlayan örnekleri göstermektedir. Derin çekme işleminde önemli değişkenler, metal sacın özellikleri, başlangıç sac çapının (D_o), ıstampa çapına oranı (d_o), ıstampa ve kalıp arasındaki boşluk (d_r - d_o), ıstampa ucu yuvarlatma yarıçapı (r_{st}), kalıp köşe yuvarlatması yarıçapı (r_m), pot çemberi basıncı, sürtünme ve yağlamadır. (Lange, 1985)

D_o çapındaki metalik bir taslak, d_o çapında bir zımba yardımıyla bir kalıbın içine çekilerek üç boyutlu bir kab elde edilmektedir. Metalin köşelere takılıp yırtılmasını önlemek için zımba ve kalıp köşeleri belirli eğrilik yarıçaplarına (r_{st} ve r_m) sahip olmalıdır. Biçimlendirilen parçanın işlem sonrası zımbadan sıyrılması gerekir. Bunun için değişik

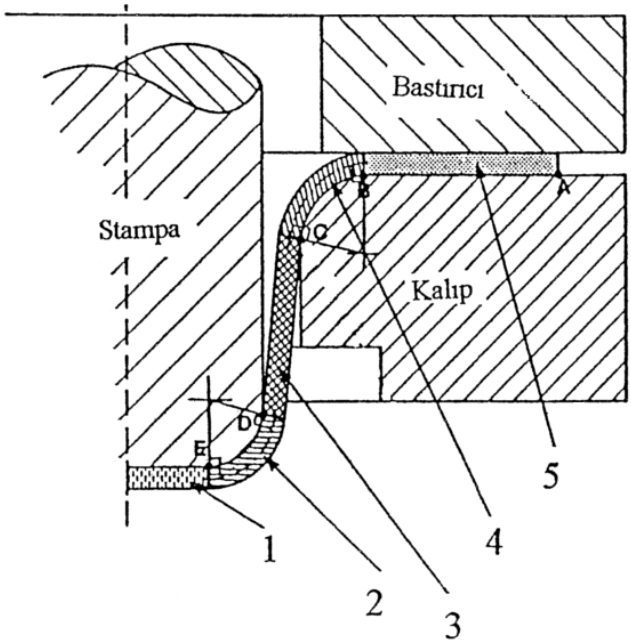
yöntemler uygulanır. Şekil 5.23' de kalıpların belirli bir derinlikten sonra çaplarının genişlediği görülmektedir. (Çapın genişlemesi hem kalıp ile parçanın yan duvarları arasındaki sürtünme yüzeylerini azaltmakta, hem de sıyırma işlemine yardımcı olmaktadır. Parçanın üst kısımları, kalıbın dar bölgesinden geçtikten sonra, geriye yaylanma etkisiyle bir miktar genişler. Zımba geriye çekilirken, parça kalıbın kesit değişiminin bulunduğu girintiye takılarak zımbadan sıyrılır. Bazı kalıp tasarımlarında sıkıştırma kalıbı, sıyırma kalıbı olarak da görev yapar. Burada zımba ile sıkıştırma kalıbı arasında çok az boşluk vardır. Zımba geriye çekilirken, biçimlendirilmiş parça sıkıştırma kalıbının alt yüzeyine takılarak zımbadan sıyrılır. Sıyırma işlemini kolaylaştırmak için bazen zımbanın ortasına tabana kadar uzanan bir delik açılır. Sıyırma işlemi esnasında bu delikten parçanın tabanına basınçlı hava gönderilerek sıyırma işlemi kolaylaştırılır. Bazı hallerde mekanik sistemle devreye giren özel sıyırma kalıpları kullanılır.



Şekil 5.24 Derin çekmede ilk aşama olan kabartma aşaması (Eshel vd., 1986)

Bir derin çekme işlemi iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama olan kabartma (embossing) aşaması, Şekil 5.24' de görüldüğü gibi, şekillendirmenin başlangıcında ıstampanın saca değmesi ve bir miktar ilerlemesiyle, saca daha ziyade bir bükmenin uygulandığı aşamadır. Istampanın tabanında (1 no' lu bölgede) herhangi bir akış yoktur ve malzeme durağandır. Bitişiğindeki 2 no' lu bölgede ise, malzeme bükmeye maruz kaldığından, burada bir miktar germe ile incelme meydana gelir. Bu bölgenin hemen üzerinde ve kalıp ağız

radyüsünün alt kısmında yer alan 3 no' lu bölge ise çok küçük bir bölge olup, cidarın minimum uzunluğunu vermektedir. Kalıp ağız radyüsü tarafından bükülen 4 no' lu bölge ise yine hafif bir germe ve incelme etkisi altında kalmaktadır. Flanş kısmını oluşturan 5 no' lu bölge ise hemen hemen hiç hareket etmemiş ve kalıp içerisine akış göstermemiş olarak düşünülür. Derin çekme işleminin birinci aşaması olan kabartma aşamasında, flanşın akışı ihmal mertebesinde küçük olmakta, sac üzerinde daha çok ıstampanın ve kalıp ağzının oluşturduğu bükme - çekme şekillendirmeleri ve buna bağlı olarak kesitte çok hafif incelmeler meydana gelmektedir. (Eshel, 1986)

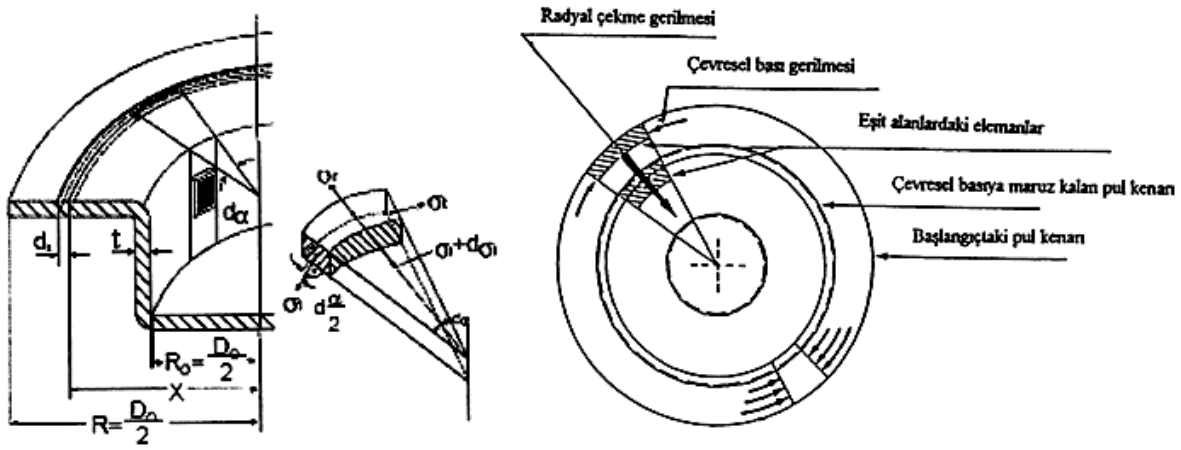


Şekil 5.25 Derin çekmede ikinci aşama olan çekme aşaması (Eshel vd., 1986)

Kabartma aşamasının sona ermesi ve ıstampa ilerlemesinin devam etmesiyle, çekme (drawing) aşaması başlamaktadır. Bu aşamada flanşın kalıp boşluğuna akışı etkinlik kazanmaktadır. Ayrıca, malzemenin kalıp cidarı, ıstampa, kalıp ve bastırıcı yüzeyleri ile sürtünmesi sonucu ortaya çıkan sürtünme kuvvetleri de belirginleşmektedir. Istampanın tabanı ve köşesi ile kavranmış olan 1 ve 2 no' lu bölge, sürtünme kuvvetlerine karşı olarak çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. 1 no' lu bölge iki eksenli olarak gerilirken, akma dayanımının aşılmasıyla birlikte, ıstampa radyüsü ile bükülmüş 2 no' lu bölge, bu radyüs üzerinden daha ince olan 3 no' lu bölgeye kaymaktadır. Derin çekmede kap cidarını oluşturan 3 no'lu bölge ise C noktasından başlamaktadır. Kalıp ağzındaki köşe radyüsü üzerinde bükülen ve bu radyüs üzerinde 3 no' lu bölgeye doğru çekilen malzeme, C noktasından itibaren bir doğrultma işlemine maruz kalmaktadır. Bükme nedeniyle 4 no' lu bölgede pekleşen malzeme, doğrultma için yüksek bir kuvvet gerektirmektedir. Bununla birlikte, derin çekme işlemlerinde

meydana gelen ve tabandan flanşa doğru artan kesit kalınlaşması, kalıp ve ıstampa arasındaki boşluğu (c) aşmadığı takdirde, 3 no' lu bölgede bir ütüleme oluşmadan ve kap cidarı incelmeden, malzeme üzerindeki noktaların yer değişimi söz konusu olmaktadır. Eksenel gerilme, flanştaki radyal gerilme ve bastırıcıdan kaynaklanan sürtünmenin meydana getirdiği gerilme bileşenlerinin toplamından oluşan efektif gerilme, malzemenin o andaki akma dayanımını aşması halinde, bu bölgede deplasmanlardan ziyade germe etkisi oluşmaktadır. Kalıp ve bastırıcı arasında 5 no' lu bölgeyi oluşturan flanş ise radyal yönde kalıp içerisine hareket ederken, çevresel yönde bası (sıkıştırma) gerilmelerine maruz kalmaktadır. (Eshel, 1986)

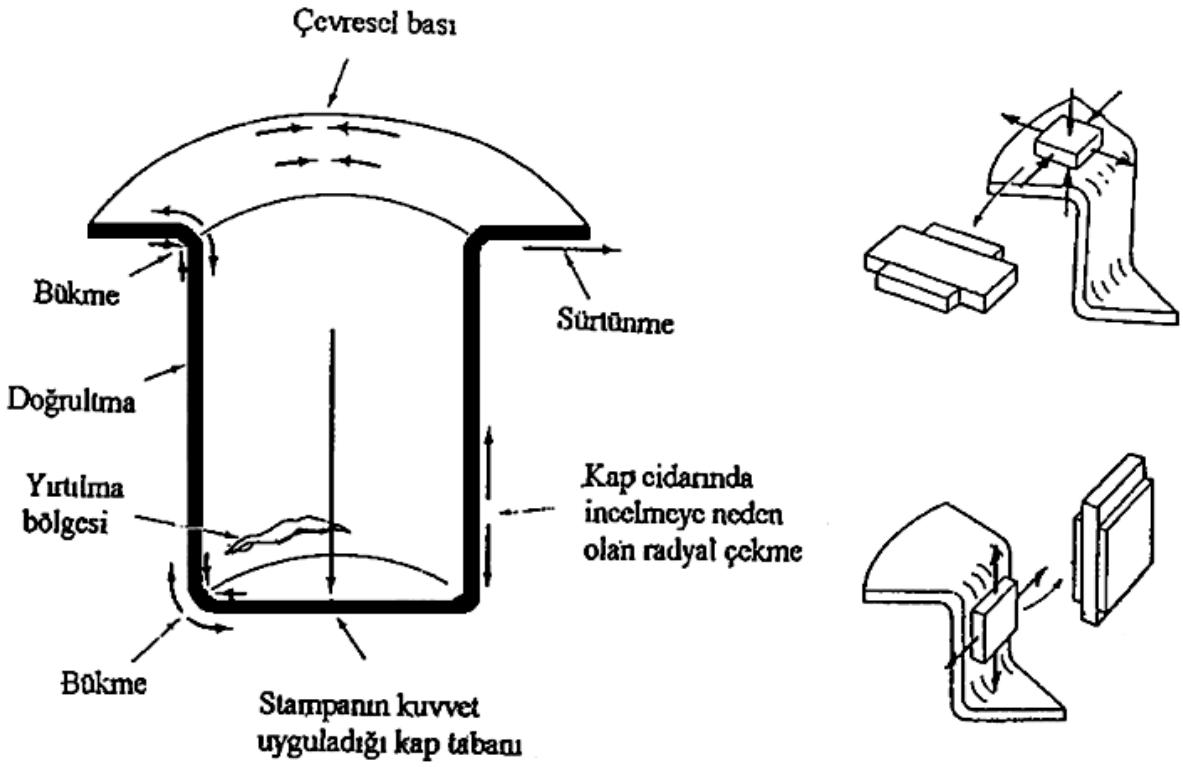
Bu aşamada sacın ıstampa ile temas ettiği her bölgede, sürtünme kuvvetleri belirginleşmektedir. Bu sebepten 1 ve 2 no' lu bölgeler, sürtünme kuvvetlerine karşı olarak çekme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Üniform deformasyon sınırını aşan bu bölgelerin kesiştiği çizgide incelme arttığından, muhtemel yırtılma bölgesinden biri bu 1 ve 2 no' lu bölge arasındaki sınırdır. Diğer muhtemel boyunlanma ve yırtılma bölgesi de 2 ve 3 no' lu bölge arasındaki sınırdır. Bunun nedeni bükmeden dolayı malzemenin pekleşerek sünekliğinin azalmasıdır.



Şekil 5.26 Derin çekmede flanş bölgesinde malzeme akışı ve oluşan gerilmeler

(Eshel vd., 1986)

Derin çekme esnasında flanşın hareketi ve oluşan gerilmeler Şekil 5.26' da görülmektedir. Başlangıçta ilkel pulun kenarında yer alan taralı bölge, şekillendirme ilerledikçe kalıp boşluğuna yaklaşmaktadır. Eksenel ıstampa hareketiyle radyal bir gerilme altında kalıp boşluğuna ilerleyen bu eleman, giderek daralmak durumundadır. Bu da çevresel bir sıkıştırma kuvvetinin meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, kap tabanından flanşa doğru artan bir kesit kalınlaşmasını birlikte getirmektedir. (Eshel, 1986)

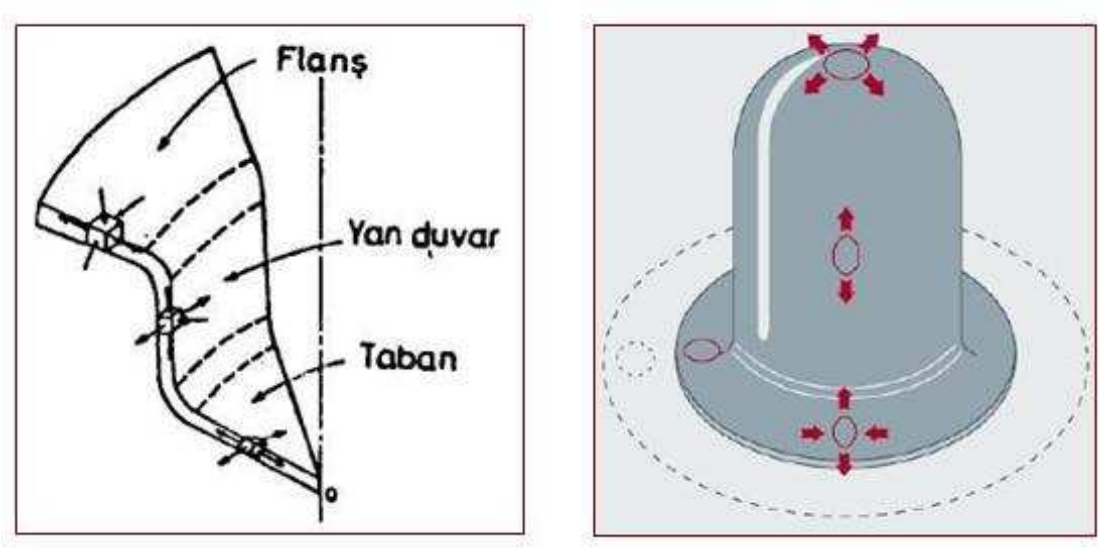


Şekil 5.27 Derin çekilen bir kabın değişik bölgelerindeki deformasyon durumu

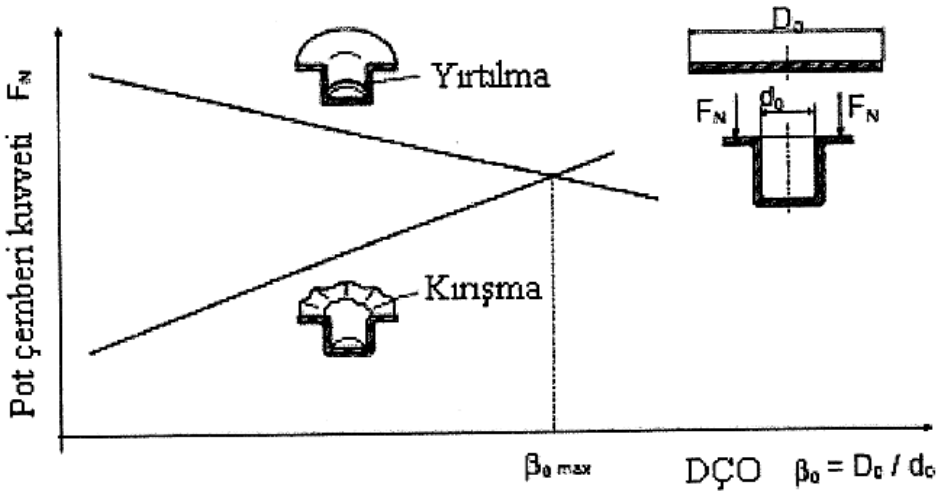
(Eary ve Reed, 1974; Kalpakjian, 1991)

Flanş bölgesindeki çevresel bası gerilmeleri, sacın kırışmasına neden olabilmektedir. Kırışma eğilimi, ince saclarda daha yüksek olmaktadır. Kırışma kusurunun önlenmesi için flanşta belli bir basınç uygulayan bastırıcı (pot çemberi) kullanılmalı yada kullanıldığı takdirde kırışma hala görülüyorsa pot çemberi basıncı arttırılmalıdır. Gereğinden büyük pot çemberi kuvveti ise yırtılmalara neden olmaktadır. Şekil 5.29' da pot çemberi kuvvetinin sınır derin çekme oranına ve kusur bölgelerine etkisi görülmektedir. (Zhu, 1999)

Derin çekmede iki önemli bölge çok iyi analiz edilmelidir. Bunlardan ilki, içinde çoğu deformasyonun gerçekleştiği flanş ve ikincisi, flanştaki deformasyonu sağlamaya yeterli olan kuvveti taşıyabilecek kap cidarıdır. Eğer başlangıç sacı çapı çok geniş seçilirse, sacı kalıp boşluğuna çekmek için gerekli olan ve cidara iletilen kuvvet, sınırı aşacak ve kap cidarında boyunlanma ya da yırtılma oluşacaktır. Bu nedenle derin çekilebilirlik, sınır derin çekme oranı ile telaffuz edilmektedir.



Şekil 5.28 Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki gerilme durumu (Vural, 2003)



Şekil 5.29 Pot çemberi kuvvetinin sınır derin çekme oranına ve kusur bölgelerine etkisi (Çapan, 2003)

Bir silindirik kabın derin çekilmesinde, ilkel pulun çapının ıstampa çapına oranı, derin çekme oranı (DR) olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla, ıstampa çapı sabit iken ilkel pul çapının artmasıyla derin çekme oranı ve redüksiyon artmakta, belli bir ilkel pul çapından sonra da yırtılma meydana gelmektedir. Kırışmayı önlemek için derin çekme oranı 1,2 değerinden küçük olmalıdır.

Bunun için, başarılı olarak çekilebilen maksimum pul çapına göre, sınır derin çekme oranı (LDR) tanımlanmaktadır. (Kalpakjian, 1991)

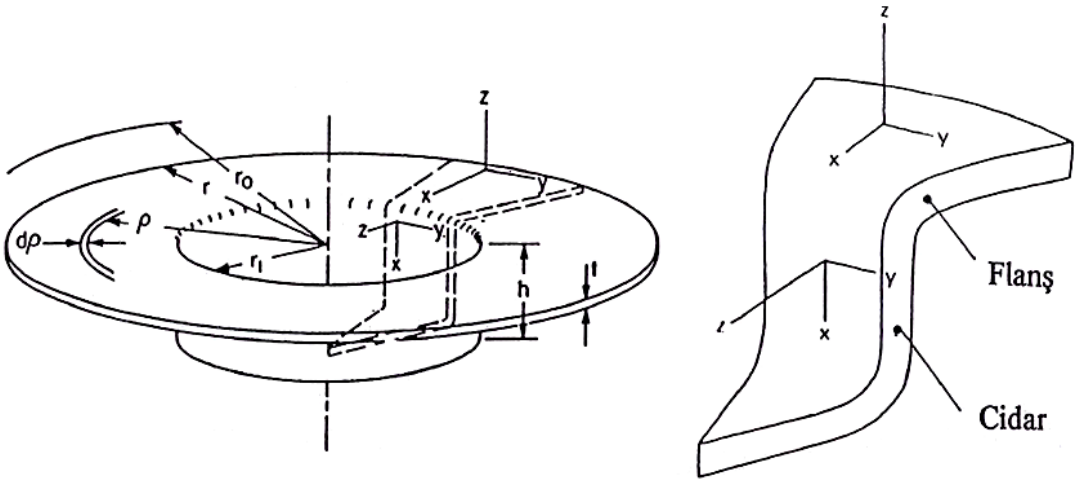
$$DR = \frac{D_o}{d_o} \tag{5.14}$$

$$LDR = \frac{D_{max}}{d_o} \tag{5.15}$$

Derin çekme işleminde sınır derin çekme oranının (LDR) teorik olarak elde edilmesi için aşağıdaki kabuller yapılır. (Mielnik, 1991)

- Bükme ve doğrultma işlemleri sırasında açığa çıkan dış ve iç sürtünme kayıpları ihmal edilir. Ancak oranın bulunmasından sonra bu sürtünme kayıpları, bir verimlilik katsayısının (η) hesaba katılmasıyla yeniden düzenlenir.
- Pekleşme üsteli n' nin sınır derin çekme oranına (LDR) çok küçük etkisi olduğundan dolayı malzeme ideal plastik malzeme olarak (n = 0) kabul edilir.
- Sac kalınlığının sabit kaldığı kabul edilir.
- Hill anizotropik plastisite teorisi uygulanır.

Sınır derin çekme oranının bu kabullere göre analiz edilmesi için Şekil 5.30' da gerekli boyutlar görülmektedir.



Şekil 5.30 Derin çekmenin herhangi bir anında, flanştaki bir elemanın pozisyonu ve kalıp içine akışta eksen takımının rotasyonu (Hosford ve Caddell, 1983)

İdeal koşullarda sınır derin çekme oranının (LDR) maksimum teorik değeri 2.7' dir. Derin çekme oranı sınırı da malzeme özellikleri ve işlem koşullarına bağlıdır. Derin kaplar elde edebilmek için derin çekme işlemini aynı parça üzerinde tekrarlamak gerekir. Bu

işlemler yeniden derin çekme işlemleri olarak tanımlanırlar.

Flanşta $d\varepsilon_z = 0$ olarak kabul edildiğinden, başlangıçta merkeze ρ_o uzaklığında bulunan birim elemanın alanı değişmemektedir. Bu durum 5.16 eşitliği elde edilir.

$$\pi \rho_o^2 = \pi \rho^2 + 2 \pi r_1 h = \text{sabit} \tag{5.16}$$

Eşitliğin her iki tarafının türevi alındığında 5.17 eşitliği belirlenir.

$$2\pi \rho \, d\rho + 2\pi r_1 dh = 0 \rightarrow d\rho = -\frac{r_1 dh}{\rho} \tag{5.17}$$

Birim elemanın çevresi ρ ile orantılı olduğundan ve $d\varepsilon_z = 0$ kabul edildiğinden, flanştaki diğer gerinimler 5.18 eşitliğiyle hesaplanır.

$$d\varepsilon_x = d\varepsilon_y = -\frac{d\rho}{\rho} = \frac{r_1 dh}{\rho^2} \tag{5.18}$$

Düzlemsel gerinim altında flanştaki akma dayanımının σ_f olduğu kabul edilirse, σ_x ve σ_y, elemanın konumuna gore değişmesine rağmen (σ_x - σ_y) terimi sabit kalır. $d\varepsilon_z = 0$, $\sigma_z = 0$ olduğundan $\sigma_y = \sigma_x$ ve $\sigma_f = 2\,\sigma_x$ olarak elde edilir. Istampa başına toplam işin integrali alınırsa 5.20 eşitliğindeki en yüksek derin çekme kuvveti belirlenir.

$$\frac{dW}{dh} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{2\pi r_1 t \sigma_f d\rho}{\rho} = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) = F_d \tag{5.19}$$

$$F_{d_{\max}} = \frac{dW}{dh_{maks}} = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) = 2\pi r_1 t \sigma_f \ln\left(\frac{D}{d}\right) \tag{5.20}$$

$$\sigma_{d\,(maks)} = \sigma_f \ln\left(\frac{D}{d}\right) \tag{5.21}$$

Kap cidarının en yüksek derin çekme kuvvetini karşılaması gerektiğinden, eksenel gerilme 5.22 eşitliğinden hesaplanabilir. Kap cidarındaki akma gerilmesi σ_w olarak gösterilir.

$$\sigma_x = \sigma_w = \frac{F_{d_{(\max)}}}{2\pi r_1 t} = \sigma_f \ln\left(\frac{D}{d}\right) \tag{5.22}$$

Düzlemsel gerinim hallerinde kap cidarının akma gerilmesi σ_w ve flanşın akma gerilmesi σ_f ile belirtildiğinden bu gerilmelerin oranı β ile gösterilir ve 5.23 eşitliğindeki gibi sınır derin çekme oranının “ e “ tabanındaki logaritmasına eşittir. (Mielnik, 1991)

$$\beta = \frac{\sigma_{w(\varepsilon_y=0)}}{\sigma_{f(\varepsilon_z=0)}} \ln(LDR) \tag{5.23}$$

İç yapı değişiminin olmadığı varsayılan izotropik ve ideal plastik malzemede $\sigma_f = \sigma_w$ ve $\beta = 1$ olduğundan LDR = e = 2,72 olur. Hesaplanması sırasında sürtünme ve bükmedeki bazı koşulların ihmal edilmesinden dolayı gerçekte bu değer 2,1 – 2,2 arasındadır. İşlemdeki bu kayıplar, deformasyon verimliliği katsayısının (η) telaffuz edilmesiyle hesaba katılır. Böylece 5.24 eşitliği en doğru sonucu vermektedir. (Mielnik, 1991)

$$\ln(LDR) = \eta\,\beta \tag{5.24}$$

η değeri ; yağlama, pot çemberi basıncı, sac kalınlığı ve yuvarlatma yarıçaplarının değişmesiyle farklılaşır. $\beta = 1$ ve sınır derin çekme oranının 2,1 – 2,2 arasında değiştiği durumlarda η , 0,74 – 0,79 aralığındaki değerlere tekabül eder.

Düzlemsel anizotropiye sahip ideal plastik malzeme için Hill teorisi, 5.25 eşitliğinde belirtilmiştir. (Mielnik, 1991)

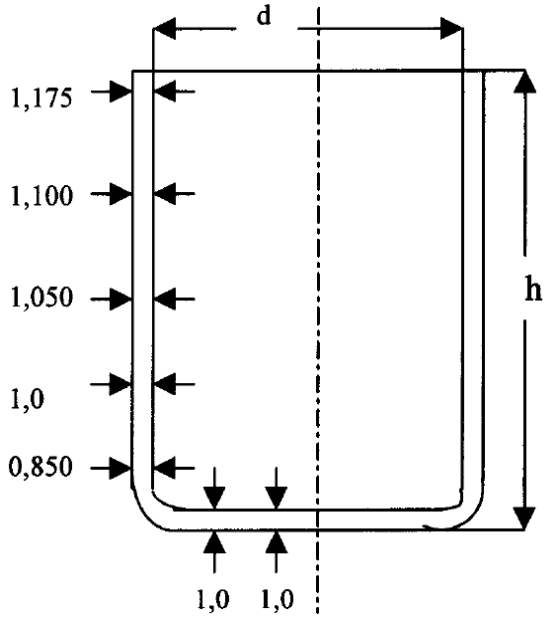
$$\beta = \sqrt{\left(\frac{r+1}{2}\right)} \tag{5.25}$$

Böylece 5.24 eşitliği 5.26 eşitliğine dönüşmektedir. Bu eşitlikte “ r “ plastik anizotropi değeri ve $\bar{r}$ ortalama dikey anizotropi katsayısıdır.

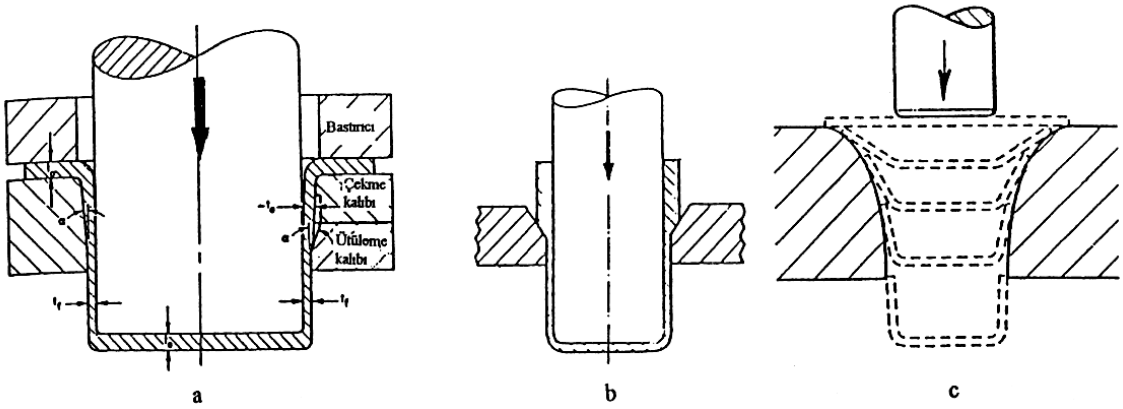
$$\ln(LDR) = \eta\sqrt{\left(\frac{r+1}{2}\right)} \cong \eta\sqrt{\left(\frac{\bar{r}+1}{2}\right)} \tag{5.26}$$

Zımbanın tabanına temas eden taslağın orta bölgesi zımbanın çevresi boyunca zımbanın üstüne doğru bükülür. Bükmeden dolayı bu bölgede kalınlık bir miktar azalır. Zımbanın hareketinden dolayı parçanın tabanında iki eksenli çekme gerilmesi vardır. Taslağın dış çevresi kalıp girişinde radyal olarak kalıp içine çekilir. Malzeme kalıp içine çekildikçe taslak çevresi πd_o değerinden πd_z değerine doğru azalır. Böylece malzeme çevresel olarak basma, radyal olarak çekme gerilmelerinin etkisindedir. Ayrıca sıkıştırma kalıbı da taslak düzlemine dik yönde basınç uygulamaktadır. Malzeme kalıp içine çekildikçe

çevresel büzülmeden dolayı kalınlığında artma olur. Malzeme, kalıp yarıçapı üzerinden geçerken bükme ve doğrultma işlemine uğrar. Bu arada radyal çekme kuvvetinin de etkisi ile kalınlığında azalma olur. Bu kalınlık azalması daha önceki kalınlık artışını bir miktar dengeler. Parçanın yan duvarında sadece çift eksenli çekme gerilmesi söz konusudur. Zımba ile kalıp arasındaki mesafe, malzemenin artmış olan kalınlığından az ise, malzeme burada basınç etkisi altında ütüleme işlemine uğrayacaktır. Genelde kalıp ile zımba arasındaki mesafe sürtünme kuvvetlerini azaltmak ve kalıp ile zımbanın aşınmasını önlemek için malzeme kalınlığından belirli oranlarda büyük tutulur. Sadece malzeme kalınlığının homojen istendiği durumlarda, söz konusu mesafe malzeme kalınlığından küçük tutulur. Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki kalınlık değişimi şekil 5.31' de verilmektedir. İşlem esnasında değişmeyen taban kalınlığı birim olarak alınmıştır.

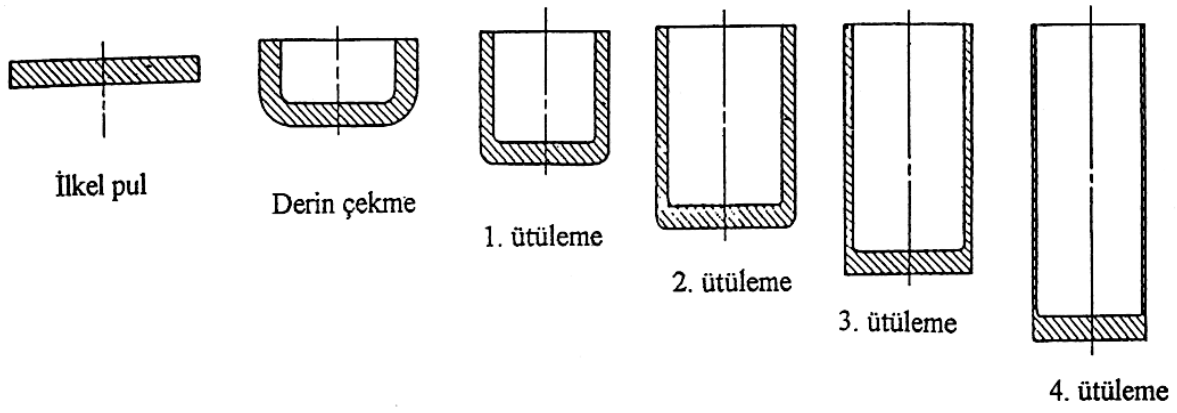


Şekil 5.31 Derin çekme işleminde kalınlığın bölgelere göre değişimi (Kayalı, 1986)



Şekil 5.32 Değişik cidar ütüleme yöntemleri (Eshel vd., 1986)

Derin çekme işleminde kalıp ile ıstampa arasındaki boşluk arttırılırsa, derin çekilen kabın kalınlığı flanşta, tabandaki kalınlıktan daha büyük olur. Bu da tek biçim olmayan cidar kalınlığına işaret eder.



Şekil 5.33 Derin çekilmiş bir kabın dört kademede ütülenmesi ile cidar kalınlığında meydana gelen incelmeler (Eary ve Reed, 1974)

Kalınlık dağılımı düzgünlüğünün önemli olduğu parçalarda cidar ütüleme ya da incelterek çekme adlarıyla telaffuz edilen yöntem kullanılır. Bu işlemde kabın taban kalınlığı sabit kalır, yan duvarların kalınlığı inceltilerek derinlik arttırılır. Ütüleme işleminde kuvvet hesabı tel çekme işlemine benzetilerek yaklaşık olarak yapılabilir.

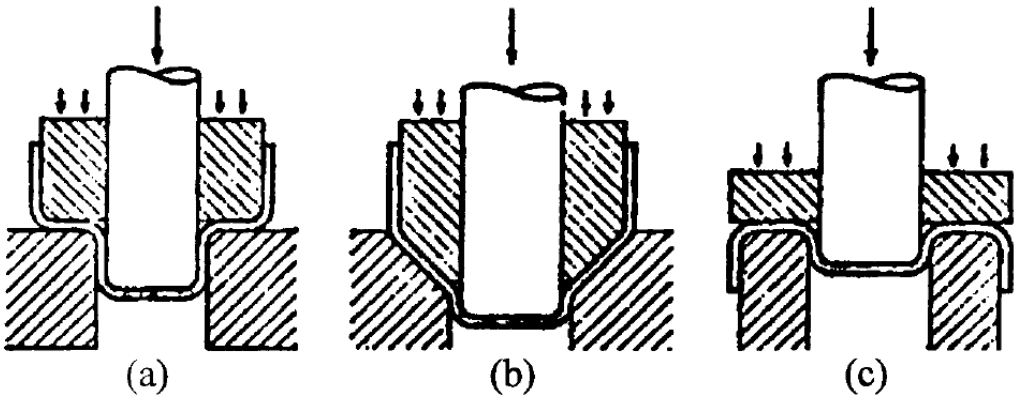
Eğer kalıp ve ıstampa arasındaki açıklık maksimum cidar kalınlığından büyükse, herhangi bir ütüleme etkisi doğmamaktadır. Bu aralığın kap cidar kalınlığından belli bölgelerde küçük tutulmasıyla ütüleme gerçekleştirilir. Bunun için, aynı işlemde farklı çaplardaki kalıplar ardışık olarak kullanılabilmekte ya da derin çekilmiş bir kap, bir veya ardışık ütüleme kalıplarında ayrı ayrı ütülenebilmektedir. Ayrıca kalıp ağzının köşe yuvarlatmasını arttırarak ütülemeyi gerçekleştirmek de yöntemlerden bir diğeri olmaktadır.

Istampanın uygulandığı kuvvet, ideal şekil değiştirme kuvveti, sürtünme kuvvetleri ve şayet varsa ütüleme işlemi için harcanan kuvvetin toplamına eşittir. (Şekil 5.34) Şekil değiştirme sertleşmesinden dolayı plastik gerilme sürekli artacağından, ideal şekil değiştirme kuvveti işlem boyunca sürekli artar.

Sürtünme kuvvetlerinin büyük bir kısmı sıkıştırma kalıbının yüzeyinde oluşur. Bu kuvvet bileşeni başlangıçta hızlı artar. İşlem ilerledikçe taslağın sıkıştırma kalıbı ile temas eden yüzeyi azaldığından, sürtünme kuvvetleri de azalır. Ütüleme olayı derin çekme işleminin sonlarına doğru başlar.

Şekil 5.34 Derin çekme işlemi esnasında uygulanan kuvvetin zımbanın ilerleme mesafesine göre değişimi (Kayalı vd., 1979)

Derin çekme kuvveti, zımba yoluyla üretilecek parçanın tabanına uygulanır. Bu kuvvet dolaylı olarak yan duvarlara iletilir. Kırılma olayı genellikle zımba eğrilik yarıçapının hemen üstündeki bölgede görülür. Bu bölgede malzeme bükme veya radyal çekmeye uğramadan sadece çekme birim şekil değişimine uğramaktadır. Bu bölgede şekil değiştirme düzlemsel plastik şekil değiştirme türünde olup kalınlığın incelmesine neden olur. Hasar önce boyun verme daha sonra yırtılma şeklinde olur.



Şekil 5.35 Yeniden derin çekme işlemlerine ait örnekler (Çapan, 2003)

Doğrudan yeniden derin çekme işleminde bükme ve doğrultma işlemleri, iki kez tekrarlanır ve deformasyon sertleşmesi veya şekil değiştirme sertleşmesi büyük oranda gerçekleşir. Şekil değiştirme sertleşmesini azaltmak için kalıp tasarımında değişiklik yapılabilir. Örneğin, Şekil 5.35 (b)' de , (a)' dakine oranla bükme doğrultma işlemleri daha az, dolayısıyla şekil değiştirme sertleşmesi de daha az oranda olur. Ters yeniden derin çekme işleminde (Şekil 5.35 c) bükme hep aynı yöndedir, dolayısıyla, şekil değiştirme sertleşmesi daha azdır. Soğuk şekil değiştirmiş malzemede şekil değiştirme yönü değiştirilirse malzeme sünekliğinde artış görülür. Şekil değiştirme yumuşaması veya deformasyon

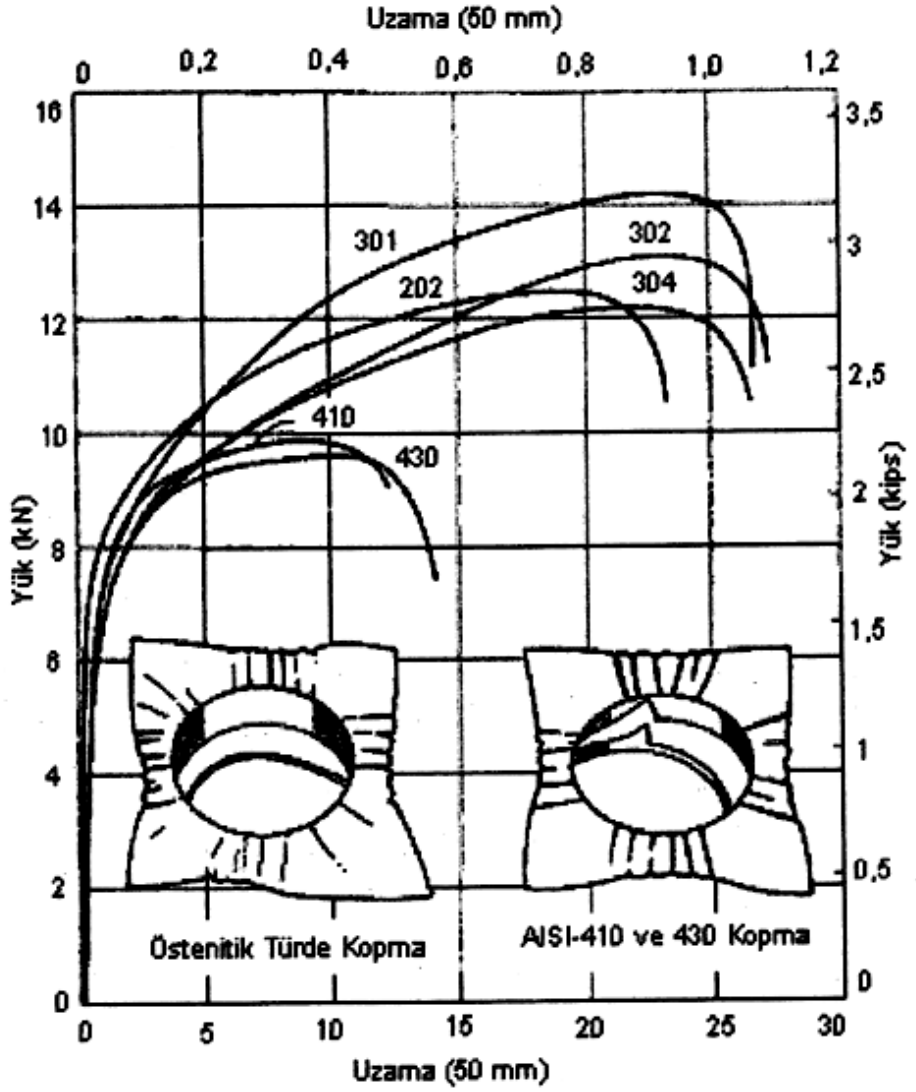
yumuşaması diye tanımlanan bu olay ters derin çekme işleminde görülebilmektedir. Bu özellikten dolayı yeniden derin çekme işlemlerinde ters derin çekme olayı tercih edilir. Yeniden derin çekme işleminde şekil değiştirme oranı her kademe için azaltılarak yapılır. Ara tavlama işlemine gerek kalmadan, malzeme toplam olarak % 50 - 80 oranında plastik şekil değiştirmeye uğratılabilir. Gerekli hallerde ara tavlama işlemi uygulanır.

Sünek olmaları nedeniyle özellikle soğuk sac şekillendirmede en çok kullanılan türler östenitik paslanmaz çeliklerdir. Bu malzemelere yüksek oranlarda çekme uygulanabilir. 201 ve 301 kaliteleri iki eksenli germe ile % 35’ den fazla şekillendirilebilir, çünkü şekillendirme sırasında martenzitik dönüşüm olması metalin büzülmeye direnç göstermesine ve daha büyük miktarlarda üniform şekil değiştirmesini sağlar. (Temel ve Aran, 2004)

Ferritik türlerin de şekil değiştirme kabiliyetleri iyidir; ancak bunlar daha az sünek olduklarından bu alışımların şekillendirme özelliği daha sınırlıdır, dolayısıyla çoğu zaman ara tav gereği ortaya çıkabilir. Ara tav sonrasında asitle temizleme işlemi yapılmalı ve paslanmazlığın muhafazası için bunu bir pasivasyon işlemi izlemelidir. Az alaşımlı martenzitik paslanmazlar şekillendirilebilirler ancak genel olarak martenzitik paslanmaz çeliklerin derin çekmeye uygun olmadığı söylenebilir. Kullanılacak şekil verme yöntemi, kullanılan çelik türünün karakteristiğine ve parçanın kalınlığına uygun olarak seçilmelidir. Paslanmaz çelikler için güç gereksinimi özellikle östenitiklerde daha yüksektir, çünkü bunlar ferritiklerden daha hızlı pekleşirler. Karbon çeliklerine soğuk olarak şekil verebilen kalınlıklarda, paslanmaz malzemeler için sıcak veya yarı sıcak olarak şekillendirme uygulanması gerekebilir. (Temel ve Aran, 2004)

Östenitik çelikler arasında 301 kalite, krom ve nikel oranı en düşük olandır ve yüksek pekleşme özelliğiyle yüksek çekme dayanımına sahiptir. Bu özelliği ile şekillendirme ile imal edilmiş yapı elemanlarında kullanımı yaygın iken derin çekme işlemine uygun değildir. Östenitik paslanmaz çelikler yaklaşık 0,5 civarında bir pekleşme üssü “ n “ değeri içerirler. Bunun sonucu olarak da çok yüksek kapasiteli biçimlendirme işlemlerinde kompleks şekle sahip parçalar tek bir operasyonla elde edilebilmektedir. (The ASM. a) Daha fazla krom ve nikel içeren 304, 304L ve 305 gibi alaşımlar daha az pekleşirler ve derin çekme ve benzeri işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan östenitik paslanmaz çelik malzeme bunlardır. Niyobyum, titanyum, tantal gibi stabilizatör alaşım elementleri ve artan oranda karbon içeren 321 ve 347 alaşımlarının şekillendirilebilirliği daha düşüktür.

Paslanmaz çelik malzemelerin derin çekilebilme kabiliyetini gösteren en uygun ölçüt, o malzemeye ait " sınır çekme oranı " değeridir. Derin çekme işleminde çekme oranı ; parçanın (pulun) başlangıç çapının, çekme sonrası çapa oranıdır. (Temel ve Aran, 2004)



Şekil 5.36 Akma ve kopma dayanımlarının karşılaştırılması (The ASM. c)

Problemsiz bir çekme işlemi için bu değerin malzemeye ait " sınır çekme oranı ", ($\overline{R}$) değerinden küçük olarak seçilmesi gerekir. Östenitik paslanmaz çelikler hızlı pekleşme özellikleri olmasına rağmen ilk çekme işleminde yüksek çekme oranlarına ulaşabilir. ($\overline{R}$ =2,1) Malzemenin sadece östenitik olduğu biliniyor fakat daha fazla ayrıntılı bilgi yok ise, çekme oranı olarak 1, 8 değerinin üzerine çıkılmamalıdır.

Östenitik paslanmaz çelikler ferritik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek sınır gerilimlerine sahiptir, dolayısıyla biçimlendirilebilirlikleri daha iyidir. (The ASM. c)

Paslanmaz çeliklerin çekmesinde kullanılan takımlar, normal karbonlu çeliklerinkinden daha güçlü yapılmalıdır, çünkü etkiyen kuvvetlerinin düşük karbonlu çeliklerden % 50 – 100 daha fazla olması beklenir. Çekme birden fazla kademede yapılacak ise kademeler arasında parçalar 7 ila 10 dakika süre ile 1000 ^{o}C – 1100 ^{o}C arasında tavlanmalıdır. Tav sonrasında soğutma, suda veya basınçlı hava ile yapılmalıdır. Tav öncesinde yağ artıklarının tümünün giderileceği bir temizleme yapılması gerekir. Şekil verme hızları düşük tutulmalıdır, aksi halde takım aşınması çok yüksek olur. Pot çemberi basıncı katlanmaları önleyecek derecede yüksek olmalıdır, ilk derin çekme kademesinde sorun çıkmaz ise daha sonraki kademelerde genellikle sorun çıkmaz. Ancak pot oluşmuş ise bunun ilerdeki kademelerde giderilmesi mümkün değildir. (Temel ve Aran, 2004)

Ferritik çeliklerde akma ve çekme dayanımları arasındaki fark, östenitik çeliklerden daha azdır, yani daha az pekleşirler, fakat bunun yanında süneklikleri de daha düşüktür. En çok tüketilen sac malzemeler arasında 409 ve 430 kalite çelikler sayılabilir. Kullanımları 304 kalite östenitik kadar yaygın olmasa da, özellikle 430 kalite saclar her türlü parlak paslanmaz çelik uygulamasında tercih edilirler. Ferritik çelikler daha ilk derin çekme kademesi için bile çok iyi değillerdir. Yani derin çekme oranları östenitikler kadar yüksek seçilemez. ($\overline{R}$) değeri ender olarak 1,55 değerinden yüksek seçilebilir. Çok kademeli çekmelerde 750 – 800°C arasında kısa bir ara tavlama ile derin çekmeye devam edilebilir, 2. kademede ($\overline{R}$ = 1,28) ve üçüncü kademede ise ($\overline{R}$ = 1,2) değerleri kullanılabilir.

Malzemenin daha iyi şekillendirilebilmesini sağlamak için, bazı durumlarda yarı sıcak (ılık) derin çekme yapılabilir. Sıcaklık ince saclarda 100 ^{o}C, kalın saclarda ise 300 ^{o}C civarında seçilebilir.

Martenzitik kaliteler arasında sadece 403 – 410 – 414 kaliteler soğuk şekillendirme için tavsiye edilir. Bu alaşımlarda akma ve çekme dayanımları ve şekillendirme için gerekli kuvvet ve enerji, gerek östenitik ve ferritik çeliklere gerekse karbon çeliklerine oranla çok yüksektir. Daha fazla karbon içermeleri nedeniyle diğer martenzitik çeliklerin soğuk şekillendirilebilirliği çok düşüktür ve genellikle ancak yarı – sıcak (ılık) durumda işlenirler. Yüksek karbonlu martezitik türlerden 440A, 440B, 440C kaliteler ise çok daha düşük şekillendirme kabiliyetine sahiptir. Bu çeliklerden yapılan sac parçanın pekleşme sonrası sertliği yeterli bulunmazsa, genellikle havada su verilerek 60 HRC’ ye kadar yükseltilebilir.

Dubleks çeliklerin akma dayanımları östenitiklerin yaklaşık olarak iki katıdır. Kopma uzamaları (süneklik), tokluk ve pekleşme özellikleri ise östenitik ve ferritiklerin sahip

olduğu değerler arasındadır. Sac parçalardaki kenar – köşe radyüsleri östenitiklerden daha büyük tutulmalı, % 25’ den fazla şekillendirme gerektiğinde ara tav uygulanmalıdır. Yaşlandırılabilir çelik sacların şekillendirilebilmesi ise diğer dört sınıf alaşıma göre daha ender olarak uygulanır. Bu durum özellikle martenzitik çeliklerin sertliğinin yeterli bulunmadığı parçalar için söz konusudur. Bu alaşımlar çözme tavı sonrası yumuşak halde iken şekillendirilebilir ve daha sonra çökelme sertleşmesi (yaşlandırma) işlemiyle istenilen sertlik değerine ulaşılır.

Paslanmaz çeliklerin derin çekmesinde alaşım yanında iç yapı özellikleri de önem taşır. Bunlar arasında tane büyüklüğü en önemlisidir. Tane büyüklüğü arttıkça yüzeyde portakallaşma tehlikesi ortaya çıkmakta, çok küçük olduğunda ise akma dayanımı arttığından derin çekme zorlaşarak imkansız hale gelmektedir. ASTM standartlarına göre, genel olarak tane büyüklüğü 6 – 10 arasında olan saclar derin çekme, 9 – 12 arasında olanlar ise (mekanik) kesme için en uygun görülenlerdir. Derin çekme ve sıvamada yaygın olarak kullanılan alaşımlardan 304, 305, 316 ve 430 sacların DQ (Draw Quality) ve DDQ (Deep Draw Quality) kodlu çekme ve derin çekme kalitesindeki ticari formları bu özellikteki sacları ifade etmektedir. (Temel ve Aran, 2004)

Derin çekmede etkili bir diğer özellik de yöne bağımlılıktır (anizotropi), yani malzeme özellikleri haddeleme yönünde ve buna dik yönde farklılıklar gösterir. Soğuk haddelenmiş ve ince saclarda, sıcak haddelenmiş kalın saclara göre daha belirgin olarak ortaya çıkabilen bu özelliğin etkileri, derin çekmede pot çemberi basıncının yerel olarak ayarlanması ile kontrol edilebilir.

Derin çekme – sıvama kalıplarının tasarımında dikkat edilecek konulardan biri de geri yaylanmadır. Karbon çeliklerine göre yüksek akma ve çekme dayanımı, kalıp tasarımında aynı oranda yüksek geri yaylanma telafisi veya şekillendirme sırasında daha yüksek pot çemberi basıncı gerektirir. Paslanmaz çeliklerin derin çekme işleminde dikkat edilmesi gereken önemli diğer konular ise; kalıp kaplamaları, yağlama ve şekillendirilecek malzemedir. Derin çekme, sıvama ve kenarlama kalıplarında tavsiye edilen kaplamalar arasında CVD ile kaplanmış titanium karbür (TiC), titanium nitrür (TiN) ve titanium karbonitrür (TiCN) vardır. Sıyırıcı veya pot kullanılan kalıplarda, pot yüzeyleri kauçuk veya plastik ile kaplanmalıdır ve basma altında oluşabilecek yüzey hasarları önlenmelidir. (Colombier ve Hochman)

Paslanmaz çeliklerin yüzeyleri, sürtünme nedeni ile diğer çeliklere kıyasla daha kolay çizilir, dolayısıyla şekillendirmede yağlamaya daha fazla özen göstermek gerekir. Bu amaçla

kullanılan madeni yağlar çoğu zaman yetersiz kalır, bu nedenle yüksek basınca dayanıklı hidrokarbon ve polimerler içeren yüksek ısıtıcılığa sahip özel kaydırıcı yağlar kullanılabilir. Yağlayıcı kullanımı konusunda değişik deneyimler mevcuttur. Yüzeye grafit – su karışımı sürülerek, çekmeden önce kuruması beklenebilir. Ayrıca çekmede kullanılan diğer yağlara bir miktar grafit katılarak işlem yapılabilir. Ara tav gereği var ise en uygunu grafitten yararlanmaktır. Diğer yağlayıcıların tav öncesi uzaklaştırılması gereği vardır.

Paslanmaz çelik sacların şekil değiştirme hızına duyarlılığı karbon çeliklerine göre daha fazla olduğundan, preste şekillendirmede daha düşük hızlar kullanılması tavsiye edilir. Bu sayede hem gereken kuvvetler düşer, hem de sünekliğin de hissedilir derecede arttığı görülür. Çekme aralığı olarak da kalınlığın % 20 – 35 fazlası önerilmektedir. Matris köşelerinde yuvarlatma yarıçapı olarak kalınlığın 5 ila 10 katı tavsiye edilir. Zımba kenarlarında ise yuvarlatma yarıçapı olarak kalınlığın 5 katı önerilmektedir. (Arkun, 2006)

6. ŞEKİLLENDİRME KABİLİYETİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Çelik sacların başarı ile şekillendirilebilmesi, malzemenin kimyasal bileşimine, çelik üretim sürecine, malzeme iç yapısına, çeliğin şekillendirilebilme yeteneği ve mekanik özelliklerine (akma mukavemeti, elastisite modülü, sertlik, yüzde uzama vs.) gibi genel malzeme özellikleri ile, verilecek şeklin geometrisine, şekli verecek malzemelerin tasarımına, çeliğin yüzey özelliklerine, yağlama kalitesine, yağ türü seçimine ve pres hızına bağlıdır.

Şekillendirme sırasında çeliğin davranışını bir çok faktör etkileyebilir. Sacların şekillendirilebilirliği, malzemenin mekanik ve metalurjik özellikleri ile büyük değişimler göstermektedir. Şekillendirmeden önce sacın depoda bekleme süresi, verilecek şeklin ve ekipmanın tasarımı, levhanın şekillendirmeye hazırlanması ve şekli verecek cihazlardaki operasyonlar kontrol edilmelidir. Kimyasal bileşim, deoksidasyon pratiği, levha kalınlığı ve kalınlık toleransları gibi diğer faktörler üreticiyle alıcı arasındaki anlaşmaya göre değişir. Üreticiler genelde sıcak ve soğuk haddelemeyle fireleri azaltıp şekillendirme için uygun karakteristikte sacı alıcıya sağlamayı düşünürler. Yukarıda adı geçen birçok faktör levhanın mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkiler. Şekillendirme sonucunda elde edilecek ürün karakteristiği hakkında bu faktörlerin incelenmesiyle bir tahminde bulunulabilir, fakat yine de kesin sonuç için daha fazla bilgi gereklidir.

Çelik levhaya verilen şekil kalıcı olmalıdır. Bunun için bölgesel ya da genel eğme, germe, düzleştirme veya bu işlemlerin bir kaçının kombinasyonu gerekli olabilir. Bir levha basit görünse de anizotropik olarak, kalınlığında farklılıklar olması ve bölgesel düzensizlikler nedeniyle analiz edilmesi imkansız gibidir. Genelde şekillendirme analizleri bir parçada şekillendirme sonucu oluşan bölgesel şekil değiştirmelerin belirlenmesi şeklinde olur.

Şekillendirilebilir metallerin çoğu tek yönlü gerildiğinde ya da çok yönlü çekme ve basma kuvvetlerinin etkisine maruz bırakıldığında genelde aynı şekilde davranış gösterir. Buna rağmen, göreceli miktarda germe ve sıvama (özellikle düzlem şekil değiştirme koşullarında yani bir boyutun değişmeden sabit kaldığı durum) işlemine tabi tutulmuş metalleri aynı miktarda yük kullanılmasına rağmen birbirinden ayırmak çok kolaydır. Bu fark edilebilirlik malzemelerin karakteristik özelliklerinden (deformasyon sertleşmesi kapasitesi, kırılma uzaması ve plastik deformasyon oranı) ve malzeme - proses etkileşiminden (kalıp açıklık etkisi, plaka - kalıp sürtünmesi, pres hızı ve bunun gibi faktörler) oluşmaktadır.

6.1 Malzemenin Kimyasal Bileşiminin Şekillendirmeye Etkisi

Çelik bileşimine istenerek katılan alaşım elementleri ve bunların yanında uzaklaştırılmak istenen, özelliklere kötü yönde etkileyen bazı elementler sacların kalitesine ve şekillendirme kabiliyetine çeşitli etkiler yapmaktadır. Çeliklerin alaşım elementleri ve etkileri şu şekildedir :

Karbon (C) : Karbon miktarı, çeliklerin mekanik özelliklerini en çok etkileyen faktördür. Karbon, çeliğin akma ve çekme mukavemetini artırır, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise çeliğin karbon içeriği yüksek olmalıdır. Miktarı arttıkça sertlik değeri yükselir ve malzeme gevrekleşir, korozyon dayanımı zayıflar.

Mangan (Mn) : Çeliğin dayanımını arttıran etki gösterir. Bunun yanında sertleşebilme ve kaynak kabiliyetini de artırır, östenit yapı oluşumuna yardımcı olur. Manganın en önemli özelliği kükürtle MnS bileşiği yapması ve demir kükürt FeS bileşiği oluşumunu engellemesidir. FeS sıcak kırılganlığa neden olur.

Silisyum (Si) : Çeliğin akma, çekme dayanımını ve elastikiyetini artırır. Pul oluşumunu önler, metale akıcılık kazandırır.

Fosfor (P) : Fosfor çeliğin akma ve çekme dayanımını arttırır, yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir, soğuk kırılganlık yaratır, talaşlı şekillendirme kabiliyetini arttırır. Fosfor çelik içinde üretim işlemlerinden kalan bir elementtir ve istenmeyen özellikleri nedeniyle mümkün mertebe yapıdan uzaklaştırılır.

Kükürt (S) : Akma ve çekme mukavemetine etkisi yok denecek kadar azdır. Fakat malzemenin yüzde uzamasına ve tokluğuna etkisi çok fazladır. Kükürt malzemenin tokluğunu ve sünekliğini önemli ölçüde azaltır, korozyon dayanımını ve kaynaklanabilirliği kötü yönde etkiler. Kükürt demirle birleşerek FeS fazını oluşturur. Bu faz düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu için haddeleme sıcaklığında ergiyerek sıcak kırılganlığa sebep olur. Bu olumsuz etki kükürdün manganla birleşmesi sağlanarak önlenir. Sadece talaşlı şekillendirilmeye uygun otamat çeliklerinde kükürt miktarı yüksek tutulur. Kaliteli ıslah çeliklerinde maksimum kükürt miktarı % 0, 045, asal ıslah çeliklerinde ise % 0, 035 dir.

Krom (Cr) : Pasif krom oksit filminin oluşumunu sağlayarak korozyon ve oksidasyon direncini ve sertleşebilme kabiliyetini artırır. Yüksek karbonlu çeliklerde aşınma direncini yükseltir.

Nikel (Ni) : Darbe tokluğunu ve tavlı çeliklerde dayanımı artırır. Nikel, östenitik paslanmaz çeliklerin kromdan sonra ikinci en önemli alaşım elementidir. Östenitik paslanmaz çeliklerdeki nikel miktarı % 7 - 20 arasındadır.

Molibden (Mo) : Tane büyümesini önler, sertleşebilme kabiliyetini arttırır. Meneviş gevrekliğini giderir. Ayrıca molibden çeliklerin sürünme dayanımını ve aşınma direncini yükseltir. Alaşımlı takım çeliklerinde önemli bir alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde özellikle oyuklanma korozyonunu engellediği için çukurlanma ve yarık oluşumunu önler, korozyon direncini önemli ölçüde arttırır.

Tungsten (W) : Aşınma direncini arttıran, sıcakta sertliğin muhafazasını sağlayan, korozyon dayanımını iyileştiren, çukurlanma ve yarık oluşumunu önleyen bir alaşım elementidir.

Vanadyum (V) : Tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma, çekme dayanımlarını ve sertleşebilme kabiliyetini arttırır. Menevişleme ve ikinci sertleşmede olumlu etkileri vardır. Alaşımlı takım çeliklerinde kullanılır. Vanadyum, tane küçültücü ve karbür yapıcı etkisi ile mikro alaşımlı çeliklerde niyobyum ve titanyum ile birlikte kullanılan bir mikro alaşım elementidir.

Titanyum (Ti) : Vanadyum gibi tane küçültücü etkisi vardır. Mikro alaşımlı çeliklerde mikro alaşım elementi olarak kullanılır. Ayrıca paslanmaz çeliklerde krom karbürün olumsuz etkisini giderebilmek için karbür oluşturucu alaşım elementi olarak kullanılır.

Niyobyum (Nb) : Mikro alaşımlı çeliklerde tane küçültme etkisi en yüksek olan mikro alaşım elementidir. Taneler arası korozyonu önler. Paslanmaz çeliklerde titanyumla birlikte veya tek başına kullanılır. Niyobyum karbür ve niyobyum nitratlar yüksek mukavemet – düşük alaşım çeliklerinin mukavemetini arttırmada kullanılır. Bu element tek başına ya da titanyumla birlikte kalıntı element içermeyen çeliklerde R değerini arttırmada kullanılır. Bu alaşım elementi karbon ve azot gibi kalıntı elementlerini uzaklaştırarak akma uzamasının görülmemesini sağlar.

Alüminyum (Al) : Derin çekme kalite sacların üretiminde deoksidasyon için kullanılır. Alüminyum ile söndürülmüş (sıvı haldeyken Al ilave edilmiş) çeliklerde alüminyum oksijen atomlarının yanı sıra azot atomlarını da bağlar. Böylece alüminyum azotun olumsuz tesirini azaltmaktadır. Alüminyum ile söndürülmüş çelik saclar temper haddesinden sonra oda sıcaklığında altı ay bekletilseler bile, süreksiz akma olayı göstermezler. Alüminyumun diğer bir avantajı da tane boyutunun küçük olmasını

sağlamasıdır. Alüminyum ile söndürülmüş çelik sacların mukavemeti, sünekliği, germe ve derin çekme kabiliyeti artmaktadır. Akma dayanımını ve darbe tokluğunu arttırıcı etki gösterir. Nitrasyon çeliklerinin temel alaşım elementidir.

Kalay (Sn) : Akma ve çekme dayanımlarını pek etkilemez, fakat sıcak haddelemelerde sorunlar yaratır. Kalay düşük ergime sıcaklığına sahip bileşikler yaparak haddeleme sırasında kopmalara neden olur.

Bakır (Cu) : Akma ve çekme dayanımını arttırır, yüzde uzamayı ve şekillenebilirliği azaltır. Soğuk çekilebilirliği kötü yönde etkiler. Korozyon direncini yükselten etki gösterir.

Kurşun (Pb) : Haddelenebilirliği azaltır, yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler. Kurşun çeliklerin talaşlı şekillendirme kabiliyetini arttırır, bu yüzden otomat çeliklerinde alaşım elementi olarak kullanılır.

Hidrojen (H) : Hidrojen gevrekliğine neden olur. Azottan daha tehlikelidir. Malzemenin elastikiyetini azaltır.

Azot (N) : Çeliklerde süresiz akma olayına (akma uzamasına) sebep olduğundan mümkün olduğunca düşük olması istenir. Azot atom boyutu demir atomlarına nazaran çok küçük olduğundan oda sıcaklığında bile çelik içerisinde yayınabilmek ve difüze olabilmektedir. Çelik saclar istenilen kalınlığa, soğuk haddelendikten sonra tavlanarak sünek hale getirilir. Tavlamadan sonra temper haddesi (% 0,5 deformasyon yapan haddeleme işlemi) yapılarak piyasaya verilir. Temper haddesi yapılan çelik saclarda akma gözükmez. Çelik içerisinde bulunan empürüte azot atomları dislokasyonlar çevresine yayınarak dislokasyon hareketini engellemekte ve bunun sonucu olarak sacda akma olayı meydana gelmektedir. Bu süreksiz akma olayı şekillendirilen sac yüzeyinde Lüders bantları adı verilen çizgilerin teşekkülüne sebebiyet vermektedir. Lüders bantları hem germe ile şekillendirilen hem de derin çekilen parçalarda görülmekte ve parça yüzey kalitesini bozmaktadır. Azotun bu negatif tesirini azaltmak için azot oranını minimuma indirmemiz gerekir.

Oksijen (O) : Fazla miktarda oksijen nitrat formunu engeller ve böylece deformasyon yaşlanmasını düşürmek için katılan alaşım elementlerinin gerekliliğini azaltır. Silisyum, alüminyum ve titanyum gibi deoksidasyon elementleri oksijen miktarını kontrol ederler. Oksijen bu deoksidanlarla birleştiği zaman kompleks yapıda metalik olmayan yapılar oluşur. Çoğu metalik olmayan yapı curufta toplanır, fakat çelik içine kaçanlar uniform tane boyutunu yakalamada engel oluştururlar.

6.2 Çelik Üretiminin Şekillendirmeye Etkisi

6.2.l Sıcak Çekilmiş Saclar

Son pasonun yüksek sıcaklıkta yapıldığı işlemdir. Bitiş sıcaklığı malzemeden beklenen özelliklere ve kimyasal yapıya göre belirlenir.

Sıcak işlem sonunda yüzeyde gri oksit tabakası kalır. Bu tabaka deformasyon sırasında düşer, ancak prese kötü etki eder. Yağlama da yapılacağı göz önünde bulundurularak son şekillendirme işleminden önce bu tabakanın kaldırılması gereklidir. Sıcak hadde çelikleri dekape (oksit filmini kaldırmak için sıcak sülfirik ya da hidroklorik asitte temizleme işlemi) olarak istenebilir ve taşıma sırasında paslanma etkilerine karşı yağlanmış olmalıdır. Dekape saclar şekillendirme sırasında gerilme deformasyonu ya da Lüders bantları gösterecektir. Bu nedenle yüzey düzgünlüğünün önemli olduğu koşullarda sacların temper haddesinden (%2 deformasyondan az olan soğuk paso) geçirilmiş olması istenir. Depolama sırasında yaşlanma sorunu varsa özel söndürülmüş sıcak çekilmiş sac istenmelidir.

Sıcak çekilmiş saclarda R değerini arttırmak için hiçbir işlem yoktur, ama geliştirilmiş tane boyutu ve boyuna yarılmaya direnç çok iyi kontrol edilen kimyasal bileşim ile sağlanabilir. Bu da ticari kalite ve sıvama kalite sıcak çekilmiş sac arasındaki farkı verir.

6.2.2 Soğuk Çekilmiş Saclar

Şekillendirme için soğuk çekilmiş saclar, tavlanmış ve temper haddesi yapılmış sıcak çekilmiş dekape saclara soğuk işlem uygulanmasıyla yapılır. Kontrollü yapı ile yüzey kalitesi isteniyorsa sınıf 1 (E, exposed) sipariş edilmelidir. Soğuk çekilmiş sınıf 2 (U, unexposed) yüzey kalitesi düşüktür. Her iki sınıf için de ticari kalite, sıvama kalite ve özel söndürülmüş sıvama kalite soğuk çekilmiş saclar mevcuttur. Çoğu soğuk çekilmiş saclarda akma uzaması görülür. Bu olay normal şekillendirme deformasyonlarında kenarlara yakın kısımlarda Lüders bantları şeklinde görülür. Akma uzaması, tavlanmış saclara temper haddesi yaparak giderilebilir. Aşırı temper haddesi deformasyon sertleşmesine neden olur ve sünekliği azaltır. Genellikle temper haddesi % 0,5 - l uzamayla sınırlandırılır. Gererek temper haddesi, serbest halde haddelemeye göre kalınlığı boyunca daha homojen deformasyon verdiği için verimlidir. Serbest hadde sonucunda çıkan malzemede ortalama 45 gün saklama süresinden sonra yaşlanma görülür. Bunlara ek olarak sacların çeşitli nedenlerle kaplanması istenebilir. Kaplama yapılmış sacların şekillendirilme kabiliyetleri sıvama kalite çelikler kadar iyi değildir.

6.2.3 Gaz Giderilmiş Çelikler

Hem soğuk hem de sıcak çekilmiş saclar için de mevcuttur. Gaz giderme işlemi, ingot yüzeyinde çok saf demir tabakası meydana getirir. Gaz giderilmiş çelikler söndürülmüş çeliklerden daha iyi yüzey kalitesine sahiptir. Sünekliği geri kazandırmak için yapılan tavlama işleminden sonra gaz giderilmiş saclara şekillendirme sırasında oluşan Lüders bantlarını engellemek için temper haddesi yapmak gereklidir.

Gaz giderilmiş saclarda var olan iki cins kalite kimyasal kontrol ve tavlama pratiğine bağlı olarak elde edilir. Standart olarak ticari kalite ve sıvama kalitede empüriteler için sıkı toleranslar uygulanır ve tavlama süresini uzun tutarak ruloda üniformluk ve iyi şekillendirme kabiliyeti sağlanır.

Gaz giderilmiş saclar germeyle şekillendirmeye derin çekme ve sıvamadan daha uygundur. Gaz giderilmiş saclarda bir süre sonra yaşlanma olayı görülecektir, bu nedenle bekleme süresine göre sınırlı bir şekillendirme kalitesi vardır.

6.2.4 Alüminyumla Söndürülmüş Çelikler

Bu çelikler Al ve mümkünse Si ile deokside edilmişlerdir. Levha kalınlığında incelmeye (plastik deformasyon oranı (R)) karşı direnç çok iyidir. Gaz giderilmiş çeliklerdeki çok iyi yüzey karakteristiği Al ile söndürülmüş çeliklerde görülmeyebilir.

6.2.5 Kalıntı Elementi İçermeyen Çelikler

Bu çeşit çeliklere vakum altında gaz giderme yapılarak karbon, azot ve oksijen gibi kalıntı elementlerinin minimum seviyeye indirilmesi sağlanır. $\overline{R}$ (ortalama derin çekilebilirlik oranı) değerinde 2.0' a çok yaklaşılır. Bu çeliklerde üretimde ya da uygulamada yaşlanma olayı görülmez ya da akma uzaması olmaz. Diğer kalite çeliklere göre daha fazla deformasyon miktarlarına dayanabilir. Kalıntı elementi içermeyen saclar, alüminyumla söndürülmüş saclara göre son şekli daha az kademede alabilirler. Diğer çeşit saclarda kaplama şekillendirilebilirlik kabiliyetini düşürse de kaplama yapılmış kalıntı içermeyen saclarda şekillendirilebilirlik çok iyidir.

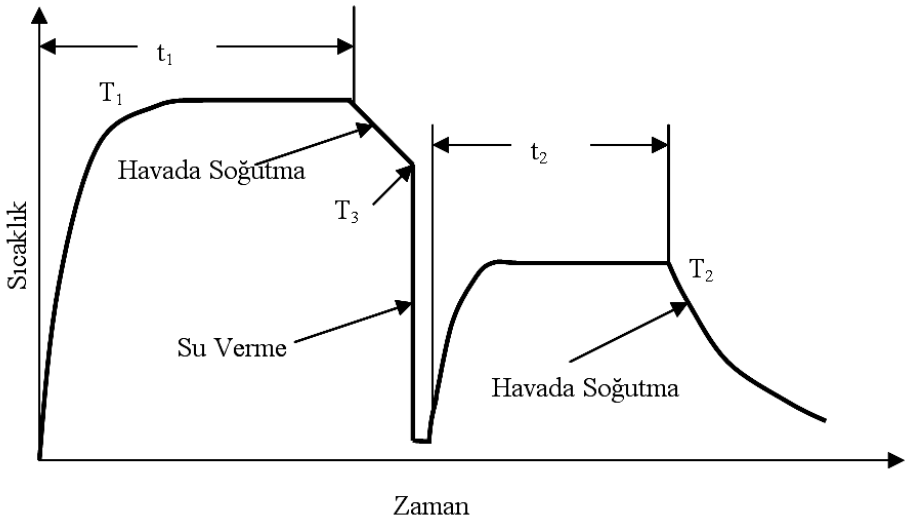
6.2.6 Yüzey Hazırlama

Soğuk çekilmiş çelikler için sınıflandırmak uygundur. Yüzey pürüzlülüğü 0,8 - 1,5 µm. (30 - 60 mikro inç) pik yüksekliğinde ve milimetrede 2 - 6 pik standart olarak belirtilmiştir. Yüzey düzgünlüğü son pasodaki merdane ve temper haddesindeki merdane

yüzeyine bağlıdır. Yüzey düzgünlüğü pres performansını bariz olarak etkileyecektir. Pürüzlü yüzeyin yağ tutma kapasitesi daha fazladır ve böylece şekillendirme sırasında kalıp yüzeyine kaynama olasılığı daha azdır. Az deformasyon yapılacak bölgelerde yüzey pürüzlülüğünün az olması uygundur.

6.2.7 Derin Çekme Saclarının Üretiminde Uygulanan Özel Yöntemler

Derin çekme saclarına sürekli tavlama yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemin alışılagelmiş üretim yönteminden farkı yeniden kristalleşme tavlamasının sürekli olarak ve çok kısa sürede yapılmasıdır. Bu tavlama ile yeniden kristalleşme, su verme ve hızlandırılmış aşırı yaşlanma gerçekleştirilir. Sürekli tavlama işlemi Şekil 6.1‘ de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Sürekli tavlama işlemi şeması (Kayalı vd., 1979)

t_1 : tavlama bekletme süresi (10-300 sn.)

t_2 : asırı yaşlanma süresi (0-150 sn.)

T_1 : tavlama sicaklığı (680-760 ° C)

T_2 : aşırı yaşlanma sıcaklığı (300- 500 ° C)

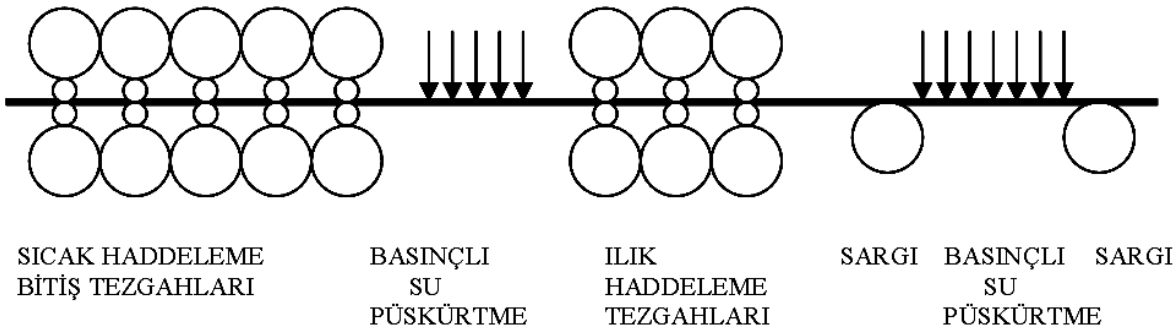
T_3 : su verme sıcaklığı (450-700 ° C)

Sürekli tavlama işleminde yeniden kristalleşme ile uygun bir tane boyutu ve kristallografik yapı elde edilmekte, istenmeyen karbür yapısı önlenmektedir. Su verme, yaşlanma işleminden önce yapılarak çözünmüş karbonun aşırı doyması arttırılarak yaşlanma süresi kısaltılmaktadır. Su verme sıcaklığı, aşırı doyma seviyesini kontrol için

önemli bir kriterdir. Aşırı yaşlanma sıcaklığı, karbonun çözünürlüğünün az, yayınmasının yüksek olduğu bir sıcaklık aralığında seçilmiştir. Su verme sırasında malzemenin kenarıyla ortası arasındaki sıcaklık farklı çarpılmalara sebep olduğundan, sıcaklık farkını gidermek için su verme sırasında basınçlı su kullanılır.

Derin çekme saclarına % 0, l Ti alaşımı ilavesiyle sürekli tavlama işlemi daha iyi sonuç vermektedir. Ti ile söndürülmüş çelikte haddelenmiş durumda bulunan ince TiC tanecikleri [111] yapısını geliştirir ve soğuk deformasyondan sonra yapılan tavlama işleminde hızlı ısıtma ile $\overline{R}$ değeri artar. Çelikteki karbon Ti tarafından stabilize edildiğinden yaşlandırma sertleşmesini engellemek için bir aşırı yaşlandırma işlemine gerek yoktur. Tavlama sıcaklığında su verildiğinde yaşlanmayan bir malzeme oluşur. Sürekli tavlama işlemlerinde hızlı ısıtma ve soğutma nedeniyle ortaya çıkan problemler Ti ile söndürülmüş çeliklerde görülmemektedir.

Buna benzer bir çalışma ise ılık haddeleme ile derin çekme kalitesindeki sacların üretimidir. Ilık haddeleme, çeliklerde A_1 sıcaklığının (Demir - karbon ikili alaşımında 723 ° C ' ye denk gelen faz dönüşüm sıcaklığı) altındaki sıcaklıklarda yapılan deformasyon işlemidir. Ilık haddelemenin avantajı, ılık haddeleme sıcaklıklarında düşük karbonlu çelik saclarda mekanik özellikler ve mikro yapıyı kontrol eden çeşitli faktorlerin kolaylıkla sağlanmasıdır. Derin çekme kalite sacların ılık haddeleme ile üretim şeması Şekil 6.2 ' de gösterilmiştir. Düşük karbonlu çeliklere 150 - 300 °C ' de yapılan ılık haddeleme ile soğuk haddelenmiş çeliklerden daha iyi kalitede derin çekme sacları elde edilmiştir. Çünkü bu sıcaklıklarda yapılan haddeleme işleminden hemen sonra yapılan soğutma ile karbür taneleri küçültülmekte ve daha sonra yapılan yeniden kristalleşme işlemiyle daha kuvvetli [111] yapısı oluşturulmaktadır. Aynı zamanda daha yüksek değerlerde ortalama çekilebilirlik oranı ($\overline{R}$) elde edilmektedir.



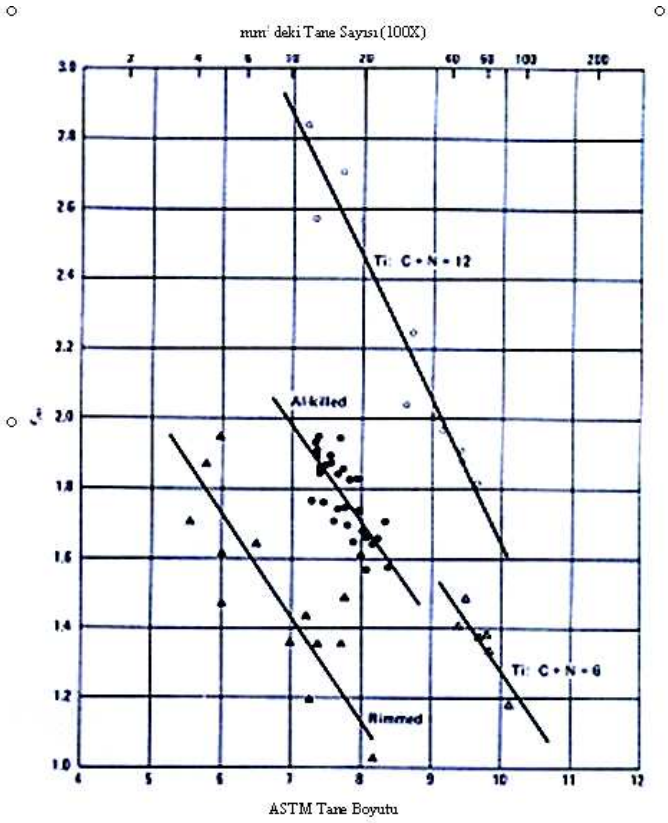
Şekil 6.2 Ilık haddeleme ile derin çekme saclarının üretim yöntemi şeması (Kayalı vd., 1979)

6.3 Malzeme Mikro Yapısının Şekillendirmeye Etkisi

Tane boyutu ve şekli, hadde yönüne göre tane ve kristal kafesin oryantasyonu ve çeşitli mikrobileşimler çeliğin şekillendirilme karakteristiğinde rol oynar.

6.3.1 Tane Boyutu

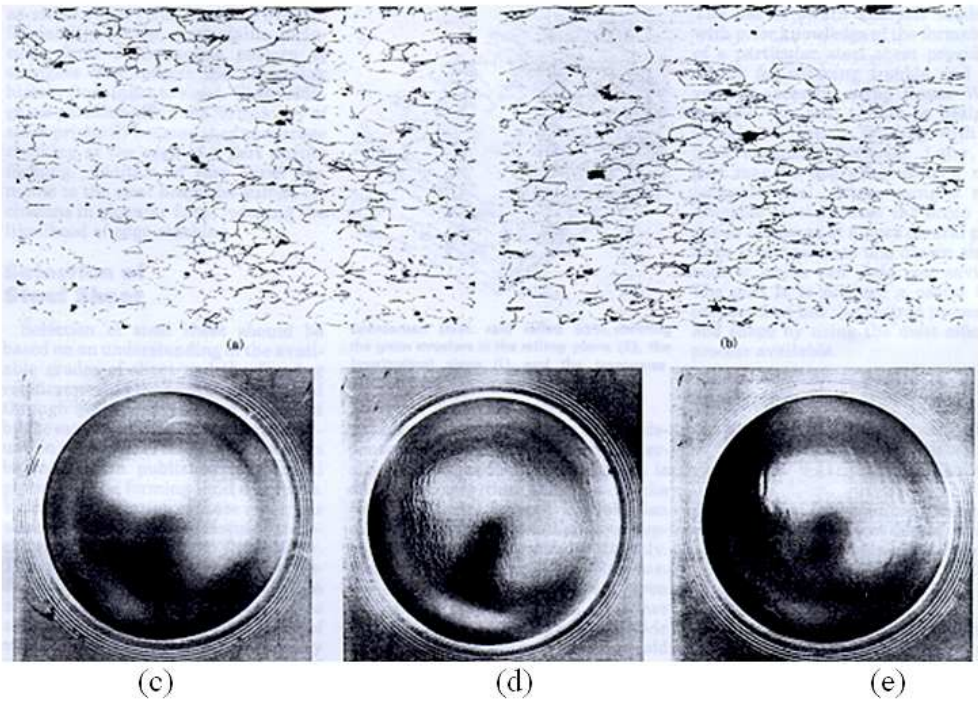
Düşük karbonlu çeliklerde akma mukavemetinin tane boyutunun kare köküyle ters orantılı olarak değiştiği bilinmektedir. Küçük taneli yapılar mukavemetlidir ancak düşük deformasyon sertleşmesi üssüne sahip oldukları için şekillendirilebilirliği sınırlıdır. $\overline{R}$ değeri ile tane boyutu arasında doğru orantı vardır. Büyük taneli çeliklerin şekillendirilmesi daha iyidir, fakat portakallanma olarak bilinen yüzey görünümü oluştuğundan kabul edilemez. ASTM' ye göre 5' in altındaki tane boyutlarında portakallanma görülür. ASTM 7 ve 8 genelde şekillendirilebilirlik ve yüzey özellikleri açısından optimum tane boyutudur.



Şekil 6.3 Dört adet düşük karbonlu çelik levhanın (%70 soğuk hadde + tavlama) $\overline{R}$ tane boyutuyla değişimi (Hecker, 1983)

Şekil 6.4' de şekillendirmeden sonra anormal tane büyüklüğü nedeniyle oluşan yüzey görünümleri gösterilmiştir. Büyük taneli yüzey görünümü levhanın iki yüzünde de görülmektedir. Tane boyutları (a) tamamıyla ASTM 6, (b) yüzeyde ASTM 3, gerikalan yerlerde ASTM 7, (c) kabın dış yüzeyi normal tane boyutlu, (d) kabın dış yüzeyi, tane boyutu

anormal büyük (portakal görünüm), (e) kabın iç yüzeyi, tane boyutu anormal büyük. (a) ve (b) 100X büyütme, (c), (d) ve (d) 2/3X büyütmelidir.



Şekil 6.4 Yüzey tane boyutunun şekillendirmeden sonra yüzey görünümüne etkisi (Hecker, 1983)

6.3.2 Ferrit Tanelerinin Şekli

Gaz giderilmiş ve sıcak çekilmiş alüminyumla deokside edilmiş çelikler hemen hemen aynı tane büyüklüğüne sahiptir. Aluminyumla deokside edilmiş çeliğin bu tane yapısı ve kristallografiyle çok iyi şekillendirme yapılabilir.

6.3.3 Mikroyapılar

Düşük karbonlu çeliklerde oda sıcaklığında ferrit, demir karbür ve bir çok metalik olmayan inklüzyonlar bulunur. En yaygın olanlar sülfürler, silikatlar ve oksitlerdir. Alüminyumla deokside çeliklerde bile optik mikroskop ile görülemeyen alüminyum nitrat partikülleri vardır. Perlit fazı daha yüksek karbon bileşimlerinde görülür. Diğer karbürler yüksek alaşım bileşimlerinde görülür.

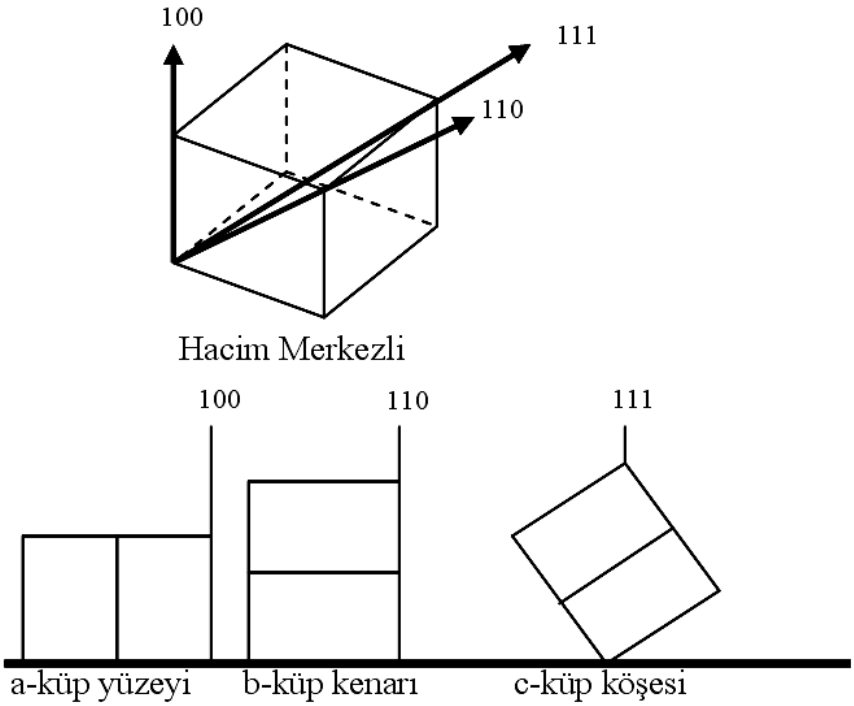
Bu mikroyapılar çeliğin mukavemetini değiştirerek şekillendirmeye etki ederler. Ferrit içinde çözünen alaşım elementleriyle oluşan karbür partikülleri ve perlit fazı mukavemeti arttırarak şekillendirilebilirliği azaltır. Metalik olmayan partiküller genellikle yapıdan daha serttirler ve gerilimi arttırarak deformasyon kabiliyetini azaltırlar. Sülfür bileşiklerini

küreselleştirmek için alaşım elementi (earth elements) kullanılabilir ve böylece çatlak oluşma ihtimali azalır.

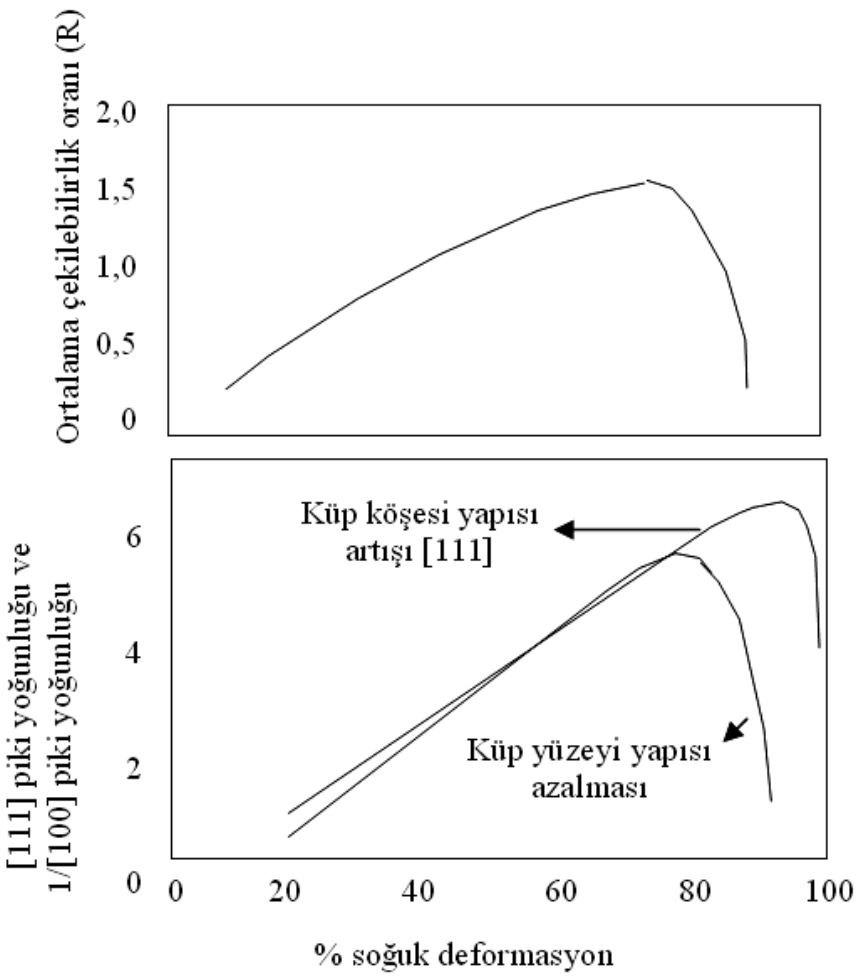
6.3.4 Tercihli Yönlenme

Herhangi bir maddenin kristallografik yapısı anizotropi yaratır. Kristalin bir maddede atomlar çeşitli düzlemlerde dizilmişlerdir, dolayısıyla atomlar arası kuvvetler ve mesafeler değişkendir. Bir numunede taneler eş eksenli olabilir, ama bu tanelerde bir yönlenme olmadığını göstermez. Genelde soğuk hadde sırasında bir çeşit tercihli yön söz konusudur ve diğeri tavlama sırasında oluşur.

Niyobyum içeren yüksek mukavemet düşük alaşımlı çelikler sade karbonlu çeliklerden tekstür açısından farklılık gösterir. Ferrit tanelerinin şekli nedeniyle $\overline{R}$ değeri 1,0' den büyük ve ΔR değeri sıfırdan farklıdır. Sade karbonlu çelikler ile niyobyum içeren çelikler arasındaki tekstür farkı, neden ΔR değerinin sade karbonlu çeliklerde genellikle pozitifken yüksek mukavemet - düşük alaşımlı çeliklerde negatif olduğunu açıklar. Tekstür farklılığı aynı zamanda kulaklanma olayını da açıklar. Düşük karbonlu çelikler hacim merkezli kübik (KHM) yapıya sahiptirler. Şekil 6.5'de KHM yapıda üç farklı kristallografik yönlenme şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Çelikte ortalama çekilebilirlik oranına etki eden kristallografik yönlenmenin 3 esas tipinin şematik gösterilişi. Sac yüzeyi ile, a) Küp yüzeyi, b) Küp Kenarı, c) Küp köşesi temas etmektedir (Kayalı, 1979)



Şekil 6.6 Ortalama çekilebilirlik oranı ($\overline{R}$) ve tekstür' ün soğuk deformasyon ile değişimi (Kayalı, 1979)

KHM yapıda mukavemet, hacimsel köşegenin bulunduğu [111] yönünde en fazladır. [110] yönünde biraz daha az , [100] yönünde ise en azdır. Kristallerin büyük bir yüzdesinde tercihli yönlenme var ise tüm malzeme tek bir kristale ait anizotropi karakteristiği kazanır. Sac malzemenin maksimum mukavemetli olduğu durum, tüm yapının veya yapının büyük bir yüzdesinin [111] yönünde yönlenmesi ile gerçekleşir. Tüm çeliklerde tavlama sırasında [111] yönlenmesi ortaya çıkar, ancak Al ile söndürülmüş çeliklerde bu iç yapı daha kuvvetlidir. Şekil 6.6' da Al ile söndürülmüş, çeliğin ortalama çekilebilirlik oranının ve kristallografik tekstürünün soğuk deformasyon ile değişimi görülmektedir.

Şekil 6.6' da görüldüğü gibi, çekilebilirlik oranındaki artış, küp köşesinin temas ettiği [111] yönünde yönlenmiş, yapının yoğunluğundaki artışa bağlıdır. Ancak bu iki eğri karşılaştırıldığında soğuk deformasyonla ortalama çekilebilirlik oranının % 75 deformasyona kadar arttığı , [111] yönündeki yönlenme ile ise % 90 deformasyona kadar çıkılabildiği görülmektedir. Fakat deformasyonda meydana gelen artışla çekilebilirlik oranının değişimi,

deformasyonla sac yüzeyinin taban düzlemi ile temas ettiği yapı olan [100] yönündeki yönlenmenin azalması ile orantılı olarak değişmektedir. [100] yönündeki yönlenme minimum iken, çekilebilirlik maksimum olmaktadır. Metalik malzemelerde plastik deformasyonun belli düzlemlerdeki atomların kaymasıyla olduğu bilinmektedir. Kayma düzlemi ise atomların en yoğun olduğu düzlemlerdir. Çeliklerde tavlama ile kuvvetli bir [111] doğrultusunda yönlenmiş yapının oluştuğu belirlenmiştir. Bu tip kristallografik yapının artmasıyla çekilebilirlik oranının artması beklenen bir sonuçtur.

6.4 Malzeme Mekanik Özelliklerinin Şekillendirmeye Etkisi

Çelik levhaların şekillendirilebilirlik özelliklerinin çoğu tek yönlü çekme deneyi ile belirlenebilir. Belirleyici parametreler; akma mukavemeti, çekme mukavemeti, toplam uzama miktarı, üniform uzama miktarı, akma uzaması, plastik deformasyon oranı (plastic strain ratio), yöne bağımlı anizotropideki farklılık ve deformasyon sertleşmesi üssüdür.

Çizelge 6.1 Sıcak haddelenmiş sacların tipik mekanik özellikleri

Kalitesi	Özellikleri	σ_a (MPA)	$\sigma_ç$ (MPA)	50 mm. %uzama	Sertlik HRB	Def. Sert. Üssü (n)	Plas. Def. Oranı (r_m)
Ticari	Standart Özellikleri	262	359	30	55	0,15	0,9
Gaz Giderilmiş	Geliştirilmiş Özellikler	241	345	35	50	0,18	1,0
Söndürülmüş	Yaşlanma yok	241	345	40	50	0,20	1,0
Normal Mukavemetli	İnklüzyon kontrolü	345	414	25	70	0,15	0,9
Yüksek Mukavemetli	İnklüzyon kontrolü	552	620	15	90	...	...

Çizelge 6.2 Soğuk haddelenmiş sacların tipik mekanik özellikleri

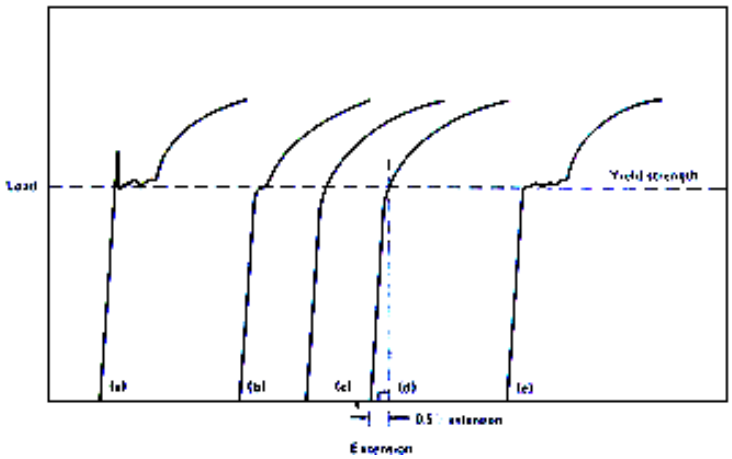
Kalitesi	Özellikleri	σ_a (MPA)	$\sigma_ç$ (MPA)	50 mm. %uzama	Sertlik HRB	Def. Sert. Üssü (n)	Plas. Def. Oranı (r_m)
Ticari	Standart Özellikleri	234	317	35	45	0,20	1,0
Gaz Giderilmiş	Geliştirilmiş Özellikler	207	310	45	40	0,24	1,2
Söndürülmüş	Yaşlanma yok	172	296	40	40	0,22	1,6
Kalıntı Elementi İçermeyen	Ekstra Derin Çekme	152	317	45	45	0,24	2,0
Normal Mukavemetli	İnklüzyon kontrolü	414	483	25	85	0,20	1,2
Yüksek Mukavemetli	İnklüzyon kontrolü	689	724	10	25	...	...

Çekme gerilmesi hadde yönünde, hadde yönüne dik yönde, hadde yönüne 45° ' lik açı yapan yönde ya da istenilen diğer yönlerde numune hazırlanılarak yapılabilir.

Test koşulları hıza ve sıcaklığa bağlıdır. Bu değişiklikler malzemelerin davranışını yani bir malzeme başarılı iken diğerinin neden hasara uğradığını belirler. Genelde kullanılan sıcak hadde ve soğuk hadde çelikler için mekanik özellikler çizelge 6.1 ve 6.2' de gösterilmektedir.

6.4.1 Akma Mukavemeti

Çelik levhalarda mukavemetin ve şekillendirilebilirliğin bir göstergesidir. Sade karbonlu çelik levhaların şekillendirilmesinde 240 MPa (35 ksi) akma mukavemeti ya da daha fazlası genel olarak aşırı geri yaylanma olasılığı, hızlı kalıp aşınması ve sınırlı süneklik ile kusurların oluşması olaslığını belirtir. Bununla beraber 140 MPa' dan (20 ksi) daha az akma mukavemetine sahip olması ise şekillendirme sırasında uygulanan gerilmeye dayanamamasına neden olur. Yüksek mukavemetli şekillendirilebilir çelik levhalar mukavemetin yüksek ya da ağırlığın düşük olması ve iyi şekillendirilebilme gereken uygulamalar için geliştirilmiştir. Bu tip çeliklerin akma mukavemetleri 345 - 690 MPa (50 - 100 ksi) arasında değişir.



Şekil 6.7 Aynı akma mukavemetine sahip farklı akma karakteristiği gösteren çelik levhalar için yük - uzama eğrisi (Kayalı, 1979)

(a) Hafif gaz giderilmiş yada Al ile söndürülmüş,

(b) Gaz giderilmiş hafif temper haddeli,

(c) ve (d) temper haddeli düşük karbonlu çelik; gaz giderilmiş ya da Al ile söndürülmüş olabilir. Akma %0.2 offset ya da % 0.5 yük miktarıdır.

(e) Gaz giderilmiş çelik ; oda sıcaklığında uzun süre bekleme sonucu yaşlanma.

Serbest hareket eden dislokasyon miktarı az olan gaz giderilmiş çeliklerde üst akma noktası belirgin bir şekilde görülebilir. Bu gerilmedeki bölge metal kaybını önlemek için aşılmalıdır. Gaz giderilmiş çeliklerde bulunan C ve N atomları gibi bazı malzemelerdeki az miktarda çözünmemiş atomlar % 4 - 5 plastik deformasyona kadar akma uzaması gösterebilirler. Bu olay malzemede Lüders bandları olarak bilinen deformasyon çizgileri olarak kendini gösterir ve kontak malzemesi olarak kullanılamaz. Eğer gaz giderilmiş çeliklere temper haddesi uygulanırsa (Akma uzamasının üzerinde bir seviyede) işlem sonrası fazla süre geçmemesi halinde şekil vermede kullanılabilir. Malzemeye yeterli miktarda Al ilavesiyle C ve N atomları bağlanarak bekleme süresi uzatılabilir.

6.4.2 Plastik Anizotropi

Haddelenerek üretilmiş çeliklerin plastik deformasyon özellikleri çoğunlukla hadde yönüne bağlı olarak farklılık gösterir. Buna plastik anizotropi adı verilir. Sacların şekillendirilme işlemlerinde, özellikle de derin çekmede, plastik anizotropinin önemi oldukça büyüktür. Saclarda incelme yönündeki gerinimlerin düşük olması istendiğinden, artan R değerleri ile birlikte sacların incelmeye karşı direnci artmaktadır. (Çeliklerde iki tür anizotropi vardır: Normal (dikey) anizotropi ve düzlemsel (planar) anizotropi.)

Normal anizotropi çeliğin şekillendirme sırasında incelmeye karşı direncini belirler, derin çekilebilirliğin bir ölçüsüdür. Literatürde plastik deformasyon oranı veya çekilebilirlik oranı (plastic strain ratio, R veya r) olarak da anılır. Bu oran enine gerçek birim şekil değiştirme (ε_u) ile kalınlık yönündeki gerçek birim şekil değiştirmenin (ε_t) oranı olarak ifade edilir. R değerinin yüksek olması incelmeye karşı direncin yüksek olduğunu belirtir.

$$\text{R veya r} = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_t} \tag{6.1}$$

Plastik deformasyon oranı (R), düşük karbonlu çeliklerde kristallografik yönlenme ile ilgilidir. Bu değerin belirlenmesi ASTM E517' de gösterildiği gibi rulo hadde yönünde çekme deneyi yapılarak belirlenir ve bu test ile elde edilen R değerleri anizotropik malzemeler için hadde yönü ve hadde yönüne dik yönde farklı olmaktadır.

Hadde yönüne göre değişik yönlerde elde edilen plastik deformasyon oranlarının ortalaması çeliğin normal plastik anizotropisini ($\overline{R}$ veya r_m) verir.

Bir derin çekme işleminde sınır derin çekme oranı (LDR) değeri teorik olarak elde edilebilir.

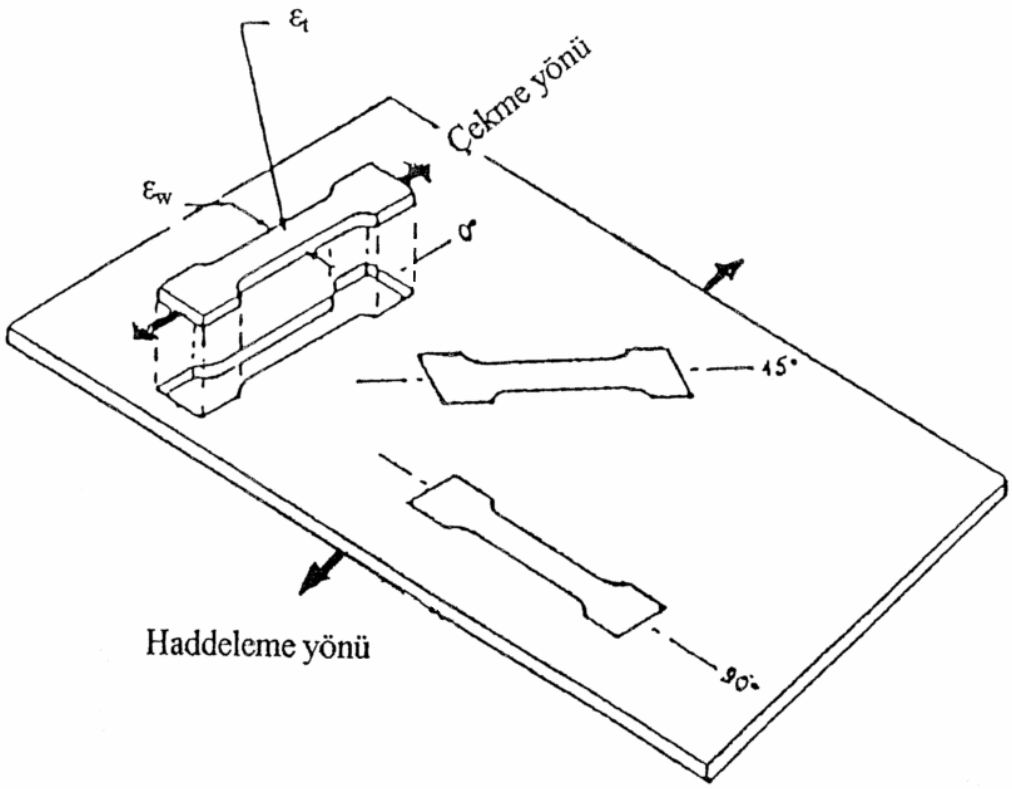
$$\ln(LDR) = \eta\alpha \tag{6.2}$$

Anizotropik plastisite teorisine göre düzlemsel izotropi hali ise 6.3 eşitliği ile elde edilir.

$$\ln(LDR) = \eta\sqrt{\frac{(R+1)}{2}} \tag{6.3}$$

Saclarda, anizotropide bir rotasyonel simetri (düzlemsel izotropi) durumu söz konusu olmadığında; Yani plastik gerinim oranı, sac yüzeyinde açısal değişimler gösterdiğinde, bir ortalama plastik gerinim oranı veya ortalama normal anizotropi değeri ($\overline{R}$) hesaplanabilir.

$\overline{R}$, Şekil 6.8' deki gibi, haddeleme yönü ile 0^0, 45^0 ve 90^0' lik açılardaki çekme numunelerinden belirlenen R_0 , R_{45} ve R_{90} değerlerinin (6.4) eşitliğindeki gibi hesaplanan ortalamasıdır. Sac malzemelerin diğer mekanik özelliklerinin ortalama değeri de ($\overline{n}$, $\overline{m}$ gibi) benzer şekilde hesaplanabilmektedir.



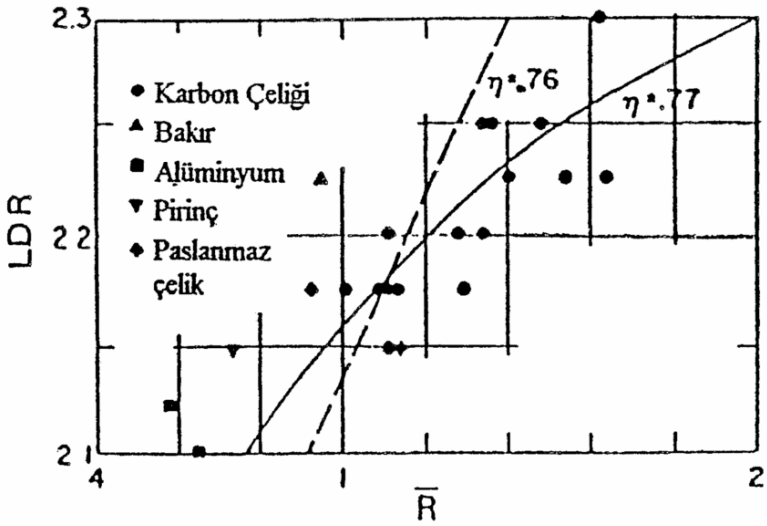
Şekil 6.8 Haddeleme yönü ile 0^0, 45^0 ve 90^0' lik açılardaki çekme numunelerinden $\overline{R}$ değerinin hesaplanması (Ghosh vd., 1984)

$$\overline{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \tag{6.4}$$

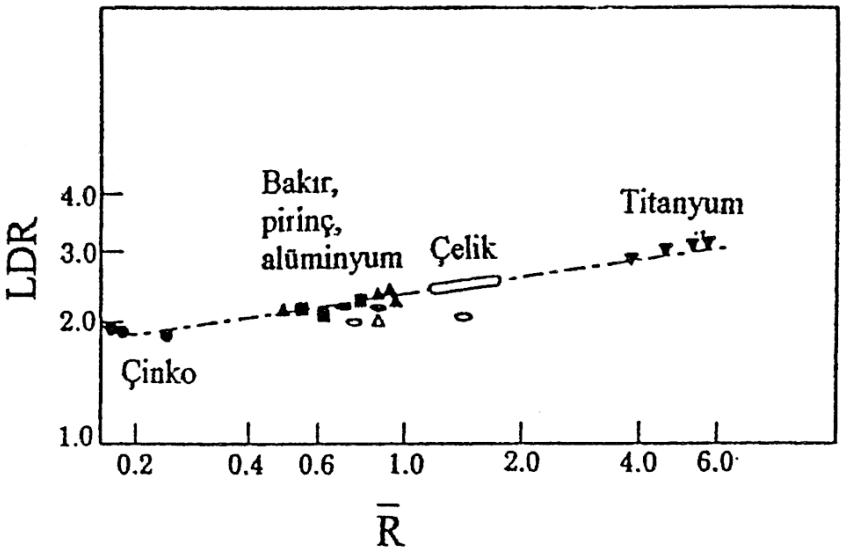
Saclarda, düzlemsel izotropi söz konusu olmadığı durumlar 6.5 eşitliği ile ifade edilebilir. Eşitlikte de görüldüğü gibi, artan $\overline{R}$ değerleri ile LDR değeri de artım göstermektedir.

$$\ln(LDR) = \eta\sqrt{\frac{(\overline{R}+1)}{2}} \tag{6.5}$$

Deformasyon verimlilik katsayısının (η), oluşan dağılıma göre en uygun eğriyi vermesi için 0,76 veya 0,77 olarak belirtmek gerekmektedir.

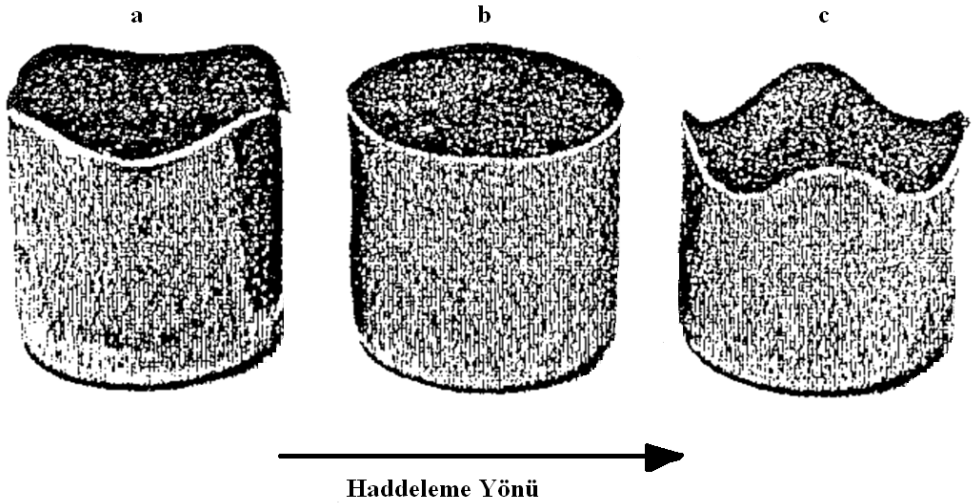


Şekil 6.9 Çeşitli malzemelerin deneysel olarak belirlenen $\overline{R}$ değerleri ile sınır derin çekme oranının ilişkilendirilmesi (Hosford ve Caddell, 1983)



Şekil 6.10 Bazı sac malzemelerin tipik $\overline{R}$ değer aralıkları ve sınır derin çekme oranları (Kalpakjian, 1991)

Sıcak çekilmiş ve soğuk çekilip normalize edilmiş çelikler genelde izotropiktir. ($\overline{R}$ = l). Gaz giderilmiş çelikler genelde $\overline{R}$ = l,2 değerine sahiptir, ama düşük mangan ve düşük kükürt değeri içeren özel uygulamalar için bu değer biraz daha yukarıda olabilir. Alüminyum ile söndürülmüş çelikler $\overline{R}$ = l,6 değeriyle daha anizotropik davranış gösterirler. Daha yüksek değerlere bileşimi ve prosesi kontrol ederek ulaşılabilir. Ticari çelikler için üst limit 3.0 civarındadır, fakat 3.0 değerine çok az ulaşıldığı görülmüştür. Kalıntı element içermeyen çeliklerde $\overline{R}$ değeri maksimum 2.0 civarındadır. Daha çok şekillendirilebilirlik, daha az şekillendirme kademesi ve daha karmaşık şekiller iyi geliştirilmiş bir yönlenme (yüksek $\overline{R}$ değeri) ile düşük karbonlu çeliklerde sağlanabilir.



Şekil 6.11 Üç farklı yönde yapılan derin çekme numuneleri ve kulak oluşum yönlerinin değişimi (Hosford ve Caddell, 1983)

Plastik gerinim oranlarının sac yüzeyinde farklı doğrultularda farklı değerler alması yani düzlemsel anizotropi, derin çekilmiş bir kaptaki yüksekliklerin yönlere göre farklılaşmasına neden olmaktadır. Derin çekmede bu durum “ kulaklanma “ olarak ifade edilir. Böylece bir kapta tepe noktası ile çukurlar arasındaki uzunluk, kulak yüksekliğini (Δh) vermektedir. Düzlemsel (planar) anizotropi (ΔR) silindir şeklinde ya da buna benzer derin çekme operasyonlarında kulaklanma (tarak dişleri şeklinde oluşan izler) olarak bilinen kenarlarda oluşan hataların bir ölçüsü olarak ifade edilebilir ve şu şekilde gösterilebilir.

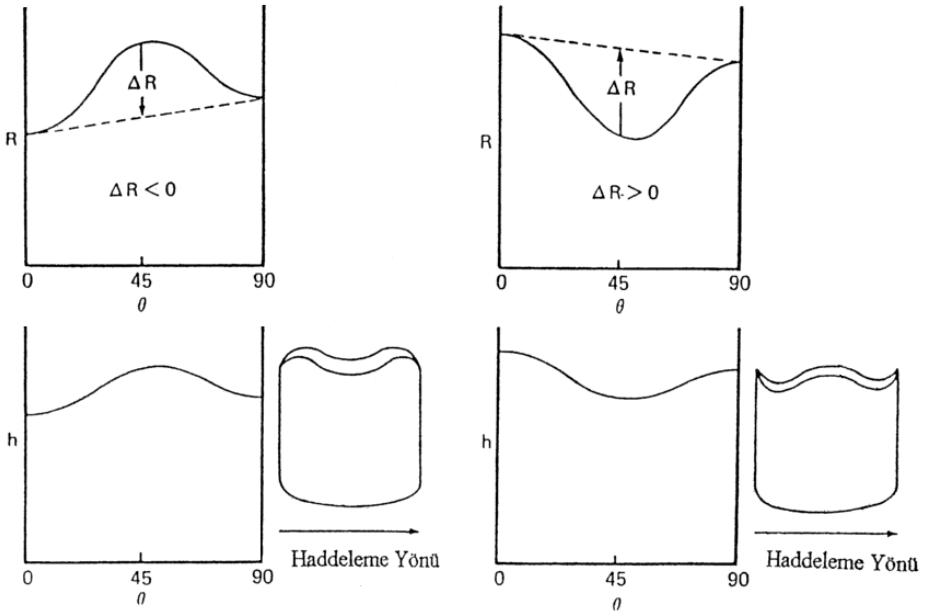
$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \qquad (6.6)$$

Bir kapta genelde dört tane kulak oluşmasına rağmen, bu sayı duruma göre iki, altı hatta sekiz olabilmektedir. Saclarda düzlemsel anizotropi sonucu dört kulak oluşumu söz

konusu ise, ΔR > 0 olması durumunda bu tepeler haddeleme yönüne 0° ve 90° doğrultularda oluşurken, çukurlar haddeleme yönüne 45°' de meydana gelmektedir. Eğer ΔR < 0 ise, tepeler haddeleme yönüne 45°' de meydana gelmektedir. Eğer ΔR = 0 ise kulak oluşmamakta ve üniform bir kap yüksekliği elde edilmektedir.

ΔR değeri negatif veya pozitif olabilir. Hadde yönünde ve buna dik ya da çapraz yöndeki yükseltiler ya da kulaklar görüldüğünde , ΔR pozitif olarak ifade edilir. (sade karbonlu sıvama kalite çelik levha) Bazı yüksek mukavemet - düşük alaşımlı çelikler için ΔR negatif ve kulaklanma 45° hadde yönünde görülür. Tüm şekillendirme operasyonları için ΔR değeri sıfıra yakın olmalıdır, yani çekme sırasında kulaklanmanın olmadığı koşuldur.

Kulaklanma ve kap boyundaki açısal değişimlerin R ile ilişkisi, şekil 6.12' de ifade edilmiştir. Saclarda R değeri, kesitin incelmesine veya kalınlaşmasına karşı direnç teşkil ettiğinden, bu değerin düşük olduğu yönlerde, daha fazla kalınlaşmayla birlikte daha kısa boylar (çukurlar) meydana gelmektedir. Bununla birlikte R değerinin yüksek olduğu yönlerde, cidar yüksekliği daha fazla (tepeler) ve kesit diğer yönlere göre daha ince olmaktadır.



Şekil 6.12 Kulaklanmanın veya kap cidar yüksekliklerinin (h) haddeleme yönüne (θ) göre açısal değişimi (Çapan, 2003)

Çeşitli malzemelere uygulanmış olan deneylere göre ΔR değeri ile ortalama kulaklanma oranı arasında ($\Delta h / \bar{h}$) bir bağıntı elde etmişlerdir. Bu orandaki $\bar{h}$ kabın ortalama yüksekliği olmaktadır. Plastik gerinim oranı, sacların derin çekilmesini önemli derecede etkilediğinden, birçok araştırmacı bu değeri " derin çekilebilirlik " olarak

tanımlamaktadır. R değeri, aynı zamanda tekrar çekme işlemlerini kabın çapındaki redüksiyon flanş deformasyonları ile ilgili olması sebebi ile olumlu yönde etkilemektedir. R değerinin cidar ütüleme işlemine etkisi, önceki derin çekme ve tekrar çekme aşamalarına olan etkisi şeklindedir. Yüksek R değerleri söz konusu olduğunda kesitteki kalınlaşma ve ütülemedeki redüksiyon oranı azalmaktadır.

Kalınlık yönündeki anizotropi değeri ($\overline{R}$) düzlemsel (planar) anizotropiden (ΔR) bağımsızdır. Genelde yüksek $\overline{R}$ değerine sahip malzemelerde, yüksek ΔR (düzlemsel anizotropi) görülmektedir. Çalışmalar yüksek $\overline{R}$ değeri yanında ΔR değerinin sıfıra eşit olması yönündedir. Anizotropi değeri kristal yapıyla yakından ilişkilidir. Sıkı paket hegzagonal yapıda (Be, Ti, Zr) hacim merkezli kübik yada yüzey merkezli kübik yapıdan (Fe, Cu, Al, Prinç) daha belirgindir.

Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik saclarda ortalama plastik gerinim oranı, sac kalitesine göre değişmektedir. Ticari kalitedeki saclarda $\overline{R}$ tipik olarak 1.0 iken, derin çekme kalitesindeki saclarda 1.2, özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesindeki saclarda ise 1,6 olmaktadır. Buradan da anlaşıldığı üzere derin çekme işlemine en uygun kalite, özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesindeki sac grubu olmaktadır. Arayer empürite element içermeyen IF çeliklerinde ise tipik olarak $\overline{R}$ = 2.0 olmakta ve bu saclar, ekstra derin çekme sacı olarak adlandırılmaktadır.

Diğer bir anizotropi ise malzemenin ingottan levhaya haddelenmesi sırasında inklüzyon, segregasyon, porozite ve diğer düzensizliklerin yönlenmesiyle oluşan mekanik fiberleşmedir.

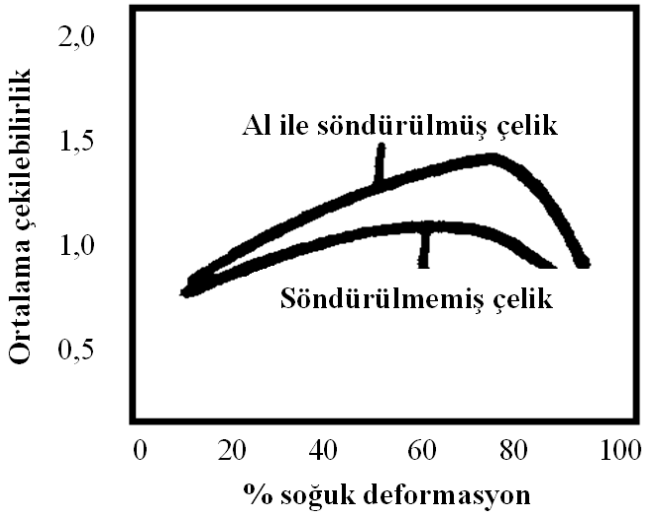
Şekil 6.13 Mekanik fiberleşme mikro yapısı (Keeler vd., 1977)

Eğer inklüzyon miktarı fazlaysa süneklik azalır ve deformasyon sertleşmesi hızı artar, bu da şekil alma kabiliyetini azaltır.

6.4.2.1 Haddeleme Şartlarının Çekilebilirlik Oranına ($\overline{R}$) ve Düzlemsel Anizotropiye (ΔR) Etkisi

Yapılan araştırmalar sonunda, anizotropinin sıcak ve soğuk haddeleme ile değiştiği, yeniden kristalleşme tavlaması öncesi yapılan soğuk işlem miktarının son sıcak haddeleme ve sargı sıcaklığının da çekilebilirlik oranını etkileyen bir faktör oldukları tesbit edilmiştir.

Deneylerde, soğuk deformasyon ve tavlama sonunda elde edilen malzeme yapısının, soğuk deformasyon miktarının artışı ile derin çekmeye uygun bir şekilde değiştiği görülmüştür. Yapıdaki değişim $\overline{R}$ ve ΔR değerlerine de yansır. Şekil 6.14' de söndürülmemiş ve Al ile söndürülmüş bir çelikte soğuk haddeleme miktarının ortalama çekilebilirlik oranına ($\overline{R}$) etkisi görülmektedir.



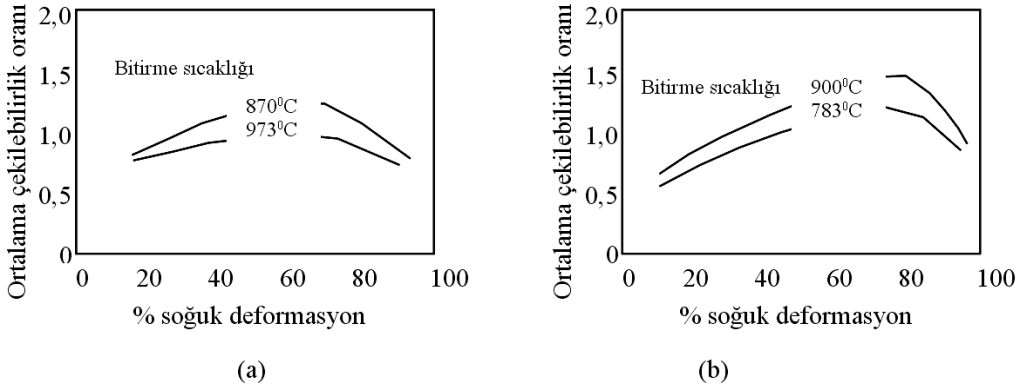
Şekil 6.14 Tavlama öncesi yapılan soğuk deformasyon miktarının ortalama çekilebilirlik oranına ($\overline{R}$) etkisi (Eren vd., 1985)

Şekil 6.14' de görülen, % 50 - 70 soğuk deformasyon ve tavlama sonucu çekilebilirlik oranında meydana gelen artma, söndürülmemiş ve Al ile söndürülmüş bir çok çelikte de görülmüştür. Çekilebilirlik oranı belirli bir değere kadar arttıkça derin çekilme kabiliyeti iyileşeceğinden, derin çekme işlemlerinde kullanılacak çeliklerde soğuk haddeleme miktarı % 60 civarında olmalıdır. Ayrıca Al ile söndürülmüş çeliğin çekilebilirlik oranının daha yüksek oluşu da dikkate değerdir. Al' un tane küçültücü etkisi çekilebilirliğin artmasına neden olur.

Şekil 6.15' de, soğuk haddeleme öncesi yapılan sıcak haddelemede, son haddeleme

sıcaklığının ortalama çekilebilirlik oranına etkisi, söndürülmüş ve söndürülmemiş çeliklerde görülmektedir. Genel olarak son sıcak haddeleme sıcaklığı azaldıkça iç yapıda bantlaşma olmakta ve çekilebilirlik oranı düşmektedir.

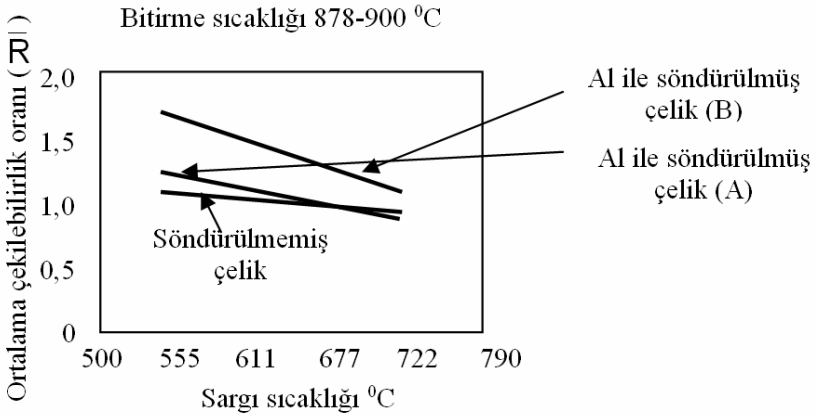
Ayrıca yüksek sıcaklıklarda haddelenen saclarda soğuk deformasyon sonrası uygun tavlama rejimi uygulanmazsa, tane büyümesi sonucu çekilebilirlik oranında tekrar düşme görülür.



Şekil 6.15 Söndürülmemiş (a) ve söndürülmüş (b) çelik için farklı son sıcak haddeleme sıcaklığı ile soğuk deformasyon miktarının ortalama çekilebilirlik oranına ($\overline{R}$) etkisi

(Eren vd., 1985)

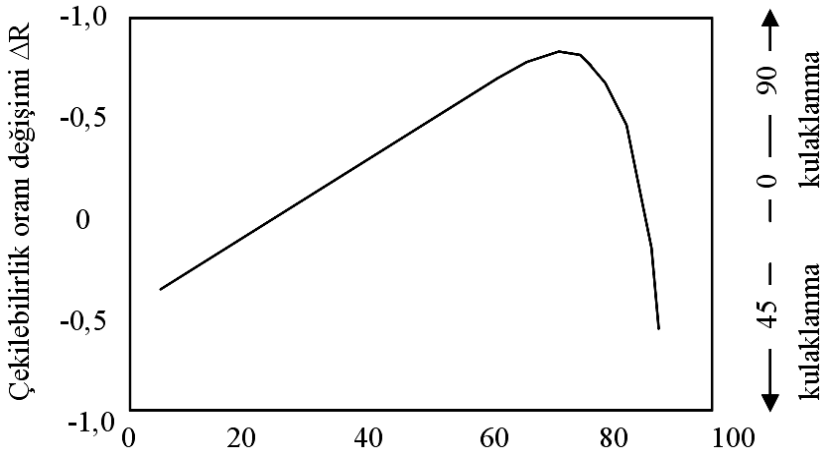
Sargı sıcaklığının da çekilebilirlik oranına ($\overline{R}$) etkisi vardır. Çelik sıcak sarıldığında soğuk sarılmaya nazaran daha düşük bir $\overline{R}$ değerine sahip olmaktadır. Bunun nedeni de yine tane boyutu ile ilgilidir. Eğer son haddeleme sıcaklığı yeterince yüksek ise, sargı sıcaklığının söndürülmemiş çeliklerde çekilebilirlik oranına etkisi azdır, ancak Al ile söndürülmüş çeliklerde bobin sargı sıcaklığı önem kazanır. (Şekil 6.16). Al ile söndürülmüş çelikte sargı sıcaklığı arttıkça ortalama çekilebilirlik oranı azalmaktadır.



Şekil 6.16 Bir söndürülmemiş ve iki Al ile söndürülmüş çelikte bobin sargı sıcaklığının $\overline{R}$ değerine etkisi (Kayalı vd., 1979)

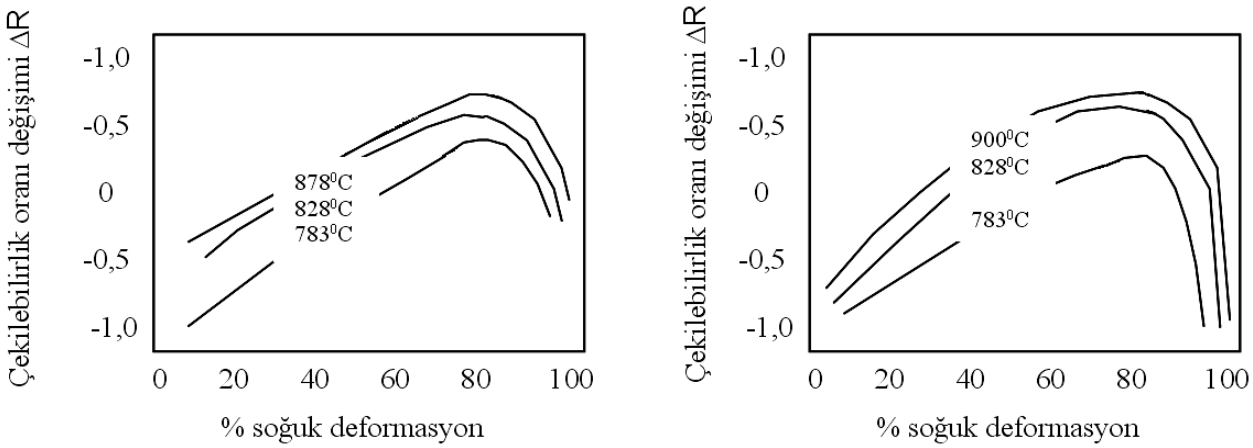
Haddeleme şartları düzlemsel anizotropi (ΔR) değerini de etkiler. Sargı sıcaklıklarının yaptığı etki hariç tutulursa, çeşitli haddeleme şartlarının $\overline{R}$ ve ΔR değerlerine etkisi fazlaca farklı değildir. Bobin sargı sıcaklığının ΔR değerine etkisi söndürülmüş ve söndürülmemiş çeliklerde aşağı yukarı aynıdır.

Soğuk haddeleme miktarının ΔR üzerine etkisi Şekil 6.17' de görülmektedir. Buna göre % 25 ve % 90 deformasyonda kulaklanma ortaya çıkmamaktadır. Bunun altında veya üstünde kulaklanma görülmektedir.



Şekil 6.17 Söndürülmüş bir çelikte tavlama öncesi soğuk deformasyonun kulaklanmaya etkisi (Kayalı vd., 1979)

Son sıcak haddeleme sıcaklığının düzlemsel anizotropiye etkisi, sıcaklığın azalması ile ΔR' nin daha negatif olması şeklindedir. Şekil 6.18' de söndürülmemiş (a) ve söndürülmüş (b) iki çelikte % soğuk deformasyon ile ΔR değerleri değişimi, çeşitli sıcaklıklar için gösterilmiştir.



Şekil 6.18 Söndürülmemiş (a) ve söndürülmüş (b) çelikte farklı sargı sıcaklıklarında, soğuk deformasyon ile ΔR' nin değişimi (Eshel vd., 1986)

6.4.3 Elastisite (Young) Modülü (E)

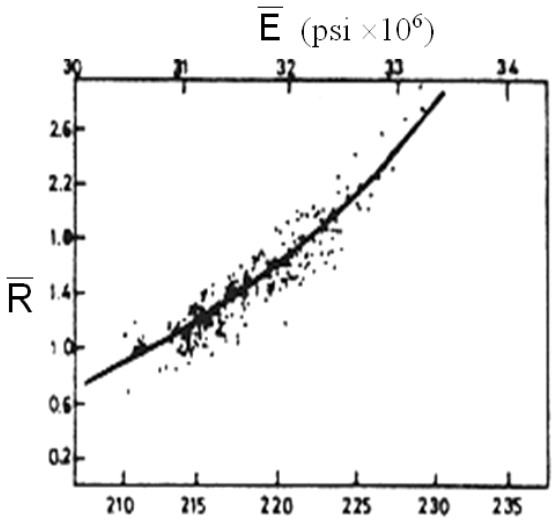
Metallere şekil verme sırasında görülen elastik geri yaylanmayı belirlemede akma mukavemeti ve elastisite modülü önemlidir. Bu olay daha çok yüksek akma mukavemeti ve düşük elastisite modülüne sahip malzemelerde görülür.

Düşük karbonlu çeliklerde 130 MN / m^2 gibi yaklaşık bir akma mukavemetinde 200 GN / m^2 elastisite modülü nedeniyle geriye yaylanma az miktardadır.

Anizotrop malzemelerde $\overline{R}$ ve ΔR değerleri gibi elastisite modülü de $\overline{E}$ (ortalama elastik modül) ve ΔE (planar elastik modül) olarak ifade edilir.

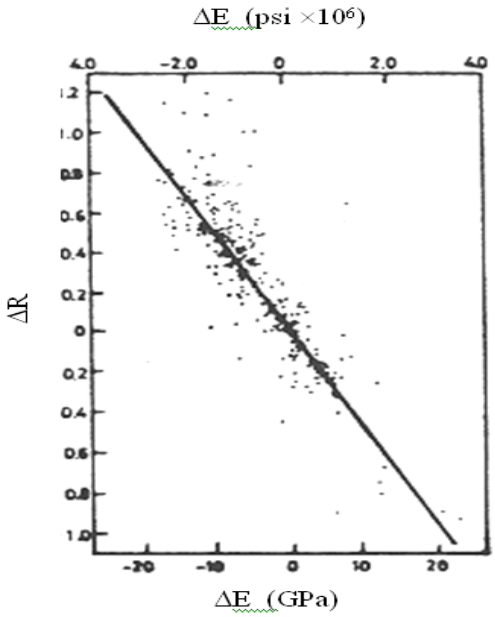
$$\overline{E} = \frac{\left(E_0 + 2E_{45} + E_{90}\right)}{4} \tag{6.7}$$

$$\Delta E = \frac{\left(E_0 - 2E_{45} + E_{90}\right)}{2} \tag{6.8}$$



Şekil 6.19 Çelik levhada normal anizotropiyle ($\overline{R}$), ortalama elastisite modülü ($\overline{E}$) değişimi (Hecker, 1975)

$\overline{R}$ değerinin $\overline{E}$ değeriyle ilişkili olduğu deneysel yolla saptanmıştır. (Şekil 6.19) Şekilden de görüleceği üzere aralarında doğru orantılı ilişki olduğunda ve derin çekme sınırı oranı ile $\overline{R}$ arasındaki doğru orantılı etkileşim nedeniyle yüksek $\overline{E}$ değerine sahip malzemelerde şekil alma kabiliyeti yüksektir denilebilir. Diğer taraftan ΔR değerinin ΔE ile ters orantılı olduğu 6.20 ‘de görülebilir. Yüksek ΔE değerine sahip malzemelerde kulaklanma ihtimali azalacaktır.



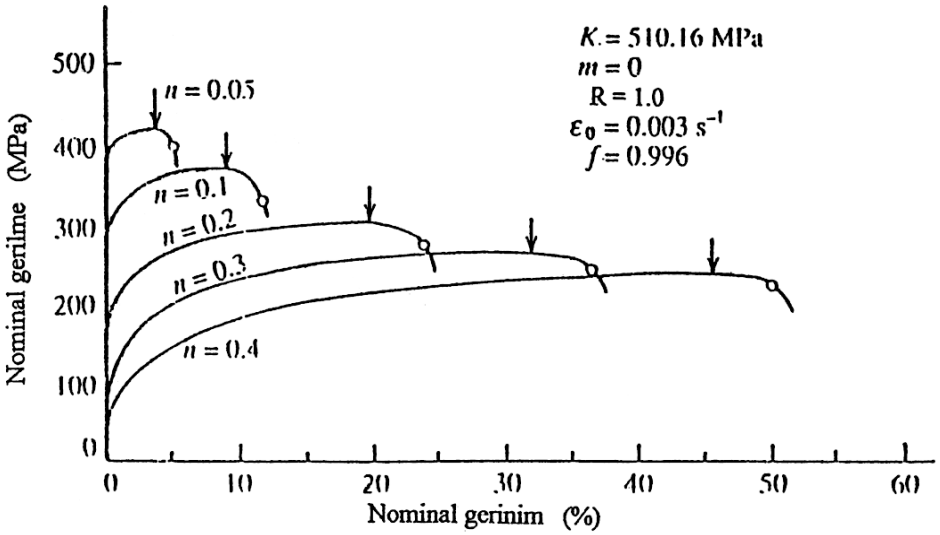
Şekil 6.20 Düzlemsel anizotropi (ΔR) ve düzlemsel elastisite modülü (ΔE) arasındaki değişim (Hecker, 1975)

6.4.4 Deformasyon Sertleşmesi Üssü – Pekleşme Üsteli (n)

Sac malzemelerin pekleşme kapasitesini yansıtan pekleşme üsteli (n) , malzemelerin şekillendirilebilirliği açısından çok önemli bir kriterdir ve malzemede deformasyon kabiliyetinin bir göstergesidir. “ n ” değerinin yüksek olması malzemenin sertleşme miktarının yüksek olacağını belirtir. (sertliğinin değil, sertleşeceği aralığın uzun olduğunu gösterir) Artan n değerleri ile malzemenin sünekliği ve iki eksenli gerilebilirliği artmaktadır. Malzeme deforme oldukça deformasyon sertleşmesi nedeniyle şekil alma kabiliyeti giderek azalır. Gerçek gerilme gerçek şekil değiştirme eğrisinin logaritmik olarak çizilmesiyle elde edilen eğrinin eğiminden hesaplanır. Düşük karbonlu çelikler için grafiğin önemli bir kısmı düz çizgidir. Veriler aşağıdaki denklem ile uyum gösterir ;

$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{6.9}$$

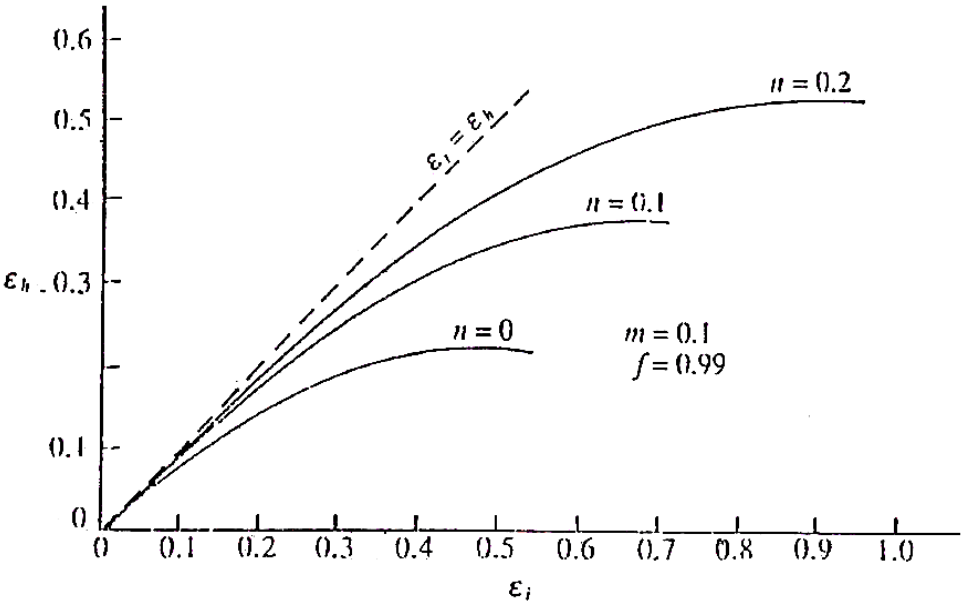
Yükün maksimuma erişerek boyunlanmanın başladığı andaki maksimum üniform gerinim ε_u= n olmaktadır. Bu değerin yüksek olması, üniform deformasyon alanının yüksek olması ve yayılı boyunlanmanın daha geç ortaya çıkması demektir. Bir başka deyişle, yüksek “ n “ değerine sahip sacın kritik bölgelerinde oluşan pekleşme ile dayanımın artması sonucu, yayılı boyunlanma oluşumuna karşı direnç de artmaktadır. (Şekil 6.21) Bu durumda deformasyon komşu bölgelere yayılarak, üniform gerinim bölgesinin alanı büyümekte ve diğer özellikler sabit kalmak şartıyla toplam uzama miktarı artmaktadır.



Şekil 6.21 Malzemenin diğer özelliklerinin ve çekme hızının sabit kalması şartıyla, pekleşme üstelinin artımı ile maksimum üniform uzamadaki artımın örneklenmesi (Mielnik, 1992)

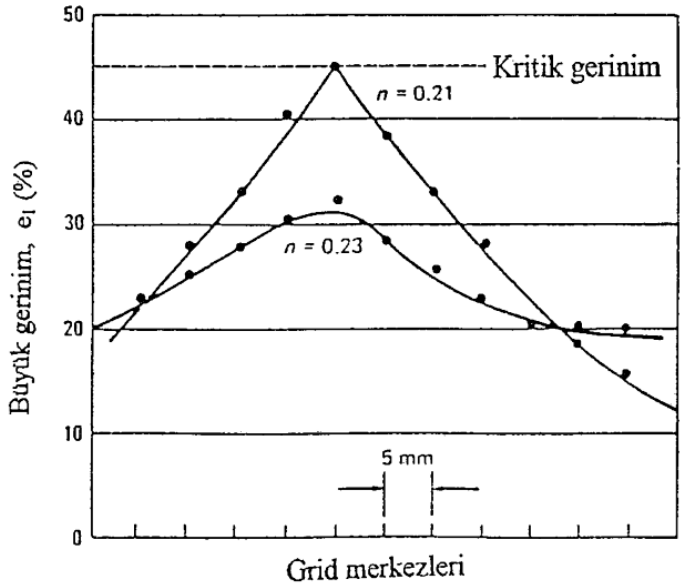
Şekillendirme için kullanılan düşük karbonlu çeliklerde " n " değeri 0, 22 civarındadır. Daha yüksek değerler (0,24'e kadar) arttırılmış süneklik ya da yüksek tek yönlü germe kabiliyetinin göstergesidir. Yeni çekilmiş gaz giderilmiş çelik ile alüminyumla söndürülmüş çeliğin " n " değerleri birbirine yakındır. Yaşlanmadan sonra gaz giderilmiş çeliklerin " n " değerleri alüminyumla söndürülmüşlere göre daha azdır. Bazı düşük karbonlu çelikler; özellikle şekillendirme için üretilmemiş sıcak çekilmiş olanların " n " değerleri 0,10 'a kadar düşük olabilir, fakat şekillendirme için üretilmişlerin " n " değerleri 0,18' in üzerindedir. Diğer metaller için bu grafik doğrusallık göstermeyebilir. Bu örnekte, yapılan şekillendirmeden elde edilen eğrinin eğiminden deformasyon sertleşmesi davranışı hakkında bir tahmin yürütmek mümkündür.

Kesitinde belli oranda bir süreksizlik bulunan (bir boyun veya çukur gibi) çekme numunesinde, süreksizlik gösteren bölgedeki deformasyon miktarı, komşu bölgelere göre daha fazladır. Bu nedenle, yayılı boyun içerisinde daha yüksek oranda pekleşme sonucu bir dayanım artışı söz konusudur. Yüksek " n " değerine sahip bir malzemenin pekleşme kapasitesi de yüksek olduğundan, boynun büyüme hızı, oluşan direnç nedeniyle azalmaktadır. Bu durumda deformasyon, daha yumuşak ve kesiti kalın olan homojen (üniform) bölgeye kaymaktadır. Şekil 6.22' de artan " n " değerleri ile boyun deformasyonun azalması ve üniform bölgedeki gerinimlerin artımı görülmektedir. Bununla birlikte, pekleşme üstelinin boyun büyümesine karşı etkisi, gerinim hızına duyarlılık üstelinin etkisi kadar fazla değildir.



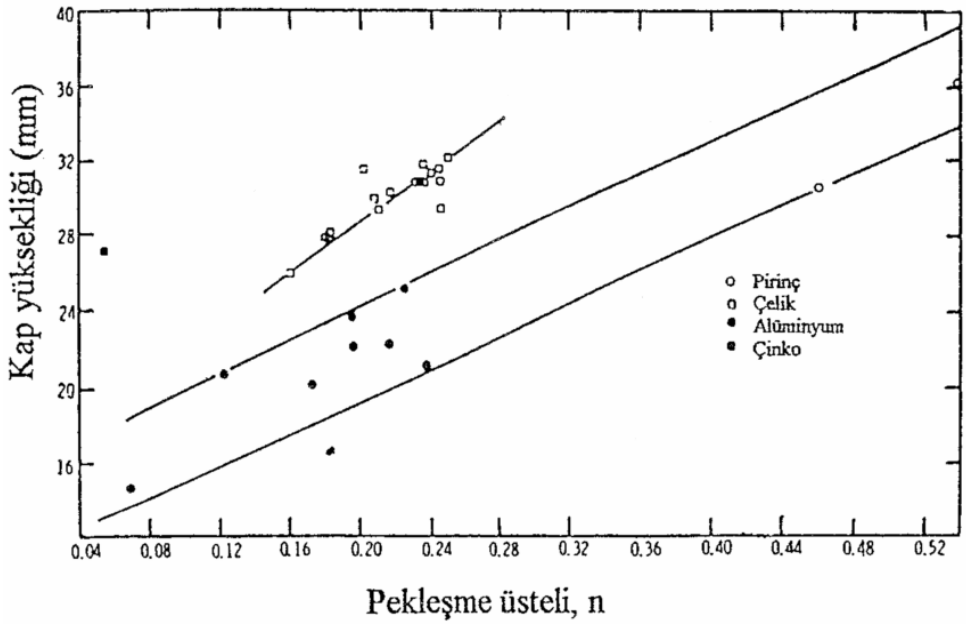
Şekil 6.22 Pekleşme üsteli ile homojen (üniform) bölgedeki gerinimin (ε_h) ve süreksizlik arz eden bölgedeki (boyundaki) gerinimin (ε_i) değişimi (Mielnik, 1992)

Düşük " n " değererine sahip malzemelerde gerinim yığılması sonucunda büyük gerinimler (e_1) kritik düzeye ulaşmaktayken, yüksek " n " değerine sahip malzemelerde gerinim daha üniform olarak yayılmaktadır. (Şekil 6.23)



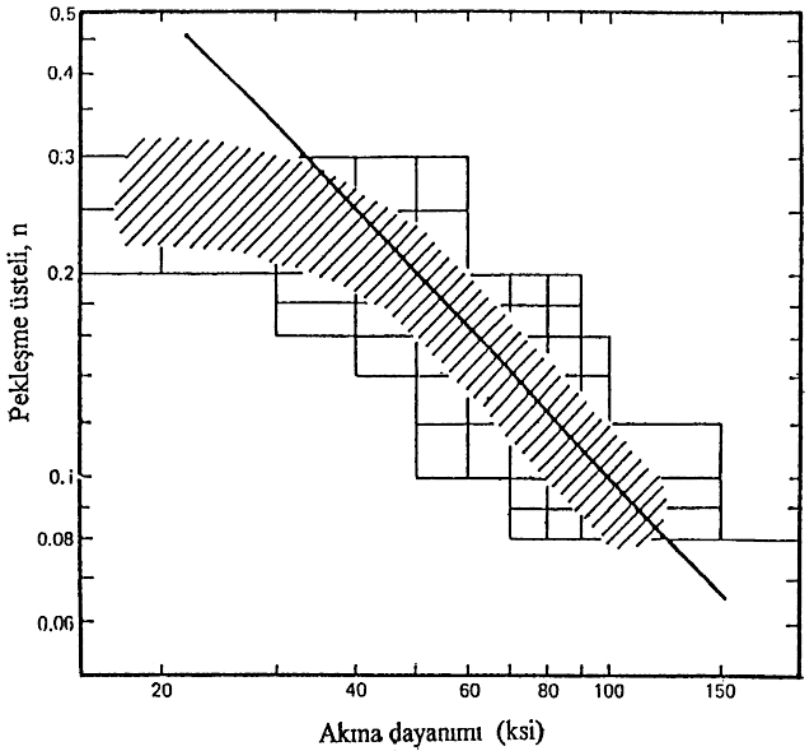
Şekil 6.23 " n "değerinin kritik deformasyon miktarına etkisi (Newby, 1978)

Pekleşme üstelinin artması ile şekillendirilebilirlik arttığından, şekillendirme sınır eğrilerinin seviyesi de artmaktadır. Farklı malzemelerle yapılmış olan deneylerde, n değerinin artması ile çökertme yüksekliğinin arttığı belirlenmiştir. (Şekil 6.24)



Şekil 6.24 Pekleşme üstelinin çökertme yüksekliğine etkisi (Hosford ve Caddell, 1983)

Malzemenin akma dayanımının artması ile plastiklik özelliklerinin düştüğü bilinmekte ve bu durum pekleşme üsteline de yansımaktadır. Artan akma dayanımı ile malzemenin pekleşme kapasitesinin düştüğü belirlenmiştir. (Şekil 6.25)



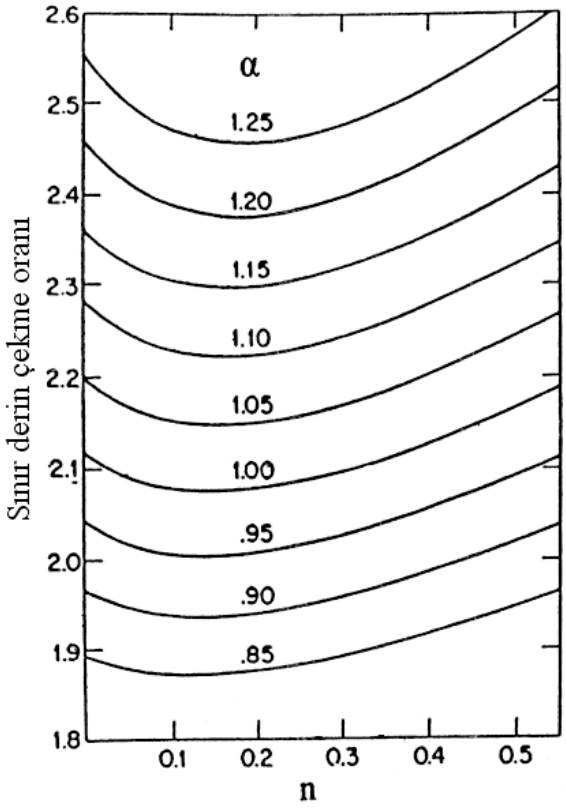
Şekil 6.25 Çeliklerde akma dayanımı ile pekleşme üstelinin değişimi

(Hosford ve Caddell, 1983)

Pekleşme üstelinin şekillendirilebilirliğe etkisi en çok germe işlemlerinde ortaya çıkmakta ve “n” değeriyle gerilebilirlik önemli ölçüde artmaktadır. Ortalama pekleşme üsteli ($\bar{n}$) ve sac kalınlığı ile Erichsen çökertme değeri arasında 0,853 korelasyon katsayısı ile (6.10) eşitliğindeki gibi bir bağıntı elde etmişlerdir.

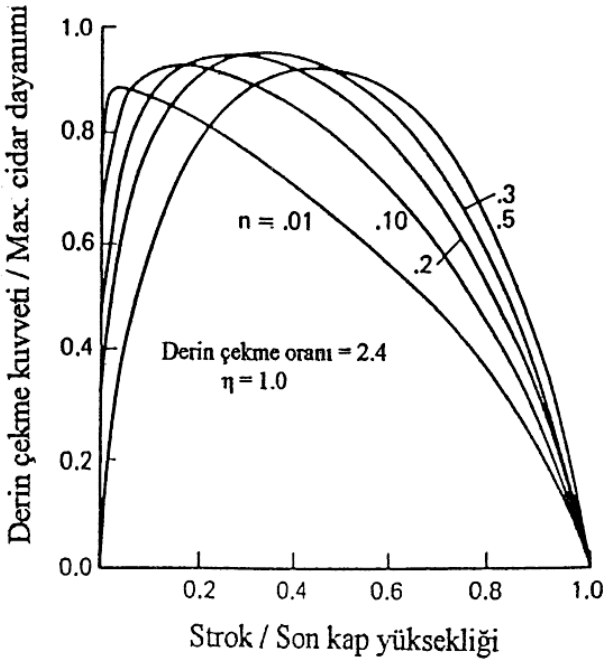
$$EÇD=7,534+1,788t+4,65.\ \bar{n}\ \pm\ 0,047 \qquad (6.10)$$

Pekleşme üstelinin derin çekme işlemine olan etkisi, germeye olan etkisi kadar fazla değildir. Hosford (1983), yürütmüş olduğu analitik çalışmada, η = 0,75 deformasyon verimliliği altında ve değişik α gerilme oranlarında, n değerinin sınır derin çekme oranına etkisini incelemiştir. (Şekil 6.26) Buna göre, pekleşme üstelinin derin çekmeye etkisinin oldukça az olduğu ve özellikle $0,2 \leq n \leq 0,5$ değerlerinde belirginleştiği görülmektedir.



Şekil 6.26 Pekleşme üstelinin η = 0,75 deformasyon verimliliğinde ve değişik α gerilme oranlarında sınır derin çekme oranına etkisi (Hosford ve Caddell, 1983)

Artan “ n “ değerleri ile derin çekmede oluşan maksimum kuvvet daha geç ortaya çıkmaktadır. (Şekil 6.27)



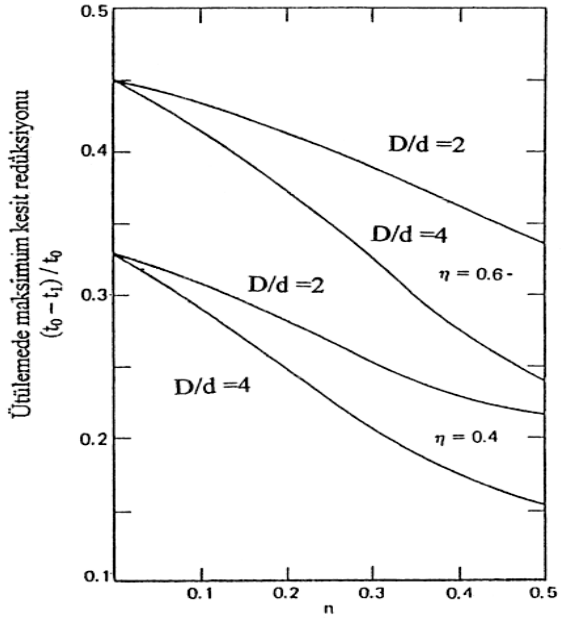
Şekil 6.27 Pekleşme üstelinin, derin çekmede ortaya çıkan maksimum kuvveti geciktirici etkisi (Hosford ve Caddell, 1983)

Pekleşme üstelinin derin çekmeye olan etkisi, özellikle işlemin başlangıç aşaması olan kabartma aşamasında belirgindir. Bunun nedeni, kabartma aşamasında, derin çekmeden ziyade bir germe – bükme durumunun meydana gelmesidir.

Sınır derin çekme oranının bir deformasyon verimlilik katsayısı ve pekleşme üsteli ile değiştiğini belirten (6.11) eşitliği araştırmalar sonucu belirlenmiştir.

$$\ln(LDR) = \left(\frac{\eta}{1{,}1}\right)^{l(n+1)} (n+1) \qquad (6.11)$$

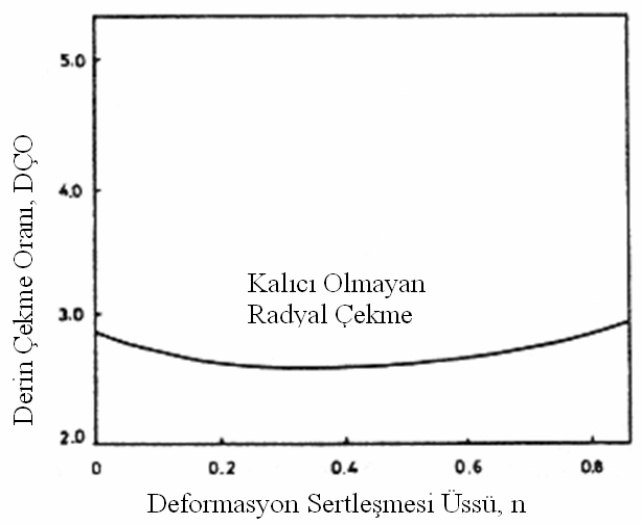
Pekleşme üstelinin tekrar çekme (kademeli derin çekme) işlemine etkisi ise olumsuzdur. Pekleşen malzemeler söz konusu olduğunda kuvvet, kap cidarının dip bölgesi yeteri kadar sertleşmeden artım gösterdiğinden, artan pekleşme üsteli (n) ile tekrar çekme oranı azalmaktadır. Aynı durum, cidar ütüleme işleminde de geçerlidir. Ütüleme işleminde de, kap cidarının alt bölgeleri, ilk çekilen kap cidarının üst bölgeleri kadar dayanıklı olmadığından (pekleşmediğinden), artan “ n “ değerleri ile sınır ütüleme oranı azalmaktadır. Şekil 6.28’ de, değişik deformasyon verimlilik katsayılarına (η) ve derin çekme – tekrar çekme oranlarına (D / d) göre, kesitteki maksimum ütüleme redüksiyonunun değişimi görülmektedir.



Şekil 6.28 Pekleşme üstelinin ütülemedeki kesit redüksiyonuna etkisi (η, deformasyon verimlilik katsayısı; D/d, derin çekme veya tekrar çekme oranı) (Hosford ve Caddell, 1983)

Karmaşık şekil verilmiş bir bölgenin şekillendirilmesi sırasındaki kritik bir bölgesinde, deformasyon dağılımına farklı " n " değerlerinin etkisi şekil 6.29 'da gösterilmiştir. " n " değeri düşük olan bölgelerde levhada aşırı incelme görülebilir ve kırılmayla sonuçlanabilir. Aynı parçanın " n " değeri yüksek olan kısımlarında aynı kritik bölgeler daha dirençli olacak ve deformasyonu komşu bölgelere transfer ederek hasara uğramadan şekillendirilebilecektir.

Derin çekme " n " değerinden bağımsızdır denilebilir. (Şekil 6.29) Kabı oluşturacak kuvvet aynı zamanda malzemeyi deforme etmeye yetecektir. Bu nedenle aynı derin çekme oranına (d_0 / d_z) sahip bir çok malzeme olabilir.



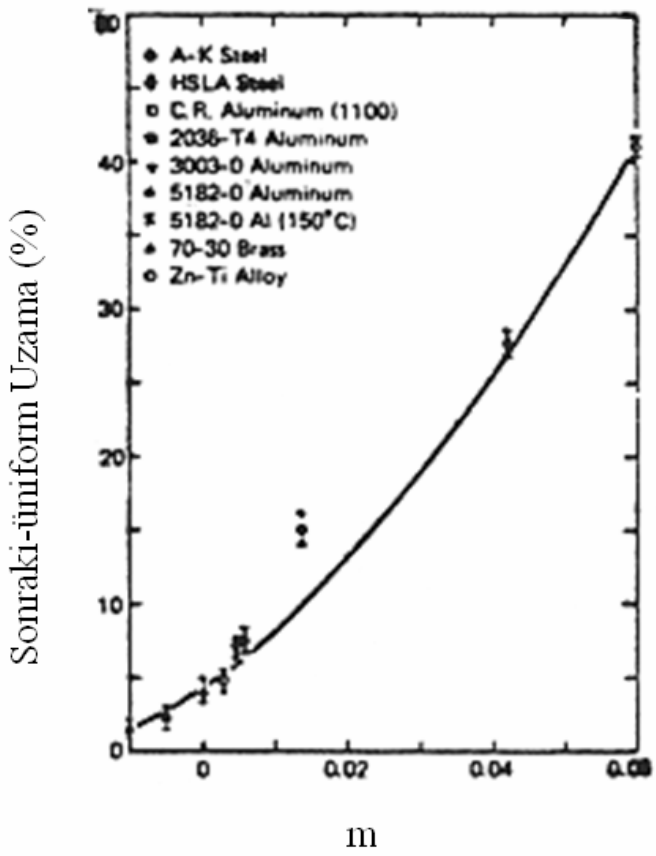
Şekil 6.29 Derin çekmede " n " değerinin şekillendirmeye etkisi (Hosford ve Caddell, 1983)

“ n “ değeri çeliğin yaşlanmasıyla ve soğuk deformasyonla düşer, tavlamayla artar. Tane boyutunun artması “ n “ değerini arttırır, fakat portakal görünümlü yüzey oluşması nedeniyle tavsiye edilmez.

“ n “ değerinin tek yönlü gerilmelerle ölçülmesi sonucu, şekillendirmede kullanılan çok yönlü sistemleri ifade etmekte yetersiz kalmaktadır.

6.4.5 Deformasyon Hızı Duyarlılığı Üssü – Gerinim Hızına Duyarlılık Üsteli (m)

Malzeme deforme edilirken oluşan sertleşme daha fazla gerilme gerektirdiğinden şekil değiştirme üniform olarak yayılır. Boyun vermeden sonraki deformasyon miktarı “ m “ ile yakından ilişkilidir. (Şekil 6.30)

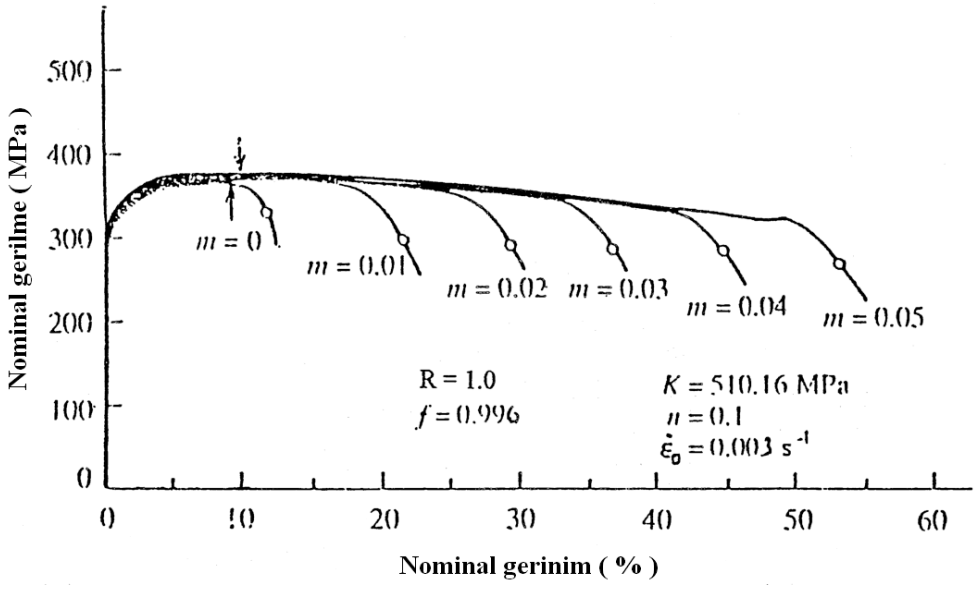


Şekil 6.30 “ m “ değerinin üniform uzamayla değişimi (Hosford ve Caddell, 1983)

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^{m} \qquad (6.12)$$

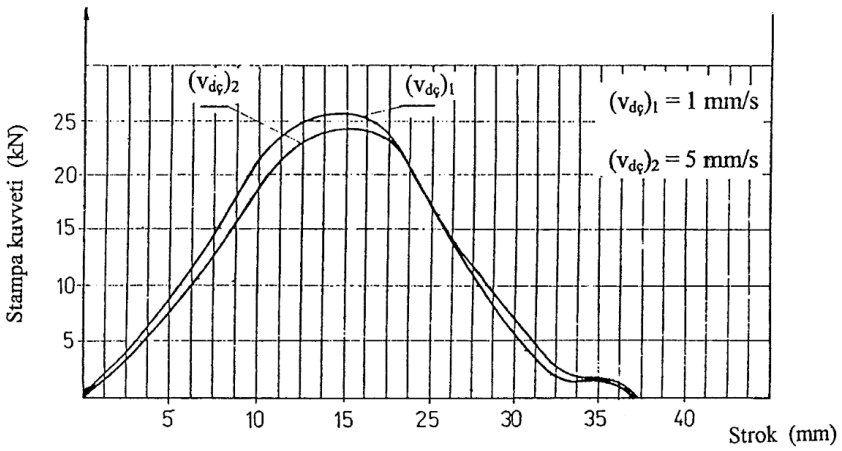
Gerinim hızına duyarlılık üsteli (m), özellikle yüksek sıcaklıklarda etkinlik kazanmasına rağmen, sac şekillendirilebilirliğini oda sıcaklıklarında da etkilemektedir.

Gerinim hızına duyarlılık üsteli pozitif ve yüksek olan malzemelerin boyunlanma sonrası uzama değerleri de yüksek olmakta ve toplam uzama değerleri artmaktadır. (Şekil 6.31) Örneğin, düşük karbonlu bir çelik ile alüminyum sac malzemelerin maksimum üniform uzamaları (dolayısıyla n değerleri) birbirlerine yakın olmasına rağmen, çelik sacın kopma uzaması daha yüksektir. Bunun nedeni düşük karbonlu çeliklerin " m " değeri pozitif ve yüksek iken, alüminyumunkinin negatif değerler sergilemesidir.



Şekil 6.31 Malzemenin diğer özelliklerinin ve çekme hızının sabit kalması şartı ile, gerinim hızına duyarlılık üstelinin artımı ile boyunlanma sonrası uzama ve toplam uzamadaki artımın örneklenmesi (Mielnik, 1992)

Gerinim hızına duyarlılığı pozitif olan malzemelerde (çelik gibi), artan gerinim hızları ile şekillendirme işlemlerinde oluşan kuvvetler de artım göstermektedir. 1 mm/s ve 5 mm/s hızlar ile uygulanmış derin çekme deneylerinde, hızın artması ile derin çekme kuvvetlerinde meydana gelen artım Şekil 6.32' de görülmektedir.



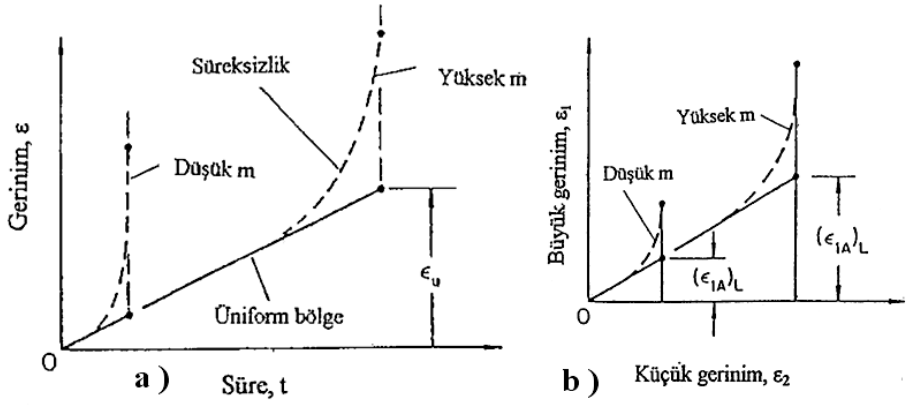
Şekil 6.32 Derin çekme hızının ıstampa kuvvetine etkisi (Marciniak vd., 1992)

Deformasyon hızının derin çekilebilirliğe etkisi tartışmalı bir konudur. Bazı araştırmacılar, derin çekme hızının sınır derin çekme oranına önemli bir etkisinin olmadığını bildirmişlerdir. Bununla birlikte, derin çekme hızından ziyade, ıstampanın saca temas şekli önemlidir. Bu temasın darbe oluşturacak şekilde gerçekleşmesi veya darbe hızının yüksek olması, derin çekilebilirliği düşürmektedir. Bu nedenle hidrolik preslerin kullanımı, mekanik preslere göre daha uygun olmaktadır. (Lange, 1985)

Sac malzemelerin gerinim hızına duyarlılık üstelinin (m) pozitif olması durumunda, artan gerinim hızı ile şekillendirilebilirlik artmaktadır. Teorik olarak elde edilen şekillendirme sınır eğrilerinin seviyesi, gerinim hızı ile birlikte artım göstermektedir. Bu artımın derecesi, yüksek " m " değerlerinde daha fazla olmaktadır. (Rao ve Sing) Istampa hızının derin çekmeye etkisi kesin olarak belirlenmiş ve tam olarak anlaşılmış bir durum olmamakla birlikte, malzemeye göre değişim göstermektedir. Buna göre şekillendirmelerde optimum hız, daha çok deneme yanılma yoluyla belirlenebilmektedir.

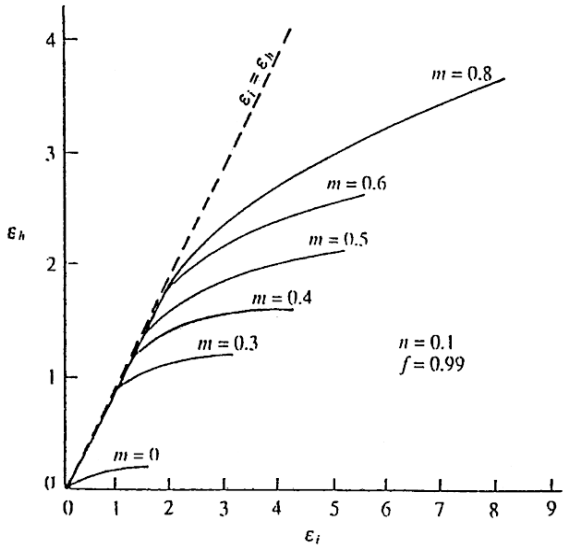
En genel söylemle, hız ile birlikte malzemenin plastik özelliklerinde bir miktar düşüm görülmesine rağmen, sürtünme kuvvetleri azalmaktadır. Aynı zamanda yüksek hızlarda gerçekleştirilebilen işlemlerde , ısınmaya bağlı olarak malzeme özelliklerinde de değişimler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle şekillendirme hızının etkisi, yağlamanın ve yağlayıcının etkisiyle birlikte düşünülmesi gerekmektedir.

Sac numune üzerinde boyun veya çukur gibi bir süreksizliğin bulunması durumunda, bu bölgedeki deformasyonlar, komşu üniform bölgelere nazaran daha fazla olmaktadır. Aynı zamanda , boyun içerisinde malzemenin plastik akış hızı, boyun dışındaki malzemeye göre daha fazladır. Bu durumda, malzemenin hıza karşı duyarlılığı pozitif ve yüksek ise, boyun içerisinde deformasyona karşı direnç artmaktadır.

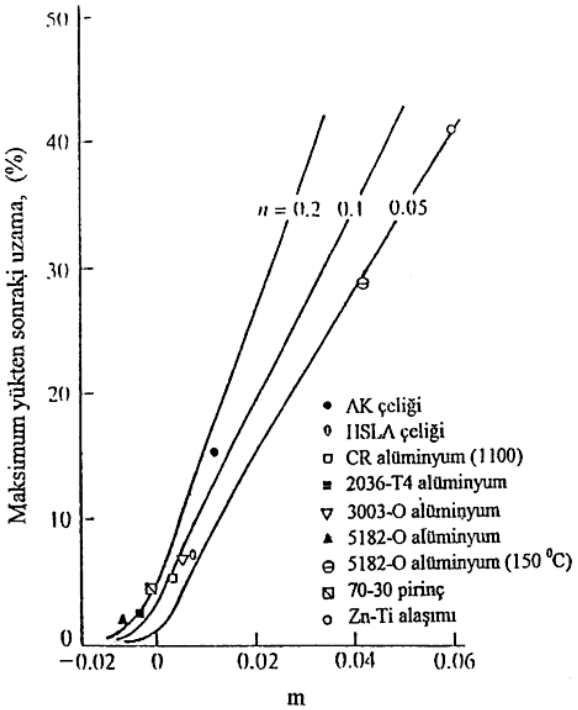


Şekil 6.33 Tek eksenli çekmede (a) ve iki eksenli çekmede (b) artan " m " değerleri ile boyun büyümesinin yavaşlaması ve üniform gerinim alanının artması (Marciniak ve Duncan, 1992)

Oluşan bu gerinim hızı sertleşmesi ile deformasyonlar üniform bölgeye kaymakta ve boynun büyüme hızı yavaşlamaktadır. Sonuçta malzemenin toplam uzama değeri artmaktadır. Bir sac numunenin tek eksenli çekilmesinde, “ m “ değeri ile üniform uzama alanının genişlemesi ve boyun büyüme hızının azalması, Şekil 6.33 a’ da şematik olarak görülmektedir. İki eksenli çekmede, üniform bölgedeki (A) sınır gerinimlerin artan “ m “ değerleri ile birlikte artması ise, Şekil 6.33 b’ de örneklenmiştir.



Şekil 6.34 Gerinim hızına duyarlılık üsteli ile homojen (üniform) bölgedeki gerinimin (ε_h) ve süreksizlik arz eden bölgedeki (boyundaki) gerinimin (ε_i) değişimi (Mielnik, 1992)

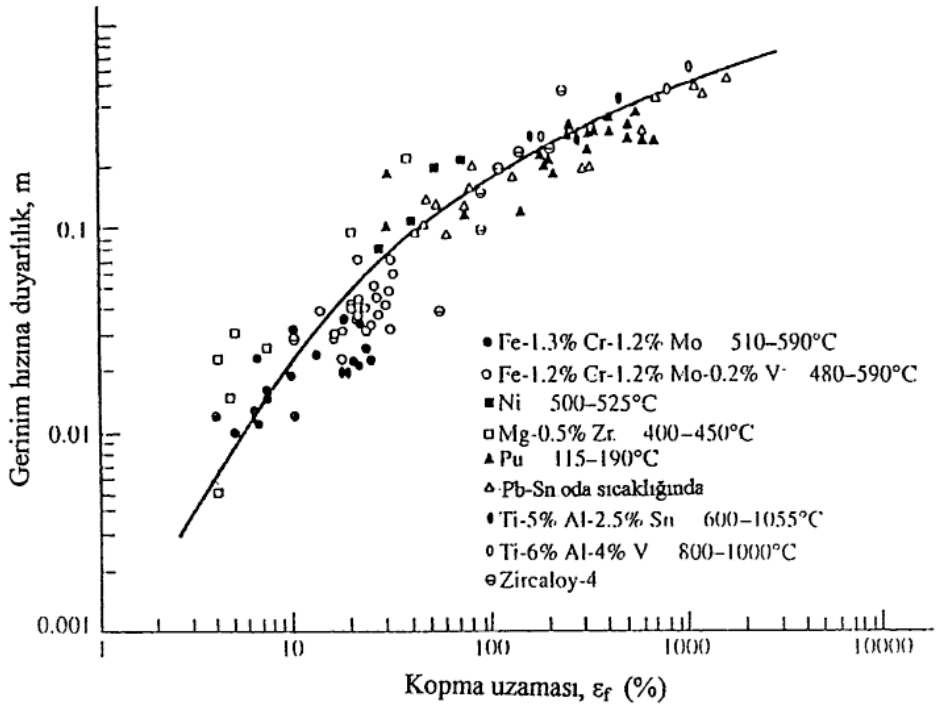


Şekil 6.35 Maksimum yükten sonraki uzamanın (boyunlanma sonrası uzamanın), “n” ve “m“ değerleri ile değişimi (Mielnik, 1992)

Gerinim hızına duyarlılık üstelinin gerinim dağılımına ve boynun büyüme hızına gösterdiği etki, Şekil 6.34 ‘ de görülmektedir. Buradan anlaşıldığı üzere, m değerinin boyun büyümesini yavaşlatıcı etkisi, “ n ” değerinden daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte, “ m “ ve “ n “ değerlerinin üniform gerinim alanını birlikte arttırıcı etkisi, Şekil 6.35’ de görüldüğü gibi oldukça büyüktür.

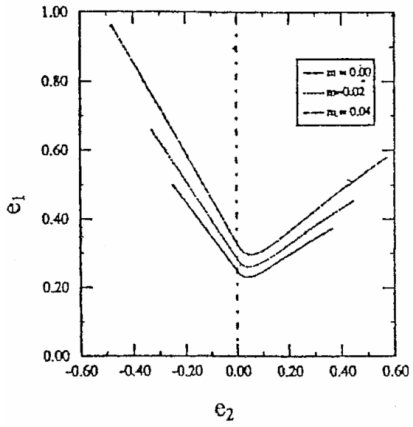
Çeşitli malzemelere değişik sıcaklıklarda uygulanan deneylerden, malzemenin kopmada uzama yüzdesi (ε_f) ile “ m “ arasındaki bağıntı elde edilmiştir. (Şekil 6.36) Buradan, yüksek kopma uzamalarının yüksek “ m “ değerlerinde meydana geldiği anlaşılmaktadır. Gerinim hızına duyarlılık özellikle yüksek sıcaklıklarda belirgin hale geçmekte, bu da metallerin süper plastik davranışının göstergesi olmaktadır. (Mielnik, 1992)

Gerinim hızına duyarlılık üsteli yüksek sıcaklıklarda belirginleşmesine rağmen, oda sıcaklığındaki sac şekillendirme işlemlerinde de önemli bir etkendir. Bu işlemlerde, kesitte bir yayılı boyun oluşumundan sonra da şekillendirme deformasyonları devam etmektedir. Gerinim hızına duyarlılığı yüksek olan malzemelerde, deformasyonun bir bölgede toplanarak aşırı incelmelerin meydana geldiği lokal boyunlanma oluşumu gecikmekte ve şekillendirme derecesi artmaktadır.



Şekil 6.36 Malzemelerin gerinim hızına duyarlılık üsteli ile kopma uzaması arasındaki ilişki (Mielnik, 1992)

Artan “ m “ değerleri ile şekillendirme sınır eğri seviyeleri de artmaktadır. (Şekil 6.37) Artan gerilme seviyelerinde gerinim hızına duyarlılık düşmektedir.

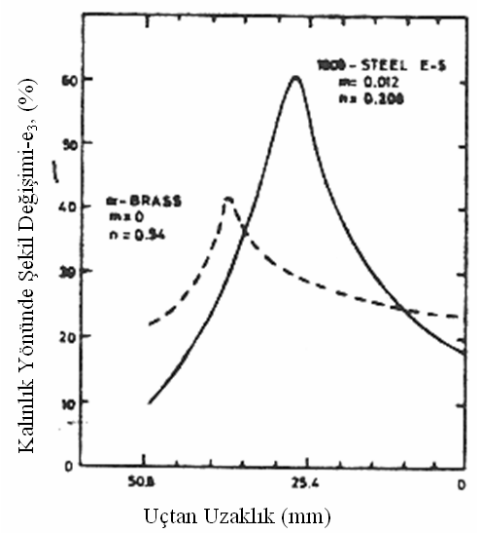


Şekil 6.37 Gerinim hızına duyarlılık üstelinin şekillendirme sınır eğrilerine etkisi

(Li ve Chandra, 1999)

Derin çekme takımıyla gererek şekillendirmede deformasyon konsantrasyonu nedeniyle deformasyon hızı aniden artar. Bu nedenle bu tür şekillendirmelerde deformasyon hızı duyarlılığı, deformasyonun başladığı andan itibaren çok önemlidir. “ m “ değerinin yüksek olması üniform gerilme dağılımının olduğuna işarettir.

α-princi ve E - 5 kalite çelik levhanın şekillendirme karakteristiği incelendiğinde ; “ n ” değeri için princin, çelikten daha iyi olduğu düşünülebilir, fakat çeliğin (m = 0,012), prinçten (m = 0) hıza daha duyarlı olduğu düşünülürse, daha geniş boyun verme aralığına sahip olduğu görülür. (Şekil 6.38)



Şekil 6.38 α - princi ve E-5 kalite çelik levhada kalınlık yönündeki şekil değiştirme ile kapta belirlenen bir noktadan itibaren boyun vermenin değişimi. (Hecker, 1982)

6.4.6 Üniform Uzama

$\sigma = K\ \varepsilon^n$ eşitliği sağlanan bir malzemede (gerçek uzama kullanılmalı) üniform yüzde uzama değeri deformasyon sertleşmesi üssü değerine eşittir. Homojen olmayan deformasyon, deformasyon sertleşmesi davranışına ve deformasyon hızı duyarlılığına bağlıdır. Eğer boyun verme görülürse boyun verme bölgesindeki deformasyon ve deformasyon hızı diğer bölgelere göre daha fazla olacaktır. Bu olay çekme sırasında malzemenin boyun verme bölgesindeki sürekli incelmenin bir açıklaması olabilir. Deformasyon sertleşmesi üssüyle mühendislik çekme gerilmesi arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilmektedir;

$$n = \ln (1+ e_u) \qquad (6.13)$$

Düşük karbonlu çelikler için e_u değeri genel olarak % 10 – 30 arasındadır. e_u ve hesaplanan “n “ değerleri tüm şekillendirilebilirlik limiti için bir yüzde belirler, fakat deformasyon hızı duyarlılığı gibi diğer faktörler performansı arttırır ya da azaltır.

Örneğin; düşük karbonlu çelik ve aluminyum alaşımı için “ n “ değerleri yaklaşık aynıdır, fakat aluminyumun toplam uzama ve şekillendirilebilirlik limitleri düşük karbonlu çeliğe göre daha düşüktür. Çünkü aluminyumun “ m “ değeri (deformasyon hızı duyarlılığı üssü) negatiftir.

$$m = \frac{\log \sigma}{\log \dot{\varepsilon}} \qquad (6.14)$$

burada ε gerçek birim şekil değiştirme , t ise zamandır.

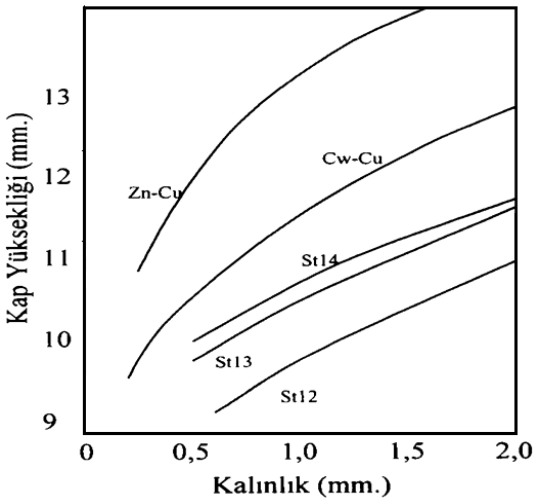
$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t} \qquad (6.15)$$

Bölgesel boyun vermeyle kırılan levhalar için homojen uzama değeri şekillendirilebilirlik hakkında doğru tahmin yapılmasına izin vermeyebilir; toplam uzamaya göre yapılan tahminler daha güvenilir sonuçlar verir.

6.5 Prosese Bağlı Parametrelerin Şekillendirmeye Etkisi

6.5.1 Levha Kalınlığı ve Tane Boyutu

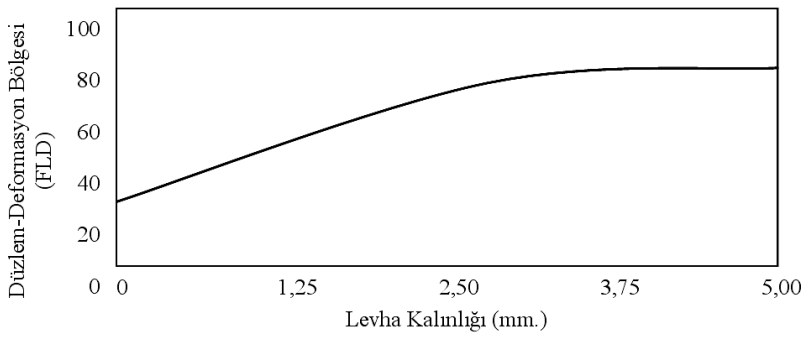
Malzemelerin preste şekillendirilme kabiliyeti malzemenin prese girmeden önceki kalınlığıyla yakından ilişkilidir. Malzeme kalınlığı arttıkça verilebilecek deformasyon miktarı da artar. (Şekil 6.39) Levha kalınlığının kopmadaki etkisini görmek amacıyla 0,5 ve 2,0 mm kalınlıkta alüminyum numune çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına bakıldığında çekme gerilmesi ve deformasyon sertleşmesi üssü (n) değerlerinin değişmediği, ancak kopma uzaması değerinin 0,5 mm' lik sac için daha az olduğu gözlenmiştir. Levha kalınlığının artmasıyla levhadaki kusurların etkisinin azalması nedeniyle şekillendirme limiti artmaktadır.



Şekil 6.39 Çeşitli levhalar için erichsen kap yüksekliği, levha kalınlığı arasındaki ilişki (Hecker, 1982)

Normalde presleme işleminde kullanılacak levhalar için boşluk gibi iç yapı kusurları kadar yüzey pürüzlülüğü de deformasyon limitine etki eder. Belirli bir deformasyon miktarı için yüzey pürüzlülüğünün etkisi malzeme kalınlığı azaldıkça artar. Bu nedenle belirli kalınlığın üzerindeki levhalar için yüzey pürüzlülüğünün çok büyük etkisi yoktur. Yüzey pürüzlülüğünün tane boyutuyla doğru orantılı olması nedeniyle deformasyon limitinin tahmininde levha kalınlığının yanı sıra tane boyutu da dikkate alınmalıdır.

Şekil 6.40' da malzeme kalınlığının şekillendirme sınır diyagramının en alt noktası yani düzlem deformasyon koşulunu ifade ettiği bölgeyle ilişkisini vermektedir. Buradan görülebileceği gibi levha kalınlığının etkisi yaklaşık 3 mm. kalınlıktan sonrası için sabit kalmaktadır.



Şekil 6.40 Çelikte FLD – levha kalınlığı ilişkisi (Hecker, 1982)

6.5.2 Kalıp Dizaynı ve Geometrisinin Etkisi

Kalıp ve derin çekme takımı arasındaki küçük bir değişiklikte bile presin kesmedeki deformasyona olan etkisi, farklı malzeme etkisinden daha fazladır. Eğmedeki açı da dikkat edilmesi gereken önemli bir parametredir. Araştırmacılara sıkça gelen bir sorun da zor eğme operasyonlarında daha önceki partilerde başarıyla üretim yapılmışken malzemede hasar görülmesidir. Normal olarak bu gibi durumlarda hasarın nedeninin malzemeden kaynaklandığı düşünülmektedir, fakat bu her zaman doğru bir tahmin olmayabilir. Deforme olan çelik özel limitler içinde olabilir, fakat her zaman zor koşullara dayanabilecek kadar iyi olmayabilir. Kalıpta dikkat edilmesi gereken diğer tasarım faktörleri ise kalıp derinliği, kalıp yüzey pürüzlülüğü, basınç kuvveti, kalıp ile derin çekme takımı arasındaki boşluk ve kalıp temizliğidir. Çok derin kalıp çeliğin elastik limitinin aşılmasına neden olur. Yüzey pürüzlülüğünün artması sürtünme kuvvetinin artmasına dolayısıyla malzeme akışının azalmasına neden olur. Sıkıştırma kuvvetinin fazla olması malzeme akışını zorlaştırır ya da engeller ve fazlaca germeye neden olur. Kalıp ile derin çekme takımı arasındaki açıklık ilişkisi, şekillendirme sırasında kalıp ile derin çekme takımının üst üste binmesi ya da açıklığın fazla olması nedeniyle hedeflenen deformasyonun malzemeye verilememesi gibi sonuçlar doğurur. Kalıbın temiz olması malzemenin derin çekme takımı üzerinde germe olmadan rahatça akarak şekil almasını sağlar.

Kademeli deformasyon işlemlerinde kırılmayı azaltmak için hangi kalıpta değişiklik yapılacağına karar vermek zordur. Öncelikli yapılan işlemlerdeki kalıp ayarlarının değiştirilmesi son kademelere göre genelde daha basit ve daha faydalı sonuçlar verir. Bu gibi işlemler için bir çarpım faktörü kullanılabilir. İlk kademelerde yapılacak küçük değişiklikler nihai üründe büyük deformasyon oranlarında kendini gösterir.

Kalıp geometrisi açısından derin çekme kabiliyetini etkileyen önemli parametreler kalıp eğrilik yarıçapı (R_k), derin çekme takımı eğrilik yarıçapı (R_z) ve derin çekme takımı

ile kalıp arasındaki boşluk (e) mesafesidir. Derin çekme işleminde çatlamaya karşı en zayıf bölge parça yan duvarının tabana yakın olan bölgesidir. Bu bölgedeki gerilme derin çekme takımının uyguladığı kuvvete doğrudan bağlıdır. Dolayısıyla derin çekme takımının uygulayacağı kuvveti azaltıcı önlemler, parçanın çatlama ihtimalini de azaltır.

Malzemenin kalıba girişindeki kalıp eğrilik yarıçapının (R_k) seçimi önemlidir. $R_k = 0$ durumunda malzeme rahat hareket edemez, kesme işlemine benzer bir durum söz konusu olur. Belirli derin çekme kuralları için (Rk) değerinin artması, derin çekme kuvvetini azaltır, dolayısıyla derin çekme oranını arttırır. Ancak (Rk) değeri sınırsız olarak arttırılamaz, çünkü aşırı durumda sıkıştırma kalıbının etki alanı azalacağından taslak çevresinde veya ürünün yan duvarlarında kırışıklık ve erken hasar görülür. Tecrübelerin ışığı altında kalıp eğrilik yarı çapı tayini :

Çelik malzemelerde: $Rk = 0{,}8\sqrt{(d_0 - d_z)t_0}$ (6.16)

Alüminyum ve alaşımlarında : $Rk = 0{,}9\sqrt{(d_0 - d_z)t_0}$ (6.17)

bağıntılarından bulunmaktadır.

Burada t_o malzemenin orjinal kalınlığıdır. İkinci ve daha sonraki yeniden derin çekme işlemlerinde,

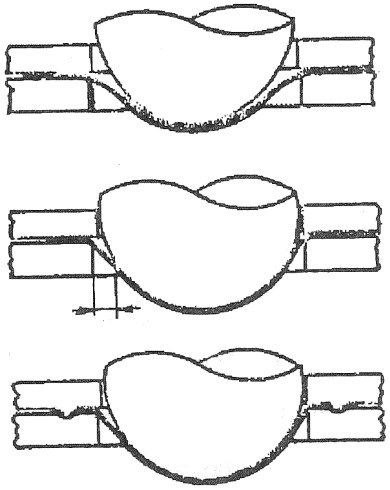
$$R_k = \frac{d_{(n-1)} - d_n}{2} \qquad (6.18)$$

bağıntısından kalıp eğrilik yarıçapı tayin edilir. Bu bağıntıdan d_n parçasının son çapı, $d_{(n-1)}$ parçanın bir önceki yeniden derin çekme işlemindeki çapıdır. Sacın derin çekme takımı tarafından hasara uğratılmaması için derin çekme takımının taban kenarının yuvarlatılması gerekir. Derin çekme takımı eğrilik yarıçapının artması derin çekme kuvvetini azaltır, derin çekme oranını da arttırır. Genel olarak derin çekme takımının eğrilik yarıçapı (R_z) malzeme kalınlığına (t_0) bağlı olarak seçilir.

$$R_k \cong (5 \approx 10)t_0 \qquad (6.19)$$

Parça tabanının keskin köşeli veya küçük eğrilik yarıçapına sahip olması istenirse, malzeme önce eğrilik yarıçapı büyük olan derin çekme takımı ile biçimlendirilir, daha sonra uygun bir derin çekme takımı ile istenen boyutlara getirilir. R_z değeri, malzeme kalınlığının 10 katını geçmemelidir, aksi halde elde edilen ürünün yan duvarlarında kırışıklık görülür.

Küresel şekilli parçaların biçimlendirme işleminde derin çekme ve gererek biçimlendirme yöntemleri beraberce uygulanır.



Şekil 6.41 Küresel tabanlı bir parçanın biçimlendirme işlemine ait örnek (The ASM,c)

Malzemelerin kırışmasını önlemek için Şekil 6.41' de görülen önlem alınır. (The ASM, c) Malzeme önce en üst şekilde görüldüğü gibi çevresi boyunca iyice sıkıştırılarak hareket etmesi önlenir. Bu arada gererek biçimlendirme yoluyla kalınlık % 10 – 15 oranında inceltilir ve parçanın ön biçimlenmesi sağlanır. Daha sonra ortadaki şekilde görüldüğü gibi, derin çekme takımı ilerledikçe, sıkıştırma kuvvetinin azaltılıp malzemenin kalıp içine doğru hareketine müsaade edilmelidir. Ancak bu durumda oklarla belirtilen bölgede malzeme bir yandan kalıp içine hareket ederken bir yandan da iyice gerdirilmelidir. Bu gerdirme işleminde, kalıplarda değişiklik yapılarak, malzemenin belirli kavisler yaparak kontrollü bir şekilde kalıba girmesi sağlanır. (The ASM, c)

Derin çekme takımı ile kalıp arasındaki boşluk (e) yine tecrübelere bağlı olarak seçilir.

$$e \cong (1{,}07 \approx 1{,}15)t_0 \qquad (6.20)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Ancak sürtünme kuvvetlerini ve kalıp aşınmasını azaltmak için yan duvar kalınlığının önemli olmadığı durumda:

$$e \cong (1{,}05 \approx 1{,}20)t_0 \qquad (6.21)$$

alınır. Parça yan duvar kalınlığının homojen olarak istendiği durumlarda (e) mesafesi daha küçük değerlerde tutulur. İkinci ve daha sonraki yeniden derin çekme işlemlerinde ise,

$$e \cong \frac{d_{(n-1)} - d_n}{2} \tag{6.22}$$

bağıntısından faydalanılır.

Burada, yine d_n parçasının son çapı $d_{(n-1)}$ parçasının bir önceki derin çekme işlemindeki çapıdır.

Derin çekme işleminde malzeme radyal çekme kuvvetleri ile kalıp içine çekilirken, taslağın kalıp içine henüz girmemiş bölgesinde çevresel basma kuvvetleri oluşur. Çevresel basma kuvvetleri malzemenin büzülerek kalınlaşmasına ve önlem alınmaz ise malzemenin kırışmasına neden olur.

Kırışma olayı taslağın kalıp içine henüz girmemiş bölgelerinin uygun bir kalıp yardımıyla sıkıştırılması sonucunda önlenir.

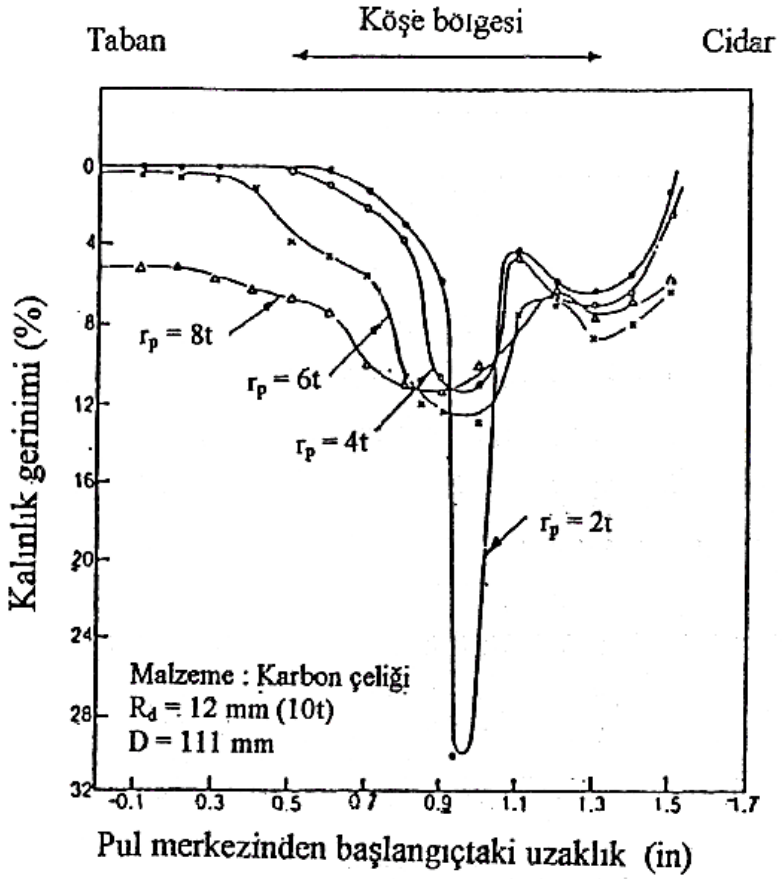
Şayet sıkıştırma kalıbı kullanılmadan derin çekme işlemi uygulanacak ise kırışmayı önlemek için derin çekme oranı (d_o/d_1), 1,2 değerinden küçük olmalıdır. Kalıp geometrisine bağlı olarak, taslağın yeterince kalın olması durumunda da sıkıştırma kalıbına gerek olmayabilir. Sınır koşulları dışında derin çekme işleminde genellikle taslağa ön sıkıştırma işlemi uygulanmamalıdır.

Sıkıştırma kuvvetinin uygulandığı durumlarda, sıkıştırma kuvveti öylesine uygulanmalıdır ki taslak çevresi veya parça yan duvarlarında kırışıklık olmamalıdır. Sıkıştırma kuvvetinin çok fazla uygulandığı durumlarda malzeme kalıplar arasında hareket edemez ve radyal çekme kuvvetlerinin etkisiyle malzeme kalınlığı hızla azalır ve sonuçta erken hasar görülür. Sıkıştırma basıncı olarak önce malzeme türüne göre yardımcı tablo ve bağıntılardan seçilen basınç uygulanır. Daha sonra deneme yanılma yöntemiyle uygun olan basınç tespit edilir. Sıkıştırma basıncının uygun seçilmesi derin çekme işleminin başarılı olarak sürdürülmesi için önemli bir faktördür.

6.5.3 Istampa ve Kalıp Ağzı Köşe Yuvarlatmaları

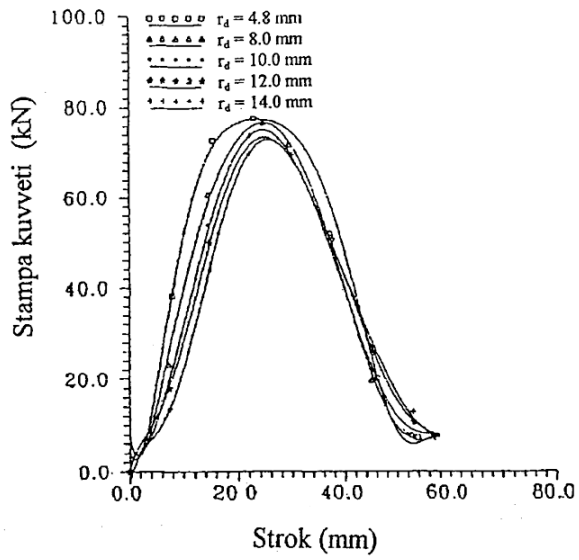
Istampanın ve kalıp ağzındaki köşe yuvarlatma yarıçaplarının seçimi, sacların derin çekilebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Derin çekme işlemlerinde, malzeme pekleşmesinden ve sürtünmeden dolayı kap cidarlarında meydana gelen çekme gerilmeleri, sac malzemede ıstampa köşe radyüsünün hemen üzerindeki bölgede yoğunlaşarak, bu bölgenin incelmesine neden olmaktadır. Istampa köşe yuvarlatmasının çok küçük tutulması ile bu bölgeler aşırı incelmekte ve derin çekme oranı düşmektedir. (Şekil 6.42)’ de değişik ıstampa köşe radyüsleri ile gerçekleştirilmiş deneylerde, derin çekmede kritik bölgelerde oluşan incelme

gerinimleri belirlenmiştir. En küçük ıstampa köşe radyüsü (r_p = 2t), en yüksek gerinim yığılmasını vermektedir. Malzeme kalınlığına bağlı olarak ıstampa köşe yuvarlatma yarıçapı, 4t < r_p < 10t arasında önerilmekte ise de daha dar olarak bu yarıçap 6t < r_p < 8t arasında sınırlandırılmaktadır. Bu yarıçapın 10t değerinin üzerine çıkması ile, germe olayı etkinlik kazanabilmektedir.



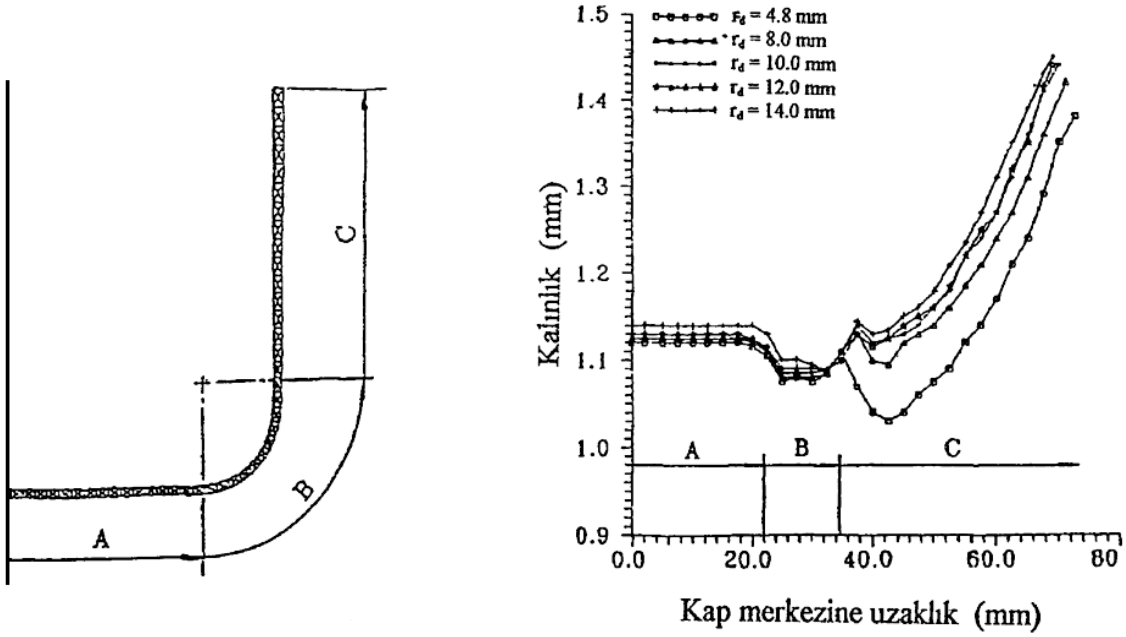
Şekil 6.42 Istampa köşe yuvarlatma yarıçapının sac kalınlığındaki gerinim yığılmasına etkisi (Eshel vd., 1986)

Kalıp ağzı köşe yuvarlatması (kalıp profil radyüsü), derin çekme işlemlerini ciddi boyutlarda etkileyen parametrelerden biridir. Kalıp ağzındaki bu köşeler üzerinde sac malzemeler bükülmeye maruz kaldığından, köşe yuvarlatmasının azalması ile derin çekme kuvvetleri artmaktadır. Değişik kalıp profil radyüsü ile yapılmış olan deneylerde, en yüksek derin çekme kuvvetinin en küçük yuvarlatmada (r_d = 4,8 mm) meydana geldiği gözlemlenmiştir.



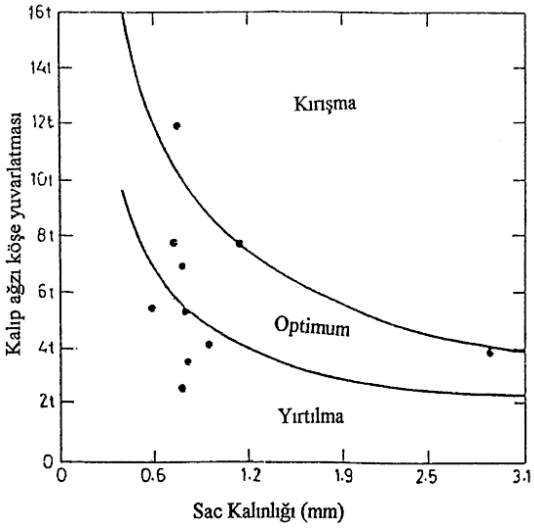
Şekil 6.43 Kalıp ağzı köşe yuvarlatması ile derin çekme kuvvetlerinin değişimi (Huang ve Chen, 1995)

Kalıp ağzı köşe yuvarlatmasının küçük tutulması ile oluşan aşırı bükme, malzemenin bu bölgede pekleşmesine neden olarak, kap cidarının alt bölgelerindeki incelme miktarını arttırmaktadır. Aynı çalışmada, kalıp köşe yuvarlatması ile bu incelmelerin değişimi de belirlenmiştir. Bunların, deneyde kullanılan en küçük yuvarlatma değerinde (r_d= 4,8 mm) meydana geldiği gözlenmektedir.



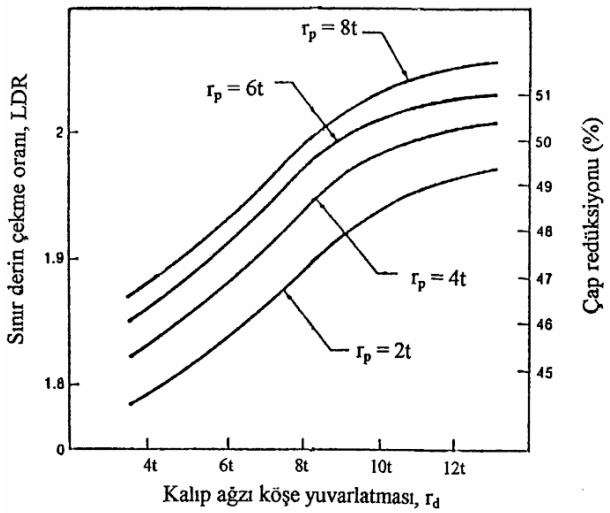
Şekil 6.44 Kalıp ağzı köşe yuvarlatması ile kap cidarındaki kritik bölgedeki incelme derecesinin değişimi (Huang ve Chen, 1995)

Kalıp ağzı yuvarlatma yarıçapının gereğinden yüksek tutulması ise, bastırıcı ile ıstampa temas noktası arasında desteksiz (serbest) bir bölgenin oluşmasına neden olmakta ve sacın kırışma eğilimi artmaktadır. Yuvarlatma $8t < r_d < 10t$ aralığında önerilmektedir.



Şekil 6.45 Kalıp ağzı köşe yuvarlatmasının sac kalınlığına göre seçimi (Richards, 1981)

Kalıp ve ıstampa boyutlandırması açısından dikkat edilmesi gereken bir husus da, kalıp ve ıstampa arasındaki boşluk (c) olmaktadır. Bu aralık, derin çekme işlemleri sırasında sac kesitinin kalınlaşmasını kontrol altında tutmakta, yani cidar ütüleme derecesini belirlemektedir. Herhangi bir ütülemenin meydana gelmesi istenmiyorsa, $c = t_0 \, (D/d)^{1/2}$ olarak önerilmektedir. Bununla birlikte biraz daha derin ve üniform yükseklikte kaplar elde etmek için, bir miktar ütüleme ($c < t$) tavsiye edilmektedir.



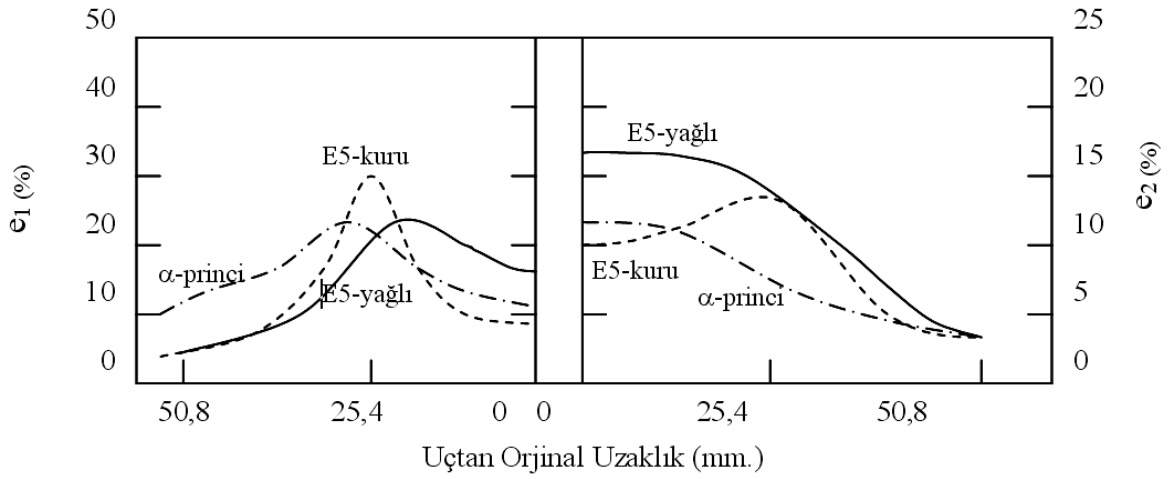
Şekil 6.46 Istampa ve kalıp ağzı köşe yuvarlatmasının sınır derin çekme oranına etkisi.

(Ghosh vd., 1984)

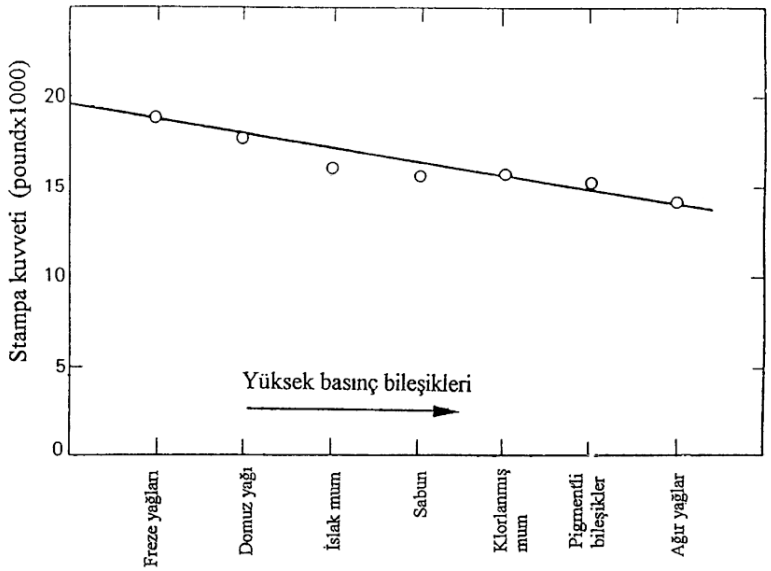
6.5.4 Yağlama , Operasyon Hızı ve Sıkıştırma Basıncı Etkisi

Sac şekillendirme işlemlerinde yağlamanın ve kullanılan yağlayıcının işlem üzerine etkisi oldukça büyüktür. Eğer yağlayıcı uygun viskozite ve yağ filmi mukavemetinde değilse ya da korozif etmenler içeriyorsa levhada çatlak, çizik, çentik veya kötü yüzey görünümüne neden olabilir.

Sürtünmeyi kontrol altında tutmak, takım aşınmalarını azaltmak, aşırı ısınmaların önüne geçmek ve şekillendirilen sac üzerinde üniform bir gerinim dağılımı sağlamak, yağlamanın amaçları olmaktadır. Yağlama şekillendirme sırasında üniform deformasyonu arttırıcı rol oynar. (Şekil 6.47)



Şekil 6.47 Kuru ve yağlı E5 kalite çelik ile α-princi'nin 27 mm. kap yüksekliği için deformasyon dağılımı. (Hecker, 1983)

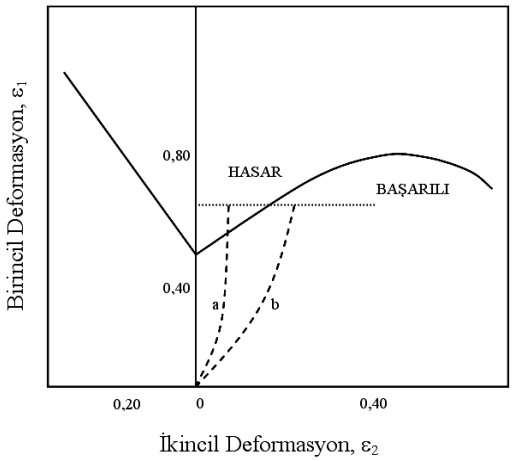


Şekil 6.48 Yağlamanın derin çekme kuvvetine etkisi (Eary ve Reed, 1974)

Yağlama etkinliğinin artması ile şekillendirme kuvvetleri düşmektedir. Şekil 6.48' de değişik yağlayıcı bileşikleri altında uygulanmış derin çekme işlemlerinde, ıstampa kuvvetinin değişimi incelenmiştir.

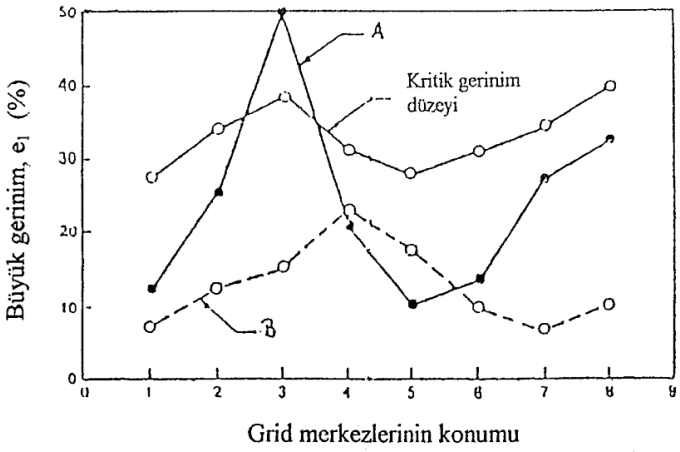
Buna göre, yağlayıcı olarak yüksek basınç bileşiklerinin kullanılması ile, derin çekme kuvvetinin düştüğü gözlenmektedir.

Ayrıca yağlama, deformasyon oranının değişmesine etki eder. Şekil 6.49'dan görülebileceği gibi eğer bir malzeme " a " ile gösterilen deformasyon bölgesinde çalışıyor ise yağlama miktarını arttırarak " b " bölgesine çekilebilir ve hasarın oluşması önlenebilir.



Şekil 6.49 Şekillendirme sırasında deformasyon bölgesinin yağlamayla değişimi (Hosford, 1983)

Yağlayıcının sac şekillendirme işlemlerinde gerinim yığılmasını önleyici etkisi, şekillendirilebilirliği önemli ölçüde arttırmaktadır. Şekil 6.50' de, diğer bütün şartlar aynı tutulup sadece yağlayıcının değiştirilmesi ile, şekillendirilen sac parçanın kritik bölgelerdeki gerinim dağılımı görülmektedir.



Şekil 6.50 Yağlayıcıların gerinim dağılımına etkisi (Ghosh vd., 1984)

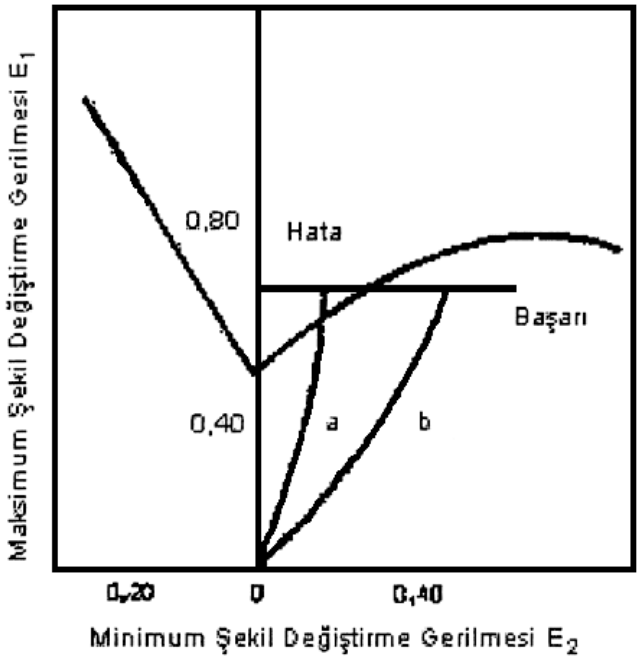
Buna göre A yağlayıcısının kullanılması durumunda oluşan gerinim yığılması kritik gerinimin üzerine çıkmaktayken, B yağlayıcısının kullanılması sonucunda daha üniform bir gerinim dağılımı elde edilebilmektedir. Bu nedenle, sac şekillendirme proseslerinde malzemeye, şekillendirme türüne, ortaya çıkan gerilme ve gerinim seviyelerine diğer işlem faktörlerine (bastırıcı, hız gibi) göre en uygun yağlayıcı veya yağlayıcı kombinasyonunu seçmek gerekmektedir. Bazı problemli şekillendirilme işlemlerinde, sacın farklı bölgeleri, farklı yağlayıcılarla yağlanarak da gayet olumlu sonuçlar alınabilmektedir. Bazı araştırmacılara göre, derin çekme işlemlerinde grafit ve tallow adı verilen yağın karışımı en iyi sonucu vermekte iken, bazılarına göre molibdendisülfit gresleri de en az bu karışım kadar etkili olmaktadır.

Derin çekme işlemlerinde yağlamanın etkisi iki açıdan düşünülmelidir. Flanşta yağlama ile sürtünme azalmakta ve dolayısıyla malzeme akışı kolaylaşmaktadır. Bununla birlikte, kap cidarlarındaki sürtünmenin ise derin çekilebilirliği arttırdığı bilinmektedir. Bu bölgede sürtünmenin artmasıyla kap cidarı üzerindeki elemanlar, ıstampa ile izafi olarak yukarı (flanşta) doğru hareket ederler. Bu durumda, cidar ile ıstampa arasında bir kayma gerilmesi meydana gelmektedir. Böylece, cidarda kritik bölge olarak bilinen ve hemen hiç pekleşmemiş olan ıstampa radyüsü üzerindeki bölgenin, çekme kuvvetlerine tümüyle maruz kalması önlenmiş olmaktadır. Bu tip uygulamaların dezavantajı ise, ıstampa aşınmasının yüksek olmasıdır.

Taslağın sadece sıkıştırma kalıbı ve biçimlendirme kalıbı ile temas eden yüzeyleri yağlanmalıdır. Derin çekme takımının tabanı ile temas eden yüzeyin yağlanması olumsuz etki gösterir. Derin çekme takım tabanının yağlanması halinde, derin çekme takımının parça tabanına uyguladığı kuvvet olduğu gibi parça yan duvarlarına iletilmiş olur. Bu durumda parçanın yan duvarında erken hasar görülebilir. Derin çekme tabanının taban bölgesinde, malzeme ile derin çekme takımı yüzeyi arasında sürtünme kuvvetlerinin oluşması derin çekme kabiliyetine olumlu etkide bulunur. Çünkü derin çekme takımının parça tabanına uyguladığı kuvvet sürtünme olayının etkisi ile kısmen tekrar derin çekme takımına iletilmiş olur. Parçanın taban bölgesindeki iç yüzeyi ile derin çekme takımı yüzeyi arasındaki sürtünmeyi arttırmak için derin çekme takımı yüzeyi zararsız olacak şekilde pürüzlendirilir.

Yağlama ayrıca deformasyon sırasında meydana gelen şekil değiştirme miktarını da etkiler. Geliştirilmiş yağlama yöntemi parçadaki birim şekil değiştirme oranını değiştirir. Mesela Şekil 6.51‘ de “ a “ harfiyle gösterilen şekillendirme yöntemi hasar ile sonuçlanmaktadır. Diğer bütün şartlar aynı iken yağlama şartını geliştirmek suretiyle, birim

şekil değiştirmede değişiklik yapılarak “ b “ harfiyle gösterilen başarılı şekillendirme gerçekleştirilmiştir. (Schedin, E)



Şekil 6.51 Deformasyon yöntemlerinde yağlamanın birim şekil değiştirme üzerindeki tesiri (Schedin, E)

Paslanmaz çeliklerde fazla güç, yüksek sertlik, düşük ısı iletimi ve yüksek sürtünme katsayılarından dolayı, şekil değişimi esnasında yüzey kalitesinin korunabilmesi için karbon ve alaşımlı çeliklere göre yağlama ihtiyacı daha büyük önem kazanmaktadır.

Paslanmaz çeliklerin şekil değişimi esnasında genelde yüzeysel bozulmalar ve yüksek sıcaklık artışları gözlemlenir.

Bölgesel ve molibden disülfidin özel kullanım alanları dışında büzülme ve sürtünmeyi azaltma özelliklerinin artışına göre listelenebilir. Yağlayıcıların arzu edilir özellikleri içinde sürtünmeyi azaltma ve kaplama özelliği, ısı taşınımı, ana metal ile tepkimeye girmemesi ve kolay temizlenmesi gibi özellikler yer almaktadır.

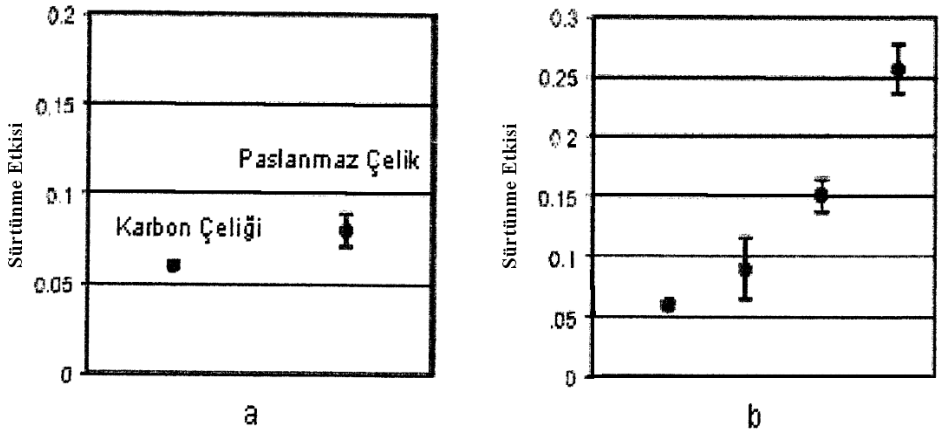
Özellikle östenitik türlerin şekil değişimi esnasında meydana çıkan sıcaklık artışı sık sık polar yağlayıcıların moleküllerinin kırılmasına neden olmaktadır.

Şiddetli derin çekme işlemleri esnasında, paslanmaz çelik yağlayıcılara (EP) yüksek basınç katkıları ilavesi uygundur. Klor ve sülfür katkıları yüksek sıcaklıklarda çelik üzerinde tepkimeye girerek kolayca birleşik oluşturabilirler. Klor en çok kullanılan EP katkısıdır, çünkü sülfür bazı çelik takımlarla kolayca tepkimeye girebilir. (The ASM, c)

Mineral yağlar, sabun çözeltileri, su emülsiyonları gibi genel amaçlı çözünebilir yağlar şekil değiştirme prosesinde kullanılmadıkları için göz ardı edilebilir.

Sac işleme operasyonu sona erdikten sonra önlem olarak, malzeme üzerinde bulunan yağlayıcı maddeler uzaklaştırılmalı ve kurutulmalıdır. Çözünmeyen sülfür veya klor gibi maddelerin yer aldığı yağlayıcılar şekillendirilecek kısımlar ısıl işleme uğramadan uzaklaştırılmalıdır. İlaveten, östenitik paslanmaz çelikler yağlayıcılarıyla tepkimeye girerler ve bunun sonucu olarak yüksek gerilmeli bölgelerde çatlamalara neden olurlar. Soğuk biçimlendirme işlemlerinde sürtünme kuvvetlerinin etkisi ile malzeme sıcaklığı 80 ^{o}C civarına yükselerek malzemede gevreklik oluşturabilir. Bu nedenle, işlemi sürekli oda sıcaklığında tutabilecek soğutma önlemlerini almak yararlı olur. (The ASM, c)

Derin çekme işlemi esnasında üretilecek parçanın tabanına dışardan uygulanacak hidrostatik basınç kuvvetleri malzemede çatlama olayını geciktireceğinden, derin çekme kabiliyetine olumlu katkıda bulunur. Hidrostatik basınç kuvvetleri, derin çekme işlemi esnasında kalıp tabanına yerleştirilecek kauçuk bir blok veya içi sıvıyla dolu lastik diyafram yardımıyla uygulanabilir. (Temel ve Aran, 2004)



Şekil 6.52 Aynı kuru yağlayıcı malzeme kullanıldığında, paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin sürtünme miktarlarının mukayesesi (a) Sürtünme miktarının kuru yağlayıcı malzeme ile değişebilme olasılığı (b) (Schedin, E)

Şekillendirmede malzeme akışı ekipman ile malzeme arasındaki sürtünme kuvvetleriyle kontrol edilir. Bu kuvvetler hıza duyarlıdır ve aşırı deformasyon hızı gerilmeye ve sürtünme kuvvetlerini aşıp hareket edebilecekken erken hasara neden olabilir.

Levhanın ve kalıbın sıcaklığı işleme sırasında yağın özelliğini kaybedecek seviyelere kadar çıkabilir. Bu gibi durumlarda yağ görevini tam anlamıyla yapamayacağından yine sürtünme kuvvetlerinin artması nedeniyle erken hasar oluşabilir.

Sıkıştırma bölgesi ve sıkıştırma basıncı malzemenin şekillendirme sırasında germeyle deformasyon ile sürtünme arasındaki oranı belirler. Sıkıştırma basıncının arttırılması şekillendirmede deformasyon miktarının artmasına neden olur, fakat buruşmayı engeller. Buruşmanın nedeni flanş ya da kap kenarlarında meydana gelen yüksek dairesel basma kuvvetleridir. Sıkıştırma çapı büyük ise derin çekme takımı kuvveti artacak ve buruşma için gerekli olan kuvvet değeri aşılacaktır. Bunu engellemek için yeterli tutucu kuvveti uygulamak gereklidir.

7. SACLARA UYGULANAN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK DENEYLERİ

Saclara şekillendirilebilirliklerinin saptanması amacıyla uygulanan deneyler iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki kendine özgü deneyler olup, malzemenin temel karakteristik özelliklerinin ölçülmesine, bu şekilde malzemenin şekillenebilirliği hakkında bilgi edinmeye ve ikisi arasında bağıntılar kurmaya yöneliktir. Temel özgül nitelik değerleri; Tek eksenli çekme deneyi, düzlemsel gerinimli çekme deneyi, iki eksenli germe deneyi, kayma deneyi ve sertlik deneyleri gibi deneyler olup, elde edilen sonuçlar, malzemenin kalınlık değerlerinin, yüzey koşullarının ve belli işlem şartlarının değişiminden bağımsızdır. İkinci gruptaki deneyler ise benzeşim deneyleridir. Bu deneylerde sac malzeme, belli şekillendirme işlemlerinde ortaya çıkan deformasyonlara benzer şekilde deforme edilmektedir. Benzeşim deneyleri; Bükme, germe, germe – bükme, derin çekme, germe – derin çekme ve geri yaylanma gibi işleme özgü şekillendirilebilirlik ölçümü deneyleridir ve sonuçlar; sac kalınlığı, yüzey durumu, yağlama, takım geometrisi ve takım boyutları gibi etkenlere bağlı olmaktadır. Bu gruptaki deneylere örnek olarak, Erichsen çökertme ve Swift derin çekme deneyleri verilebilir (Taylor, 1985).

Bu bölümde, saclarda uygulanan bazı şekillendirilebilirlik deneylerine değinilmekte ve sacların şekillendirilebilirliğini yansıtan şekillendirme sınır eğrileri ile bunların oluşturulması incelenmektedir.

7.1 Tek Eksenli Çekme Deneyi

Sacların mekanik özelliklerinin elde edilmesi amacıyla kullanılan en yaygın deney, tek eksenli çekme deneyidir. Çekme deneyi, malzemelerin ekseni doğrultusunda çekmeye zorlandığı zaman göstermiş olduğu davranışları belirlemek için yapılır. Bir malzeme ekseni doğrultusunda çekmeye zorlandığında boyu uzar, kesiti daralır. Kuvvet uygulanmaya devam edilecek olursa, malzeme çeşidine göre bazı değişiklikler olduktan sonra kopma meydana gelir. Çekme deneyi ile bir malzemenin tek eksenli çekme gerilmesi altında uzama, gerinim, yük, gerilme, kesit daralması, pekleşme üsteli, plastik gerinim oranı, gerinim hızına duyarlılık üsteli ve elastiklik modülü gibi temel mekanik özellikleri belirlenebilmektedir.

Çekme deneyi numuneleri, her iki uçlarından çekme testi makinesinin mengelerine bağlanıp, numuneler kopana dek, verilen hızlarda çekilirler.

Çekme deneyi numuneleri ve yapılışı TS138 EN 10002–1 / Nisan 2004’ de standartlaştırılmıştır. Çekme deneyi yapılan cihazdan, uygulanan kuvvet ve uzama miktarı

değerleri elde edilir. Uygulanan kuvvet ilk kesit alanına bölünürse normal gerilme σ (Sigma), boyca uzama farkı ilk boya bölünür ise birim şekil değiştirme ε (Epsilon) elde edilir. Uygulanan yük ve uzama, yük hücresi ve uzama – ölçerler sayesinde ölçülür.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad \left[\frac{N}{mm^2}\right] \tag{7.1}$$

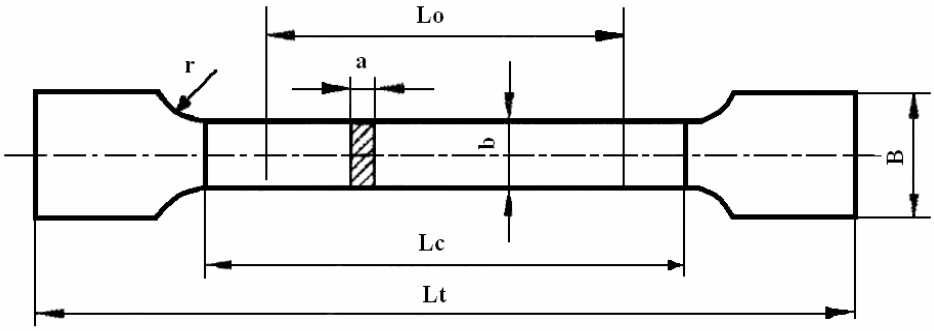
$$\varepsilon_e = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \tag{7.2}$$

σ : Nominal gerilme ε_e : Elastik birim şekil değiştirme

F : Uygulanan kuvvet ΔL : Boyca uzama miktarı

S_0 : Kesit alanı L_0 : İlk boy

Çekme deneyi, malzemenin mekanik özelliklerinden birini veya daha fazlasını (Akma sınırı – akma dayanımı ($R_{p\ 0,2}$), toplam uzama gerilmesi (R_t), çekme dayanımı (R_m), elastisite modülü (E), kopma uzama yüzdesi (A), toplam kopma uzama yüzdesi (A_t), akma sınırı uzaması (A_e), üniform uzama yüzdesi (azami kuvvette uzama yüzdesi) (A_g), toplam üniform uzama yüzdesi (A_{gt}), kopma büzülme yüzdesi (kesit daralma yüzdesi) (Z), rezilyans (U_R), tokluk (U_t), poisson oranı (ν), gerçek eğri – mühendislik eğrisi, gerçek gerilme (σ_g)) belirlemek amacıyla bir deney parçasının, genellikle kopuncaya kadar, gerilmesini kapsar. Aksi belirtilmedikçe deney 10 ^oC ile 35 ^oC arasındaki sıcaklıkta yapılır. Kontrollü şartlarda yürütülen deneyler 23 ^oC ± 5 ^oC sıcaklıkta yapılabilir.



Şekil 7.1 Kalınlığı 0,1 mm ile 3 mm arasında olan yassı numuneler (Can, 2006)

Çizelge 7.1 Kalınlığı 0,1 mm ile 3 mm arasında olan yassı çekme deneyi numuneleri

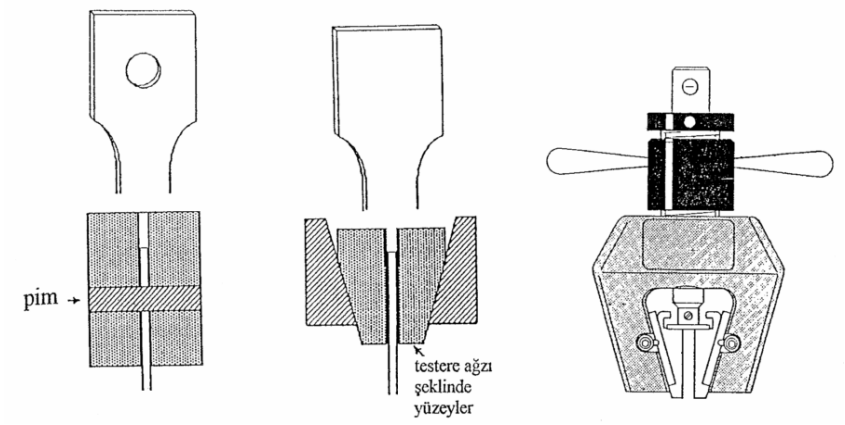
Numune tipi	b	L_o	L_c	Paralel kenarlı numuneler için kavrama noktaları arasındaki serbest uzaklık
1	12,5 ± 1	50	75	87,5
2	20 ± 1	80	120	140
B: En az 20 mm, en fazla 40 mm r : En az 20 mm				

Deney parçalarının şekil ve boyutları, bu parçanın alındığı metalik mamülün şekil ve boyutlarına bağlıdır. Deney parçaları genellikle mamulden alınmış bir numuneden veya kalıpla kesilmiş ya da dökülmüş bir numuneden tezgahta işlenerek elde edilir. Bununla birlikte, kesit alanı sabit mamüller (profiller, çubuklar, teller, vb.) ve dökülmüş deney parçaları (bir başka deyişle dökme demirler ve demir dışı alaşımlar) tezgahta işlenmeden deneye tabi tutulur. Deney parçalarının şekli daire, kare, dikdörtgen, halka veya özel durumlarda başka şekiller olabilir. (TS 138 EN 10002 – 1, 2004)

Tezgahta işlenmiş deney parçalarının kavranılan baş kısımları ile paralel uzunlukları farklı boyutlarda iseler bu iki bölüm arasında düzgün bir geçiş kavisi olmalıdır. Bu geçiş yarıçapının boyutları önemlidir, deney ekinde ya da malzeme şartnamesinde verilmektedir. Kavranılan uç kısımlar, deney cihazının kavrama mekanizmasına uymak şartıyla her şekilde olabilir. Paralel uzunluk (L_c) veya deney parçasını geçiş kavisine sahip olmadığı hallerde kavrama noktaları arasındaki serbest uzunluk her zaman ilk ölçü uzunluğundan (L_0) büyük olmalıdır. Tezgahta işlenmemiş deney parçalarında kavrama noktaları arasındaki serbest uzunluk, ölçü işaretlerinin kavrama noktalarından makul bir mesafede olmasına yetmelidir. Döküldüğü durumdaki deney parçalarının kavranılan ucuyla paralel uzunluk bölgesi arasındaki geçiş kavisi bulunmalıdır. Bu geçiş yarıçapının boyutları önemli olup mamul standardında tanımlanmış olması tavsiye edilir. Kavranılan uç kısımlar, deney cihazının kavrama mekanizmasına uymak şartıyla her şekilde olabilir. Paralel uzunluk (L_c) her zaman ilk ölçü uzunluğundan (L_0) büyük olmalıdır.

Deney parçası kamalar, vidalı kavrayıcılar, paralel çeneli ağızlar ve kademeli tutucular gibi uygun vasıtalarla sıkıca tutulmalıdır. Deney parçasının bükülmelerini en aza indirmek amacıyla üzerlerine uygulanan kuvvetin olabildiğince eksenel yönde olmasını sağlayacak şekilde tutulması için elden gelen çaba harcanmalıdır. Bu, kırılgan malzemeler deneye tabi tutulduğunda veya orantısız uzama gerilmesi, toplam uzama gerilmesi ya da akma dayanımı tayin edilirken çok önemlidir. Deney numunelerinin çekme makinesi tarafından kavranması, kavrama çenesi adı verilen elemanlarla gerçekleştirilir. Çeneler, sac numuneyi mekanik olarak

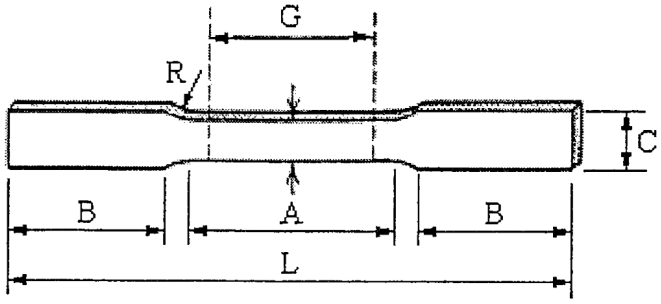
(testere ağzı şeklinde yüzeylerle, pimlerle veya konik sıkıştırma şeklinde) yada hidrolik olarak kavramaktadır.



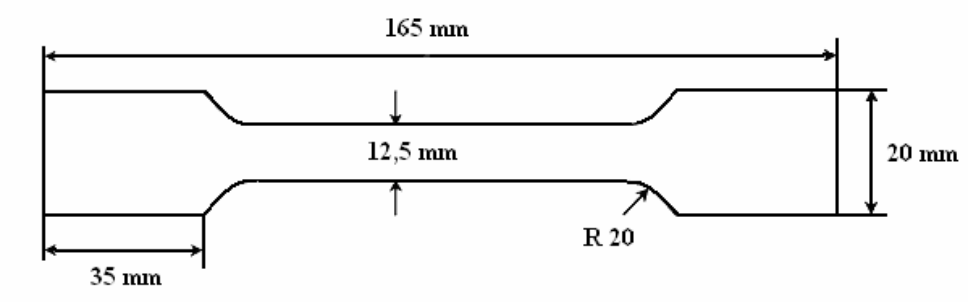
Şekil 7.2 Sac çekme numunelerinin deney makinasına tutturulma yöntemleri ve çeşitli kavrama çeneleri (Hosford, 1992)

Düz bir deney parçası elde etmek ve deney parçasıyla kavrama düzeneğinin hizalanmasını sağlamak için belirtilmiş veya beklenen akma dayanımının % 5' ini aşmayan bir ön yük uygulanabilir. Uzama düzeltmesi, sadece ön yükün etkilerini hesaba katmak için yapılmalıdır.

ASTM standartlarına göre sac malzemelerin tek eksenli çekme deney numunelerinin boyutlandırılması, Şekil 7.3 ' deki sembollere göre yapılmaktadır. Bu şekle göre standartta, G= 50 ± 0,1 mm, W = 12,5 ± 0,2 mm, R = 12,5 mm (en az), L = 200 mm (en az), A = 57 mm (en az), B = 50 mm (en az), C ≈ 20 mm olarak belirtilmiştir (Taylor, 1988).



Şekil 7.3 ASTM E 8M standardına göre, tek eksenli çekme deney numunesinin boyutlandırılması (Taylor, 1988)



Şekil 7.4 ASTM standardıma göre çekme deney numunesi boyutları (Can, 2006)

Doğru ve güvenilir sonuçların elde edilmesi için tek eksenli çekme testinin titiz denetimi gereklidir. Bu bakımdan özellikle numune yüzeylerinin, çizik veya diğer hasarlardan arındırılmış olması gerekir. Bu tip kusurların gerilmeyi arttırıcı etkisi vardır ve erken kırılmaya sebebiyet verir. Ölçü bölgesinde kenarların birbirine paralel olması ve yuvarlatma bölgelerindeki geçişlerin düzensizlikleri barındırmaması gereklidir. Bu bölgelerin soğuk şekillendirmeye uğratılmadan, örneğin taşlama gibi işlemlerle temizlenmesi önerilmektedir.

Uygulanan yük, test makinesinde genelde üst çeneye bağlı bulunan yük hücresi vasıtasıyla ölçülür. Uzama da genellikle klipslerle bağlanan gerinim ölçerler (strain gage extensometer) kullanılarak ölçülür. (Taylor, 1988)

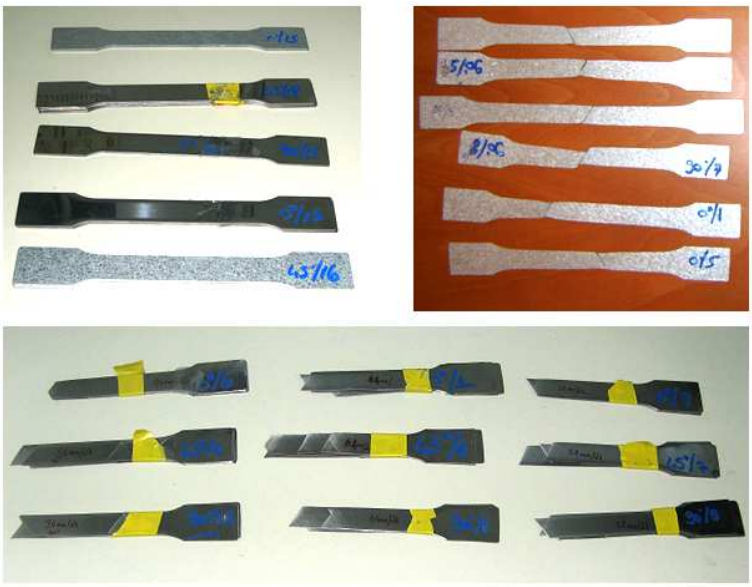
Çekme deneylerinde bir ekstansometre kullanmak suretiyle uzama değerleri hassas olarak ölçülebilir. Ekstansometre kullanılmadığı durumlarda uzama değerleri, çenelerin ayrılmasına göre hesaplanmakta ve bu şekilde belirlenen uzamalar, ölçme uzunluğundaki gerçek uzama değeri olmaktadır. Ölçme uzunluğunun numune üzerine daha önceden işaretlenmiş olması ile sadece kopma uzaması, kopan parçaların bir araya getirilmesi suretiyle gerçek değerinde ölçülebilir. Ekstansometreler yalnız uzama yönündeki gerinimleri ölçen tek eksenli ekstansometreler ve hem uzama hem de daralma yönündeki gerinimleri ölçen iki eksenli ekstansometreler olarak iki tipte bulunabilir.

Çekme deneyinde hız, gerinim hızı, yükleme hızı veya çenelerin ayrılma hızı olarak ifade edilebildiği gibi, deneyde geçen süre olarak da belirtilebilmektedir. (ASTM E 8M). EN 10002-1 standardında, üst akma dayanımının belirlendiği deneylerde elastik bölgedeki yükleme hızı, $E < 150000$ N/mm^2 olan malzemelerde 2-10 N/mm^2. s^{-1}, $E \geq 150000$ N/mm^2 olan malzemelerde ise 6- 30 N/mm^2.s^{-1} olarak önerilmektedir. Sadece alt akma dayanımı veya alt akmayla birlikte üst akma dayanımı da belirleniyorsa, akma esnasında gerinim hızı 0.00025 – 0.0025 s^{-1} arasında tutulmalıdır. ASTM E 8M standardına göre, noktaların belirlenmesi için 12 Mpa / s yükleme hızını geçmemek gerekir. Akma sonrası plastik bölgede ise, gerinim hızının max. 0.01 s^{-1} olması gerektiği belirtilmektedir.

Şekil 7.5 Çekme deneylerinde kullanılan INSTRON 4505 üniversal çekme cihazı
(Arçelik A.Ş., 2008)

Deney cihazının yük ölçme sistemi ISO 7500-1'e göre kalibre edilmeli ve en az Sınıf 1 olmalıdır. Bir ekstansometre kullanıldığında bu, orantısız uzama gerilmesinin tayini için (EN 10002-4'e göre) en az Sınıf 1 olmalıdır; daha büyük uzamaların söz konusu olduğu başka özellikler için (EN 10002-4'e göre) Sınıf 2 ekstansometre kullanılabilir. Üst ve alt akma dayanımlarının tayini için ekstansometre kullanılması gerekmez.

EN 10002 – 1 standart numarası ile verilen çekme deney metodunda, belirgin akma gösteren malzemelerde üst akma dayanımı R_{eH} olarak, alt akma dayanımı ise R_{eL} olarak ifade edilmektedir. Malzemenin belirgin akma göstermesi durumunda, % 0,2 uzama noktasından elastik bölgeye paralel çizim metoduyla belirlenen ve kalıcı uzama dayanımı olarak adlandırılan % 0,2 akma dayanımı, $R_{p0,2}$ sembolü ile ifade edilmektedir. Çekme dayanımı ise Rm olarak gösterilmektedir. Orantısız çekme numunelerinde kopmadaki uzama yüzdesi, ilk ölçü uzunluğu ile birlikte A sembolü ile (A80 mm veya A50 mm olarak) belirtilir. Orantılı çekme numuneleri kullanılmışsa, ölçme uzunluğu yerine orantı katsayısı ile (A 5,65 veya A 11,3 olarak) gösterim esastır. (EN 10002 – 1)



Şekil 7.6 Çekme deney numunelerinin deney öncesi ve sonrası durumları (Arçelik A.Ş., 2008)

7.1.1 Çekme Deneyinde Kullanılan Terimler ve Tarifler

Deneyde kullanılan terimler ve tarifler şu şekildedir:

a. Ölçü uzunluğu (L)

Deney parçasının üzerinde ölçüm yapılan silindirik veya prizmatik kısmının uzunluğudur. Ölçü uzunluğunda aşağıdaki ayrımlar yapılır.

a.1 İlk ölçü uzunluğu (L_0)

Kuvvet uygulamadan önceki ölçü uzunluğudur.

a.2 Son ölçü uzunluğu (L_u)

Deney parçasının kopmasından sonraki uzunluğudur.

b. Paralel uzunluk (L_c)

Deney parçasının kesiti daralmış bölümünün paralel kısmıdır.

c. Uzama

İlk ölçü uzunluğunda (L_0) deneyin herhangi bir anındaki artıştır.

d. Uzama yüzdesi

İlk ölçü uzunluğunun (L_0) yüzde olarak ifade edilen uzamasıdır.

d.1 Kalıcı uzama yüzdesi

Önceden belirtilmiş bir gerilmenin kaldırılmasından sonra ilk ölçü uzunluğundaki (L_0) yüzde olarak ifade edilen artıştır.

d.2 Kopmadan sonraki uzama yüzdesi

Ölçü uzunluğunun, ilk ölçü uzunluğunun (L_0) yüzdesi olarak ifade edilen kırılmadan sonraki kalıcı uzamasıdır. ($L_u – L_0$)

d.3 Kopmadaki toplam uzama yüzdesi (A_t)

Ölçü uzunluğunun, kopma anında ölçülen ve ilk ölçü uzunluğunun (L_0) yüzdesi olarak ifade edilen toplam uzamasıdır. (elastik uzama artı plastik uzama)

d.4 Azamî kuvvette uzama yüzdesi

Deney parçasının ölçü uzunluğunun azami kuvvette ölçülen ve ilk ölçü uzunluğunun (L_0) yüzdesi olarak ifade edilen uzamasıdır.

e. Kesit daralma yüzdesi (Z)

Deney sırasında meydana gelen ve ilk kesit alanının (S_0) yüzdesi olarak ifade edilen azamî kesit alanı değişikliğidir. ($S_0 – S_u$)

f. Azamî yük (F_{max})

Deney sırasında akma noktası geçildikten sonra deney parçasının dayandığı en büyük yüktür.

Bu, akma noktası olmayan malzemelerde, deney sırasında ulaşılan azami değerdir.

g. Gerilme

Deney sırasında herhangi bir andaki yükün deney parçasının ilk kesit alanına (S_0) bölümüyle elde edilen değerdir.

g.1 Çekme dayanımı (R_m)

Azami yüke (F_m) karşılık gelen yük.

g.2 Akma dayanımı

Metalik malzeme akma özelliği gösterdiğinde, deney sırasında yükte herhangi bir artış olmaksızın plastik deformasyonun oluştuğu noktaya karşılık gelen yüktür. Aşağıdaki akma dayanımı tarifleri arasındaki farklar gözden uzak tutulmamalıdır:

g.2.1 Üst akma dayanımı (Re_H)

Yükte ilk azalmanın gözlemlendiği andaki gerilme değeridir.

g.2.2 Alt akma dayanımı (Re_L)

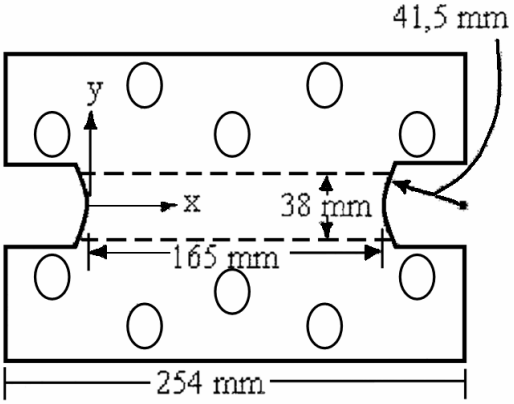
İlk geçici etkileri göz ardı ederek, plastik akma sırasındaki en düşük gerilme değeridir.

h. Kopma

Deney parçasının tam olarak ikiye ayrılmasının gerçekleştiği veya uygulanan yükün azalarak neredeyse sıfıra indiği durumdur.

7.2 Düzlemsel Gerinimli Çekme Deneyi

Tek eksenli çekme deneyinde numune, büyük gerinimi artı değerli ve küçük gerinimi eksi değerli durumda kopararak, sonuçlarını bu gerinim durumuna göre vermektedir. Bu tip deney numunesiyle küçük gerinimin sıfır olduğu düzlemsel gerinim durumundaki özelliklerin elde edilmesi olanaksızdır. Bu nedenle aynı çekme testi makinesinde, yalnızca çenelerin ve numune geometrisinin değiştirilmesi ile, istenen gerinim durumunun elde edilmesi amaçlanarak başarılmıştır.



Şekil 7.7 Düzlemsel gerinimli çekme deneyi numunesi (Taylor, 1988)

Numune, geometrisi Şekil 7.7' de açıkça görüldüğü gibi, standart tek eksenli çekme testi numunelerine göre daha kısa ve daha geniştir. Dikdörtgen sac çekme testinde, düzlemsel gerinim koşullarına ulaşmak amacıyla boy / genişlik oranları 1 / 1 , 1 / 2, 1 / 4 olan numuneler kullanılır. Bu numunelerin çeneye bağlanan kısımlarına ek parçalar kaynaklanarak üçer katmanlı yapılır. Böylece test sırasında, yüksek sıkıştırma kuvvetiyle herhangi kayma veya çarpılmalar önlenerek deney hatasız yapılmaktadır. Boy / genişlik oranı 1 / 4 olan numune ile elde edilen en küçük gerinim değeri –0,05 olarak ölçülmüştür. Bu da düzlemsel gerinim için gereken sıfır değerine çok yakındır.(Taylor, 1988)

7.3 Sertlik Ölçme Deneyleri

Sertlik, malzemenin kendine batırılmak istenen bir maddeye karşı gösterdiği dirençtir. Malzemeler üzerinde yapılan en genel deney, sertliğinin ölçülmesidir. Bunun başlıca sebebi, deneyin basit oluşu ve diğerlerine oranla numuneyi daha az tahrip etmesidir. Diğer avantajı ise, bir malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişkinin bulunmasıdır. Örneğin çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik ile doğru orantılıdır; dolayısıyla, yapılan basit sertlik ölçmesi neticesinde malzemenin mukavemeti hakkında bir fikir edinmek mümkündür.

Sertlik ölçme deneyleri, malzemenin kullanım yerine göre değişik şekillerde; genellikle bir cisme sivri uç batırılarak yapılır. Batırılan cismin şekli ve uygulanan kuvvetin farklılığına göre sertlik ölçme deneyleri çeşitli isimler alır. Sertlik ölçümü yapılırken, sertliği ölçülecek cisme sert bir uç batırılır ve cismin üzerindeki izin boyutları ölçülür. Uygulanan kuvvet ve iz boyutlarından faydalanılarak sertlik değerleri hesaplanır. (Can, 2006)

7.3.1 Brinell Sertlik Ölçme Deneyi

Brinell sertlik ölçme yönteminde malzemeye batırılan uç küre geometrisinde bilyedir. Bu bilye ile malzeme yüzeyine belli bir P yükü uygulanarak 30 saniye süre ile bastırılır. Kuvvet kaldırıldıktan sonra bilyenin malzeme üzerinde meydana getirdiği iz çapı ölçülerek, küre takkesinin alanı hesaplanır. İz ölçümü optik cihazlarla büyütülerek yapılır. Kuvvetin iz alanına bölümü Brinell Sertlik Değerini verir.

Eski standartlarda Brinell sertliği HB sembolü ile gösterilmiştir. Sertlik ölçümü çelik bilye ile ölçülmüş ise HB veya HBS harfleri ile gösterilir. TS 139-1 EN ISO 6506 -1 / Haziran 2001 standardına göre sertlik sert metal bilye ile ölçülür ve HBW ile gösterilir. Burada bahsedilen sert metal, elmas uç denilen metal – metal karbür kompozitidir.

$$HBW = \left[\frac{F}{A_{iz}} \right] = 0{,}102 \frac{2F}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \tag{7.3}$$

F : Uygulanan kuvvet [N]

D : Uç olarak kullanılan bilyenin çapı (mm)

d : Bilyenin malzeme üzerinde oluşturduğu iz çapı (mm)

Brinell sertliğinin birimi kgf / mm^2 ‘ dir. Çoğu zaman kuvvet birimi yazılmaz ve sadece HB, HBS, HBW sembolleri sertlik değeri yazıldıktan sonra yazılır.

Ölçümlerin sağlıklı yapılabilmesi için iz çapı d = (0,24....0,6).D olmalıdır. Hatayı azaltmak için kuvvet – çap oranı (0,102 x F / D^2) sabit kalması tavsiye edilir. Bu oran malzeme çeşitlerine göre ilgili standartta verilmektedir. Bu standartta çelikler ve sertliği 140 HBW' den büyük dökme demirler için 30, sertliği 140HBW' den küçük dökme demirler için 10 verilmiştir.

Standart olarak bilye çapı 10 mm (10 mm standart ölçü bilyesinin dışındaki bilye çapları 5 mm; 2,5 mm; 2 mm ve 1 mm' dir), kuvvet ise 3000 kgf' dir. Kuvvet ani olarak uygulanmamalı, 2 - 8 saniye kadar bir sürede maksimum değerine ulaşmalıdır. Yükün tutma süresi 10 – 15 saniyedir.

Sertlik ölçümü için kuvvet, bilye çapı ve uygulama süresi değiştiriliyor ise HBW işaretinin yanına " bilya çapı / yük / yükleme süresi " (mm / kgf / s) sırasıyla bilgi olarak eklenir. 99HBW 5 / 500 / 30

Çizelge 7.2 Brinell sertlik ölçme deneyinde parça kalınlığına bağlı bilye çapı seçimi

Malzeme kalınlığı (mm)	Bilye çapı
> 6	2,5 - 5 - 10
3 - 6	2,5 - 5
2 - 3	2,50

Deney sıcaklığı 10 – 35 ^{o}C ' ler arasında tutulmalıdır. İz ölçümü yapabilmek için parçanın yüzeyi temiz ve pürüzsüz olmalıdır. İz çapı birbirine dik yönde yapılan iki ölçümün ortalaması olarak alınır. Deney parçasının kalınlığı, iz derinliğinin en az sekiz katı olmalıdır. Ucun batıralacağı nokta kenardan en az iç çapının iki buçuk katı, ikinci defa ölçüm yapılacak ise diğer iz ile en az iz çapının üç katı bir aralık olmalıdır.

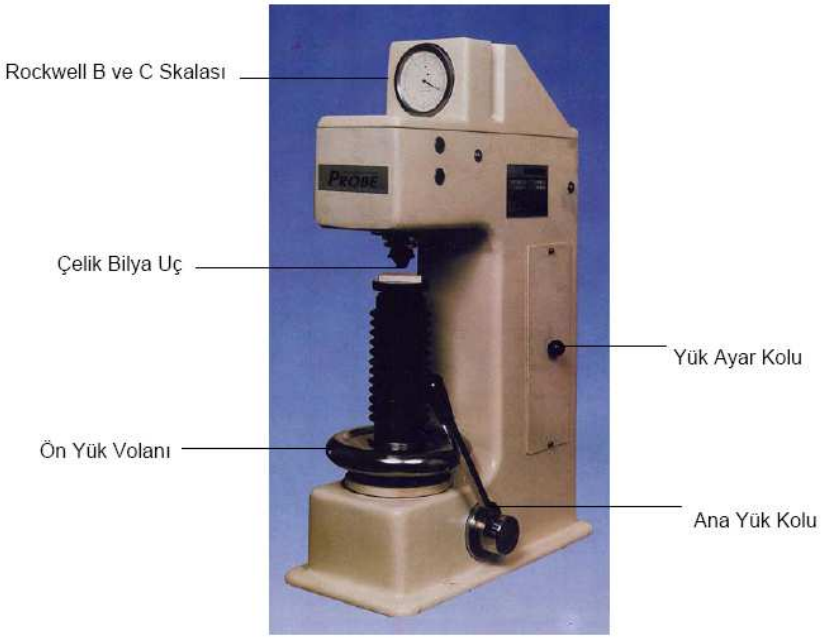
Eğer küçük bilyeler kullanılmışsa deney sonuçlarında bunun belirtilmesi gerekir. Malzemenin üzerine uygulanacak yük değeri sertliği ölçülecek malzemenin cinsine ve bilye çapına göre seçilmektedir. Deney yükünün saptanmasında $P = C . D^2$ bağıntısı kullanılır. Burada P deney yükü, C malzeme cinsine göre değişen yükleme derecesidir.

Brinell sertliği ile malzemenin çekme dayanımı hakkında bilgi edinebiliriz.

Sertliği ölçülecek malzemenin yüzeyi parlak ve zımparalanmış olmalı ve yüzey tabana paralel olmalı, esnemeye imkan tanınmamalıdır. Deney izleri birbirinden ve parçanın kenarlarından en az " d " kadar uzak olmalıdır. Homojen iç yapıya sahip olmayan malzemelerde Brinell sertlik deneyi uygulanmalıdır. Ayrıca bu tip malzemelerde 10 mm

çapında bilya tercih edilmelidir. Bu yöntem çok sert malzemelerle, ince yüzey tabaka sertliklerinin ölçülmesinde uygun değildir. En az üç sertlik ölçümü yapılıp bunların ortalaması alınmalıdır. (Homojen olmayan bölgeler ve hatalı ölçümden doğan yanlışlıkları azaltmak amacıyla)

Brinell Sertlik ölçme yönteminde kullanılan cihaz aynı zamanda baskı ucunun değiştirilebilmesi sebebi ile Rockwell sertlik ölçme yönteminde de kullanılabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Şekil 7.8'de söz konusu cihazın resmi ve kısımları görülmektedir. Ortam şartları bakımından da, metalsel malzemelerin mekanik özelliklerinin sıcaklık ve basınçla değişmesi nedeni ile oda sıcaklığında ve normal atmosfer basıncında bir ortamda deneyin gerçekleştirilmesi; deney sonuçlarının doğruluğu bakımından uygun olacaktır.



Şekil 7.8 Brinell-Rockwell-Vickers sertlik ölçüm cihazı (Can, 2006)

7.3.1.1 Brinell Sertlik Ölçme İşlemi

Ölçme işlemi için öncelikle uygulanacak basıncın bilinmesi gerekir. (7.4) eşitliğinde P uygulanacak basınç, C numunenin malzemesine göre değişen katsayı ve D ise bilya çapıdır.

$$P=CxD^2 \qquad (7.4)$$

• Demir esaslı malzeme (Çelik , DD) C = 30

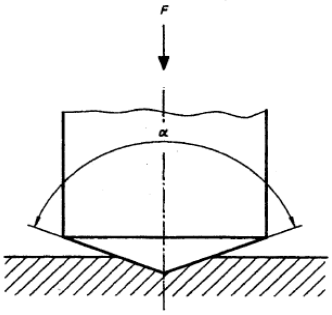
• Cu ve Al alaşımlı malzeme C = 10

• Yumuşak malzeme C = 5

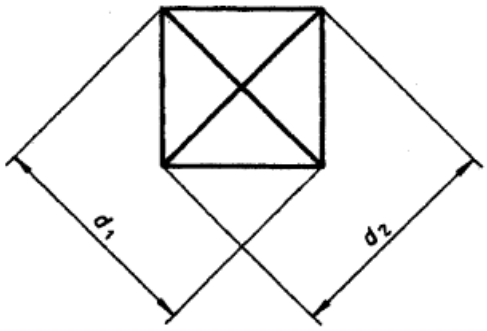
Uygulanacak basınç değeri de hesaplandıktan sonra yük ayar kolu yardımıyla cihazın uygulayacağı basınç ayarlanır. Uygun çaptaki çelik bilye de yerine takılır. Numune de tabla üzerine koyulduktan sonra yükleme işlemine geçilir. Ancak kullanılan cihaz Brinell sertlik ölçümünün yanı sıra Rockwell sertlik ölçümünü de gerçekleştirebilecek şekilde dizayn edildiğinden, ana yükün uygulanabilmesi için Rockwell sertlik yönteminde olduğu gibi bir ön yükün uygulanması gerekmektedir. Ana yükün uygulanması sonucu harekete geçen büyük kadrandaki ibrenin hareketsiz hale gelmesi (durması) beklenir. Bunun için yaklaşık 30 saniye beklenmesi yeterli olacaktır. İbrenin durmasıyla ana yük kolu ters yönde çevrilerek ana yük kaldırılır. Son olarak ön yükün de kaldırılması ile deney sona erdirilir. Ancak bu ölçümün sonucunun doğruluğundan emin olunabilmesi için numunenin en az üç farklı noktasına uygulanması gerekmektedir. Oluşan izin bilinen ölçme aletleri ile (kumpas, mikrometre, pasimetre vb.) ölçülmesi mümkün olmadığından ölçme mikroskobu veya iz çapını 100 kat büyütebilen optik yöntemler kullanılır.

7.3.2 Vickers Sertlik Ölçme Deneyi

Brinell sertlik ölçme yöntemiyle sert malzemelerin sertliğinin ölçümü zordur. Sert malzemelerin ölçümü için daha sivri uç kullanılan sertlik ölçme yöntemleri geliştirilmiştir. Vickers sertlik ölçme deneyinde batıcı uç olarak tepe açısı 136° olan elmas piramit uç kullanılır. Ucun malzeme üzerinde bıraktığı iz kare olur. Deney kuvvetinin (F) kaldırılmasından sonra ortaya çıkan izin köşegen uzunluğu ölçülür. Vickers sertlik değeri (HV), uygulanan kuvvetin (kgf) iz alanına bölümüdür. (Can, 2006)



Şekil 7.9 Vickers deneyinde kullanılan elmas uç ve sertliği ölçülecek malzemeye batırılış şekli (TS EN 6507)



Şekil 7.10 Vickers deneyinin prensibi (TS EN 6507)

Vickers sertliği, deney kuvvetinin, kare tabanlı dik piramit ve tepe noktasındaki açıları basma ucuyla aynı olacağı varsayılan eğimli iz alanına bölümünden elde edilen değerle orantılıdır.

Vickers sertlik deneyi, iz köşegeni 0,020 mm ile 1,400 mm arasında olan uzunluklar için tanımlanmıştır.

α : Piramit şekilli basma ucunun tepe noktasında karşılıklı yüzler arasındaki açı (136º)

F : Deney kuvveti, N

d : İki köşegenin (d_1 ve d_2) aritmetik ortalaması

HV : Vickers sertliği

7.3.2.1 Vickers Sertlik Ölçme İşlemi

Genel olarak, deney 10 ºC - 35 ºC sınırları içinde ortam sıcaklığında yapılır. Kontrollü şartlarda yürütülen deneyler (23 ± 5) ºC sıcaklıkta yapılmalıdır. Deney parçası rijit bir destek üzerine yerleştirilmelidir. Destek yüzeyleri temiz olmalı ve üzerinde yabancı madde (tufal, yağ, kir, vb.) bulunmamalıdır. Deney parçalarının destek üzerinde kaymayacak şekilde sağlam ttturulmuş olması önemlidir; böylece deney sırasında yer değiştirme olmaz.

Basma uç açısı 136˚ olan elmas uç deney yüzeyine temas ettirilir ve önceden belirlenen değere ulaşılıncaya kadar, sarsıntıya veya titreşime yol açmadan deney yüzeyine dik yönde kuvvet uygulanır. Deney kuvvetinin ilk uygulanmaya başladığı andan başlayarak istenilen kuvvet değerine ulaşıncaya kadar geçen süre 2 s’den az 8 s’den çok olmamalıdır. Düşük kuvvet sertlik ve mikrosertlik deneylerinde bu süre 10 s’yi aşmamalıdır. Düşük kuvvet sertlik ve mikrosertlik deneylerinde basma ucunun yaklaşma hızı 0,2 mm/s’yi geçmemelidir. Deney kuvvetinin uygulandığı süre, (süreye bağımlı özellikleri bu aralığı uygun olmayan bir

aralık yapan malzemelerin deneyleri hariç) 10 - 15 s kadar olmalıdır. Bu deneyler için daha uzun bir süre uygulanmasına müsaade edilir ve bu süre sertlik gösterilişinin bir parçası olarak belirtilmelidir. Deney süresince, cihaz sarsıntıdan ve titreşimden korunmalıdır.

Sertlik birimi kgf / mm^2 ‘ dir, fakat sertlik ifadesinde birim genellikle kullanılmaz.

$$HV = \frac{F}{A} = 1{,}8544\frac{F}{d^2} \tag{7.5}$$

Kuvvet Newton olarak alınır ise,

$$HV = \frac{F}{A} = 0{,}189\frac{F}{d^2} \tag{7.6}$$

Çelik, bakır ve bakır alaşımlarında herhangi bir izin merkezleri ile deney parçasının kenarı arasındaki mesafe, iz köşegen ortalamasının en az 2,5 katı; hafif metaller, kurşun, kurşun alaşımları, kalay ve kalay alaşımlarında iz köşegen ortalamasının en az 3 katı olmalıdır. Çelik, bakır ve bakır alaşımlarında komşu iki izin merkezi arasındaki mesafe, iz köşegen ortalamasının en az 3 katı; hafif metaller, kurşun, kurşun alaşımları, kalay ve kalay alaşımlarında iz köşegen ortalamasının en az 6 katı olmalıdır. İki komşu izin büyüklüğü birbirinden farklı ise mesafe, daha büyük olan izin ortalama köşegeni esas olarak belirlenmelidir. İki köşegen uzunluğu ölçülür. Vickers sertliği hesaplanması için yapılan iki okumanın aritmetik ortalaması alınır. Düz yüzeyler için, iki izin köşegenleri arasındaki fark %5’ ten fazla olmamalıdır. Fark daha büyükse bu durum raporda belirtilmelidir. Köşegenlerin boyutlarını, görüş alanının % 25’ inden daha büyük ancak % 75’ inden daha küçük olarak gösterecek büyüteçler sağlanmalıdır.

7.3.3 Rockwell Sertlik Ölçme Deneyi

Rockwell sertlik ölçme yöntemi basittir ve usta kullanıcı gerektirmez. Bir batıcı uç (elmas konik uç çelik veya sert metalden bilye), belirtilen şartlarda iki aşamada deney parçası yüzeyine bastırılır. Esas yükün kaldırılmasından sonra ön yük uygulanmaya devam edilerek oluşan izin derinliği h ölçülür. Optik cihazlar gerektirmeden ölçüm yapılabilir. Sertlik ölçme tekniği Brinell ve Vickers sertlik ölçümlerinden farklıdır. Rockwell sertlik ölçümünde iz alanı yerine iz derinliği ölçülür.

Batıcı uç olarak, değişik çaplarda çelik veya sert metal malzemeden yapılmış bilye veya uç açısı 120° ve uç kısmı 0,2 mm yarıçapında yuvarlatılmış elmas konik uç kullanılır.

Deney parçası, esnemeyen sabit bir destek üzerine yerleştirilmeli ve üzerinde iz yapılacak olan yüzey, batıcı ucun eksenine ve uygulanan kuvvete dik olacak şekilde desteklenmelidir. Ayrıca ölçüm sırasında deney parçasının yer değiştirmesinin önüne geçilmelidir.

Batıcı uç deney yüzeyi ile temas eder duruma getirilir ve şoka, titreşime ve salınıma yol açmadan ön deney kuvveti F_0 uygulanır. Ön deney kuvvetinin uygulanma süresi 3 saniyeyi geçmemelidir. Sertlik ölçülecek yüzey mümkün olduğu kadar pürüzsüz, düzgün ve oksit, tufal gibi yabancı maddelerden temiz olmalıdır. Deney sıcaklığı 10 – 35 ^{o}C' ler arasında tutulmalıdır.

Ölçme cihazı, başlangıç konumuna ayarlanır ve şoka, titreşime veya salınıma yol açmadan, 1 saniyeden az, 8 saniyeden çok olmayan bir zaman aralığında uygulanan kuvvet F_0'dan F'ye yükseltilir. Toplam F kuvveti, 4 saniye ± 2 saniye süreyle uygulanır. Ön kuvvet F_0' ı koruyarak esas deney kuvveti F_1 kaldırılıp ve kararlılığın sağlanması için kısa bir süre beklendikten sonra nihai okuma yapılmalıdır. Rockwell sertlik numarası, Çizelge 7.3' de verilen formül kullanılarak sürekli iz derinliği h' dan elde edilir ve genellikle ölçme cihazından doğrudan okunur. Birbirine komşu iki izin merkezleri arasındaki mesafe iz çapının en az dört katı olmalıdır.

Rockwell sertliği h değerinden ve iki sabit sayı N ve S'den aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\text{Rockwell sertliği} = N - \frac{h}{s} \qquad (7.7)$$

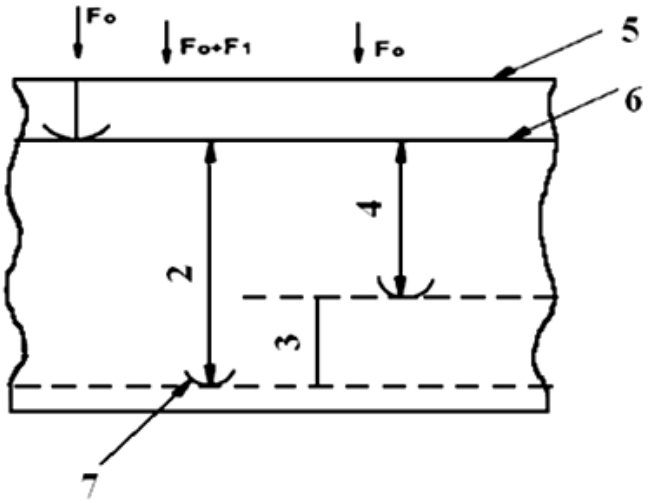
Çizelge 7.3 Rockwell sertlik deneyinde kullanılan semboller ve kısaltmalar

Sembol/ Kısaltmalar	Anlamı	Birim
F_0	Ön deney kuvveti	N
F_1	Esas deney kuvveti	N
F	Toplam deney kuvveti	N
S	Skala birimi, skalaya has	mm
N	Numara, skalaya has	
h	Esas deney kuvvetinin kaldırılmasından sonra ön deney kuvveti uygulanmaya devam edilirken ölçülen derinlik (sürekli iz derinliği)	mm
HRA HRC HRD	Rockwell sertliği = $100 - \frac{h}{0{,}002}$	
HRB HRE HRF HRG HRH HRK	Rockwell sertliği = $130 - \frac{h}{0{,}002}$	
HRN HRT	Rockwell sertliği = $100 - \frac{h}{0{,}001}$	

Çizelge 7.4. Rockwell Skalaları

Rockwell sertlik skalası	Sertlik sembolü	Basma ucunun tipi	Ön deney kuvveti F_0	Esas deney kuvveti F_1	Toplam deney kuvveti F	Uygulama alanı (Rockwell sertlik deneyi)
A [a]	HRA	Elmas konik uç	98,07 N	490,3 N	588,4 N	20HRA - 88 HRA
B [b]	HRB	Çelik bilye 1,5875	98,07 N	882,6 N	980,7 N	20HRB - 100 HRB
C [c]	HRC	Elmas konik uç	98,07 N	1373 N	1471 N	20 HRC - 70 HRC
D	HRD	Elmas konik uç	98,07 N	882,6 N	980,7 N	40 HRD - 77 HRD
E	HRE	Çelik bilye 3,175	98,07 N	882,6 N	980,7 N	70 HRE - 100 HRE
F	HRF	Çelik bilye 1,5875	98,07 N	490,3 N	588,4 N	60 HRF - 100 HRF
G	HRG	Çelik bilye 1,5875	98,07 N	1373 N	1471 N	30 HRG - 94 HRG
H	HRH	Çelik bilye 3,175	98,07 N	490,3 N	588,4 N	80 HRH - 100 HRH
K	HRK	Çelik bilye 3,175	98,07 N	1373 N	1471 N	40 HRK - 100 HRK
15N	HR15N	Elmas konik uç	29,42 N	117,7 N	147,1 N	70 HR15N - 94 HR15N
30N	HR30N	Elmas konik uç	29,42 N	264,8 N	294,2 N	42 HR30N - 86 HR30N
45N	HR45N	Elmas konik uç	29,42 N	411,9 N	441,3 N	20 HR45N - 77 HR45N
15T	HR15T	Çelik bilye 1,5875	29,42 N	117,7 N	147,1 N	67 HR15T - 93 HR15T
30T	HR30T	Çelik bilye 1,5875	29,42 N	264,8 N	294,2 N	29 HR30T - 82 HR30T
45T	HR45T	Çelik bilye 1,5875	29,42 N	411,9 N	441,3 N	10 HR45T - 72 HR45T

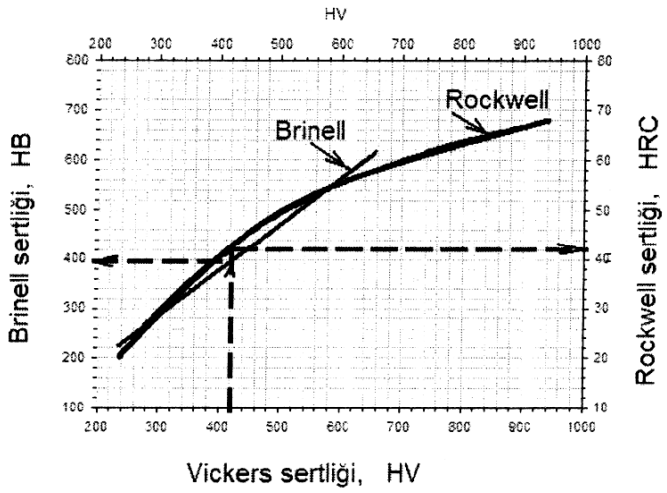
a Uygulama alanı deney karbürleri için 94 HRA'ya genişletilebilir.
b Mamul şartnamesi veya özel anlaşma ile uygulama alanı 10 HRBW'ye genişletilebilir.
c Basma ucu uygun boyutlara sahip olursa, uygulama alanı 10 HRC'ye genişletilebilir.
Not – Mamul şartnamesinde belirtilmişse veya özel anlaşma ile 6,350 mm ve 12,70 mm çaplı batıcı bilyeler de kullanılabilir.



1 Ön deney kuvveti F_0'ın neden olduğu iz derinliği
2 Esas deney kuvveti F_1 ile yapılan izin derinliği
3 Esas deney kuvveti F_1'in kaldırılmasından sonraki elastik düzelme
4 Sürekli iz derinliği, h
5 Numune yüzeyi
6 Ölçme için referans düzlemi
7 Batıcı ucun konumu

Şekil 7.11 Rockwell sertlik deneyinde kullanılan kavramlar.

Süper Rockwell yöntemi ile çok ince sac ve sementasyon tabakalarının sertlik değerleri tespit edilebilmektedir. 3kg'lık ön yük ve 15- 30- 45 Kg'lık toplam test yükleri ile malzemenin sertliğini ölçmek mümkündür. Deneyde batıcı uç olarak sert bilye veya elmas uç kullanılır.

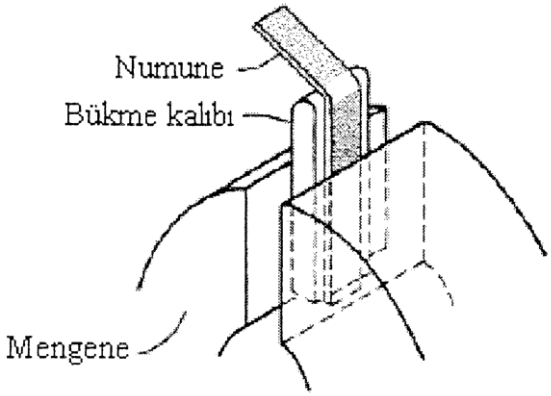


Şekil 7.12 Brinell, vickers ve rockwell sertliklerinin birbirine dönüşümü (Can, 2006)

7.4 Bükme (eğme) ve Katlama Deneyleri

Bükme deneyi bir benzeşim deneyidir ve uygulamada çok fazla çeşidi vardır. Sac malzemelere uygulanan bükme ve eğme deneyleri ile katlama deneylerinin amacı, bükme ile şekillendirmelerde malzemenin davranışı belirlemektir. Belli oranda veya açıda bükülen sac malzemenin, özellikle çekme gerilmesine maruz kalan dış yüzeyinde herhangi bir çatlağın meydana gelmemesi gerekmektedir. (Erhuy, 2001)

ASTM E 290 standardının öngördüğü yöntemde, metal sac numune ve bir bükme kalıbı, mengeneyle sıkıştırılır ve numune, kalıp üzerinden elle veya metal olmayan bir tokmak yardımıyla bükülür.



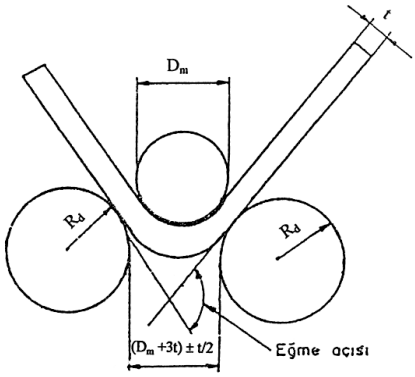
Şekil 7.13 ASTM E 290 standardına göre bir ucu mengeneye sıkıştırılmış sac numunenin, ucu belli bir yarıçapta yuvarlatılmış blok üzerinde bükülmesi. (Taylor, 1988)

Eğer numune kırılma ya da çatlama olmadan 180° bükülüyorsa, deney, bükme kalıbı yuvarlatma yarıçapının küçültülmesiyle tekrarlanır. Bu deneyde numune genişliğinin kalınlığa oranı, 8 / 1 ‘ den büyük olmalıdır ve numune eğer bir soğuk şekillendirme yöntemiyle çıkarılıyorsa kenarları talaş kaldırılarak düzeltilmelidir. Ayrıca numune alınırken haddeleme

yönüne göre doğrultusuna dikkat edilmelidir, çünkü bu numunenin çatlamaya karşı direncini etkiler. (Taylor, 1988)

Bükme deneyleri saclarda değişik şekillerde uygulanabilir. Bükülerek katlama deney yönteminde 3 mm' den küçük kalınlığa sahip saclar kendi üzerine, 3 mm' den büyük kalınlıklardaki saclar ise bir blok üzerine, kolları açık ve birbirine paralel olacak şekilde 180° bükülürler. Bükürek eğmede esas amaç, malzemeyi çatlak oluşana dek, tek yönde eğmektir. Süneklik dereceleri iyi olan malzemeler 180° katlanmalarına rağmen çatlama göstermezler. Daha düşük açılarda çatlama gözlemlenen numunelerde ise kıstas olarak eğilme açısı kullanılır. (Değirmenci, 2006) Kalınlığı t = 3 mm'den az olan saclarda, deney numunesinin genişliği b = 20 ± 5 mm olarak alınır. Kalınlığı 3 mm'den fazla olan saclarda ise b = 25-50 mm olarak alınmalıdır. (TS 205; DIN 50111)

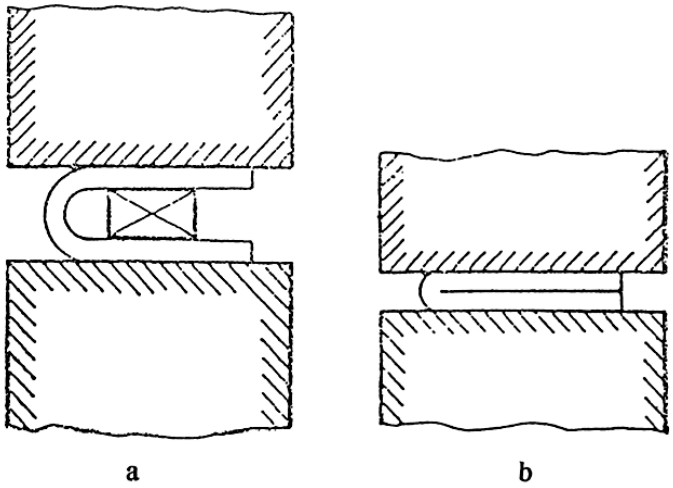
Saclara uygulanan bükme deneylerinden biri de, mandrel ile destekler arası eğme yöntemidir. (Şekil 7.14). Deney düzeneğindeki mandrel çapı (D_m), sac malzeme standartlarına göre değişmektedir. Destek elemanlarının yarıçapı (R_d), DIN 50111 standardında 25 mm olarak belirtilmektedir. Destekler arası açıklık, yaklaşık $D_m + 3t \pm t/2$ olarak alınmalıdır. Bu deney, kalınlığı 3 mm' den az veya fazla olan saclarda, maksimum 120°' lik eğme açısına kadar uygulanmaktadır. Numune dış yüzeyinde bir çatlağın meydana gelmesi ile deney sona ermektedir. DIN 50111' e göre deney hızı, 1 mm / s' yi aşmamalıdır.



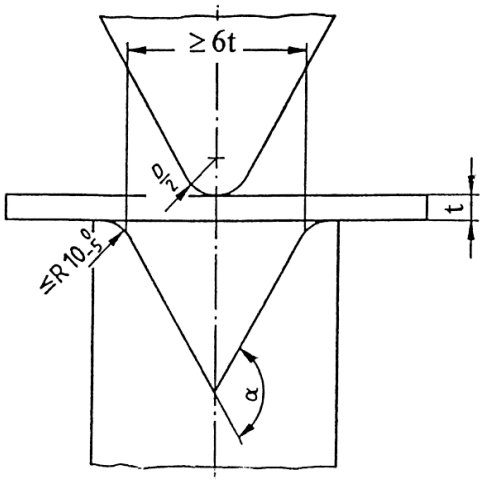
Şekil 7.14 Destekler arası eğme (TS 205)

Destekler arasında eğme deneyinin yanı sıra, saclara değişik şekillerde bükme ve katlama deneyleri de uygulanmaktadır. Bir sac numune, bir blok üzerinde kolları açık ve birbirine paralel kalacak şekilde 180° bükme deneyine tabi tutulabilir. (Şekil 7.15 a) Kalınlığı 3 mm' den az olan saclara ise bir blok kullanmaksızın kendi üzerine 180° katlama deneyi uygulanabilir. (Şekil 7.15 b) Kalınlığı 3 mm'den fazla olan saclara uygulanan bir yöntem de, deney numunesinin U şeklindeki bir blok (kalıp) içersinde bükülmesidir. Bu

yöntemde deney numunenin uzunluğu genelde 250 mm olarak alınmakta ve deney 90˚ ’lik eğme açısına kadar uygulanabilmektedir. Şekil 7.16’da, bir V blok üzerinde (tepe açısı 60˚) bükme işlemi görülmektedir. Bütün bu deneylerde de, numune dış yüzeyinde bir çatlak oluşup olmadığı sonucuna bakılmaktadır.



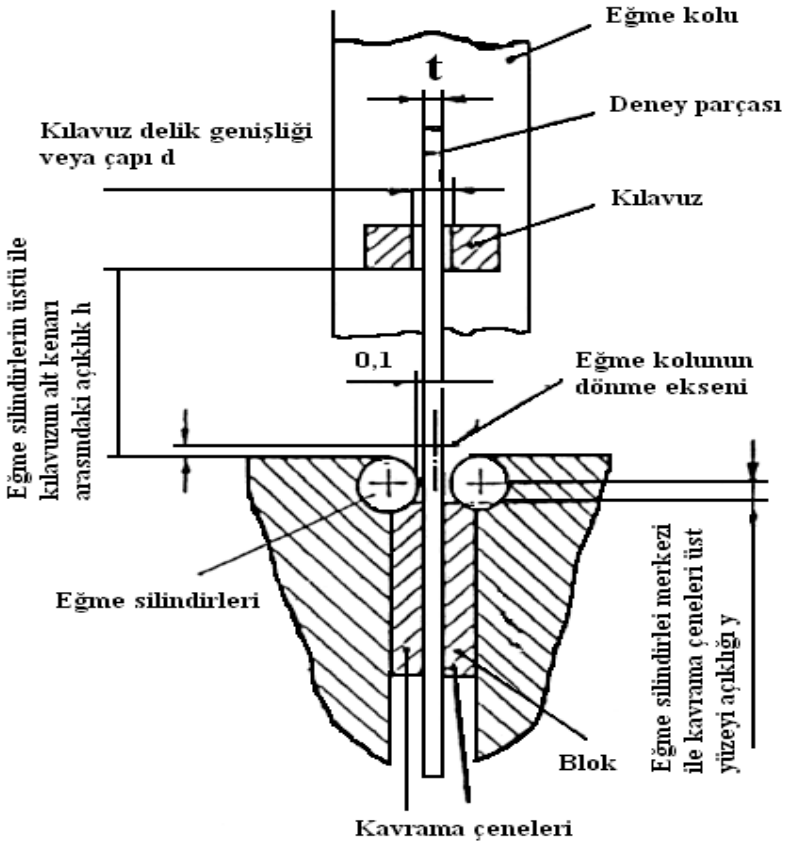
Şekil 7.15 Sacların bir blok üzerinde, kollarının açık ve birbirine paralel olarak 180° (a) ve kendi üzerine 180° (b) katlanması (TS 205)



Şekil 7.16 Tepe açısı 60° olan bir V blok üzerinde sac numunenin bükülmesi (DIN 50111)

Kalınlığı 3 mm’ den az olan sac ve şeritlere uygulanan diğer bir deney yöntemi de, ileri - geri eğme deneyidir. Bu yöntemde, genişliği 20 ± 5 mm olan deney numunesinin bir ucu kavrama çeneleri arasında sıkıştırılırken, diğer ucu bir kılavuza takılır (Şekil 7.17). Deney numunesinin kılavuza takılan ucu, önce bir eğme silindiri üzerinde 90˚ eğilip tekrar düzleştirilir, sonra ters yönde diğer eğme silindiri üzerinde eğilip tekrar başlangıç konumuna getirilir. İleri geri eğme deneyinde deney numunesi, istenilen eğme sayısına (N_b) kadar

kırılmamalıdır. Malzemenin aşırı ısınmaması için saniyede en çok bir eğme yapılmalıdır. (TS 205)



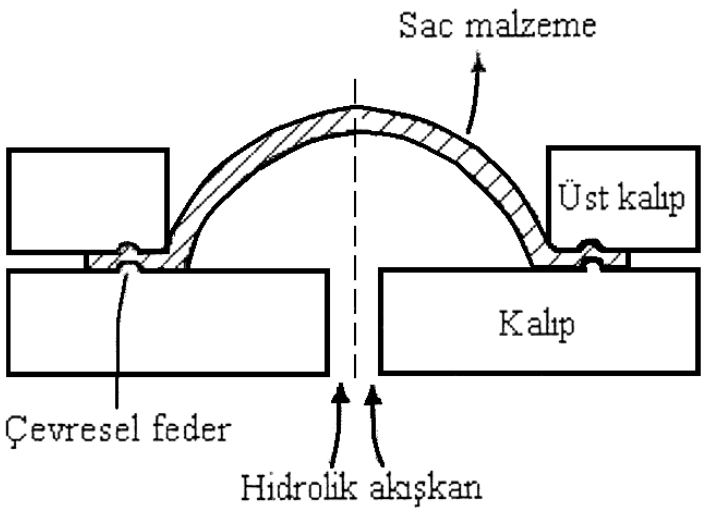
Şekil 7.17 İleri - geri eğme düzeneği (TS 205)

7.5 İki Eksenli Germe Deneyi

Malzemelerin iki eksenli gerinim durumlarını belirlemede sıkça kullanılan yöntem hidrolik şişirme deneyidir. Bu deneyde metal sac, federli üst kalıp parçası ile çevresinden sıkıştırılmakta ve ıstampa yerine hidrolik basınç kullanılarak yalnızca bir tarafından şişirilmektedir.

Çevresel kalıp parçaları kullanıldığından kubbe biçiminde deforme olmuş numune, şekil itibariyle tam küreye yakındır. Bu bölgedeki gerilme – gerinim durumu, uzama ve akışkan basıncı eğrisinden bulunmaktadır. Test düzeneği bilgisayarla etkileşimli çalışabilmekte ve uzama ölçerden gelen geri dönüşümlü bilgilerle akışkan basıncı ve gerinim hızı ayarlanabilmektedir. Kontrol, günümüzde video uzama ölçer sistemi kullanılarak da gerçekleşebilmektedir. (Değirmenci, 2006)

Istampa yerine akışkan kullanılması, sürtünmenin sıfıra yaklaşmasını ve şekillendirmenin dengeli iki eksenli çekme halinde ($\varepsilon_\theta = \varepsilon_\Phi = \varepsilon_t$) gerçekleşmesini sağlamaktadır.



Şekil 7.18 Malzemenin iki eksenli gerinim durumunu yansıtan hidrolik şişirme deneyi (Lange, 1985)

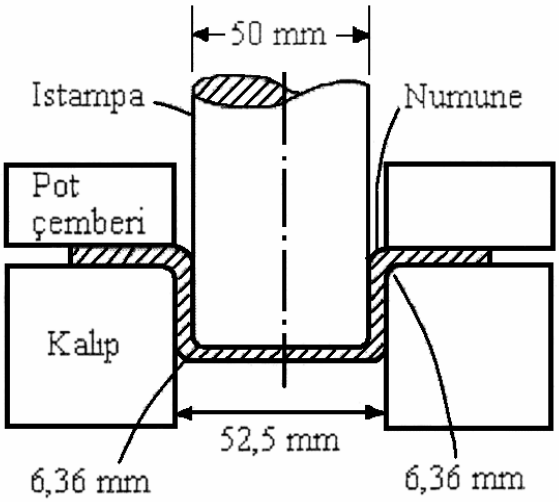
Hidrolik şişirme deneyi, bir sac malzemenin gerçek pres işlemlerindeki deformasyon şeklini yansıtmamaktadır, çünkü herhangi bir ıstampa sürtünmesi söz konusu değildir. Bu deney yöntemi, laboratuar şartlarında sac malzemelerin dengeli iki eksenli çekme halindeki plastik akış teorilerini ve akış eğrilerini elde etmekte, diğer yöntemlerle ulaşılamayan yüksek gerinim seviyelerinde malzeme davranışını incelemede, teorik akma davranışlarının geçerliliğini belirlemede ve kalınlık yönünde gerçek bir basma gerilme – gerinim eğrisi elde etmede kullanılmaktadır. (Lange, 1985)

Sac şekillendirme yöntemlerinde sıkça karşılaşılan iki eksenli germe halindeki malzemenin temel özgül niteliklerini vermektedir. Ayrıca deney, malzemenin teorik akma davranışını incelemede ve plastisite teorilerini doğrulamada sıkça başvurulan yöntemdir. (Taylor, 1988)

7.6 Derin Çekme Deneyleri

Derin çekilebilirliğin ölçümü için kullanılan benzeşim deneylerinden en yaygını Swift deneyidir. Bu deneyde, değişen çaplarda dairesel kesilen numuneler pot çemberi ile tutulurlar ve düz dairesel uçlu ıstampa ile derin çekilirler. Swift ve Fukui deneyleri, en yaygın olarak başvurulan derin çekme deneyleri olmaktadır.

Swift derin çekme deneyi, düz tabanlı ıstampayla ve yarıküresel uçlu ıstampayla olmak üzere iki şekilde uygulanabilmesine rağmen, düz tabanlı ıstampa ile yapılan deneyler daha yaygındır. Yarıküresel uç formuna sahip bir ıstampa kullanılmasıyla, germe ve derin çekme durumu birlikte oluşmaktadır. Düz tabanlı ıstampa ile uygulanan Swift derin çekme deney düzeneği, Şekil 7.19' da görülmektedir. Kullanılan ıstampanın çapı Ø 50 mm olmaktadır. Istampa çapına ve sac kalınlığına bağlı olarak kalıp delik çapı, kalıp- ıstampa arası boşluk, ıstampanın ve kalıp ağzının köşe yuvarlatma yarıçapları da değişmektedir. (DIN EN 1669)



Şekil 7.19 Düz tabanlı ıstampa ile yapılan Swift derin çekme deneyi düzeneği (Taylor, 1988)

Deney sonuçlarına, bastırıcının uyguladığı kuvvet ve yağlama da etki etmektedir. Chung ve Swift (1951), bastırıcı basıncını (P_b) akma dayanımının % 0,5 - 1 'i olarak önermektedir. Ayrıca, sac kalınlığının stampa çapma oranı t / d > 0.025 olması durumunda, bastırıcı kullanımı gereksiz görülmektedir. Bastırıcının uyguladığı kuvvet, aşağıdaki eşitlikten (7.8) hesaplanabilmektedir.

$$F_b = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \times Pb \qquad (7.8)$$

Deneyde en sık kullanılan yağlayıcı, tallow olup, ayrıca 0.08 mm kalınlıkta polietilen tabaka yağlayıcıları da kullanılabilmektir.

Deney sonucu sınır derin çekme oranıdır. (LDR = D_{max} / d) D_{max} başarılı olarak çekilebilen maksimum ilkel pul çapıdır. Bu çap değeri, ilkel pul çapının başarısız (yırtılmanın olduğu) derin çekmelere kadar kademeli olarak arttırılması ile belirlenebildiği gibi, (7.9) eşitliğinden de yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikteki d_k kalıbın delik çapı,

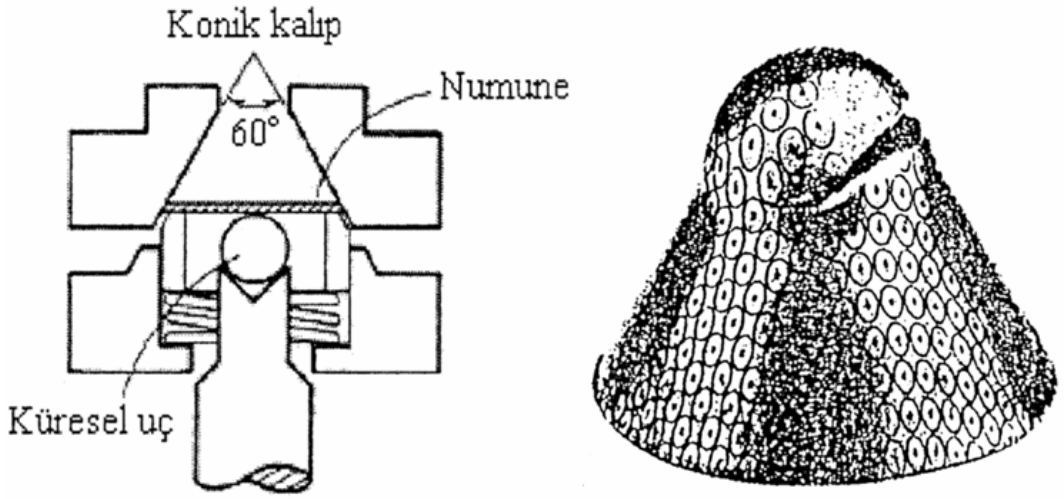
$(F_{dç})_f$, yırtılmanın meydana geldiği kuvvet ve $(F_{dç})_{max}$ derin çekmedeki maksimum kuvvet olmaktadır.

$$D_{max} = \frac{(F_{dç})_f}{(F_{dç})_{max}}(D - d_k) + d_k \tag{7.9}$$

Kap yüksekliği ise yaklaşık olarak (7.10) eşitliğinden hesaplanabilmektedir.

$$h = \frac{(D^2 - d^2)}{4d} \tag{7.10}$$

Diğer bir derin çekme deneyi ise Fukui konik derin çekme (konik kap çekme) deneyidir. Bu yöntemde kullanılan deney düzeneği ve deney sonrası yırtılmış bir sac numune, Şekil 7.20' de görülmektedir. Sacı deforme eden, bir ıstampanın uç kısmında bulunan ve çapı sac kalınlığına bağlı olarak 12.5 ile 27 mm arasında değişen küresel bir elemandır.



Şekil 7.20 Fukui konik derin çekme düzeneği ve deney sonrası yırtılmış bir numune (Mielnik, 1992)

Kalıbın konik deliğinin ağız çapı ise sac kalınlığına bağlı olarak 9.4 - 32 mm arasında değişmektedir. İlkel pul çapları 23 ile 79 mm arasında seçilmektedir. İşlemde herhangi bir bastırıcı kullanılmamakta ve yağlayıcı olarak yüksek viskozitede bir yağ önerilmektedir. Fukui deney sonucu olarak Fukui konik kap çekme değeri, FCCV = D / D_f şeklinde hesaplanabilir. (D başlangıçtaki ilkel pul çapı, D_f ise yırtılma anında konik kısmın tabanının ortalama çapı) Deneyin bitim noktasının hassas belirlenmesi önemli değildir, çünkü çatlak oluştuktan sonra konik bölümün çapı değişmez. Bazı durumlarda, bir boyunlamayla birlikte

yük düşümünün gerçekleştiği andaki yük değeri veya kap derinliği ya da konik kısmın tabanının ortalama çapı deney sonucu olarak verilebilmektedir.

7.7 Çökertme Deneyleri

Çökertme deneyleri bir sac malzemenin şekillendirilebilirliğini belirlemede yaygın olarak kullanılan deneylerdir. Erichsen ve Olsen olmak üzere iki tip standart çökertme deneyi vardır. Bu deneylerin prensibi aynı olmasına rağmen, deney düzeneğinin boyutları farklılık göstermektedir. Çökertme deneylerinde ortaya çıkan deformasyon durumu, daha çok germe işlemlerinde ortaya çıkan duruma benzemektedir. (Erhuy, 2001)

7.7.1 Cupping (Erichsen çökertme) Testi

Cupping testi, metal bir plaka veya şeridin cupping kalitesinin test koşulları içinde belirlenmesinde kullanılır. Testin amacı için tutucu ile kalıp arasına sıkıştırılan numune, bir bilye veya top uçlu bir itici yardımıyla kalıp içine doğru numune kırılana kadar bastırılır. Bu baskı sırasında oluşan derinlik belirlenir. Numunenin yüzey görünümü maddenin tanecik yapısı hakkında bilgi verir. Kırılım yapısı maddenin yapısının belirlenmesine yardımcı olur. (DIN 50101)

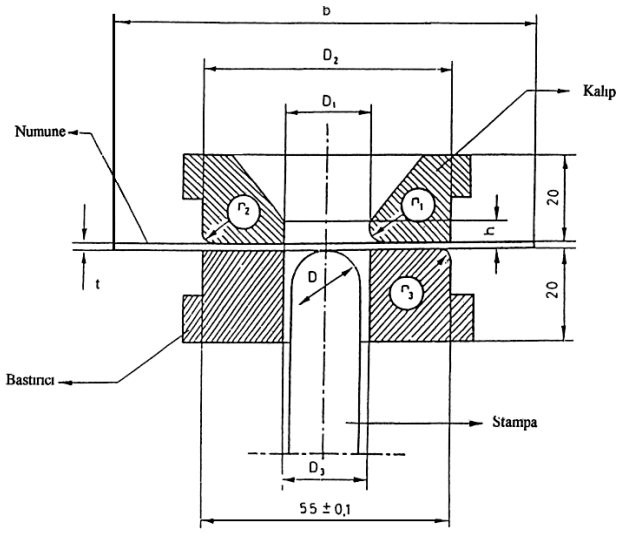
Erichsen çökertme deneyi, kalınlığı 0,2 – 3 mm arasındaki saclara uygulanan bir deney metodu olup, deney düzeneğinin elemanları ve boyutları, sac numune genişliğine göre değişmektedir. Genişliği 90 mm’ den az olan sac ve şeritlerin deneyinde Şekil 7.21’ de görülen, genişliği 90 mm’ den fazla olan sac ve şeritlerin deneyinde Şekil 7.22’ de görülen deney düzeneği kullanılmaktadır. Deney düzeneğinin elemanları ve boyutları ise Çizelge 7.5’ de verilmiştir. (Erhuy, 2001)

Deney numunesi, genişliği 90 mm ile 100 mm arasında olan ve uzunluğu 270 mm den kısa olmayan bir plakadan meydana gelir. (minimum 3 ölçüm alabilmek için) Test, uzunluğu veya çapı 90 mm ile 100 mm arasında olan kare ve dairesel numuneler üzerinde de uygulanabilir. Cup’ ların merkezleri numunenin herhangi bir kenarından en az 45 mm uzaklıkta ve bir önceki cup’ın merkezinden en az 90 mm uzakta olmalıdır. (DIN 50101) Parçanın genişliği 90 mm’ den küçük ise DIN 50102 ‘ deki test prosedürü izlenmelidir.

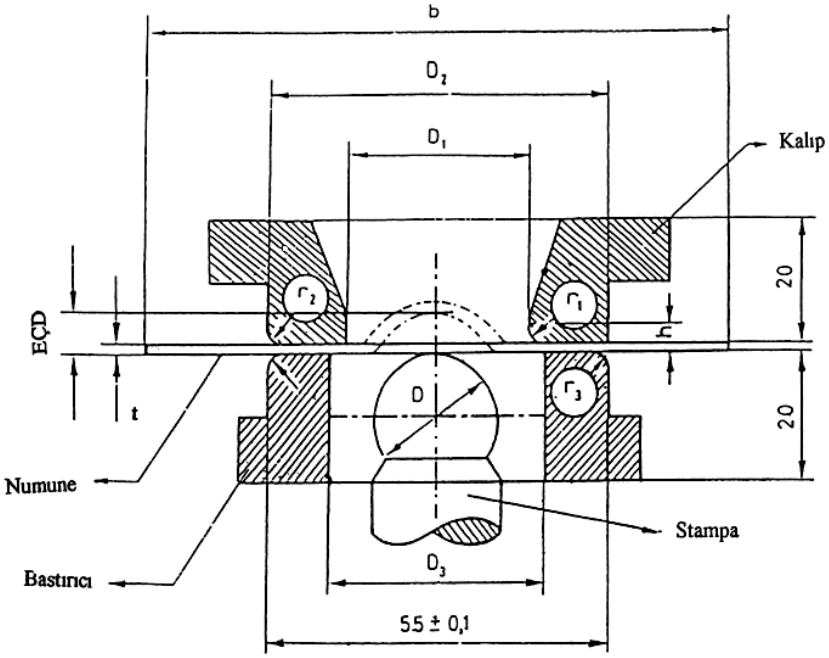
Numune, kuvvetlendirme işlemi veya sıcak işlem uygulanmamış olmalıdır. Numunenin makine tarafından tutulmasını zorlaştırmamak için numune bel vermemiş olmalı ve yüzeyi pürüzsüz olmalıdır. Deney, kesilen şeritler kuru olarak ve iki yüzeyi grafitli gres yağı ile yağlanarak iki farklı şekilde yapılmalı ve değerler karşılaştırılmalıdır. Teste

başlamadan önce numunenin iki yüzü ve itici grafitli yağ ile yağlanmalıdır. Eğer başka bir yağ kullanılırsa (örnek petrolium jelly) test raporunda belirtilmelidir.

Belirtilmediği sürece test başına düşen cup sayısı 3'ten az olmamalıdır. Makine numuneyi yaklaşık 1000 kp kuvvetle tutabilecek donanıma sahip olmalıdır. Makine üzerinde numuneyi 27 mm çapındaki kalıbın içinden geçebilecek ve numune kırılana kadar üzerine kuvvet uygulayabilecek, çapı 20 mm olan top uçlu bir itici olmalıdır. Kırılmanın başladığı zaman belirlenebilmeli ve makina, iticinin penetre ettiği derinliği 0,1 aralıklarla ölçebilmeli, numuneyi sabit tutmak için tutucunun uyguladığı kuvveti hesaplayabilecek donanıma sahip olmalıdır. İtici aşınmalara karşı dayanıklı ve Vickers sertliği 750 kp / mm^2 ' den fazla olan bir malzemeden üretilmelidir. Küresel uç cilalanmalıdır. (kalın krom kaplama önerilir) İticinin doğru ebatta üretilebilmesi için iticinin gövde çapı küresel ucun çapından yalnızca gerektiği kadar fazla olmalıdır. İtici, test sırasında dönmemeli ve geri çekilme sırasında plakaya yapışmamalıdır. Topun orta uç noktası ile kalıbın ekseni arasındaki mesafe 0,1 mm' yi geçmemelidir. Bu iticinin hareketi sırasında da geçerlidir. Cup' ların merkezleri numunenin her hangi bir kenarından en az 45 mm uzakta ve bir önceki cup' ın merkezinden en az 90 mm uzakta olmalıdır. İtici numuneye darbeli bir kuvvet uygulamayacak biçimde temas etmelidir ve değdiği an iticinin bulunduğu nokta başlangıç noktası olarak kabul edilip cup derinliği hesaplanmalıdır. Test sırasında itici sabit bir besleme ile (yaklaşık 5 mm/ dak. ile 20 mm / dak. arasında) yukarı doğru hareket ederek kırılma oluşana kadar numuneye etki etmelidir. Testin sonuna doğru iticinin yükselme hızı belirtilen minimum seviyeye yakın olmalıdır. Kırılma anında iticinin penetre ettiği derinlik 0,1 mm yakınlığında ölçülmelidir. (DIN 50101)



Şekil 7.21 Genişliği 90 mm'den daha dar sacların çökertme muayenesinde kullanılan cihazın anaparçaları ve deney düzeneği (TS 271)



Şekil 7.22 Genişliği 90 mm'den daha geniş sacların çökertme muayenesinde kullanılan cihazın anaparçaları ve deney düzeneği (TS 271)

Çizelge 7.5 Muayene cihazı parçalarının boyutları ve bu boyutlara ait toleranslar.

İşareti	Parçanın Adı	Anlamı	Şekil - 1 Genişliği 90 mm den fazla olan saç ve bandlar için				Şekil - 2 Genişliği 90 mm den az olan saç ve bandlar için		
			Boyutu mm	Toleransı mm	Boyutu mm	Toleransı mm	Boyutu mm	Toleransı mm	Boyutu mm
a	Muayene örneği	Muayene örneğinin kalınlığı	0,2 - 2,0	_	2-3	_	0,2 - 1,0	_	0,2-2,0
b	Muayene örneği	Muayene örneğinin genişliği	90 - 100	—	90-100	—	30-55	—	55-90
l	Muayene örneği	Muayene örneğinin uzunluğu (üç çökertme yapmak için)	270 m ı n	—	400 min	—	270 min	—	270 min
D	Küresel uçlu Zımba	Küresel ucun çapı	„	ı (),()*;	21)	-' 0,05	8	± 0,02	15
D_1	Kalıp	Kalıbın delik çapı	27	-ı- 0,05	X,	-' 0,05	11	.': 0,02	21
D_2	Kalıp	Kalıbın dış çapı	55	1 0,1	70	-'- 0,1	55	± 0,1	55
r_1	Kalıp	Kalıbın iç tarafındaki köşe yarı çapı	0,75	1 O.Oİİ	2	J- 0,05	0,75	-t 0,05	0,75
r_a	Kalıp	Kalıbın dış tarafındaki köşe yarı çapı	0,75	': 0,05	1	± 0,05	0,75	± 0,05	0,75
h	Kalıp	Kalıbın delik derinliği	3	± 0,1	6	± 0,1	3	± 0,1	3
-	Kalıp	Kalıbın kalınlığı	20 mm	—	20 mm		20 min	—	20 min
D_a	Tutucu çember	Tutucu çemberin delik çapı	33	± 0,1	33	± 0,1	10	± 0,1	18
-	Tutucu çember	Tutucu çemberin dış çapı	55	± 0,1	55	± 0,1	55	± 04	55
r_a	Tutucu çember	Tutucu çemberin dış tarafında köşe yan çapı	0,75	± 0,1	1	± 0,1	0,75	± 0,1	0,75
-	Tutucu çember	Tutucu çemberin kalınlığı	20 mm	—	20 mm	—	20 mm	—	20 mm

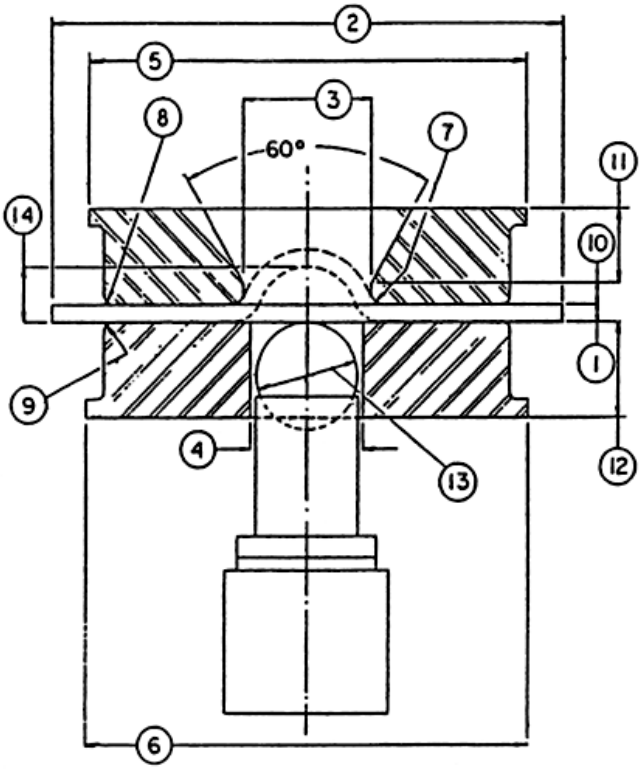
Şekil 7.23 Cupping test makinası ve test sonu numuneleri (Arçelik A.Ş.)

Erichsen çökertme deneyinin sonucu olarak, Erichsen çökertme değeri (EÇD) belirlenmektedir. Bu değer, bir çatlak meydana gelene kadar ıstampanın sac üzerinde yaptığı çökertme yüksekliğinin mm olarak ifadesidir.

Kalıbın delik çapı 27 mm ise, deney sonucu EÇD olarak gösterilirken, kalıbın delik çapı 40 mm, 11 mm veya 21 mm olması durumunda $EÇD_{40}$, $EÇD_{11}$, $EÇD_{21}$ sembolleri kullanılmaktadır. Deney sonu, bir çatlağın meydana geldiği andır. Bu, bir ses ile veya yük düşmesi olarak algınabildiği gibi, göz ile de algılanması da bir kriterdir. Deney raporunda, deneyin sona erdirilme şeklinin de bildirilmesi gerekmektedir. (TS 271)

7.7.2 Olsen Çökertme Deneyi

Olsen çökertme deneyi de yöntem olarak Erichsen çökertme deneyinin benzeri olup, sadece deney düzeneğinin boyutları değişmektedir. (Şekil 7.24) Bu deney yönteminde deney hızı 0,08 – 0,40 mm / s olarak önerilmektedir. (ASTM E 643 – 84)



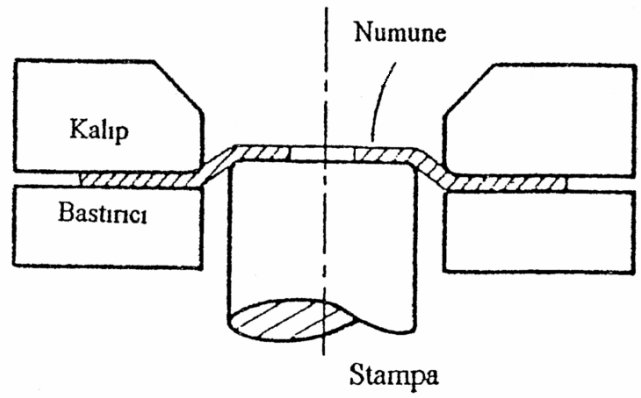
Şekil 7.24 Olsen çökertme deney düzeneğinin elemanları (ASTM E 643 -84)

7.8 Delik Genişletme Deneyi

Sacların şekillendirilebilirliği, sadece lokal boyunlanma ile sınırlanmamaktadır. Bazen saclarda, kenar çatlaması olarak bilinen durumlar da meydana gelebilmektedir. İlkel pulların

kesim işleminin sac kenarlarında çapak bırakması, kenar çatlama riskini arttırmaktadır. Bu nedenle, keskin ve uyumlu kesme kalıpları ile çalışmak gerekmektedir. Bunun dışında, kesme kenarlarının pekleşmesi ve malzemenin özellikleri de bu oluşumu etkilemektedir. Özellikle yüksek dayanımlı çeliklerde uzamış inklüzyonlar, bu tip problemleri doğurabilmektedir. (Hosford ve Caddell, 1983)

Sacların kenar çatlama eğilimi, delik genişletme deneyi ile değerlendirilebilir. Bunun için Şekil 7.25' te görülen, ortası bir zımba ile yuvarlak olarak delinmiş bir ilkel pul kalıp ve bastırıcı arasına sıkıştırılmakta ve genelde düz tabanlı bir ıstampa ile gerilmektedir. Istampanın uç formu yarıküresel veya konik de olabilmektedir. Germe ile başlangıçtaki çapı d_o olan delik genişlemekte, delik kenarında çatlakların görülmeye başlamasıyla deney sona erdirilerek, deliğin ortalama çapı (d_m) ölçülmektedir. Bu andaki deliğin genişleme yüzdesi veya çevresel gerinim, (d_m - d_o) / d_o x 100 olarak hesaplanır. Delik genişleme miktarı, aynı zamanda malzemenin sünekliği ile de ilgili olmaktadır. (Taylor, 1985)



Şekil 7.25 Delik genişletme deney düzeneği (Taylor, 1985)

7.9 Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Oluşturulması

Karmaşık şekilli parçaların teorik olarak şekillendirilebilirliklerinin saptanmasının zor olması, tek eksenli çekme deneyinin ya da uygulanan Erichsen, Olsen, Swift gibi benzeşim deneylerinin sınırlı sayıda gerinim durumunun analizine olanak tanıması ve bu deneylerin tam olarak malzemelerin şekillendirilme kabiliyetlerini yansıtmamaları nedenleriyle araştırmacılar, sac malzemelerin çeşitli gerinim durumlarını yansıtan şekillendirme sınır diyagramlarını geliştirmişlerdir. Şekillendirme sınır diyagramları (FLD), sac malzemelerin gerinim analizlerinden oluşturulan şekillendirme sınır eğrilerinden ibarettir. (Değirmenci, 2006)

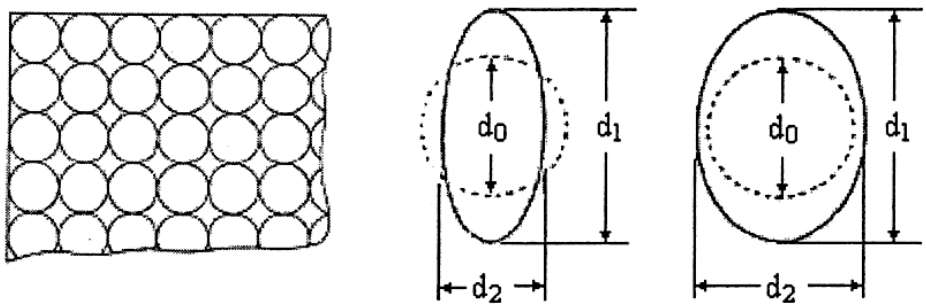
Şekillendirme sınır eğrileri (FLC), sac malzemenin çeşitli gerilme hallerinde oluşan sınır gerinimlerini belirten eğrilerdir. Gerçek proseslerde ortaya çıkan deformasyon durumu, derecesi ve sac malzemenin şekillendirilebilirliğini yorumlama açısından oldukça kullanışlı olmaktadırlar. (Newby, 1978)

Şekillendirme sınır diyagramları, sac malzemelerin gerinim analizlerinden oluşturulan şekillendirme sınır eğrilerinden ibarettir. Bu eğrilerin deneysel olarak elde edilmesinde, sınır gerinimlerin ölçümü için, sac levha yüzeyine şekillendirmeden önce kimyasal dağlama, elektro - dağlama ya da fotoğraf baskısı gibi özel tekniklerle dairesel bir ağ görüntüsünün çizilmesi gerekir.

Şekillendirme sınır eğrileri, sacın yüzeyinde oluşan iki asal gerinimin bir diyagram üzerinde gösterilmesi ile elde edilir ve bu diyagrama " şekillendirme sınır diyagramı (FLD) " adı verilir. Sac yüzeyinde oluşan büyük gerinimler (major strain), e_1 veya ε_1 olarak düşey ekseni oluşturmakta ve daima pozitif değerde (çekme) olmaktadır. Küçük gerinimler (minor strain) ise, e_2 veya ε_2 olarak yatay ekseni teşkil etmekte ve gerilme haline bağlı olarak pozitif ya da negatif değerlerde (çekme veya basma) olmaktadırlar. Bu yönler, sac malzemenin şekillendirilmesinde ortaya çıkan gerinim oranlarının (β) işareti ile özdeştir. (Mielnik, 1992)

Deney parçasındaki gerinim derecelerinin karşılaştırılması için daireler mümkün olduğunca küçük çaplı olmalıdır. Belirlenen optimum daire çapı 2,54 mm' dir. (Granzow, 1990) Dairesel ağların yüzeye uygulanmasından sonra, yağlama yapılmadan yırtılma görülene kadar sac şekillendirilerek, incelme ve yırtılma oluşan bölgelerde dairelerin şekli incelenir.

Şekillendirmeden sonra daireler elipse dönüşmektedir. (Şekil 7.26) Bir elipsin büyük ekseni d_1, küçük ekseni d_2 ve deformasyondan önceki daire çapı d_0 ise şekil değişiminden sonra oluşan büyük asal gerinimler (e_1 ve ε_1) ve küçük asal gerinimler (e_2 ve ε_2) 7.11 – 7.14 eşitlikleri ile hesaplanabilir.



Şekil 7.26 Şekillendirme öncesinde yüzeye uygulanan dairesel ağ görüntüsü ve deformasyon sonrasında bunların dönüştükleri elipslerin boyutları. (Mielnik, 1992)

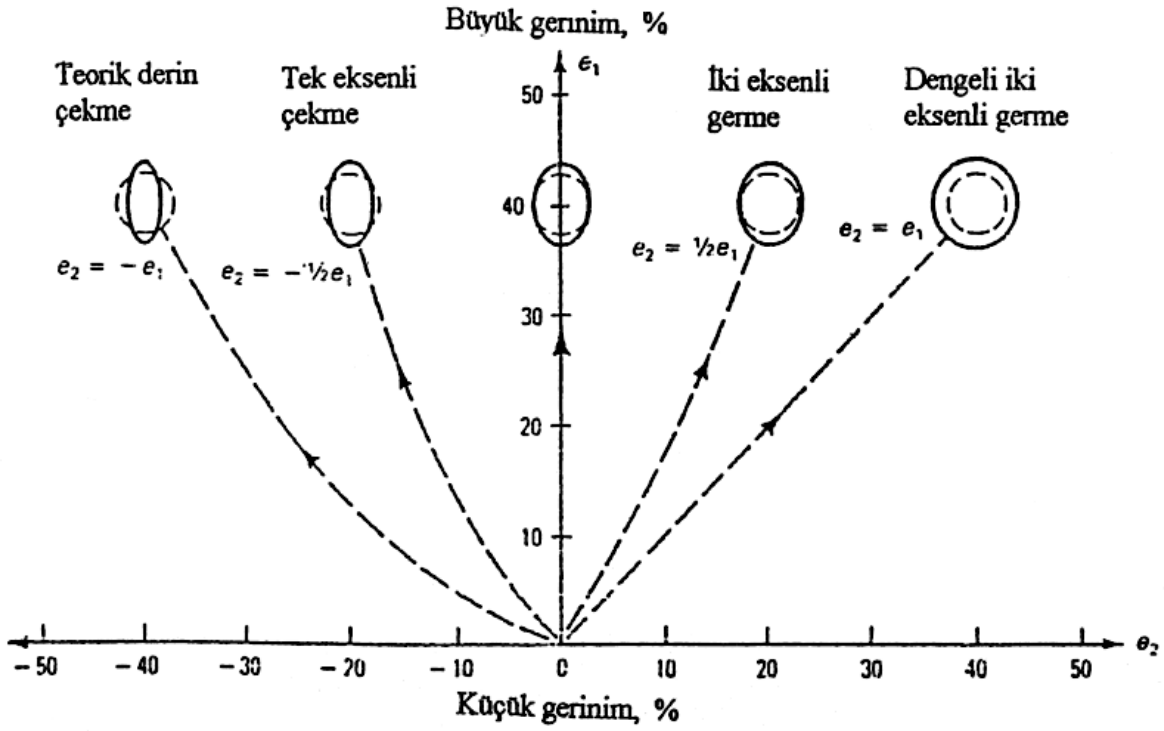
$$e_1 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \tag{7.11}$$

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \tag{7.12}$$

$$e_2 = \frac{d2 - d_0}{d_0} \tag{7.13}$$

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \tag{7.14}$$

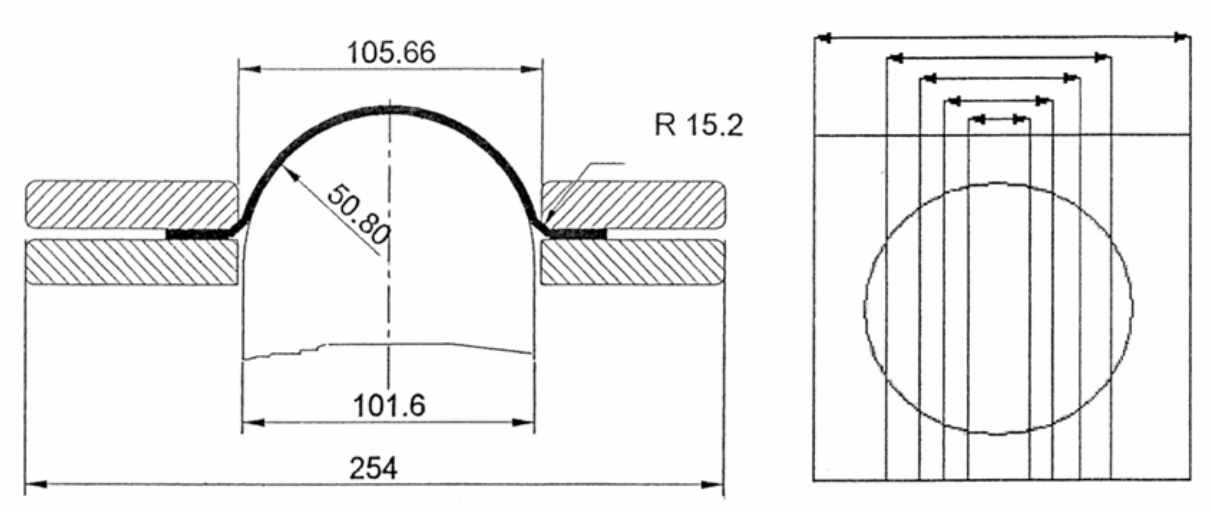
e_1 ve e_2‘ nin yerine ε_1 ve ε_2‘ nin kullanımı daha uygun sonuçlar vermesine rağmen çoğu araştırmacı e_1 ve e_2’ yi kullanmaktadır. Tek eksenli çekme yöntemi ile şekillendirmede, e_1 artı ve e_2 eksi değerlerde olup bu nedenle sacın yüzeyindeki gerinim durumu çekme – basma olmaktadır. Malzeme gererek şekillendirilirse bu sefer büyük ve küçük eksenlerin her ikisi de ilk daire çapından büyük olacaktır. Bu durumda da çekme – çekme gerinimleri söz konusudur.



Şekil 7.27 Değişik gerilme ve gerinim halleri için grid deformasyonu (Taylor, 1985)

Büyük gerinimin artı, küçük gerinimin sıfır olduğu durumda bir gerinim halidir ve duruma düzlemsel gerinim hali denilmektedir. Büyük gerinimlerin bir eksen takımında ordinata, küçük gerinimlerin de apsise işaretlenmesi ile gerinim durumlarının yerlerinin gösterilmesi mümkün olmaktadır.

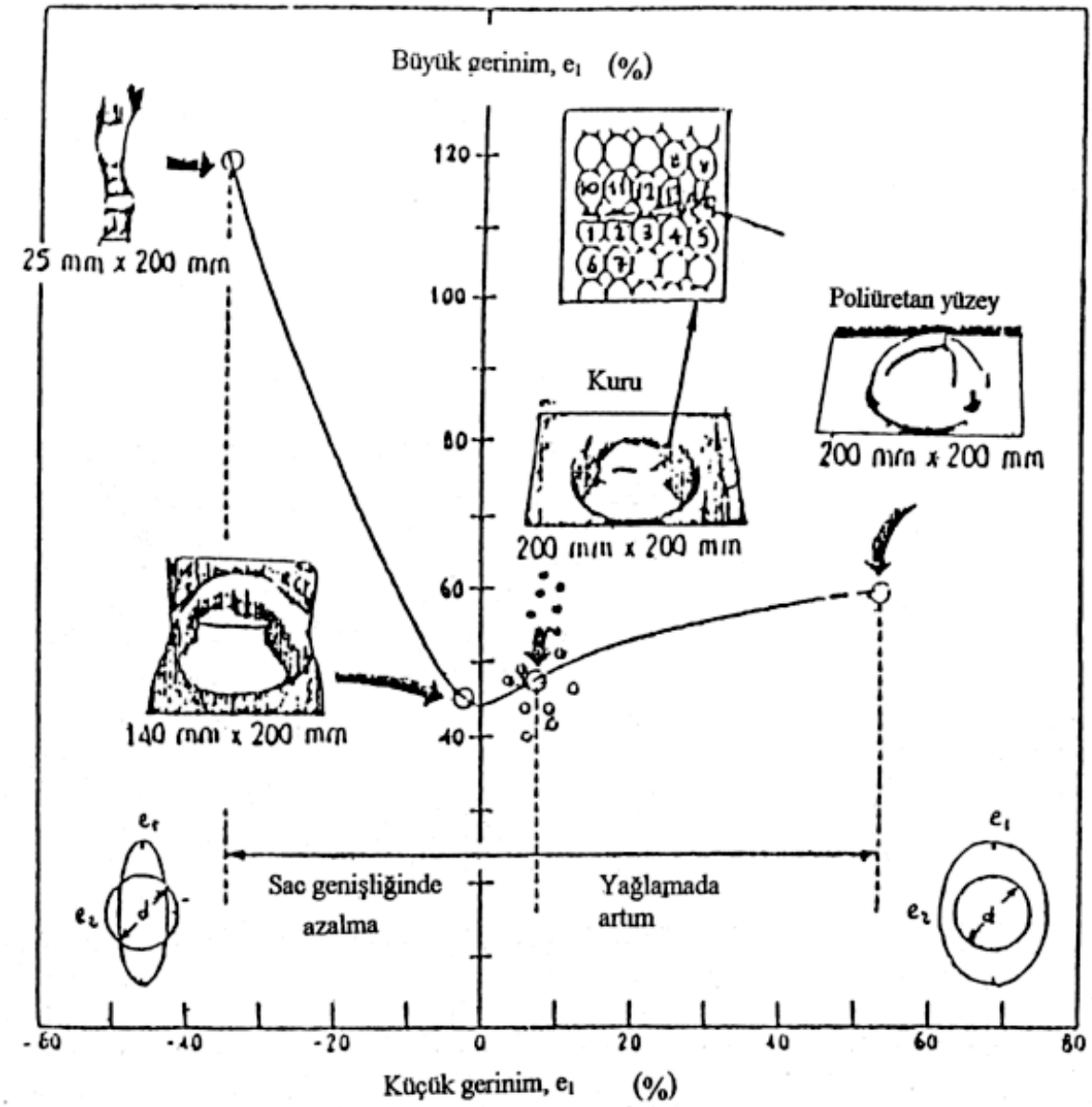
Şekillendirme sınır eğrilerinin oluşturulması için gerekli olan gerinim durumlarının tespiti için kullanılan en yaygın yöntem, Hecker adlı araştırmacının 1975 yılında geliştirdiği, yarıküresel uçlu ıstampa ile sac numunenin deforme edilmesi yöntemidir. Bu yöntemde değişik gerinim durumlarını ve gerekli $e_1 - e_2$ noktalarını diyagram üzerinde elde etmek için, deney numunelerinin yağlayıcı cinsleri ve genişlikleri değiştirilir.



Şekil 7.28 Şekillendirme sınır eğrilerini elde etmek için kullanılan, yarıküresel uçlu ıstampayla germe deney düzeneği ve değişik endeki sac numunelerin şişirilmesi deneyi (Ghosh vd., 1984)

Kare bir sacın şişirilmesinde eşit iki eksenli germe söz konusu iken, küçük enli bir örnekte germe tek eksenli hale yakındır. Bu amaçla, 200 mm' lik sabit boy değerinde sac numunelerin genişlikleri 25 mm' den 200 mm' ye kadar çeşitlendirilmiş ve böylece 25 mm genişlikteki numuneyle çekme- basma durumu elde edilirken 200 mm x 200 mm boyutundaki numuneyle çekme – çekme durumunun eldesi amaçlanmıştır. Kısa kenara paralel olarak ölçülen gerinimler küçük gerinimleri vermekte ve levha eni küçüldükçe e_2' nin negatif değerleri artım göstermektedir. Yağlayıcı olarak 0.08 mm kalınlığında polietilen tabaka ve mineral yağ kombinasyonu, 1.6 mm kalınlığında neopren tabaka ve mineral yağ kombinasyonu ile 6.4 – 63.5 mm arasındaki kalınlıklarda değişen poliüretan tabaka kullanılarak, bu sıraya göre yağlama etkisi arttırılabilmektedir. Değişen yağlayıcı ve levha ebatları ile uygulanan bir dizi deneyde, hasar bölgesindeki gridlerin deformasyonundan sınır

gerinimler ölçülmekte ve bunların diyagramda işaretlenmesi ile tipik şekillendirme sınır eğrisi elde edilmektedir. (Ghosh vd., 1984)



Şekil 7.29 Çeşitli boyutlardaki sac deney levhaları ve çeşitli yağlayıcılar kullanılarak elde edilen bir şekillendirme sınır diyagramı. (Ghosh vd., 1984)

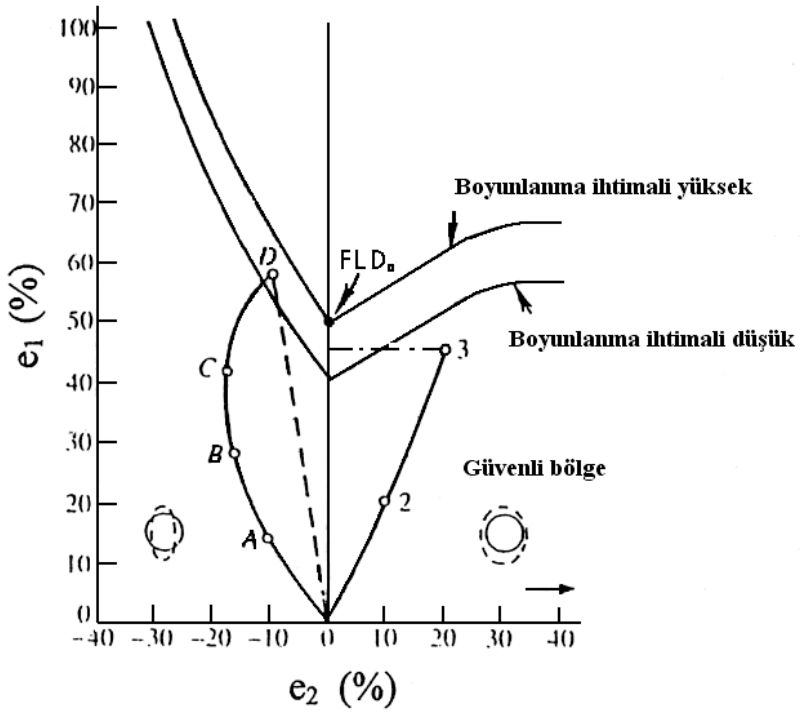
Bir şekillendirme sınır eğrisinin oluşturulmasında, hasar bölgesinde ölçülen elipslerin seçimine göre eğrinin seviyesi değişim göstermektedir. Şekil 7.29’ da gösterilen yırtılma ve boyunlanmanın gerçekleştiği bölgenin civarında, ölçülecek elipslerin nerelerden alınacağı ile ilgili olarak üç değişik yol izlenebilir; Birincisinde, içerisinden çatlak geçen elipslerin ölçülmesi ve diyagramda işaretlenmesi ile en yüksek seviyedeki noktalar elde edilir. İkinci olarak, çatlaktan etkilenmiş (çatlağa hemen komşu olan veya ağır bir boyunlanma gösteren)

elipsler ölçülür. Üçüncü ölçüm ise, çatlaktan etkilenmeyen ve kabul edilebilir bir deformasyon gösteren elipslerin ölçümüdür. (Mielnik, 1992)

Böylece ortaya çıkan birbirine paralel eğriler, bir şekillendirme sınır bandı oluşturmaktadır. Bu bandın altında kalan alan, şekil değişimleri güvenli bölgeyi, üstündeki deformasyonlar ise kusurlu bölgeyi belirtmektedir.

Bazı noktalardaki gerinimlerin bölgeselliği veya büyüklüğü, sac parçayı etkileyen bütün faktörlerin göz önüne alınması ile saptanır. Bu etkenler; takım geometrisi, yağlama ve malzeme özellikleridir. Bu nedenle şekillendirme sınır eğrisinin durumu, malzeme ve işlem faktörlerini de içeren ve kullanılan sac metale ait bir niteliktir. Tüm bu etkenler şekillendirme sınır eğrisinin düzeyine etki eder. Eğri yukarılara doğru kaydıkça malzemenin şekillendirilebilirliği yükselir.

Şekillendirme sınır diyagramı üzerinde e_2' nin sıfır olduğu ve e_1' in belli bir değerde olduğu nokta, düzlemsel gerinim noktasıdır ve burada okunan " e_1 " düzlemsel gerinim değeri, $ŞSD_0$ veya FLD_0 " olarak gösterilerek çoğu sac malzemenin şekillendirilebilirliklerinin karşılaştırılmasında tek başına bir ölçüt olarak kullanılmaktadır.



Şekil 7.30 Şekillendirme sınırının bir band ile gösterilmesi (Mielnik, 1992)

8. 304 KALİTE PASLANMAZ ÇELİK ve DX51 KALİTE GALVANİZ SACLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

EN 10131 standartlarına göre Chaifar firması tarafından üretilen 304 kalite paslanmaz çelik ve Borçelik A.Ş. tarafından üretilen DX51 kalite soğuk haddelenmiş çelik sac üzerine sıcak daldırma çinko kaplama yöntemiyle kaplanmış galvaniz saclar üzerinde mekanik deneyler yapılmıştır. 0.5 mm. kalınlığındaki 304 kalite paslanmaz çelik ve 0,5 mm kalınlığındaki DX51 kalite galvaniz sacların mekanik özelliklerini ve şekillendirilebilirliğini belirlemek amacıyla bir takım testler saclar üzerine uygulanmıştır. Ayrıca çinko kaplanmış galvaniz sac, kaplamadan önce fosfatlama işlemi görmüştür. Bu çalışmada, bu kalitedeki saclara Vickers sertlik deneyi, haddeleme yönü, haddeleme yönüne 45° ve haddeleme yönüne dik açıda, sabit hızlarda, değişik hızlarda ve ani hızlanma ile çekme deneyleri, farklı koşul ve hızlarda Erichsen çökertme deneyleri ile derin çekme deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca galvaniz sacın kaplama kalınlığını ölçmek için soğuk kürlenme işlemiyle SEM mikroskobunda kaplama kalınlığı tayin edilmiştir.

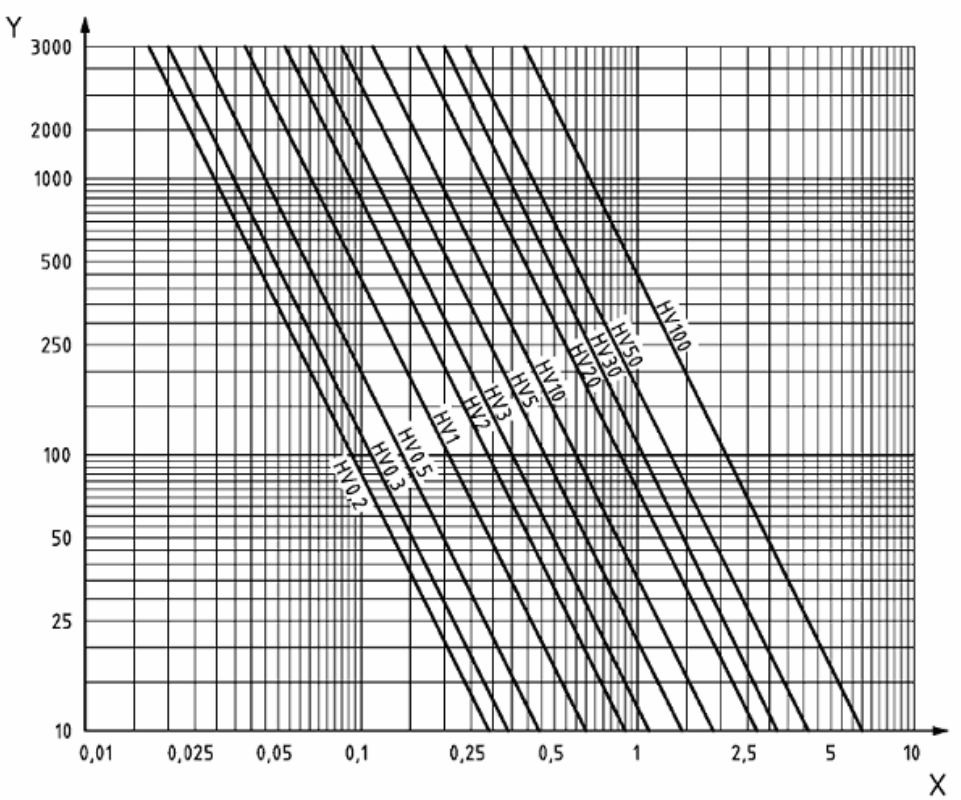
Deney sonuçlarına göre sac malzemelerin mekanik karakteristikleri ve şekillendirilebilirlik özellikleri, malzeme ve işlemsel faktörler açısından Bölüm 9’ da yorumlanmıştır.

8.1 Vickers Sertlik Deneyleri

304 kalitesindeki paslanmaz çelik sac ile DX 51 kalitesindeki soğuk haddelenmiş sac üzerine çinko kaplanmış galvaniz sacın Vickers sertlik değerini ölçmek için, sac levhaların değişik bölgelerinden 50 x 50 mm^2 boyutlarında parçalar kesilerek çıkartılmıştır. Bu parçalar üzerinde 10 noktada ve 10 kgf (Şekil 8.1) yük altında, WOLPERT sertlik ölçme cihazı kullanılarak Vickers sertlik değerleri belirlenmiştir. Elmas ucun sac parçayı tahrip etmesi sonucu ortaya çıkan izin köşegenleri ölçülerek ortalaması alınmış ve cihazın kataloğundan bunlara karşılık gelen Vickers sertlik değerleri okunmuştur. Ölçüm sonuçları ve ortalaması Çizelge 8.1 ve 8.2 de gösterilmiştir. Vickers sertlik deneyi ile ölçtüğümüz değerlerin doğruluğunu kontrol etmek açısından SuperRockwell sertlik ölçümü de yapılmıştır.

Bu cihaz bilya veya elmas uçla tahribatlı muayene yapan bir cihazdır. İnce sac malzemeler için uygulanan 15 T uygulaması ile yapılmıştır. 15 T yaklaşık olarak 15 kgf karşılık gelen bir kuvvettir ve bilyanın batması sırasında bir ön yükleme malzemeye uygulanır. Bu kuvvet 2.9 ila 3.0 kgf arasında bir yüklemedir ve yük 15 kgf’ye SHIMADZU DXT test cihazıyla çıkartılır. Malzemenin sertlik ölçümünü yapması beklenir. Çizelge 8.3 ve

8.4’ de SuperRockwell değerleri gösterilmiştir. . Şekil 8.2’ de kullanılan Vickers sertlik ölçme cihazı ile SuperRockwell ölçme cihazı gösterilmiştir.



Şekil 8.1 Vickers ölçme işlemi için numune sac kalınlığına göre yük seçimi (TS EN 6507)

Çizelge 8.1 304 kalite paslanmaz çelik sacın, 10 farklı noktada ölçülen Vickers sertlik değerleri ve ortalaması.

DENEY NO	İZ KÖŞEGENLERİ			VSD
	d_1	d_2	d_{ort}	
1	0,35	0,355	0,353	152
2	0,345	0,35	0,348	153
3	0,35	0,355	0,353	148,8
4	0,35	0,35	0,35	151,4
5	0,35	0,345	0,348	153
6	0,345	0,352	0,348	153
7	0,35	0,348	0,349	152
8	0,343	0,345	0,344	157
9	0,348	0,35	0,349	152
10	0,355	0,355	0,355	148,8
ORT	0,3486	0,3505	0,3497	152,1

Çizelge 8.2 DX51 kalite galvaniz sacın, 10 farklı noktada ölçülen Vickers sertlik değerleri ve ortalaması

DENEY NO	İZ KÖŞEGENLERİ			VSD
	d_1	d_2	d_{ort}	
1	0,445	0,44	0,443	94,5
2	0,42	0,435	0,428	101,2
3	0,43	0,46	0,45	91,6
4	0,44	0,45	0,445	93,6
5	0.425	0,445	0,435	98
6	0.45	0,43	0,44	95,8
7	0.43	0,44	0,435	98
8	0.435	0,45	0,443	94,5
9	0.43	0,445	0,438	96,7
10	0.44	0,435	0,438	96,7
ORT	0,43375	0,443	0,4395	96,06

a b

Şekil 8.2 Sertlik deneyi için kullanılan Vickers sertlik ölçme cihazı (a) ile SuperRockwell sertlik ölçme cihazı (b) (Arçelik A.Ş., 2008)

Çizelge 8.3 304 kalite paslanmaz çelik sacın, 10 farklı noktada ölçülen SuperRockwell sertlik değerleri ve ortalaması

DENEY NO	SRD	DENEY NO	SRD
1	79,5	**6**	82,1
2	80,1	**7**	80,9
3	80,4	**8**	81,8
4	81,3	**9**	78,6
5	81,9	**10**	81,3
ORTALAMA: **80.79**			

Çizelge 8.4 DX 51 kalite galvaniz sacın, 10 farklı noktada ölçülen SuperRockwell sertlik değerleri ve ortalaması

DENEY NO	SRD	DENEY NO	SRD
1	76,9	**6**	76,9
2	76,2	**7**	76,2
3	76,7	**8**	76,7
4	76,3	**9**	77,1
5	78,2	**10**	78,2
ORTALAMA: **76,94**			

8.2 Çekme Deneyleri

Yapılan çekme deneyleri ile 304 kalite paslanmaz çelik sacın ve DX51 kalite galvaniz sacın mekanik özellikleri ve değişik hızlarda ve farklı hadde yönlerinde bu özelliklerin değişimi izlenmiştir. Çekme numeneleri Şekil 8.3’ de görülen lazer kesme cihazında hazırlanmış ve kesme sonrası 304 kalite paslanmaz saclarda oluşan çapaklar taşlanarak giderilmeye çalışılmıştır. Değişik mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla uygulanan deneylerin tümünde, aynı tipte ve boyutta çekme numuneleri kullanılmıştır. İlk ölçme uzunluğu 80 mm ve genişliği 20 mm olan numuneler EN 10002-1 standardına göre orantılı deney numunelerinden seçilmiştir. Deneylerin gerçek mekanik değerlere yakın olması için minimum 5 farklı deney numunesi çekmeler için kullanılmıştır.

Şekil 8.3 Çekme numunelerinin çıkarılmasında kullanılan Alfa Laser kesme cihazı
(Arçelik A.Ş., 2008)

Deney için Şekil 8.4'deki INSTRON 4505 üniversal çekme cihazı ve aparatlarından yararlanılmıştır. Daha sonra bilgisayar kontrollü olarak ve INSTRON –S IX Software programı kullanılarak deneyler yapılmış ve veriler elde edilmiştir. Deneylerde kullanacağımız sacın tipik çekme dayanımı standartlarda mevcut olduğundan,10 kN kapasitesindeki bir load cell kullanılmıştır. Ayrıca çekme cihazı ile bilgisayar arasında bir kontrol ünitesi mevcuttur.

Şekil 8.4 Çekme deneylerinde kullanılan INSTRON 4505 universal çekme cihazı
(Arçelik A.Ş., 2008)

Bir malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için uygulanan en basit ve en yaygın mekanik deney, tek eksenli çekme deneyidir. Tek eksenli çekme deneylerinden elde edilen çekme eğrileri ile, bir malzemenin elastiklik modülü, akma ve çekme dayanımı, pekleşme davranışı, gerinim hızına duyarlılığı, anizotropik davranışı ile o malzemenin sünekliğini

doğrudan ifade eden maksimum üniform uzama, kopma uzaması, çeşitli yüklerdeki uzama değerleri ve kopmada kesit büzülmesi kolaylıkla belirlenebilmekte ve yorumlanabilmektir.

Bir malzemenin tek eksenli olarak çekilmesi ile elde edilen çekme eğrisi, uzama - yük, nominal gerinim (veya yüzde uzama) nominal gerilme ya da gerçek gerinim – gerçek gerilme şeklinde olabilmektedir. Nominal gerilme (S), yükün (F) başlangıçtaki kesit alanına (A_0) bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Uzama yönündeki nominal gerinim (e veya $e_ı$) ise, uzamanın (ΔL) başlangıçtaki ölçme uzunluğuna bölünmesi ile elde edilmektedir. Çekme deneylerinde, başlangıçtaki ölçme uzunluğu L_0 olarak simgelendirmektedir. Gerçek gerinim-gerçek gerilme eğrisi ise, (8.1) ve (8.2) eşitliklerinden bulunan sonuçlarla çizilebilir.

$$\varepsilon_1 = \text{In} (1+e_1) \tag{8.1}$$

$$\sigma = S (1+e) \tag{8.2}$$

Bir nominal gerinim- nominal gerilme eğrisinde, kama noktası ile gerilmenin maksimuma çıktığı nokta arasında numune uniform olarak büzülmekte ve herhangi bir boyunlanma meydana gelmemektedir. Yükün ve nominal gerilmenin maksimuma ulaştığı u noktasındaki gerilme, “ çekme dayanımı (S_U, S_{MAX}) ” olarak adlandırılmaktadır. Bu noktadaki gerinim ise, “ maksimum üniform nominal gerinim “ (e_u) olarak tanımlanır.

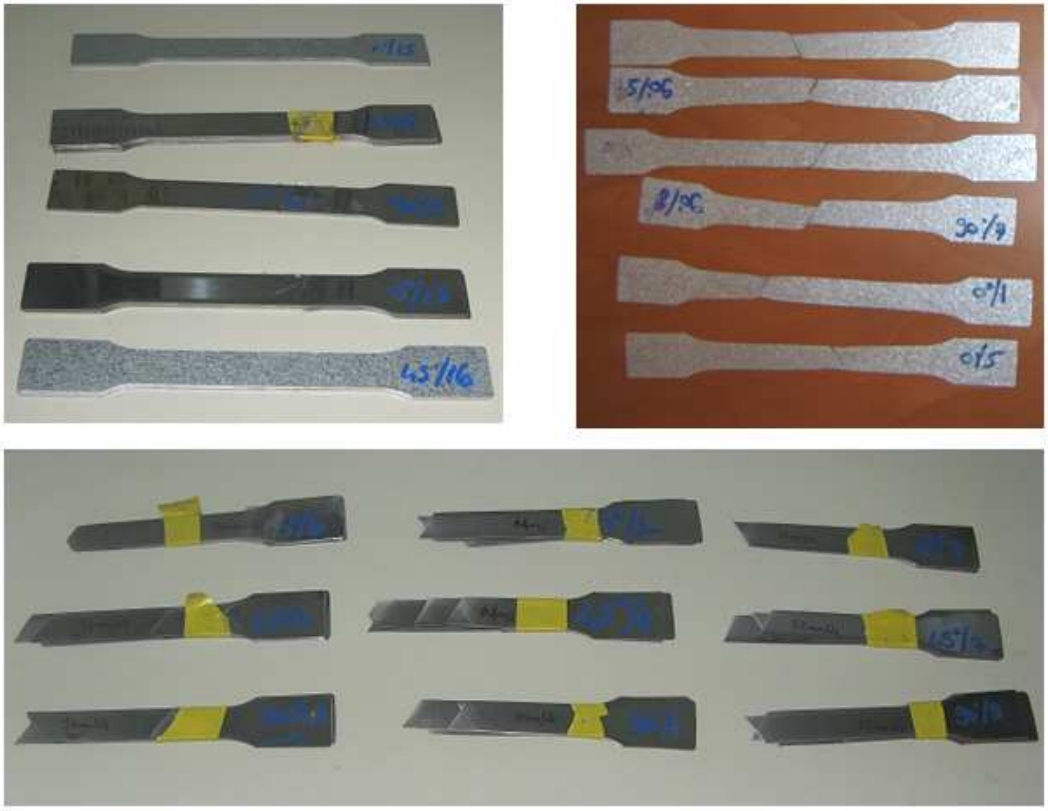
Nominal eğride gerilme, u noktasında maksimum değerine ulaştıktan sonra düşmektedir. Nominal gerilmedeki bu düşüşün nedeni, boyunlanmanın yani kesitte bir bölgenin boğumlanmaya başlaması ve üniform uzamanın sona ermesidir. Sonuçta malzeme f noktasında kopmaktadır. Kopmada yüzde uzama (e_f), (8.3) eşitliği ile hesaplanır. Eşitlikte L_f, kopan parçaların biraraya getirilmesi ile ölçülen boydur.

$$\% \; e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \tag{8.3}$$

8.2.1 Belli Bir Çekme Hızında Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz sacın $V_{çek}$ = 32 mm / dak. hız altında çekme deneylerinden, akma ve çekme dayanımı, uzama değerleri, dayanım katsayısı ve pekleşme üsteli gibi bazı mekanik özellikler ve malzemeye ait bazı şekillendirilebilirlik karakteristikleri belirlenmiştir. Malzemenin anizotropik özelliğinden dolayı haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°’lik doğrultularda (Θ = 0°, 45° ve 90°) kesilmiş çekme numuneleri deneye tabi tutularak, özelliklerin bu yönlerdeki değişimi incelenmiştir. Deneylerde kullanılan INSTRON S IX software programı, kuvvet ve uzama değerlerinden faydalanarak, sadece nominal gerinimi (e veya % e) ve nominal gerilmeyi (S) hesaplayabilmektedir. Gerçek

gerinim (ϵ) ve gerçek gerilme (σ) değerleri ise 8.1 ve 8.2 eşitliklerinden hesaplanmıştır. Bununla birlikte program, n ve K değerlerini istenen bir aralıkta belirleyebilmektedir. Buna göre $V_{çek}$ = 32 mm / dak. hız altında haddeleme yönüne 0°, 45°, ve 90°'lik doğrultularda uygulanan çekme deneylerinde elde edilen sonuçlar 304 kalite paslanmaz çelik için çizelge 8.5, çizelge 8.6 ve çizelge 8.7' de, galvaniz sac için çizelge 8.8, çizelge 8.9 ve çizelge 8.10' da görülmektedir.



Şekil 8.5 Çekme deneyinde kullanılan ve deney sonucunda kopan numuneler

(Arçelik A.Ş., 2008)

Çizelge 8.5 304 kalite paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 0˚ ’ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri

DENEY NO	% 0.2 AKMA DAYANIMI $R_{p0.2}$* ($\sigma_{A0.2}$) [Mpa]	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ A50 mm* (e_f) [%]	BOYUNLANMA SONRASI UZAMA YÜZDESİ e_{pu} [%]	PEKLEŞME ÜSTELİ n	DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]
		R_m* (S_u , S_{max}) [Mpa]	σ_u [Mpa]	e_u	ε_u				
1	282,517	665,567	1.068,987	0,60613	0,47383	66,018	5,405	0,389	1117,792
2	283,246	668,189	1.071,267	0,60324	0,47203	65,983	5,659	0,391	1128,122
3	282,254	668,223	1.077,289	0,61217	0,47758	66,548	5,331	0,389	1109,944
4	283,576	667,983	1.065,286	0,59478	0,46674	66,057	6,579	0,391	1116,673
5	284,149	666,398	1.063,831	0,59639	0,46774	65,887	6,248	0,389	1130,437
ORT	**283,148**	**667,272**	**1.069,332**	**0,60254**	**0,47158**	**66,099**	**5,844**	**0,390**	**1120,594**

* EN 10002-1 standardına göre gösterimlerdir.

Çizelge 8.6 304 kalite paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 45° ' lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri

DENEY NO	% 0.2 AKMA DAYANIMI $R_{p0.2}$* ($\sigma_{A0.2}$) [Mpa]	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ A50 mm* (e_f) [%]	BOYUNLANMA SONRASI UZAMA YÜZDESİ e_{pu} [%]	PEKLEŞME ÜSTELİ n	DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]
		R_m* (S_u , S_{max}) [Mpa]	σ_u [Mpa]	e_u	ε_u				
1	291,723	676,775	1.078,935	0,59423	0,46639	64,032	4,609	0,381	1142,237
2	292,389	675,823	1.079,648	0,59753	0,46846	64,865	5,112	0,384	1141,348
3	291,217	674,539	1.074,527	0,59298	0,46561	64,943	5,645	0,381	1144,449
4	291,828	675,116	1.076,790	0,59497	0,46685	64,257	4,760	0,387	1145,325
5	291,947	675,318	1.077,949	0,59621	0,46763	64,796	5,175	0,383	1146,534
ORT	**291,821**	**675,514**	**1.077,570**	**0,59518**	**0,46699**	**64,579**	**5,060**	**0,383**	**1143,979**

* EN 10002-1 standardına göre gösterimlerdir.

Çizelge 8.7 304 kalite paslanmaz çelik sacın, haddeleme yönüne 90˚ ’ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri

DENEY NO	% 0.2 AKMA DAYANIMI $R_{p0.2}$* ($\sigma_{A0.2}$) [Mpa]	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ A50 mm* (e_f) [%]	BOYUNLANMA SONRASI UZAMA YÜZDESİ e_{pu} [%]	PEKLEŞME ÜSTELİ n	DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]
		R_m* (S_u , S_{max}) [Mpa]	σ_u [Mpa]	e_u	ε_u				
1	285,516	657,852	1.028,348	0,56319	0,44673	61,689	5,370	0,386	1093,122
2	285,324	657,738	1.027,702	0,56248	0,44627	61,534	5,286	0,387	1097,209
3	285,899	656,831	1.024,768	0,56017	0,44479	61,508	5,491	0,379	1091,329
4	285,215	657,342	1.027,288	0,56279	0,44647	61,323	5,044	0,385	1098,587
5	285,237	657,417	1.027,727	0,56328	0,44679	61,471	5,143	0,388	1092,984
ORT	**285,438**	**657,436**	**1.027,167**	**0,56238**	**0,44621**	**61,505**	**5,267**	**0,385**	**1094,646**

* EN 10002-1 standardına göre gösterimlerdir.

Çizelge 8.8 DX 51 kalite galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0° ' lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri

DENEY NO	% 0.2 AKMA DAYANIMI $R_{p0.2}$* ($\sigma_{A0.2}$) [Mpa]	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ A50 mm* (e_f) [%]	BOYUNLANMA SONRASI UZAMA YÜZDESİ e_{pu} [%]	PEKLEŞME ÜSTELİ n	DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]
		R_m* (S_u , S_{max}) [Mpa]	σ_u [Mpa]	e_u	ε_u				
1	232,039	342,282	488,649	0,42762	0,35601	46,523	3,761	0,261	608,691
2	232,768	344,904	491,395	0,42473	0,35398	46,488	4,015	0,263	607,802
3	231,776	344,938	494,524	0,43366	0,36023	47,053	3,687	0,261	610,903
4	233,098	344,698	488,185	0,41627	0,34803	46,562	4,935	0,263	611,779
5	233,671	343,113	486,493	0,41788	0,34916	46,392	4,604	0,261	612,988
ORT	**232,670**	**343,987**	**489,849**	**0,42403**	**0,35348**	**46,604**	**4,200**	**0,262**	**610,433**

* EN 10002-1 standardına göre gösterimlerdir.

Çizelge 8.9 DX 51 kalite galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45˚ ’ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri

DENEY NO	% 0.2 AKMA DAYANIMI $R_{p0.2}$* ($\sigma_{A0.2}$) [Mpa]	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ A50 mm* (e_f) [%]	BOYUNLANMA SONRASI UZAMA YÜZDESİ e_{pu} [%]	PEKLEŞME ÜSTELİ n	DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]
		R_m* (S_u , S_{max}) [Mpa]	σ_u [Mpa]	e_u	ε_u				
1	242,245	353,490	500,443	0,41572	0,34764	44,537	2,965	0,253	639,576
2	241,911	352,538	500,258	0,41902	0,34997	45,370	3,468	0,256	643,663
3	240,739	351,254	496,838	0,41447	0,34675	45,448	4,001	0,253	637,783
4	241,350	351,831	498,355	0,41646	0,34816	44,762	3,116	0,259	645,041
5	241,469	352,033	499,077	0,41770	0,34904	45,301	3,531	0,255	639,438
ORT	**241,543**	**352,229**	**498,994**	**0,41667**	**0,34831**	**45,084**	**3,416**	**0,255**	**641,100**

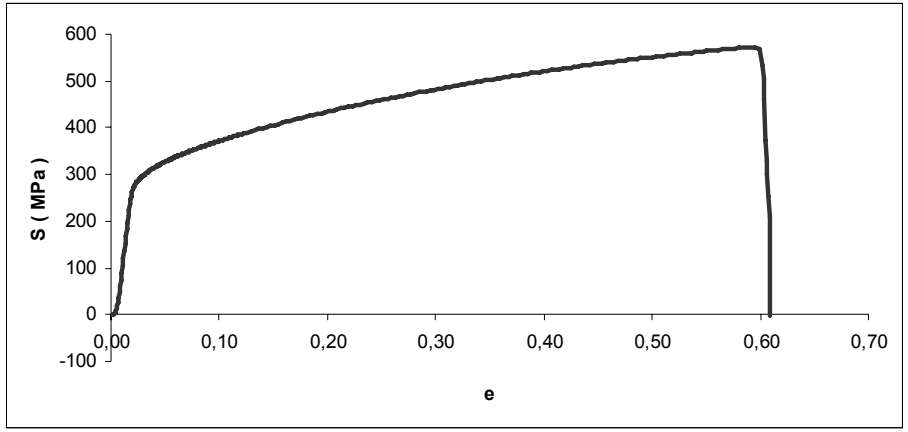
* EN 10002-1 standardına göre gösterimlerdir.

Çizelge 8.10 DX 51 kalite galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90˚ ’ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri

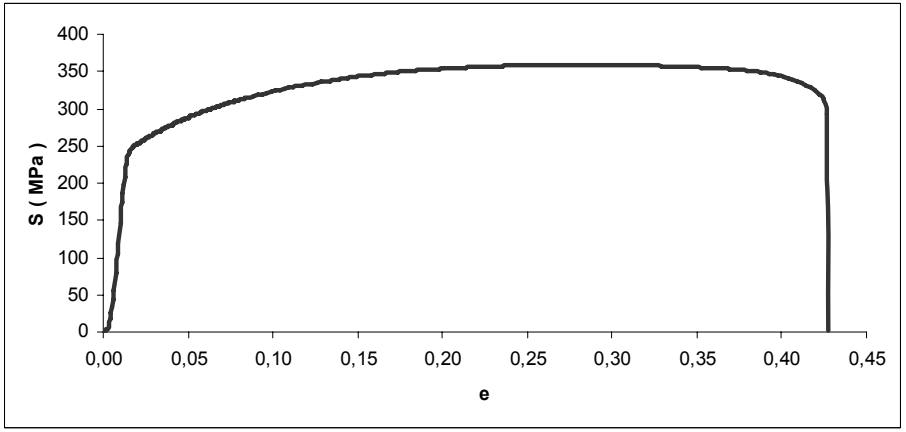
DENEY NO	% 0.2 AKMA DAYANIMI $R_{p0.2}$* ($\sigma_{A0.2}$) [Mpa]	ÇEKME DAYANIMI		MAKSİMUM ÜNİFORM GERİNİM		KOPMADA UZAMA YÜZDESİ A50 mm* (e_f) [%]	BOYUNLANMA SONRASI UZAMA YÜZDESİ e_{pu} [%]	PEKLEŞME ÜSTELİ n	DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]
		R_m* (S_u , S_{max}) [Mpa]	σ_u [Mpa]	e_u	ε_u				
1	237,038	334,567	473,305	0,41468	0,34690	44,894	3,426	0,258	596,246
2	236,846	334,453	469,562	0,40397	0,33930	44,739	4,342	0,255	606,576
3	236,421	333,546	470,854	0,41166	0,34477	44,013	2,847	0,251	588,398
4	236,737	334,057	469,110	0,40428	0,33952	44,628	4,200	0,257	595,127
5	236,759	334,132	472,720	0,41477	0,34697	44,676	3,199	0,258	608,891
ORT	**236,760**	**334,151**	**471,110**	**0,40987**	**0,34349**	**44,590**	**3,603**	**0,256**	**599,048**

* EN 10002-1 standardına göre gösterimlerdir.

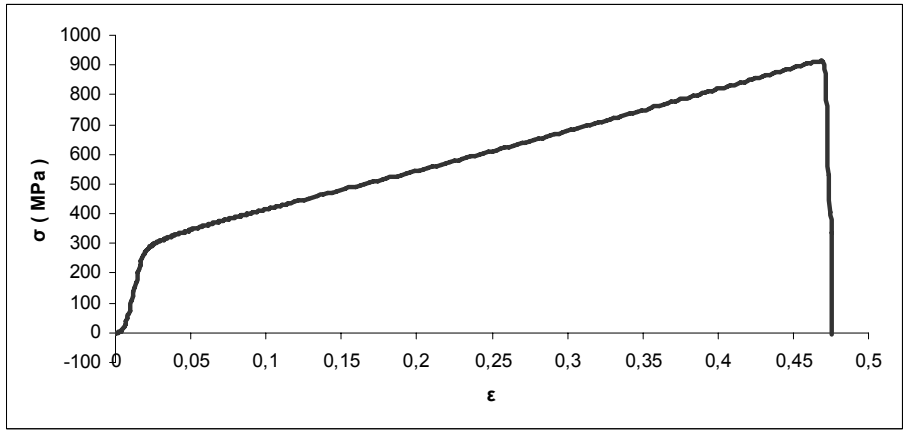
Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.1



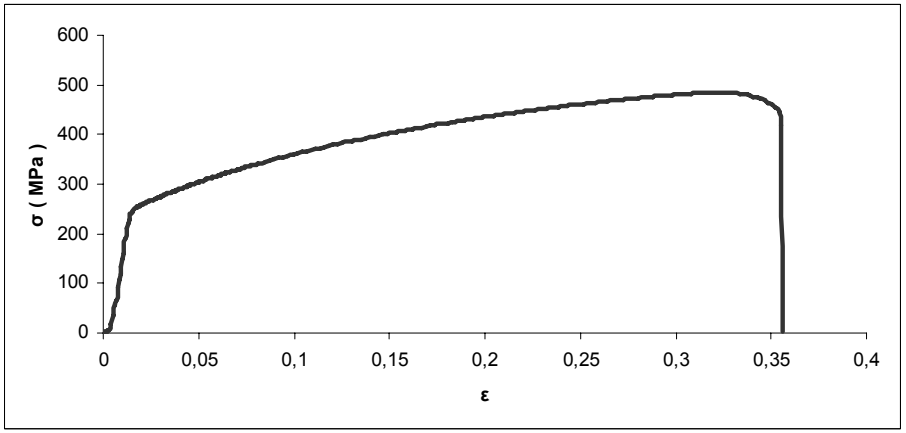
Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.1



Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.1

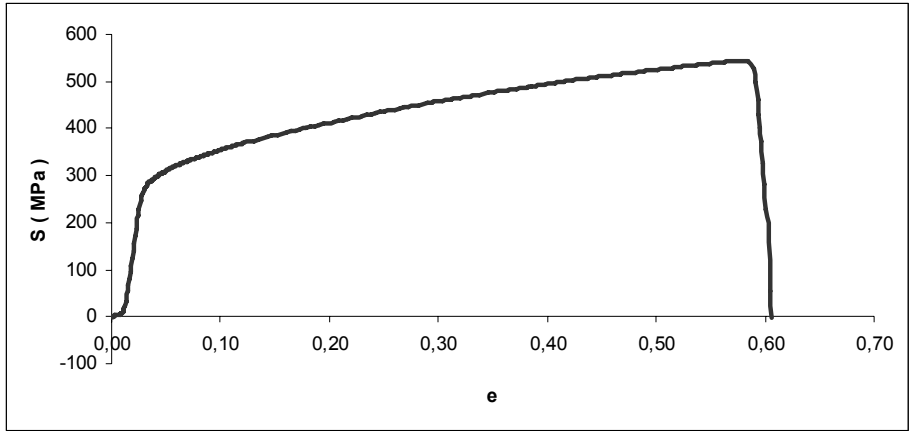


Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.1

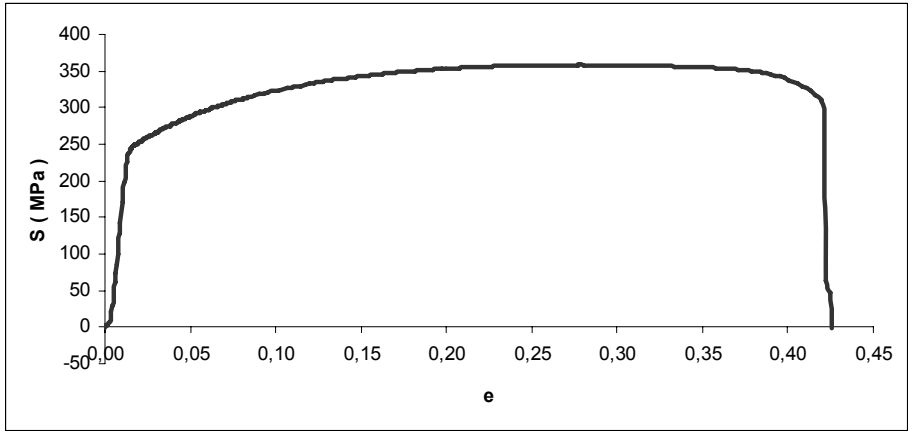


Şekil 8.6 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.1, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

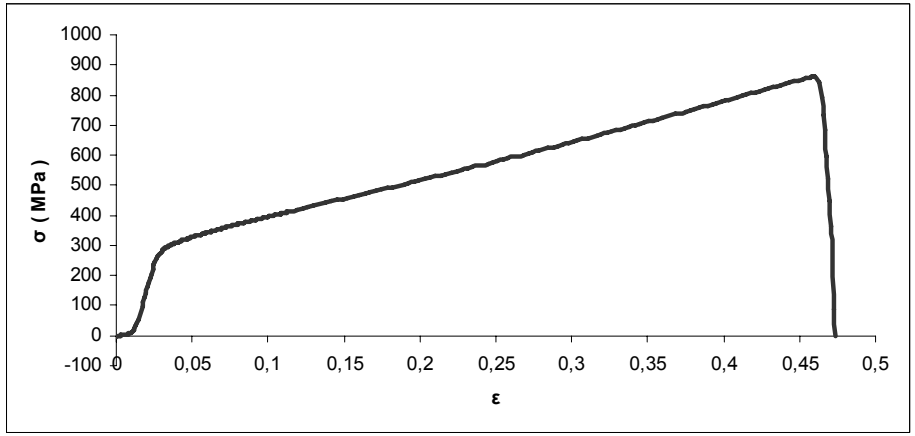
Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.2



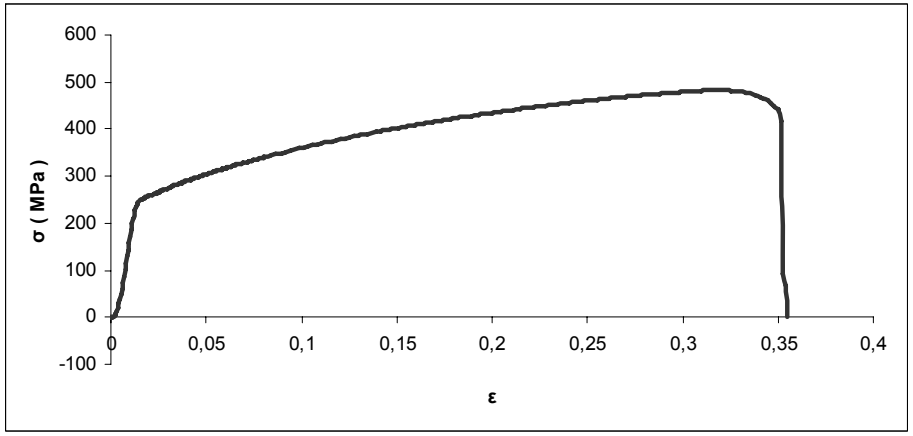
Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.2



Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.2

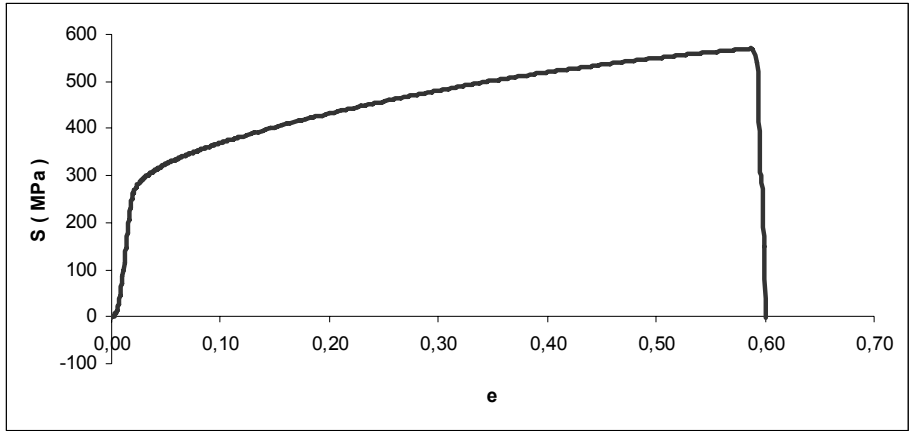


Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.2

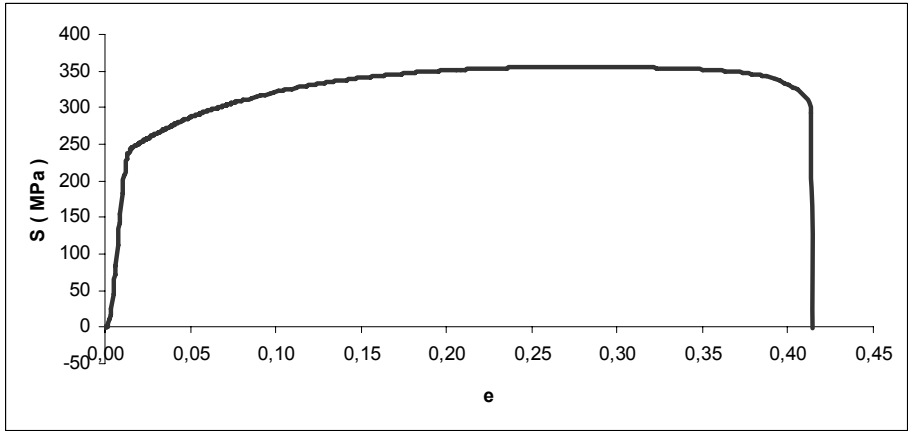


Şekil 8.7 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.2, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

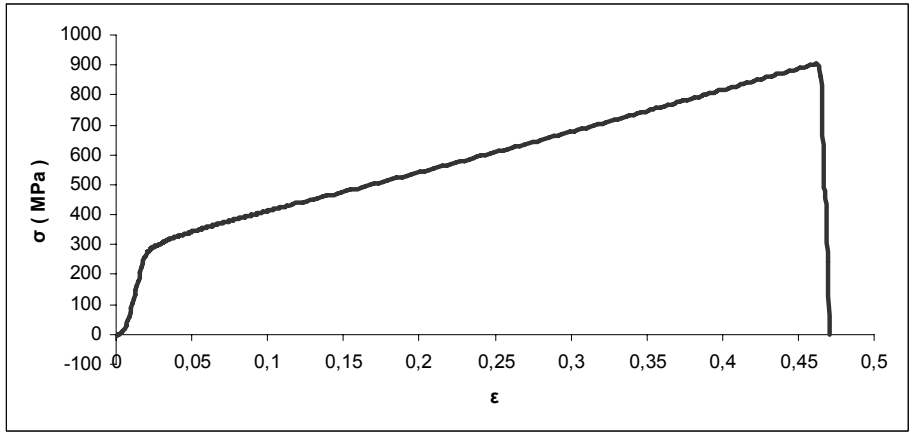
Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.3



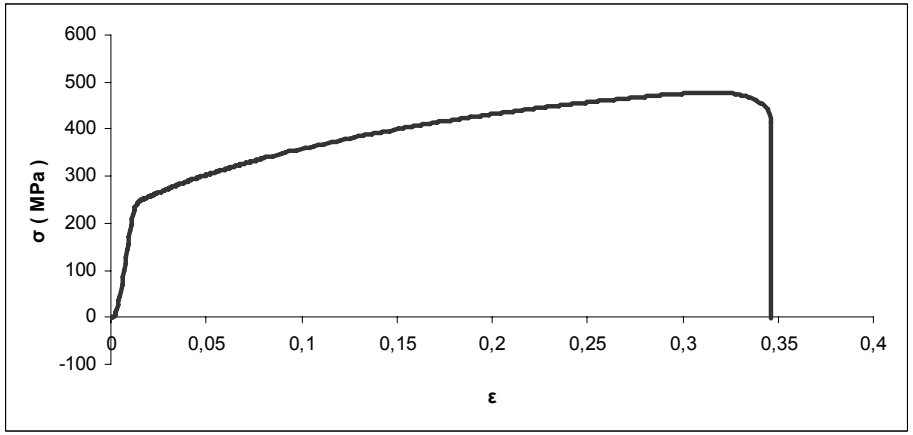
Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.3



Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.3

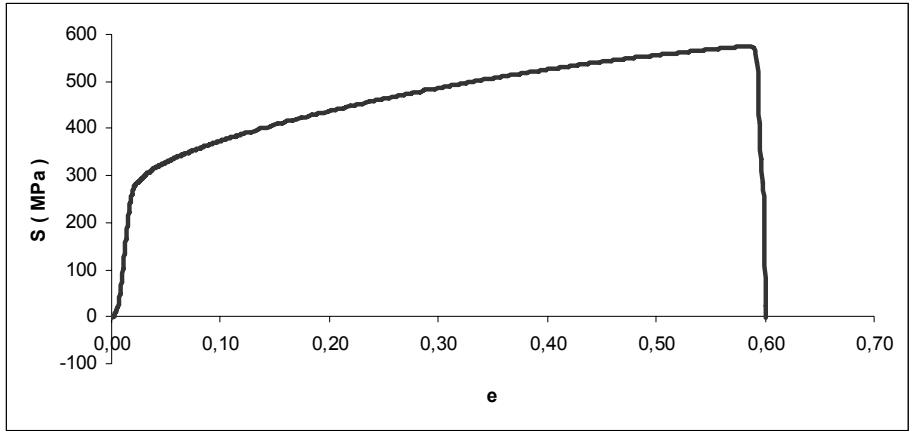


Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.3

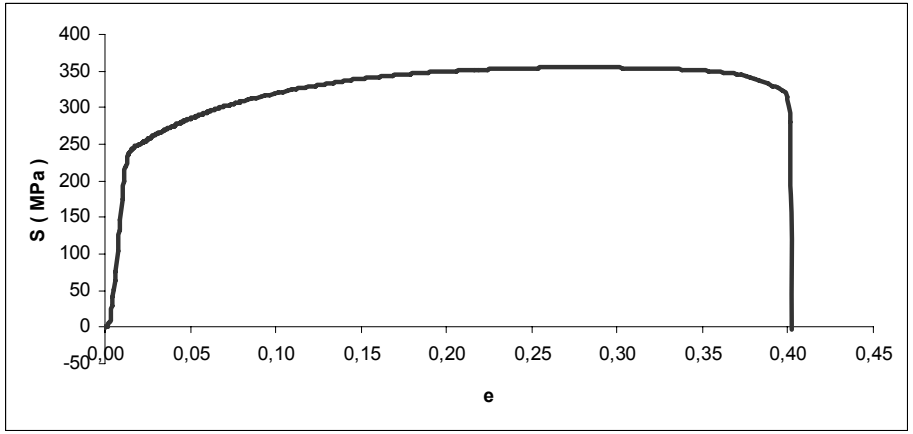


Şekil 8.8 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.3, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

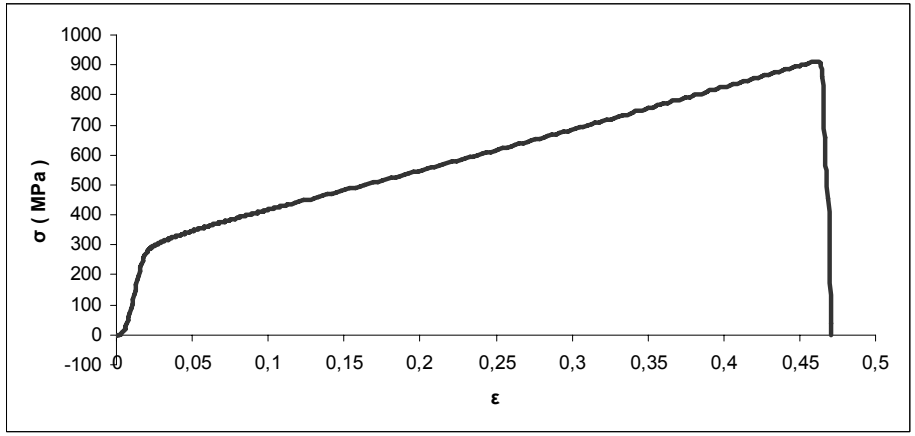
Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.4



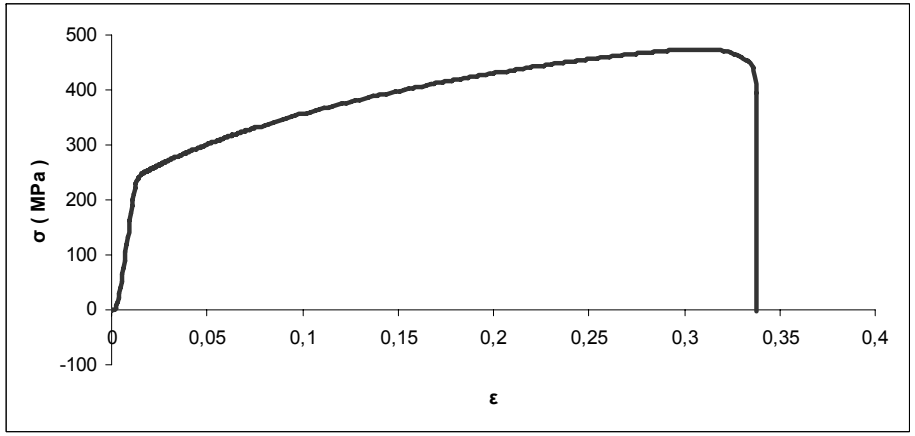
Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.4



Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.4

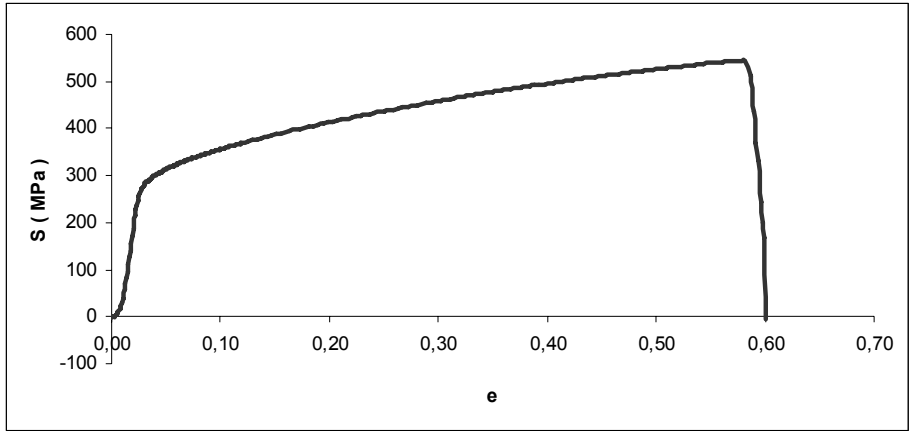


Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.4

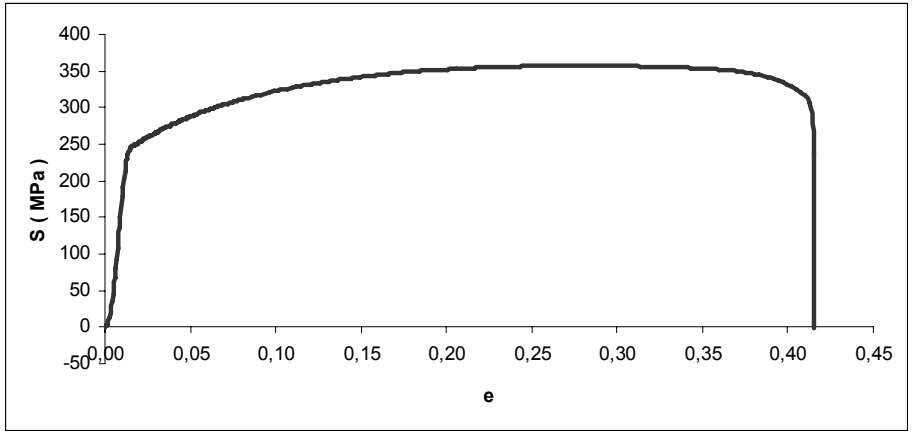


Şekil 8.9 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0° ' lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.4, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

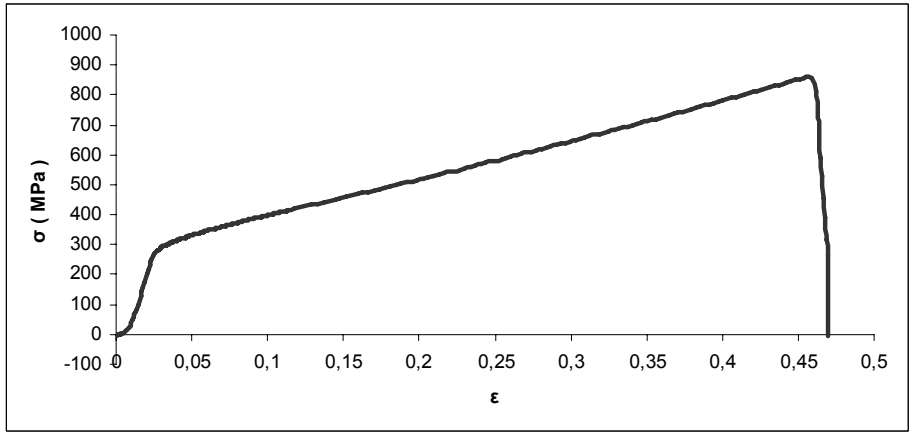
Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.5



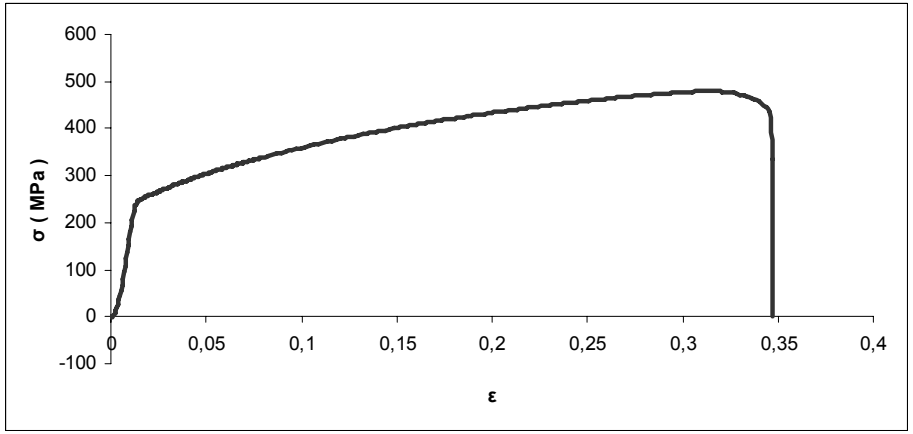
Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.5



Paslanmaz Çelik (304) θ = 0° Deney No.5

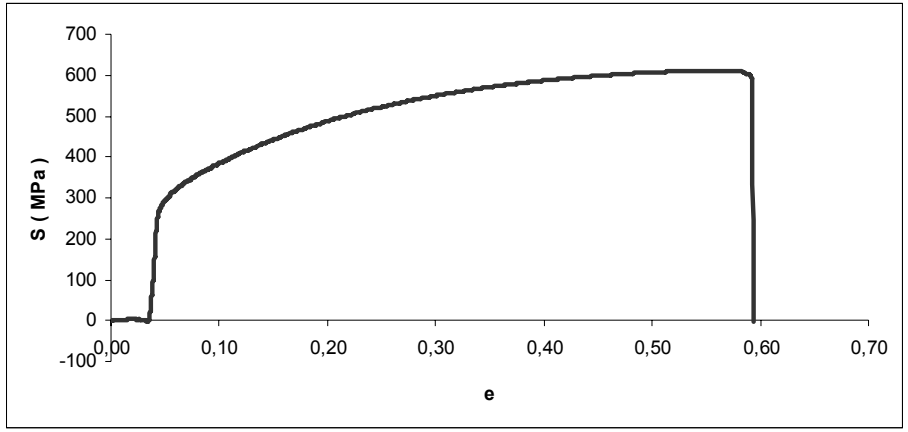


Galvaniz Sac (DX51) θ = 0° Deney No.5

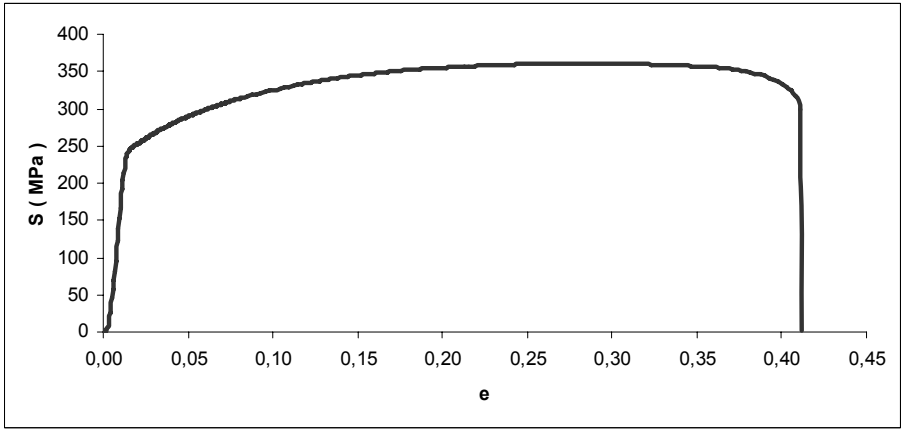


Şekil 8.10 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.5, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

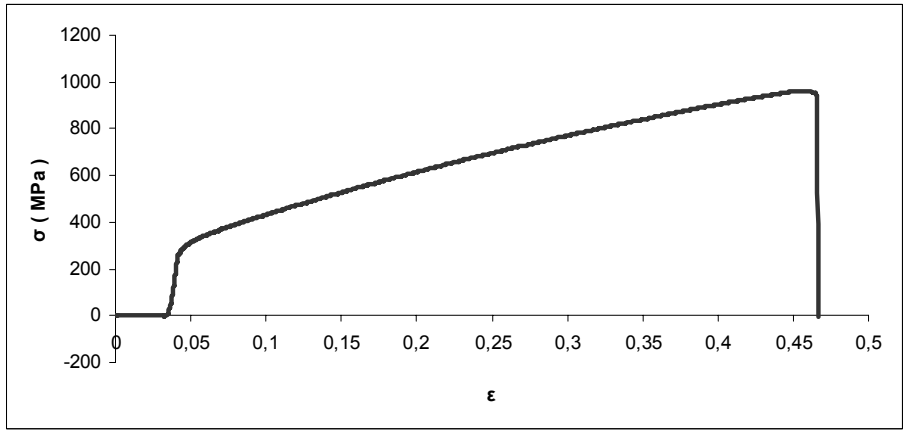
Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.1



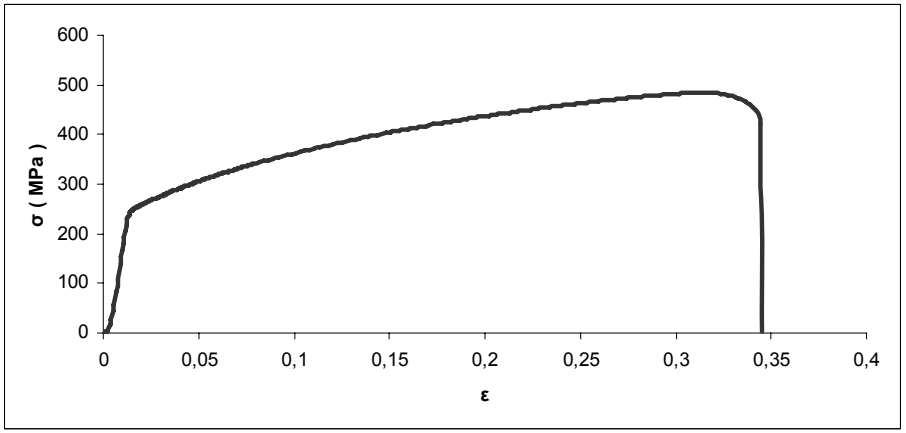
Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.1



Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.1

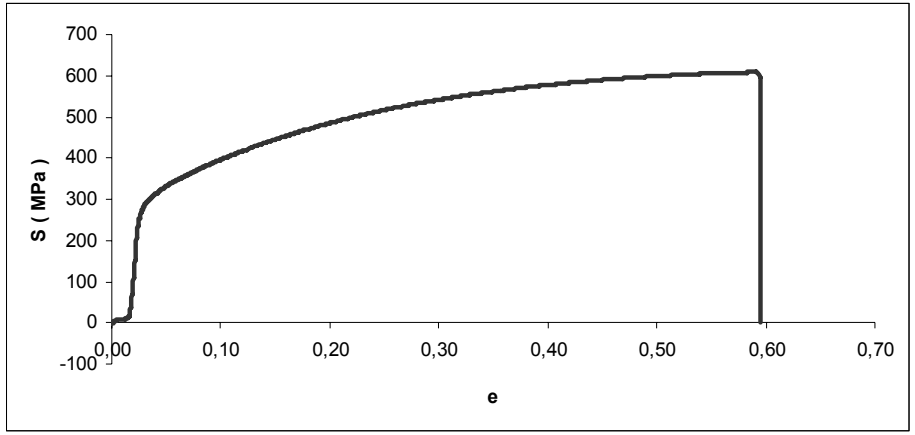


Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.1

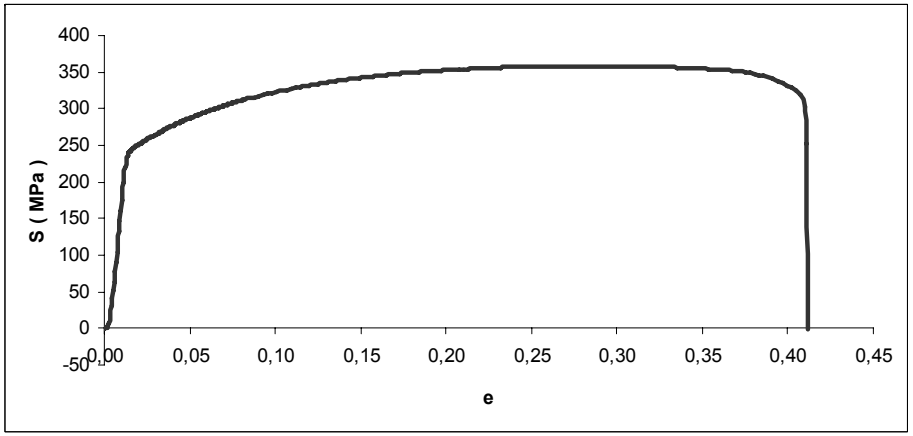


Şekil 8.11 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.1, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

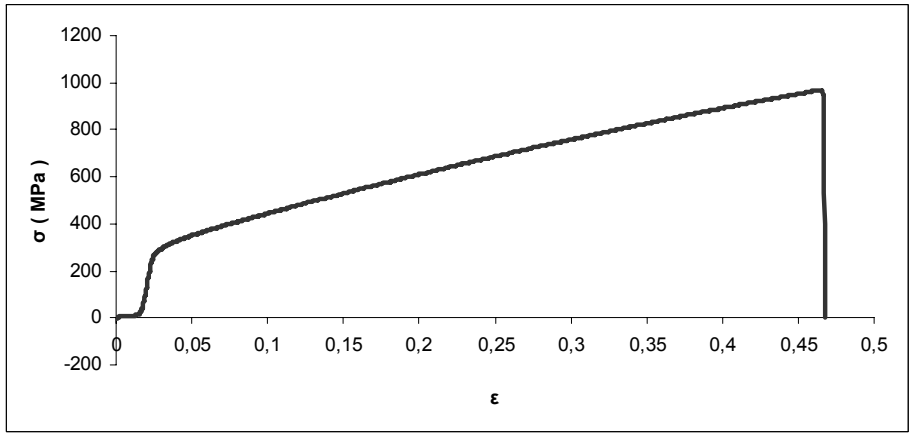
Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.2



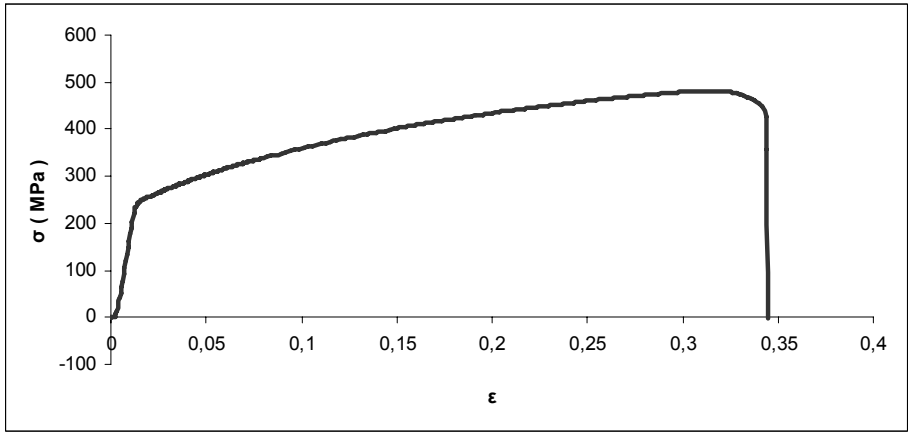
Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.2



Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.2

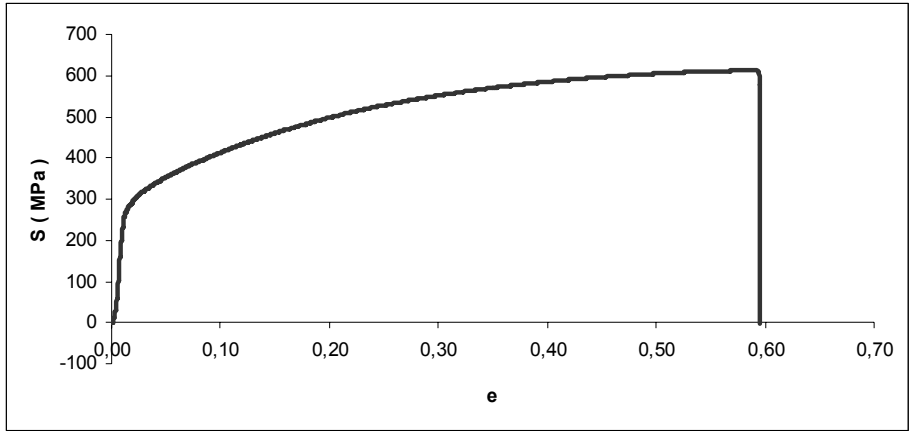


Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.2

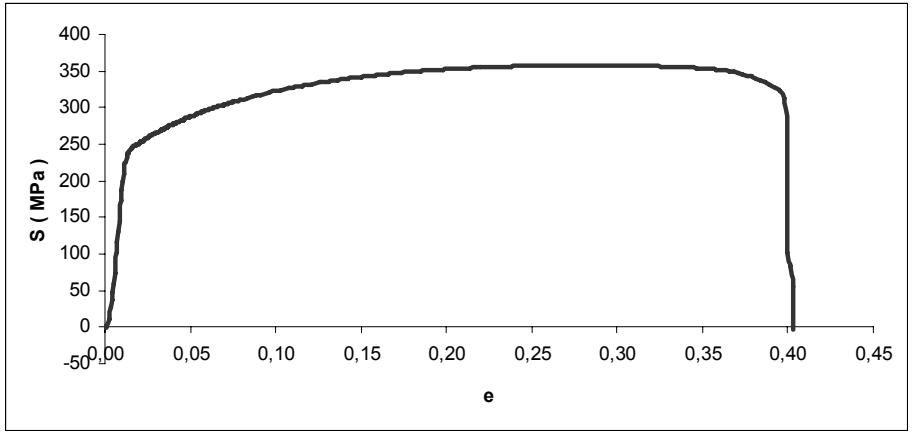


Şekil 8.12 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.2, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

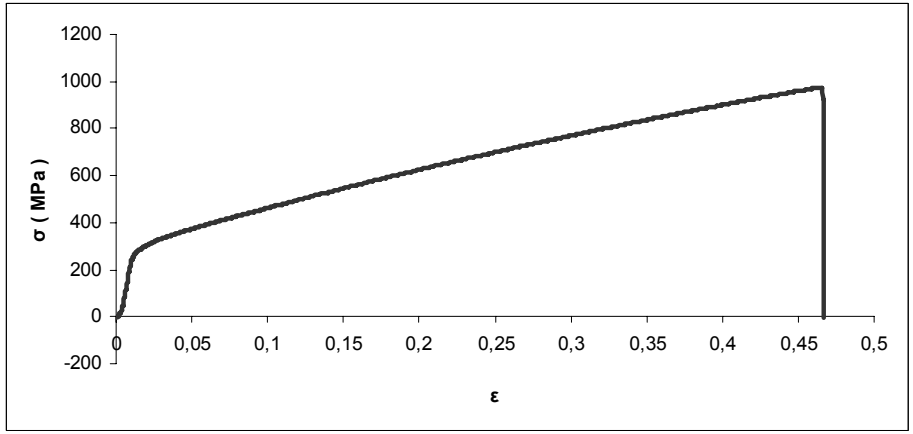
Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.3



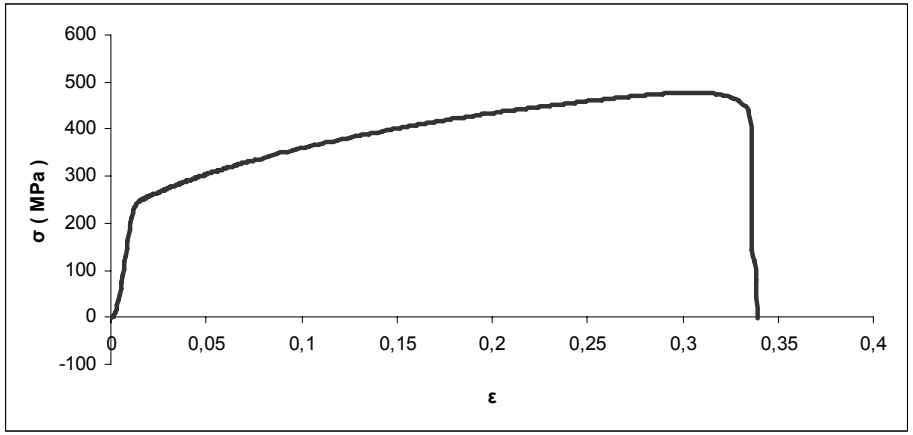
Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.3



Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.3

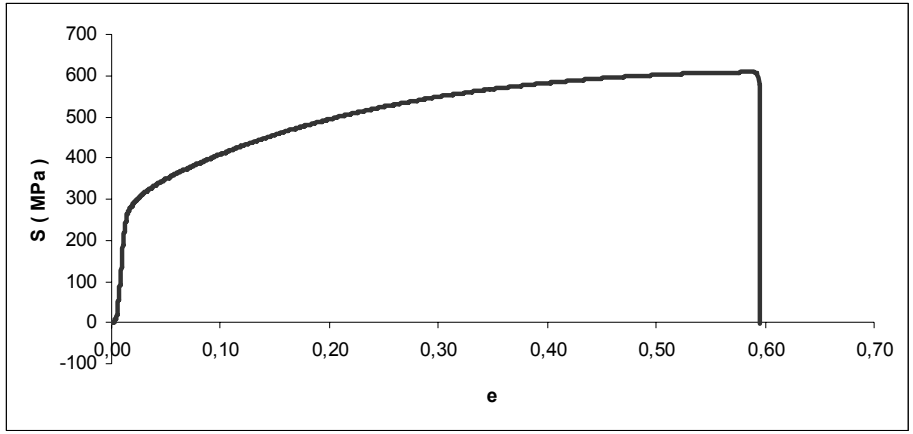


Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.3

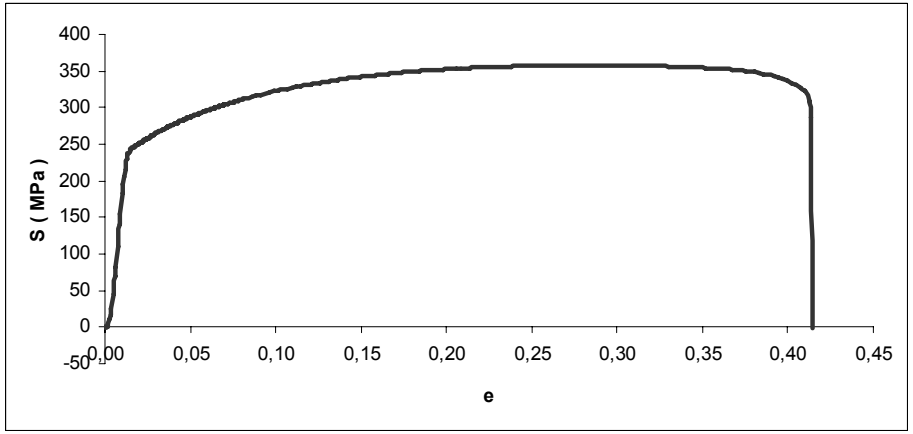


Şekil 8.13 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.3, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

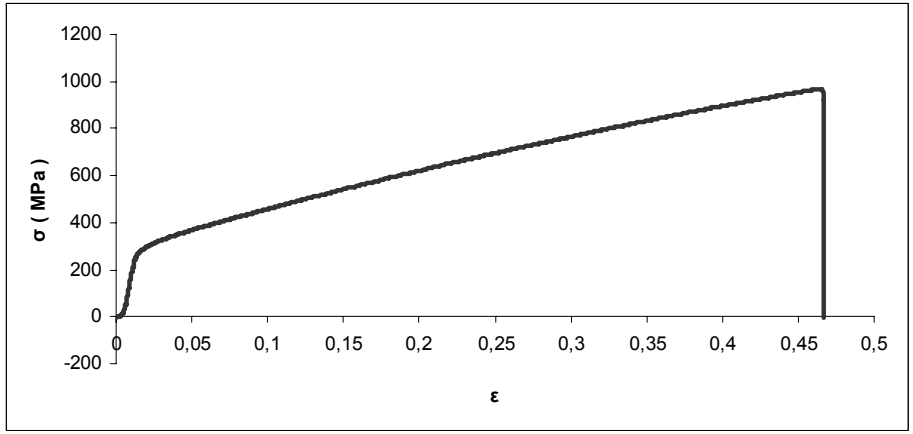
Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.4



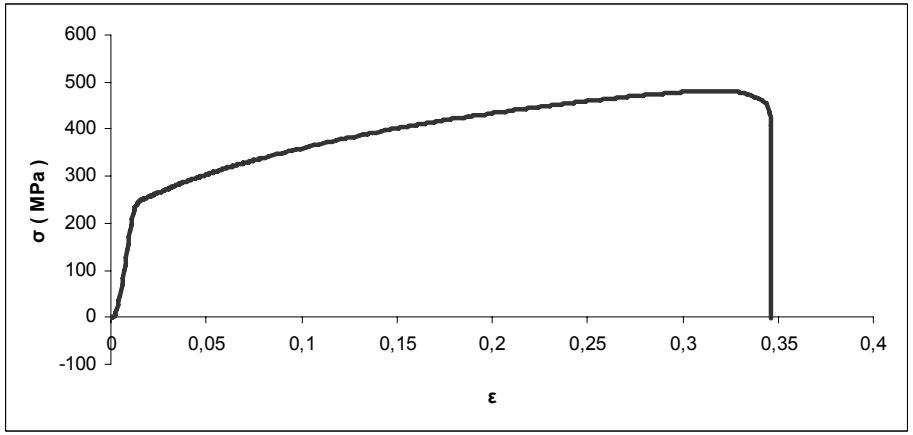
Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.4



Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.4

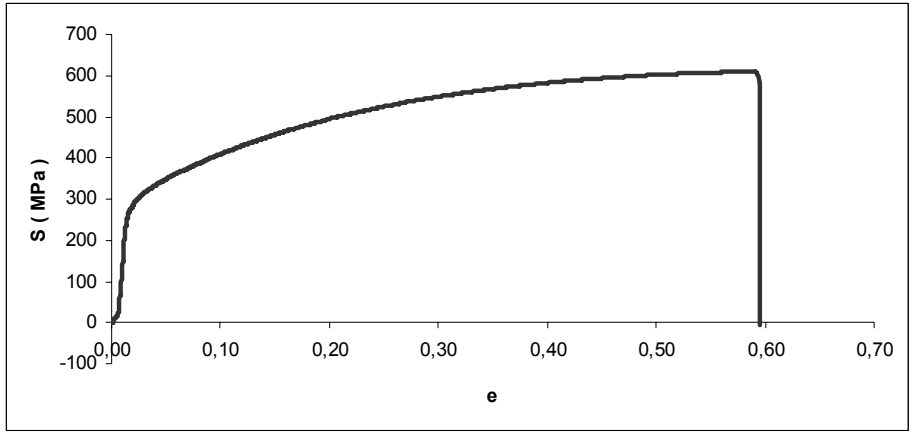


Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.4

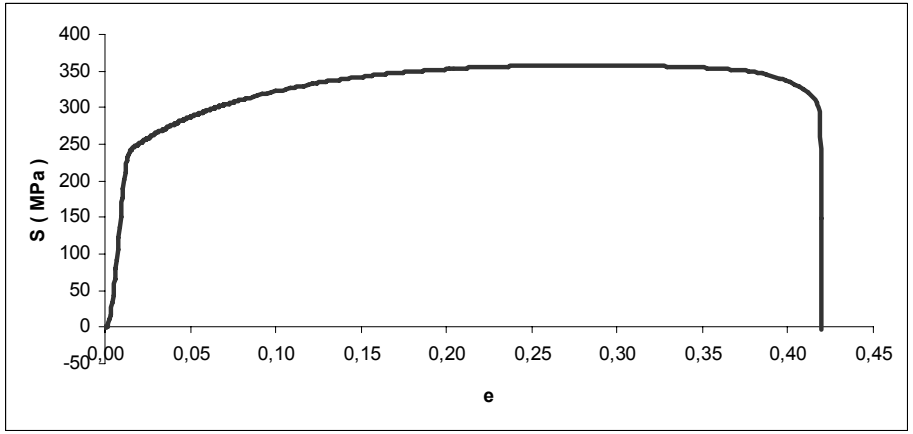


Şekil 8.14 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.4, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

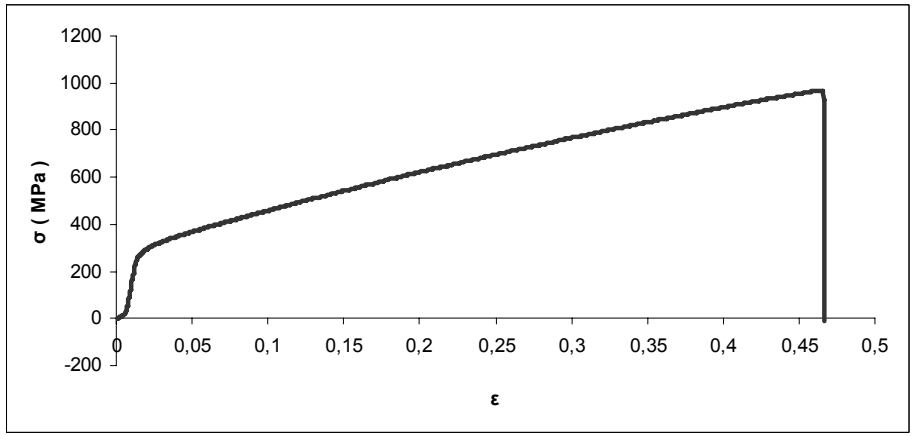
Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.5



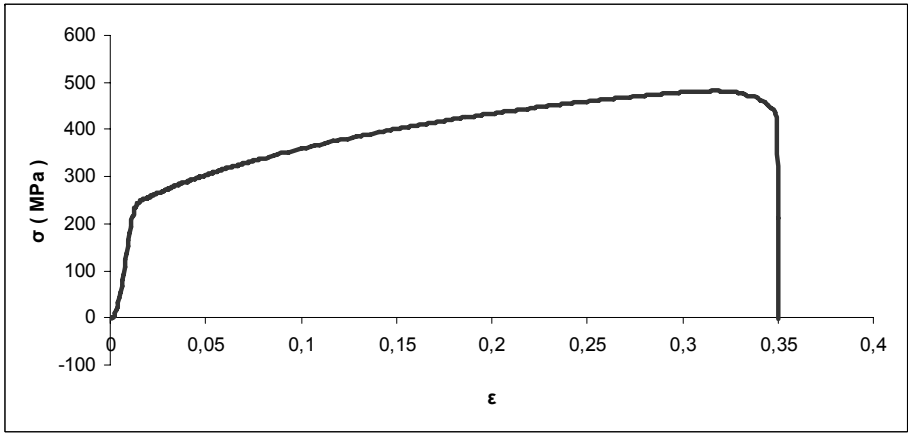
Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.5



Paslanmaz Çelik (304) θ = 45° Deney No.5

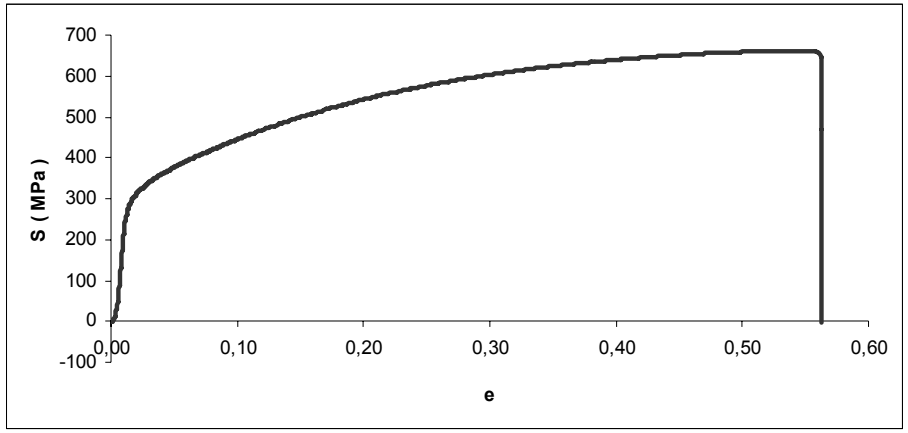


Galvaniz Sac (DX51) θ = 45° Deney No.5

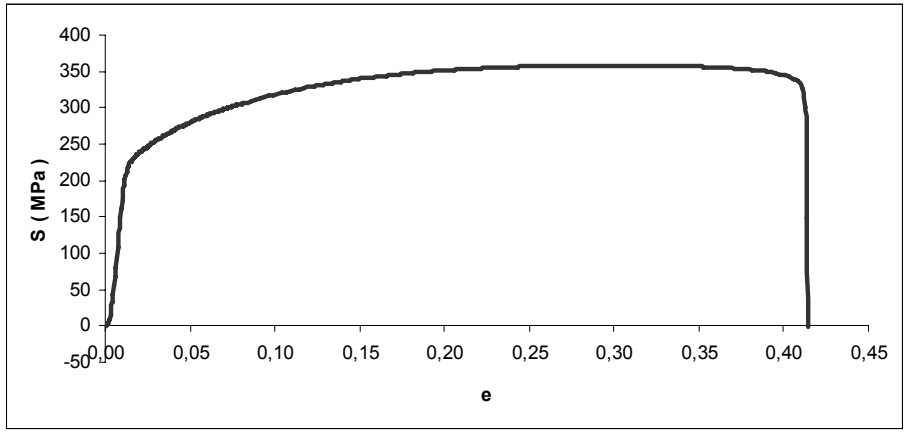


Şekil 8.15 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.5, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

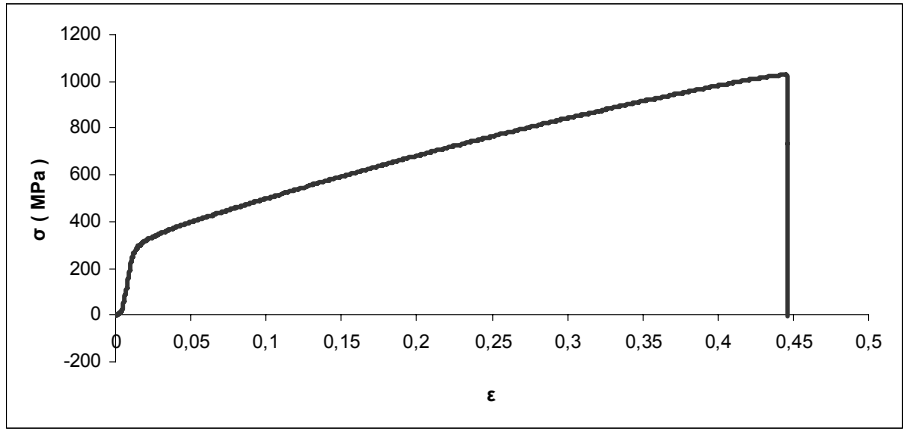
Paslanmaz Çelik (304) θ = 90° Deney No.1



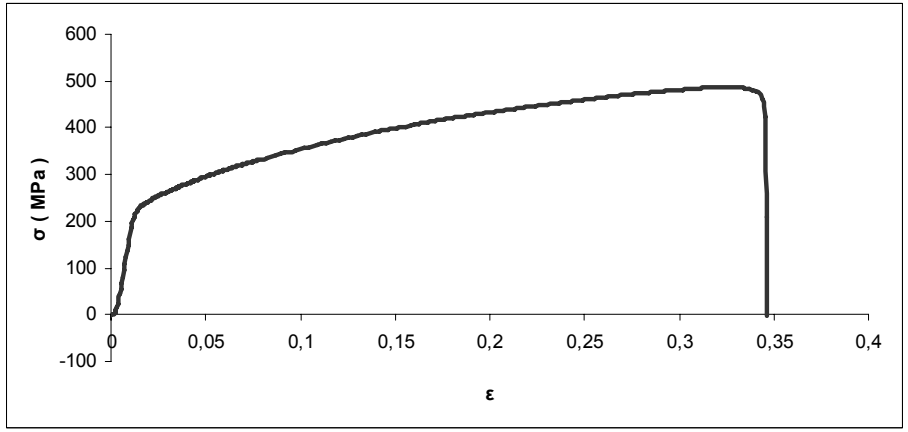
Galvaniz Sac (DX51) θ = 90° Deney No.1



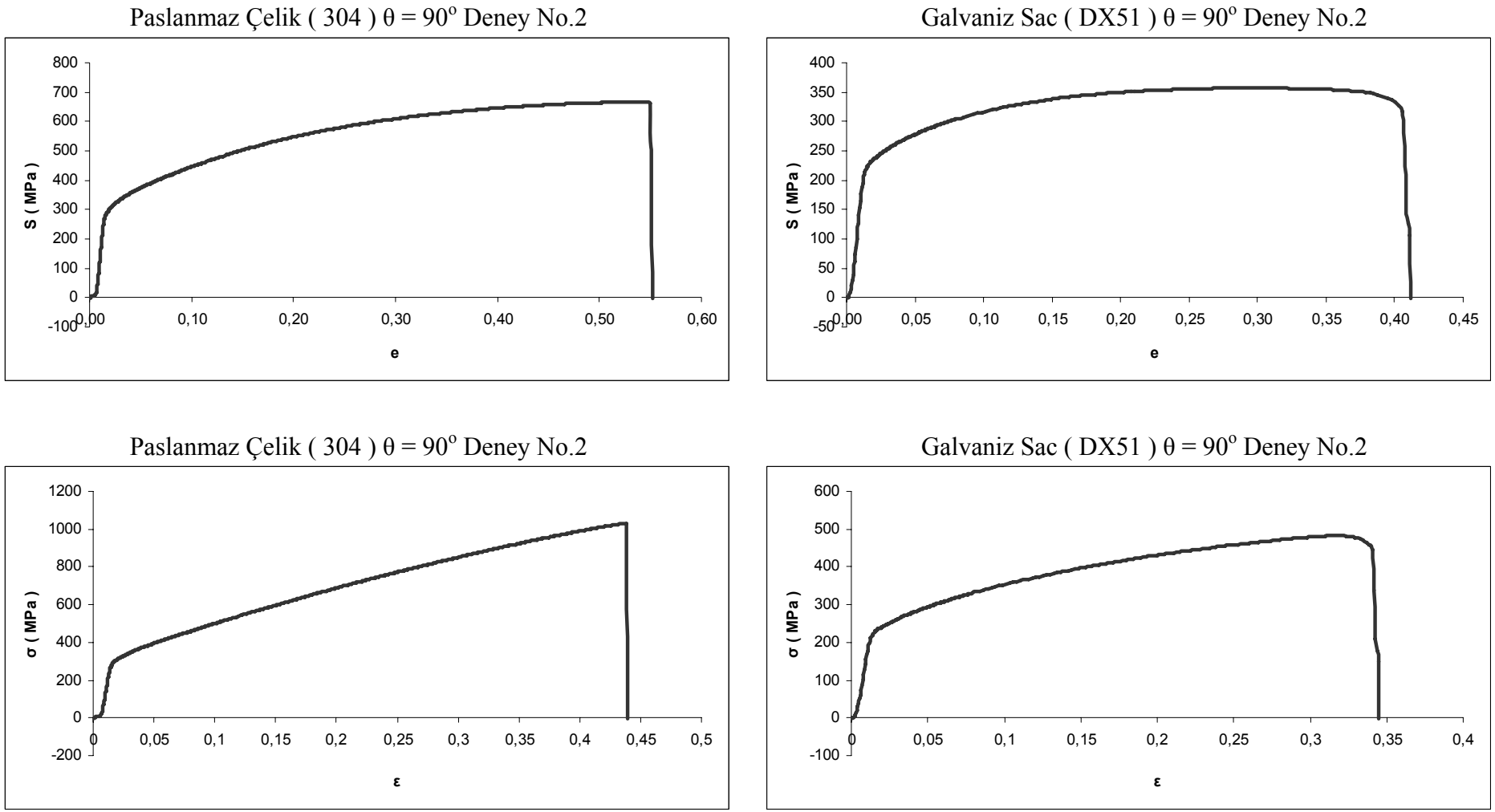
Paslanmaz Çelik (304) θ = 90° Deney No.1



Galvaniz Sac (DX51) θ = 90° Deney No.1

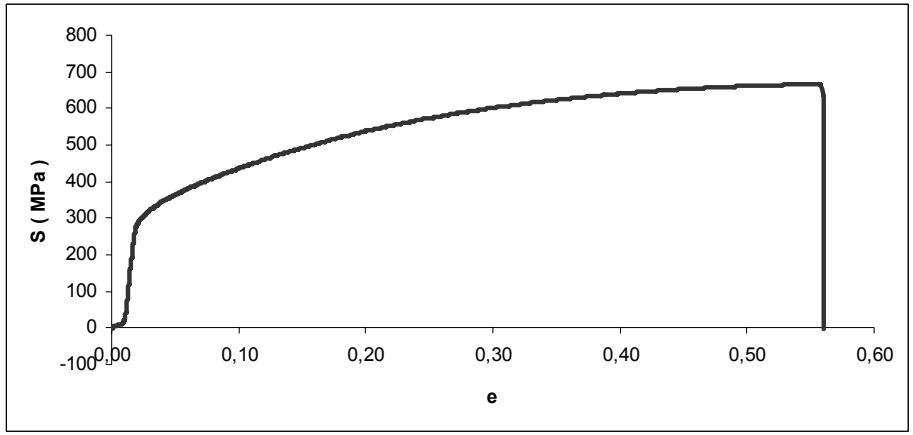


Şekil 8.16 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.1, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

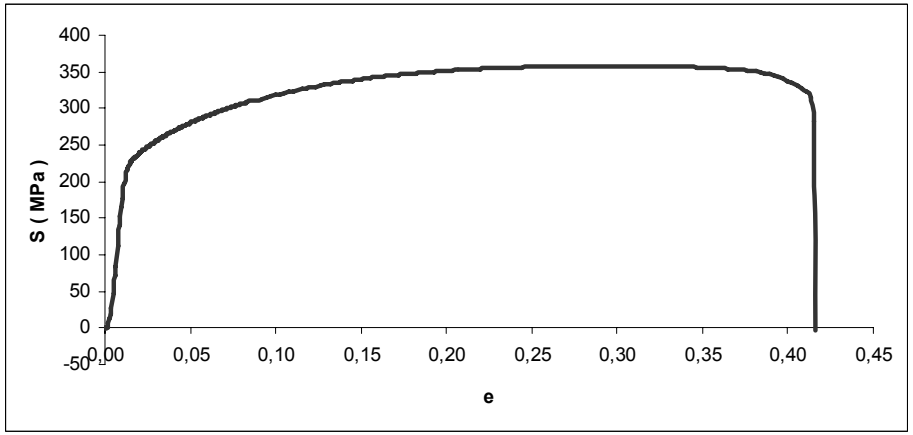


Şekil 8.17 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.2, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

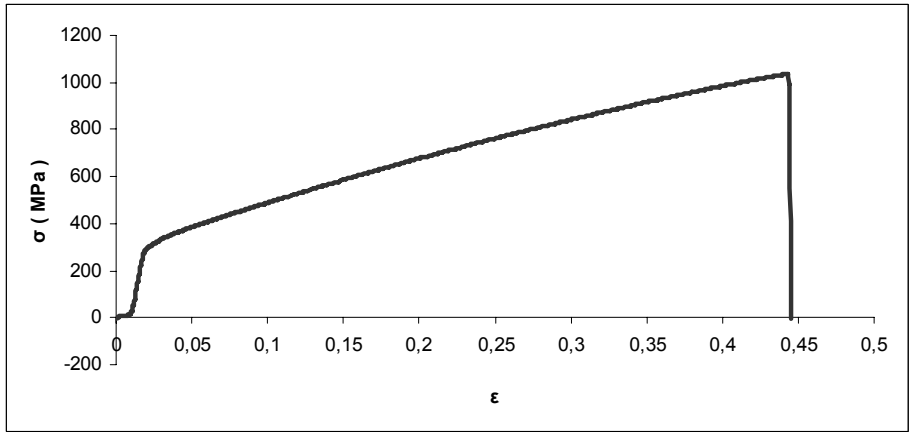
Paslanmaz Çelik (304) θ = 90° Deney No.3



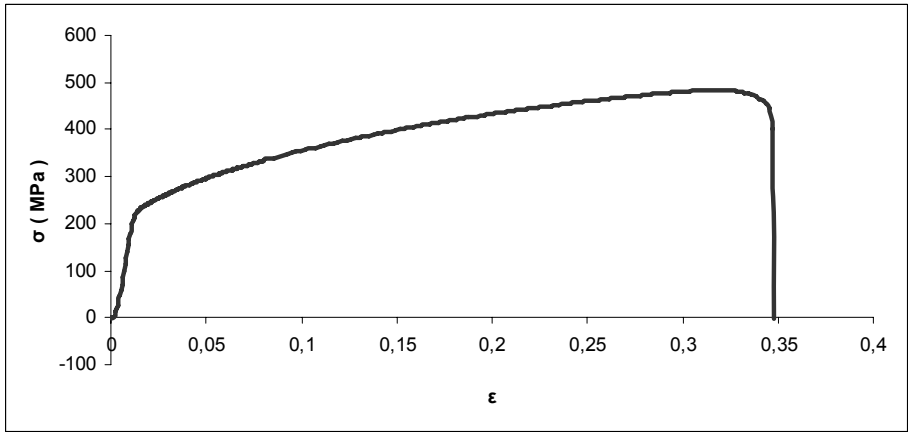
Galvaniz Sac (DX51) θ = 90° Deney No.3



Paslanmaz Çelik (304) θ = 90° Deney No.3

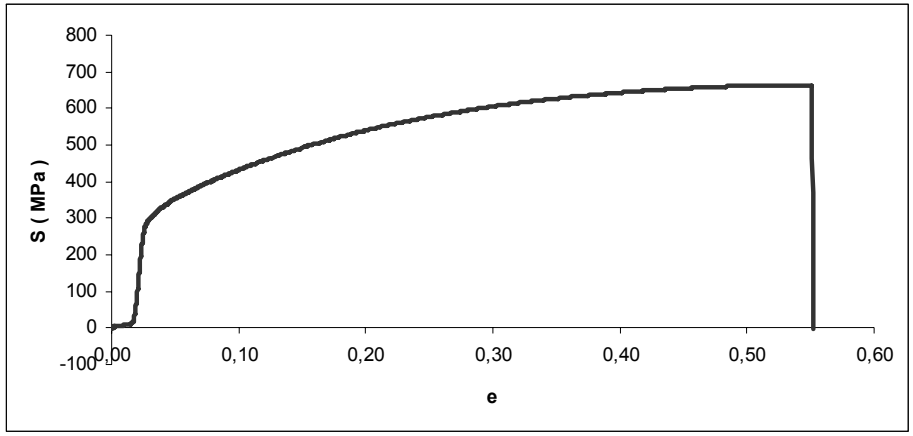


Galvaniz Sac (DX51) θ = 90° Deney No.3

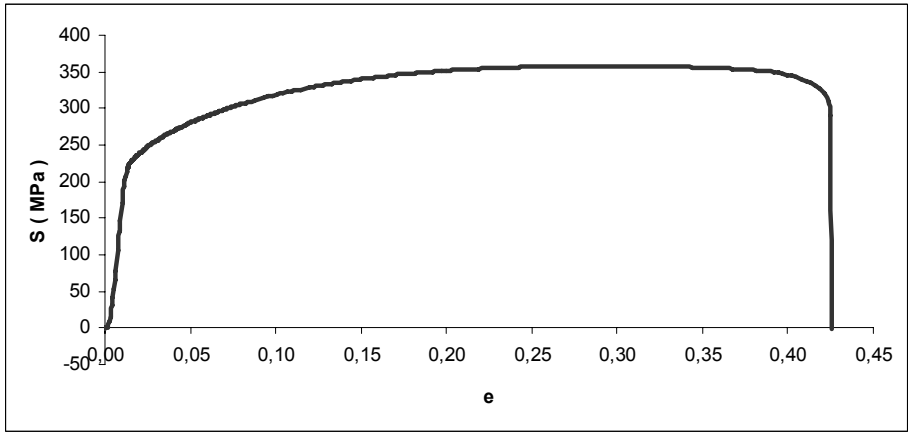


Şekil 8.18 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.3, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

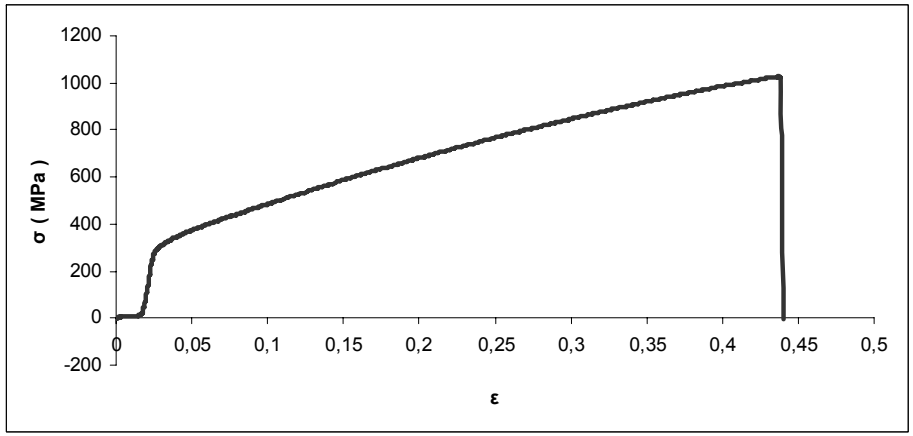
Paslanmaz Çelik (304) θ = 90° Deney No.4



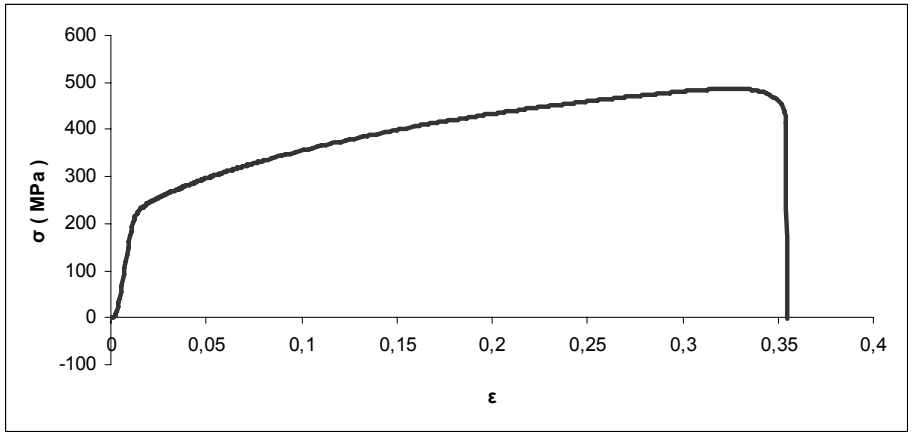
Galvaniz Sac (DX51) θ = 90° Deney No.4



Paslanmaz Çelik (304) θ = 90° Deney No.4

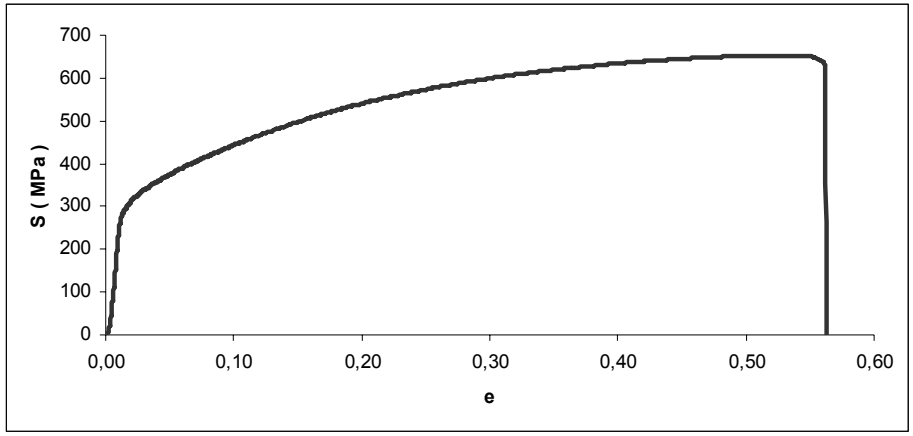


Galvaniz Sac (DX51) θ = 90° Deney No.4

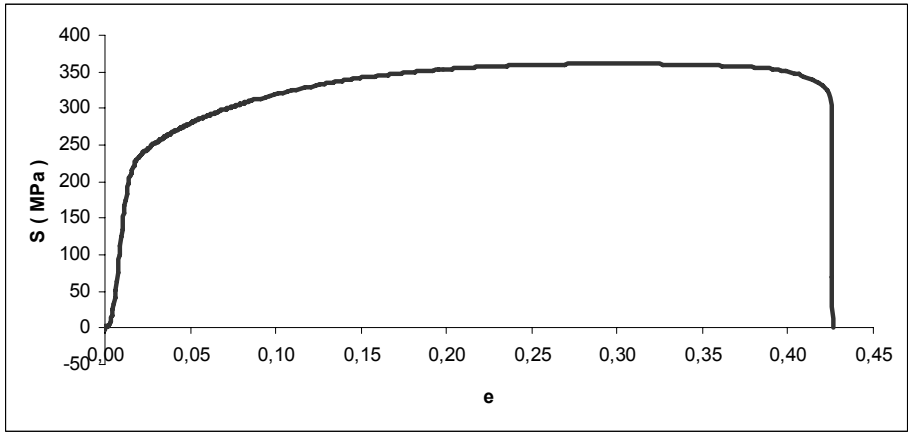


Şekil 8.19 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.4, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

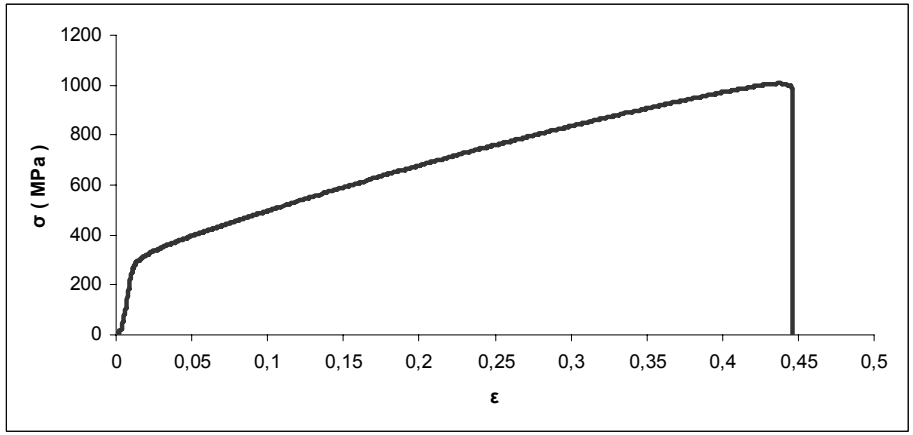
Paslanmaz Çelik (304) θ = 90° Deney No.5



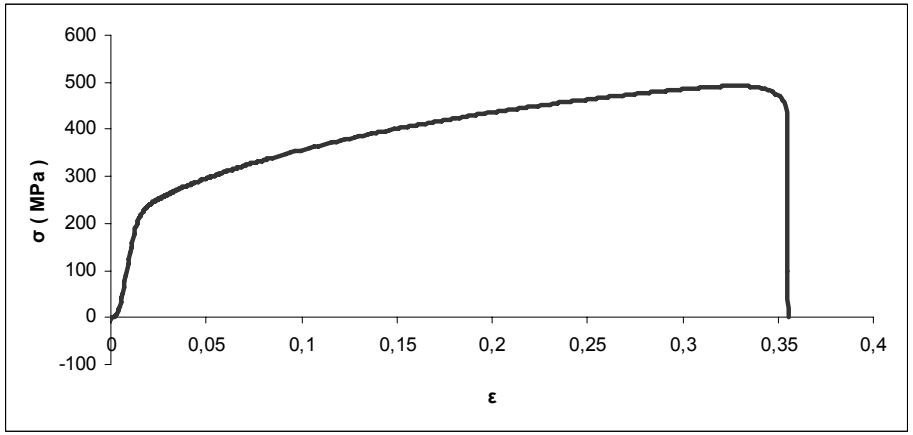
Galvaniz Sac (DX51) θ = 90° Deney No.5



Paslanmaz Çelik (304) θ = 90° Deney No.5



Galvaniz Sac (DX51) θ = 90° Deney No.5



Şekil 8.20 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz sacın, haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultudaki çekme deneylerinden elde edilen nominal gerinim – nominal gerilme ve gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrileri. (Deney No.5, $V_{çek}$ = 32 mm/dak)

8.2.2. Ani Hız Arttırma Yöntemi İle Gerinim Hızına Duyarlılığın Belirlenmesi

304 kalite paslanmaz çelik ile DX 51 kalite çinko kaplama galvaniz saclara uygulanan bir grup çekme deneyinde, e= % 15 uzama anındaki çekme hızı ($v_{çek1}$) = 32 mm / dakikadan ($v_{çek2}$)= 96 mm / dakikaya artırılarak, kuvvet ve gerilme değerlerindeki değişimler belirlenmiştir. İkinci hızın 96 mm / dak seçilmesi ise gerinim hızının net bir şekilde görünmesi için seçilmiştir. Buna göre, çekme cihazının ölçebildiği verilerle (8.4) eşitliği kullanılarak, gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) bulunur. Burada oluşan gerçek gerilmeler (σ), (8.7) eşitliğinden, gerinim hızları (ė,έ) ise (8.5) ve (8.6) eşitliklerinden hesaplanmıştır. Gerinim hızına duyarlılık, haddeleme yönüne 0˚ ve 90˚ lik doğrultularda kesilmiş çekme numuneleri ile belirlenmiştir. Hız artırımı esnasında gerinim hızına duyarlılık üstelini bulmak için % e = 14.999 a kadar 32 mm/dak olarak çekilmiş, %e=15.001'den başlayarak kopana kadar olan sürede de 96 mm/dak hızla çekilmiştir. Böylece gerinim hızına duyarlılık üsteli rahatlıkla hesaplanabilmiştir.

$$m = \frac{\log(\sigma_2 / \sigma_1)}{\log(\varepsilon_2 / \varepsilon_1)} \tag{8.4}$$

$$\dot{e} = \frac{V_{çek}}{L_0} \tag{8.5}$$

$$\dot{\varepsilon} = (\frac{L_0}{L})\dot{e} = \frac{V_{çek}}{L} \tag{8.6}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{8.7}$$

Çizelge 8.11 304 kalite paslanmaz çelik sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 0˚ ’ lik doğrultuda belirlenen, e = %15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m)

DENEY NO	ÇEKME HIZLARI		e=% 15 UZAMADA GERİNİM HIZLARI				e=%15 UZAMADA ANİ YÜK ARTIRIMI		e= %15 UZAMADA ANİ GERİLME ARTIRIMI				m (e=%15 uzamada)
	$(V_{çek})_1$ [mm/dak]	$(V_{çek})_2$ [mm/dak]	$\dot{e}_1$ [S^{-1}]	$\dot{e}_2$ [S^{1}]	$\acute{\varepsilon}_1$ [S^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_2$ [S^{-1}]	F_1 [Kn]	F_2 [Kn]	S_1 [Mpa]	S_2 [Mpa]	σ_1 [Mpa]	σ_2 [Mpa]	
1	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,654	4,718	503,412	510,248	808,077	819,051	0,012284
2	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,679	4,744	505,965	512,937	796,009	806,978	0,012464
3	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,696	4,761	507,773	514,876	813,503	824,882	0,012651
4	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,613	4,677	509,495	516,387	818,147	829,215	0,012238
5	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,668	4,732	504,868	511,673	808,597	819,496	0,012193
ORT	**32**	**96**	**0,0067**	**0,0200**	**0,00580**	**0,01739**	**4,662**	**4,726**	**506,303**	**513,224**	**808,867**	**819,924**	**0,012366**

Çizelge 8.12 304 kalite paslanmaz çelik sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 45˚ ’ lik doğrultuda belirlenen, e = %15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m)

DENEY NO	ÇEKME HIZLARI		e=% 15 UZAMADA GERİNİM HIZLARI				e=%15 UZAMADA ANİ YÜK ARTIRIMI		e= %15 UZAMADA ANİ GERİLME ARTIRIMI				m (e=%15 uzamada)
	$(V_{çek})_1$ [mm/dak]	$(V_{çek})_2$ [mm/dak]	$\dot{e}_1$ [S^{-1}]	$\dot{e}_2$ [S^{1}]	$\acute{\varepsilon}_1$ [S^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_2$ [S^{-1}]	F_1 [Kn]	F_2 [Kn]	S_1 [Mpa]	S_2 [Mpa]	σ_1 [Mpa]	σ_2 [Mpa]	
1	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,699	4,764	511,356	518,126	825,942	836,878	0,011979
2	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,683	4,748	512,286	519,081	816,200	827,026	0,012000
3	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,692	4,757	510,397	517,183	843,227	854,439	0,012029
4	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,718	4,783	511,065	517,861	820,668	831,582	0,012031
5	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,688	4,753	513,462	520,282	817,226	828,081	0,012017
ORT	**32**	**96**	**0,0067**	**0,0200**	**0,00580**	**0,01739**	**4,696**	**4,761**	**511,713**	**518,507**	**824,653**	**835,601**	**0,012011**

Çizelge 8.13 304 kalite paslanmaz çelik sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 90˚ ’ lik doğrultuda belirlenen, e = %15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m)

DENEY NO	ÇEKME HIZLARI		e=% 15 UZAMADA GERİNİM HIZLARI				e=%15 UZAMADA ANİ YÜK ARTIRIMI		e= %15 UZAMADA ANİ GERİLME ARTIRIMI				m (e=%15 uzamada)
	$(V_{çek})_1$ [mm/dak]	$(V_{çek})_2$ [mm/dak]	$\dot{e}_1$ [S^{-1}]	$\dot{e}_2$ [S^{1}]	$\acute{\varepsilon}_1$ [S^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_2$ [S^{-1}]	F_1 [Kn]	F_2 [Kn]	S_1 [Mpa]	S_2 [Mpa]	σ_1 [Mpa]	σ_2 [Mpa]	
1	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,590	4,653	491,682	498,293	794,165	804,843	0,012164
2	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,598	4,661	492,614	499,150	760,227	770,313	0,012004
3	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,578	4,641	491,534	498,158	792,402	803,080	0,012191
4	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,586	4,649	492,123	498,745	790,251	800,885	0,012173
5	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	4,581	4,644	491,692	498,244	777,660	788,023	0,012056
ORT	**32**	**96**	**0,0067**	**0,0200**	**0,00580**	**0,01739**	**4,587**	**4,649**	**491,929**	**498,518**	**782,941**	**793,429**	**0,012117**

Çizelge 8.14 DX 51 kalite galvaniz sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 0˚ ’ lik doğrultuda belirlenen, e = %15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m)

DENEY NO	ÇEKME HIZLARI		e=% 15 UZAMADA GERİNİM HIZLARI				e=%15 UZAMADA ANİ YÜK ARTIRIMI		e= %15 UZAMADA ANİ GERİLME ARTIRIMI				m (e=%15 uzamada)
	$(V_{çek})_1$ [mm/dak]	$(V_{çek})_2$ [mm/dak]	$\dot{e}_1$ [S^{-1}]	$\dot{e}_2$ [S^{1}]	$\acute{\varepsilon}_1$ [S^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_2$ [S^{-1}]	F_1 [Kn]	F_2 [Kn]	S_1 [Mpa]	S_2 [Mpa]	σ_1 [Mpa]	σ_2 [Mpa]	
1	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,575	3,614	348,881	352,743	500,348	505,887	0,010026
2	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,576	3,615	347,997	351,975	495,722	501,388	0,010350
3	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,579	3,618	348,198	352,053	497,505	503,013	0,010027
4	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,604	3,644	349,603	353,480	494,933	500,421	0,010043
5	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,515	3,554	346,674	350,567	492,312	497,841	0,010171
ORT	**32**	**96**	**0,0067**	**0,0200**	**0,00580**	**0,01739**	**3,570**	**3,609**	**348,271**	**352,164**	**496,164**	**501,710**	**0,010124**

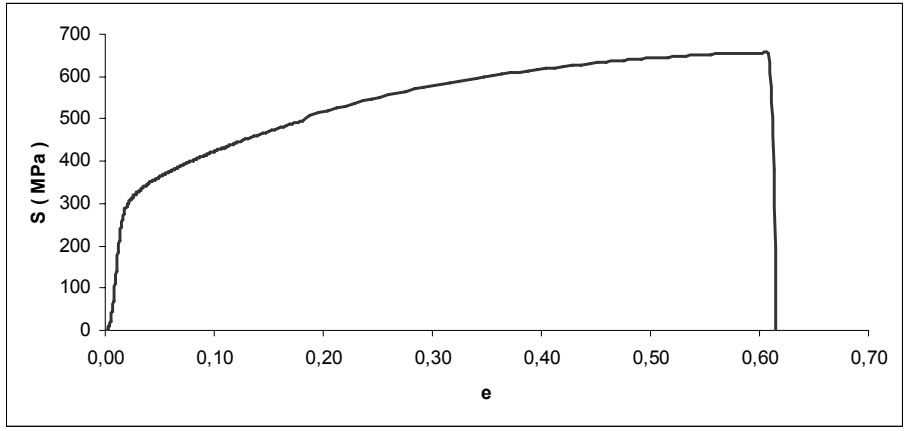
Çizelge 8.15 DX 51 kalite galvaniz sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 45˚ ' lik doğrultuda belirlenen, e = %15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m)

DENEY NO	ÇEKME HIZLARI		e=% 15 UZAMADA GERİNİM HIZLARI				e=%15 UZAMADA ANİ YÜK ARTIRIMI		e= %15 UZAMADA ANİ GERİLME ARTIRIMI				m (e=%15 uzamada)
	$(V_{çek})_1$ [mm/dak]	$(V_{çek})_2$ [mm/dak]	$\dot{e}_1$ [S^{-1}]	$\dot{e}_2$ [S^{1}]	$\acute{\varepsilon}_1$ [S^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_2$ [S^{-1}]	F_1 [Kn]	F_2 [Kn]	S_1 [Mpa]	S_2 [Mpa]	σ_1 [Mpa]	σ_2 [Mpa]	
1	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,621	3,659	351,431	355,116	507,519	512,840	0,009499
2	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,610	3,648	352,245	355,978	506,000	511,363	0,009601
3	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,624	3,662	352,524	356,248	507,212	512,570	0,009571
4	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,614	3,652	352,587	356,312	502,683	507,993	0,009570
5	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,626	3,664	351,736	355,448	503,018	508,326	0,009561
ORT	**32**	**96**	**0,0067**	**0,0200**	**0,00580**	**0,01739**	**3,619**	**3,657**	**352,105**	**355,820**	**505,286**	**510,619**	**0,009561**

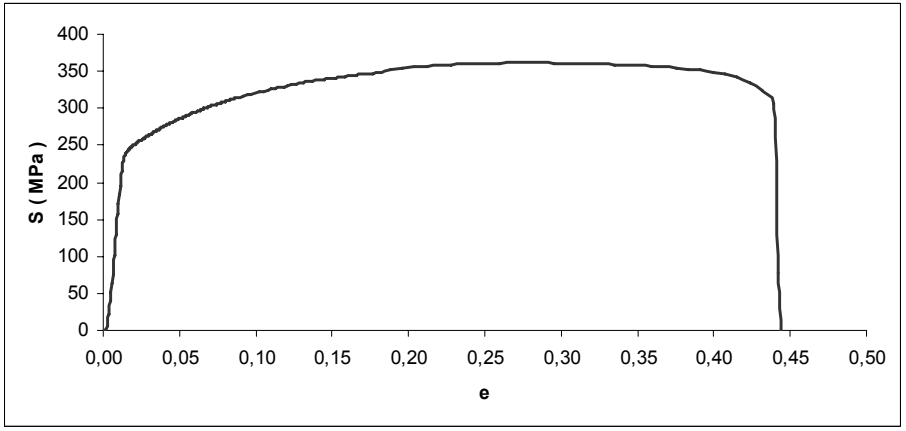
Çizelge 8.16 DX 51 kalite galvaniz sacın, çekme deneyinde ani hız artırımı yöntemi ile haddeleme yönüne 90˚ ’ lik doğrultuda belirlenen, e=%15 uzamadaki ortalama gerinim hızına duyarlılık üsteli (m)

DENEY NO	ÇEKME HIZLARI		e=% 15 UZAMADA GERİNİM HIZLARI				e=%15 UZAMADA ANİ YÜK ARTIRIMI		e= %15 UZAMADA ANİ GERİLME ARTIRIMI				m (e=%15 uzamada)
	$(V_{çek})_1$ [mm/dak]	$(V_{çek})_2$ [mm/dak]	$\dot{e}_1$ [S^{-1}]	$\dot{e}_2$ [S^{1}]	$\acute{\varepsilon}_1$ [S^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_2$ [S^{-1}]	F_1 [Kn]	F_2 [Kn]	S_1 [Mpa]	S_2 [Mpa]	σ_1 [Mpa]	σ_2 [Mpa]	
1	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,496	3,534	334,886	338,461	483,626	488,788	0,009670
2	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,531	3,569	335,254	338,834	478,240	483,346	0,009673
3	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,533	3,571	335,374	338,982	475,829	480,947	0,009744
4	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,491	3,529	334,316	337,918	469,948	475,011	0,009759
5	32	96	0,0067	0,0200	0,00580	0,01739	3,496	3,534	334,855	338,461	475,528	480,648	0,009754
ORT	**32**	**96**	**0,0067**	**0,0200**	**0,00580**	**0,01739**	**3,509**	**3,547**	**334,937**	**338,531**	**476,634**	**481,748**	**0,009720**

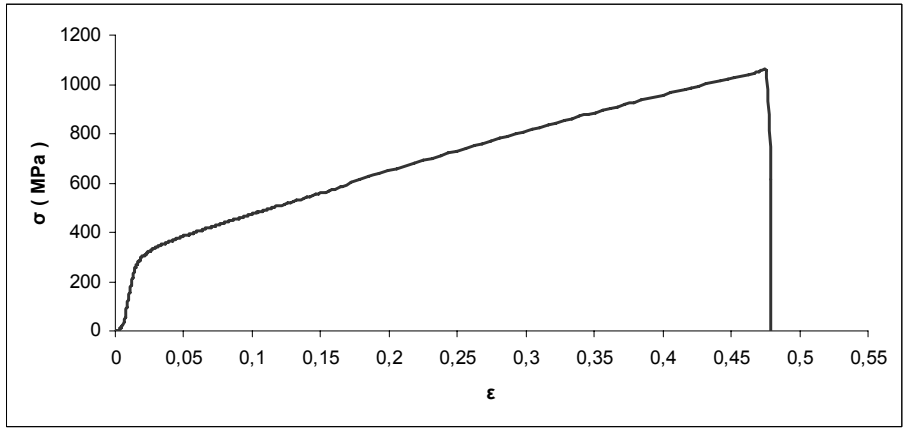
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.1



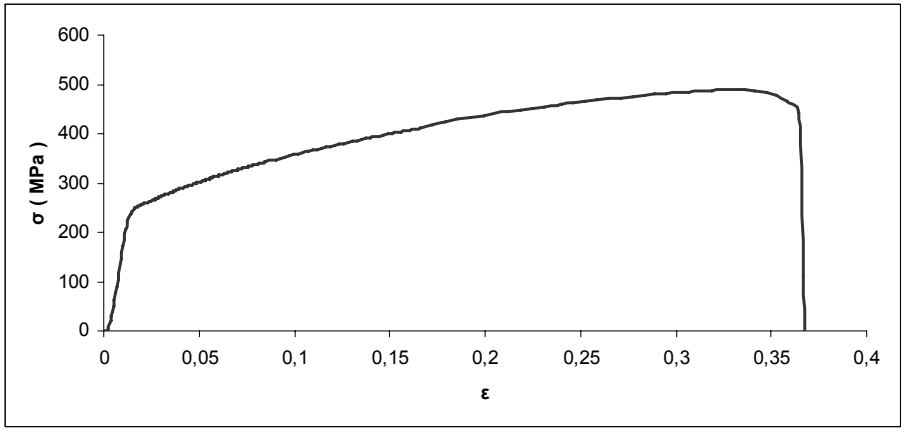
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.1



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.1

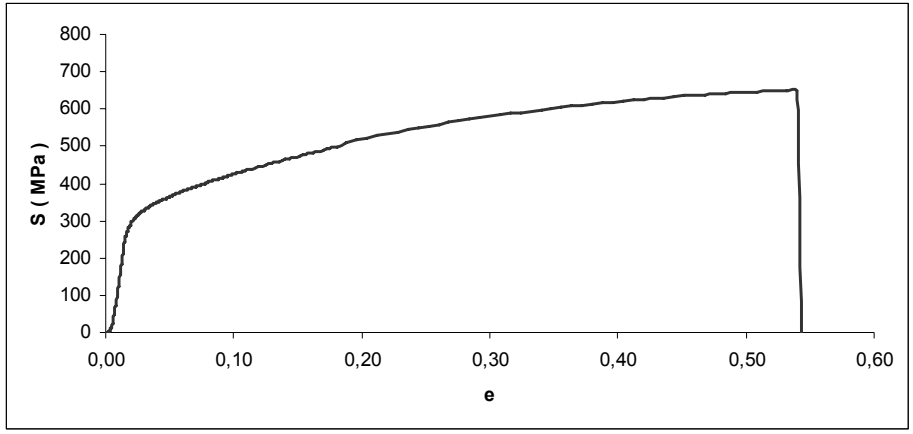


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.1

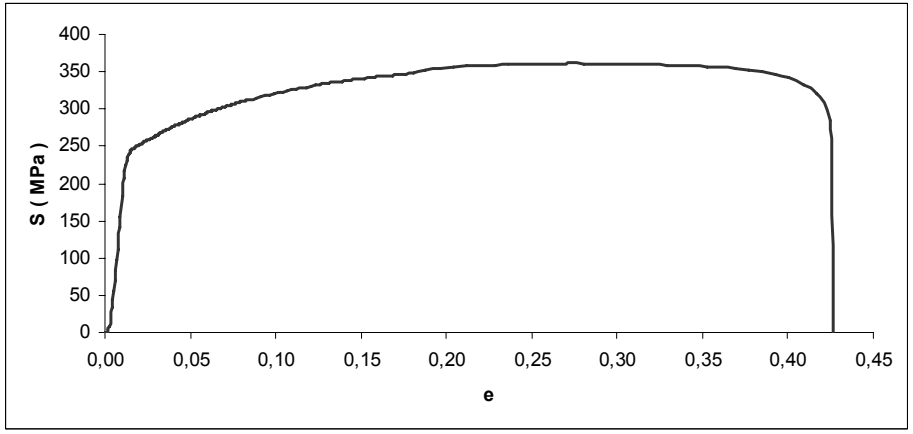


Şekil 8.21 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.1)

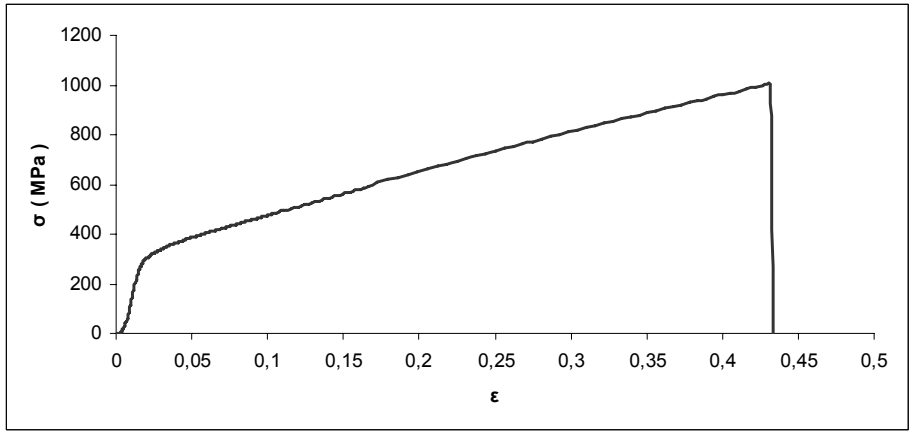
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.2



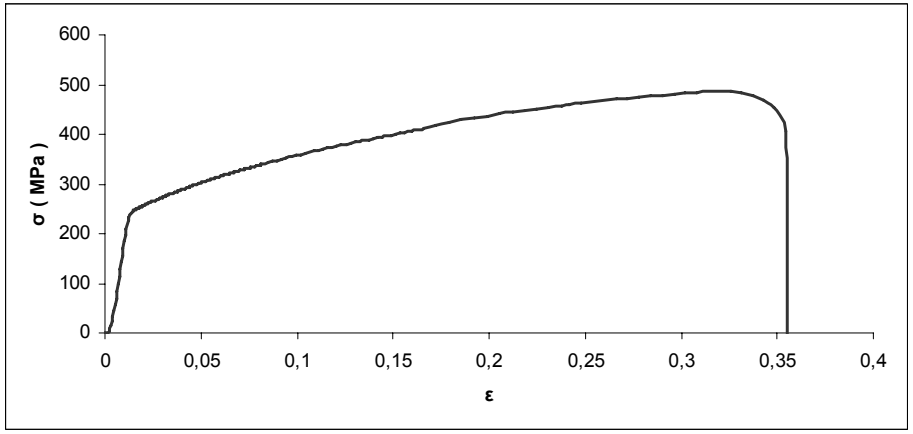
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.2



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.2

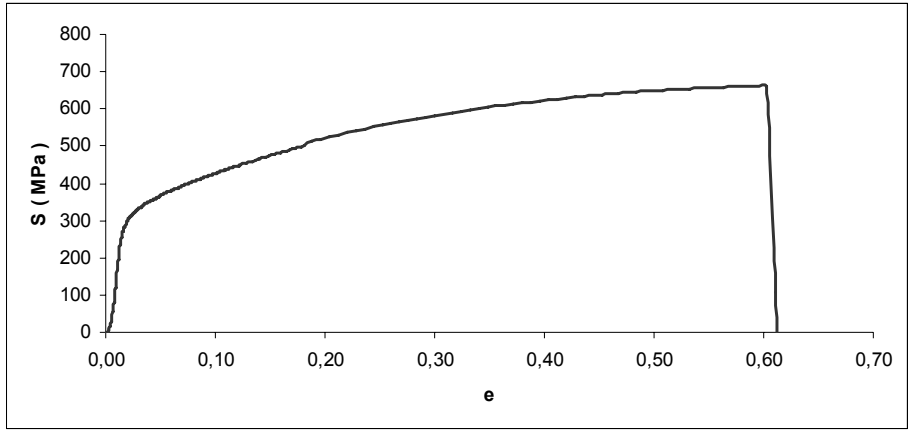


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.2

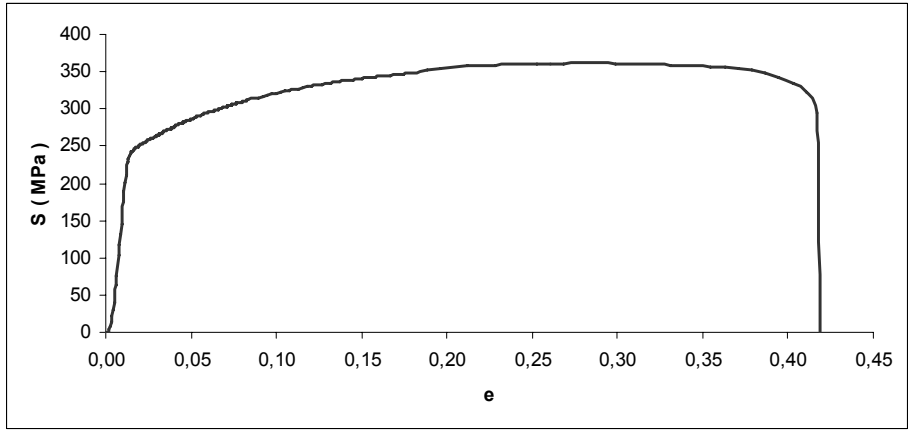


Şekil 8.22 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.2)

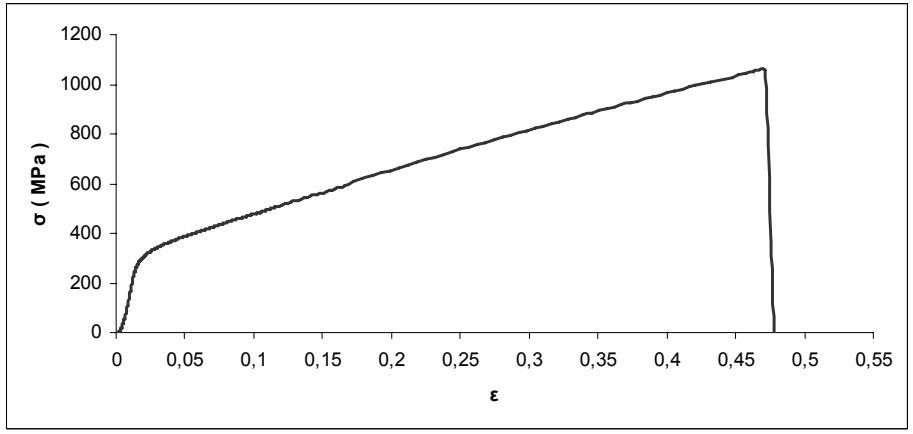
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.3



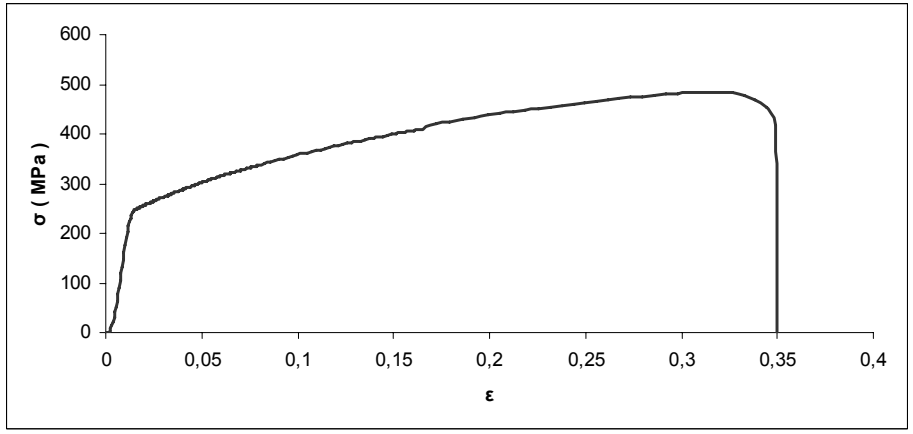
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.3



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.3

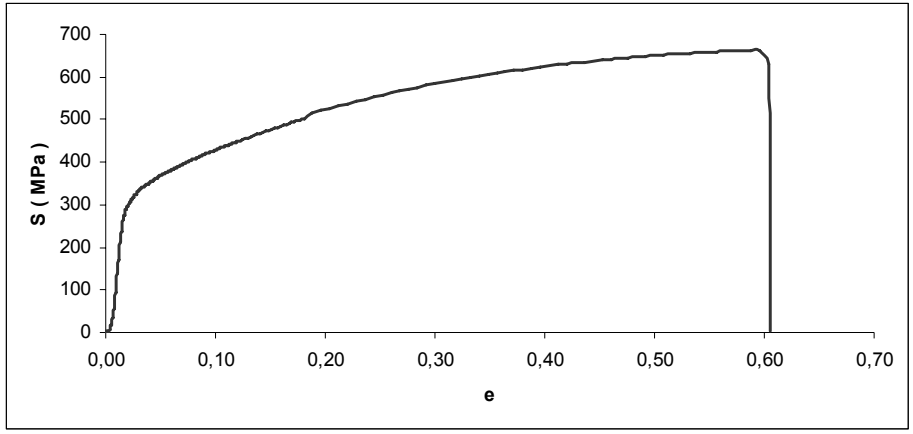


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.3

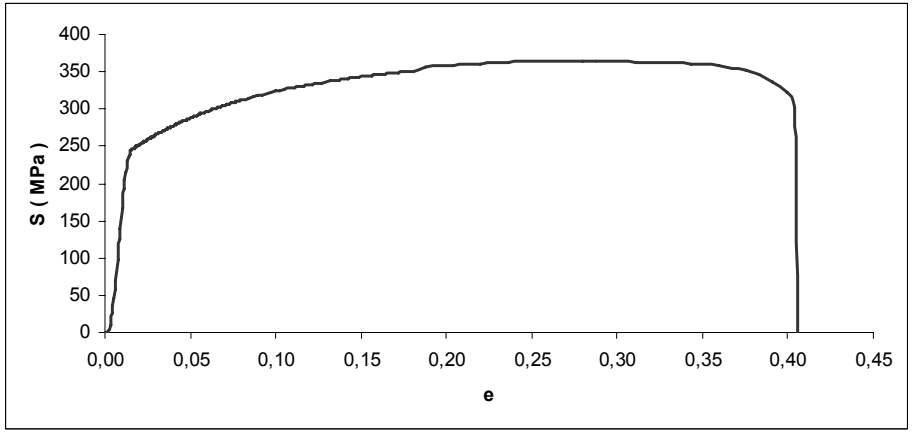


Şekil 8.23 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.3)

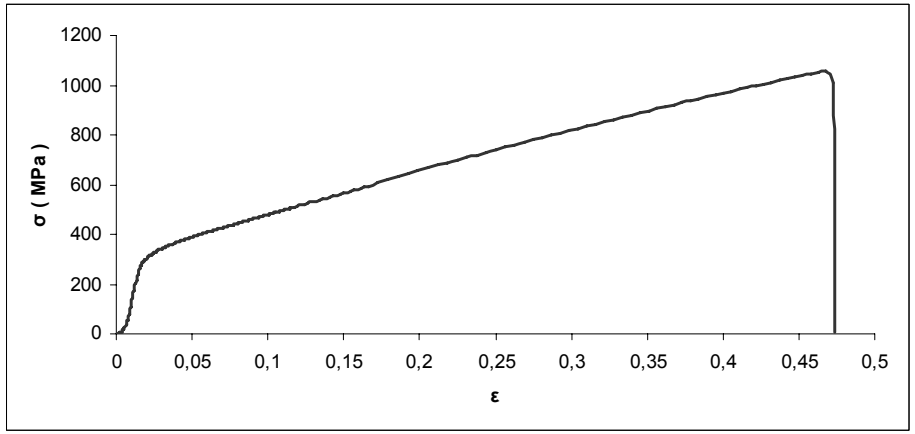
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.4



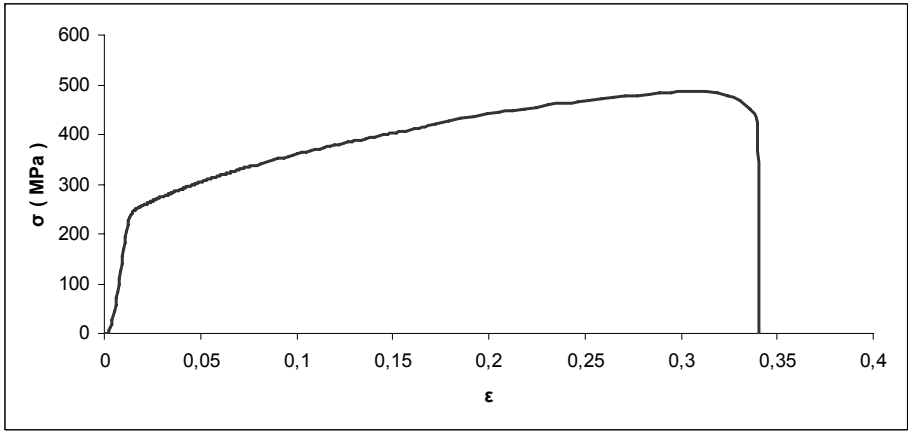
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.4



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.4

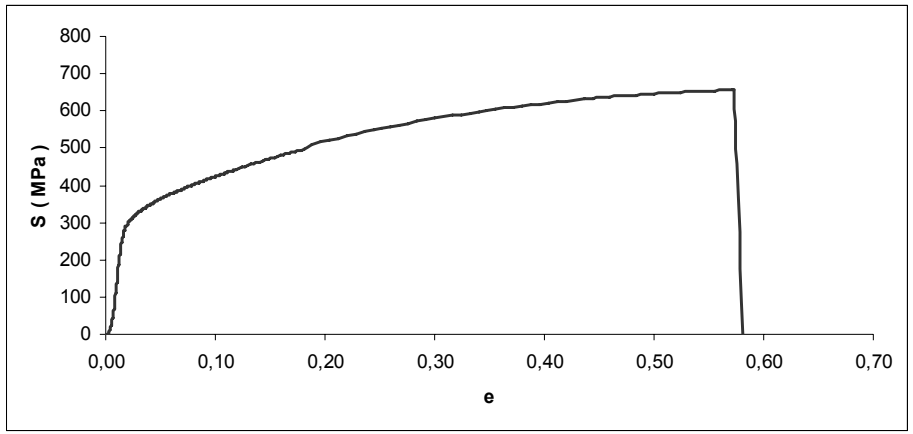


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.4

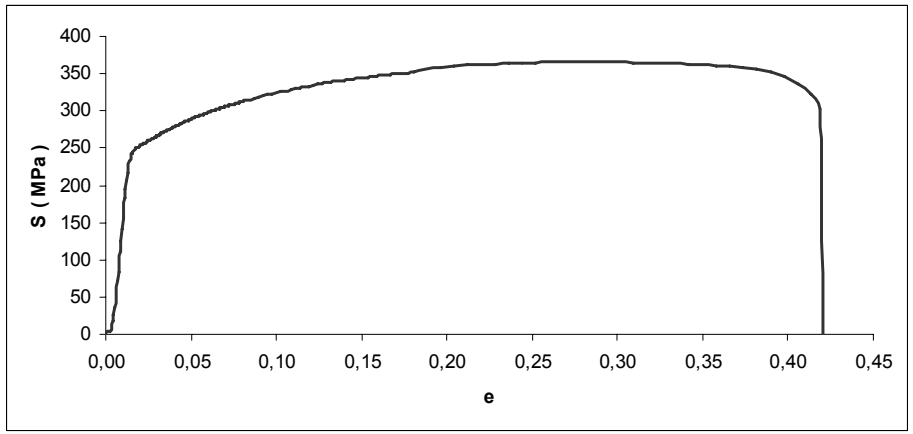


Şekil 8.24 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.4)

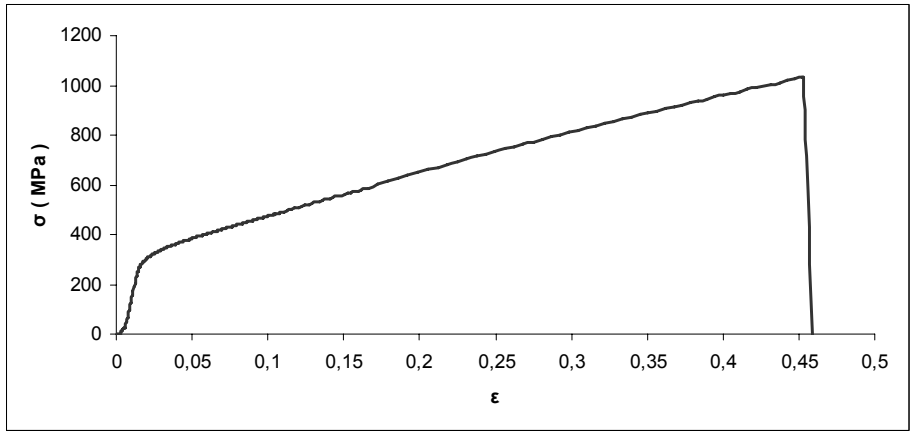
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.5



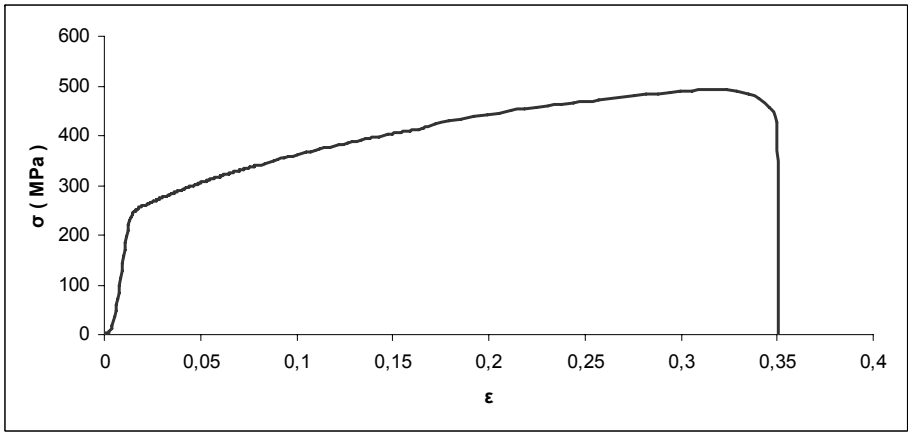
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.5



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 0° Deney No.5

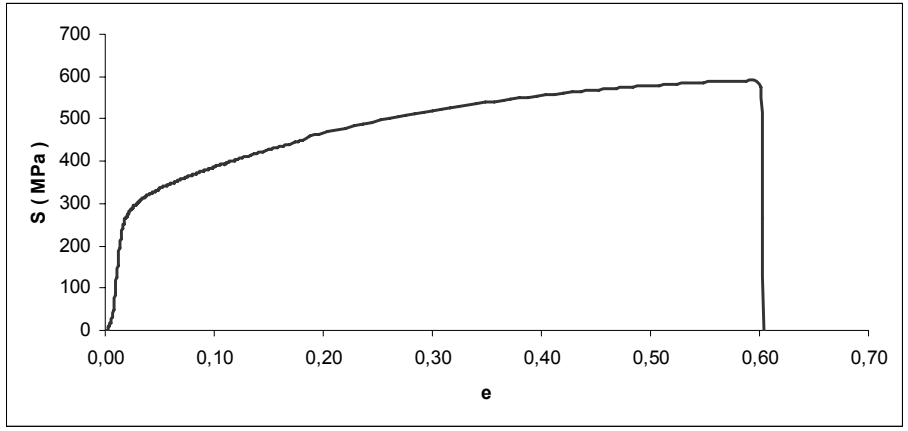


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 0° Deney No.5

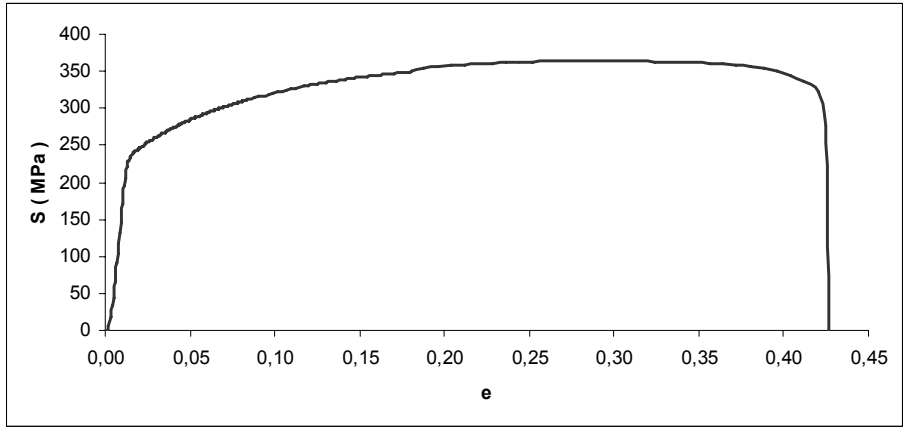


Şekil 8.25 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 0° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.5)

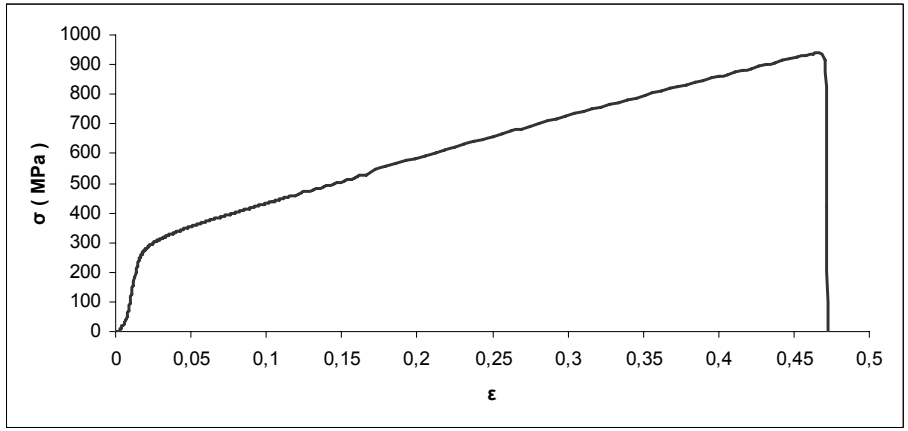
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.1



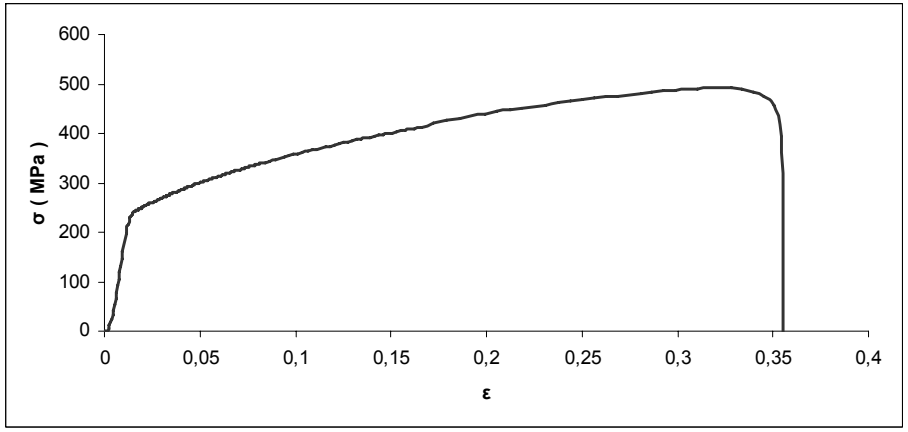
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.1



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.1

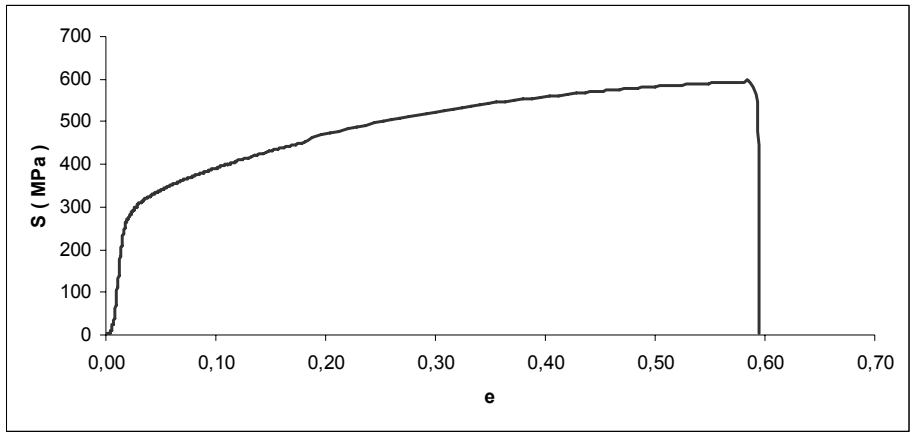


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.1

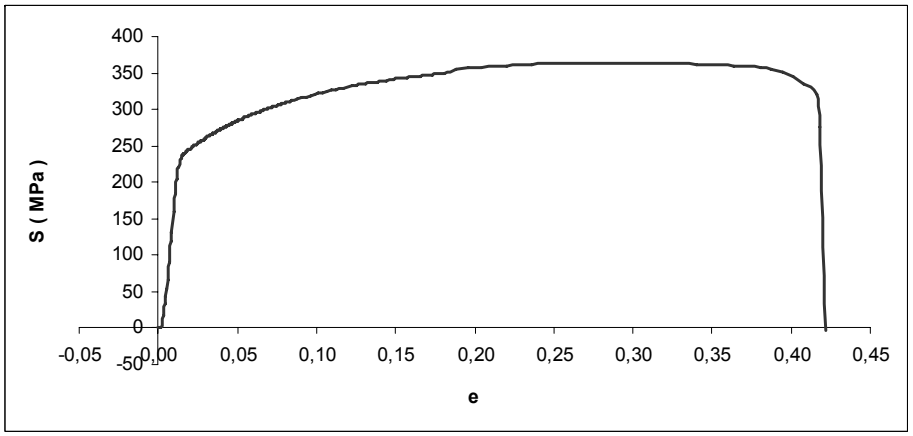


Şekil 8.26 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.1)

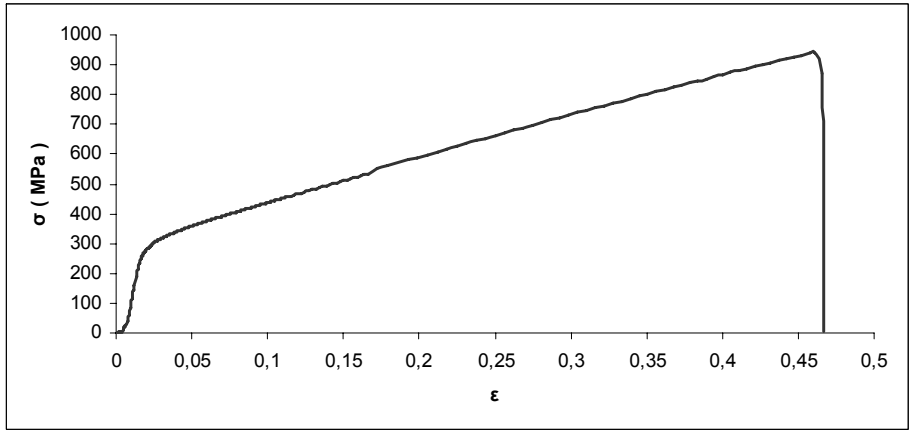
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.2



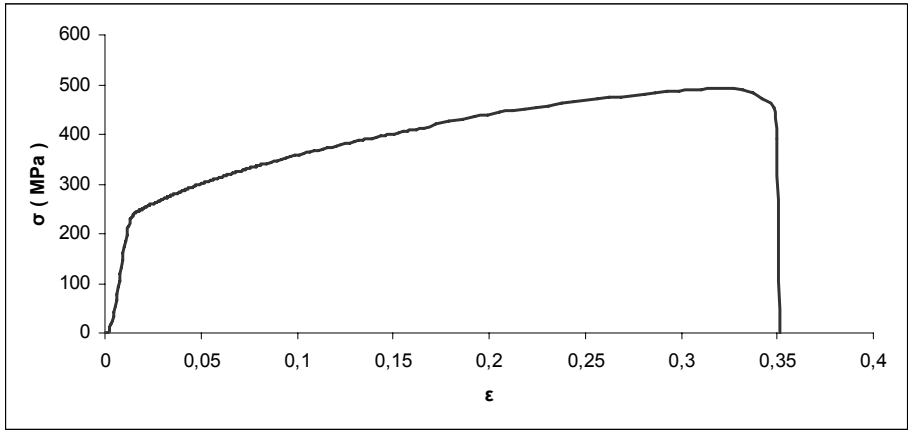
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.2



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.2

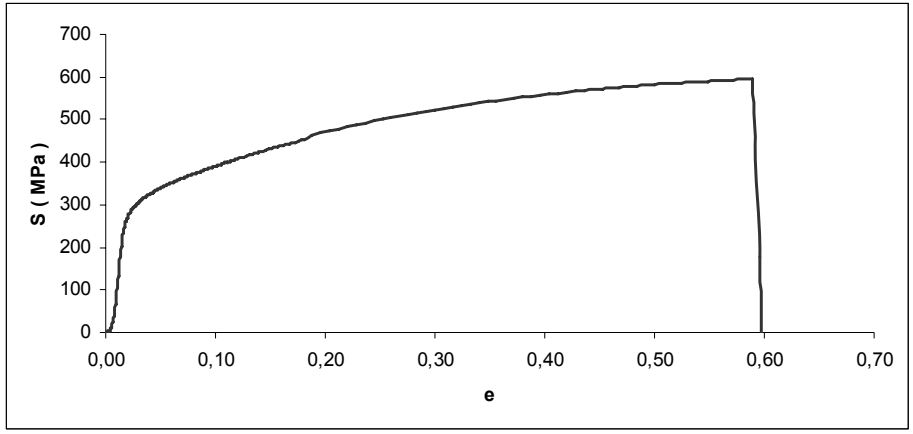


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.2

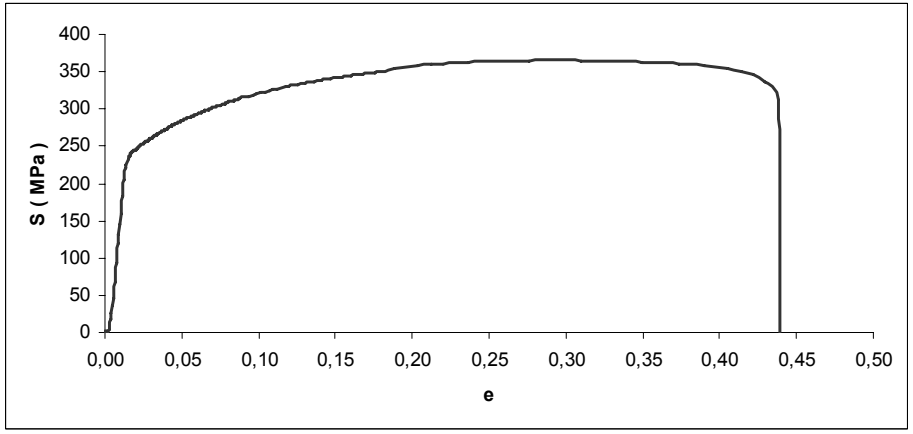


Şekil 8.27 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.2)

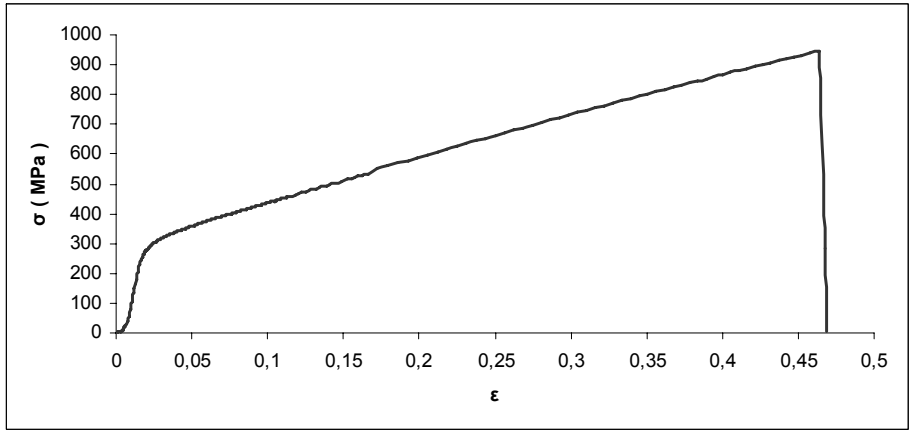
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.3



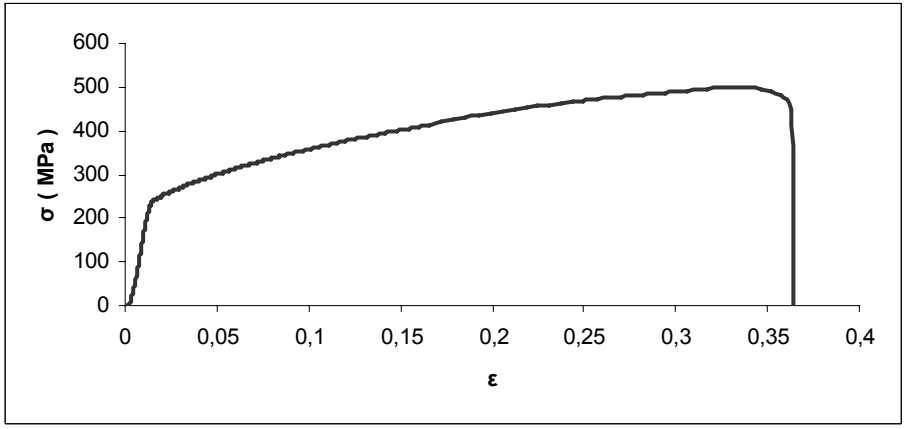
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.3



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.3

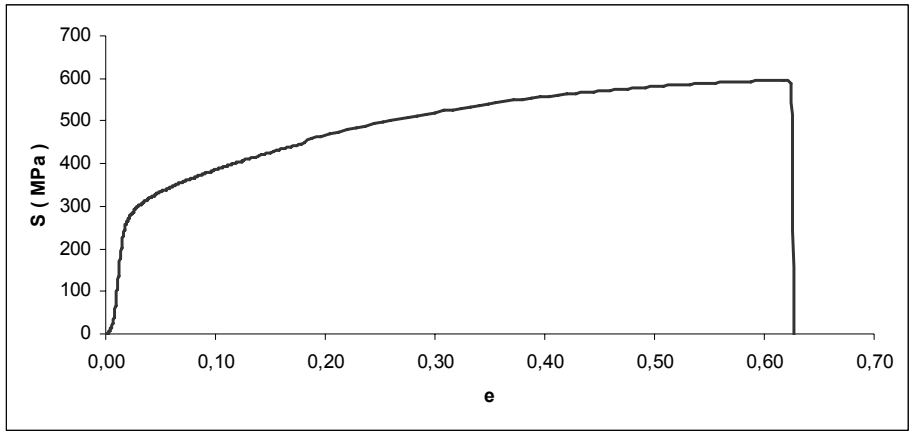


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.3

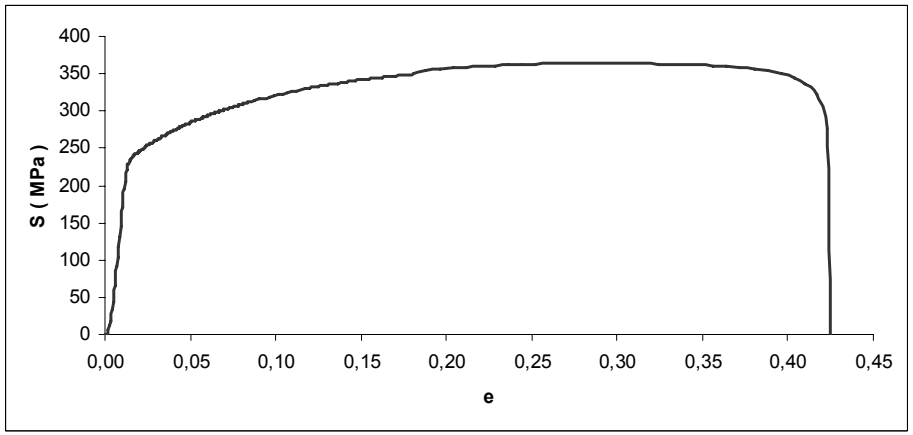


Şekil 8.28 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.3)

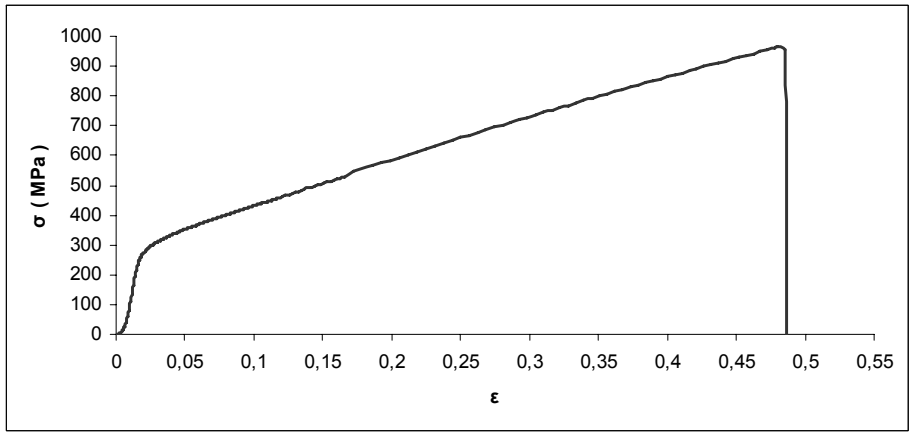
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.4



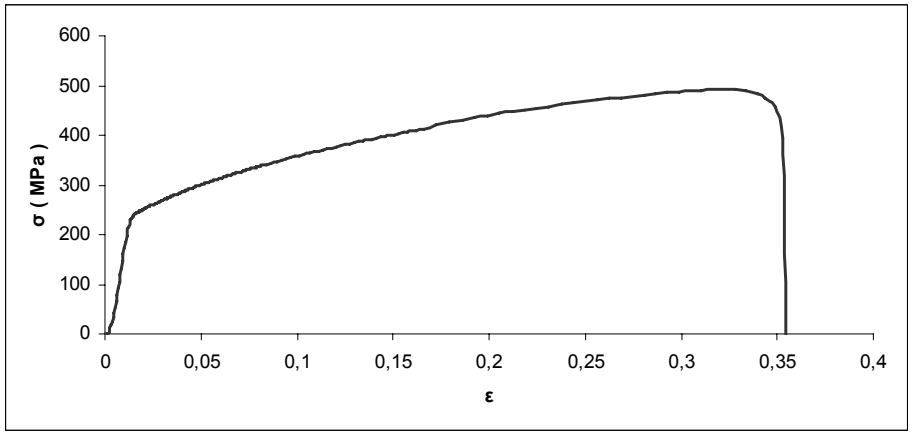
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.4



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.4

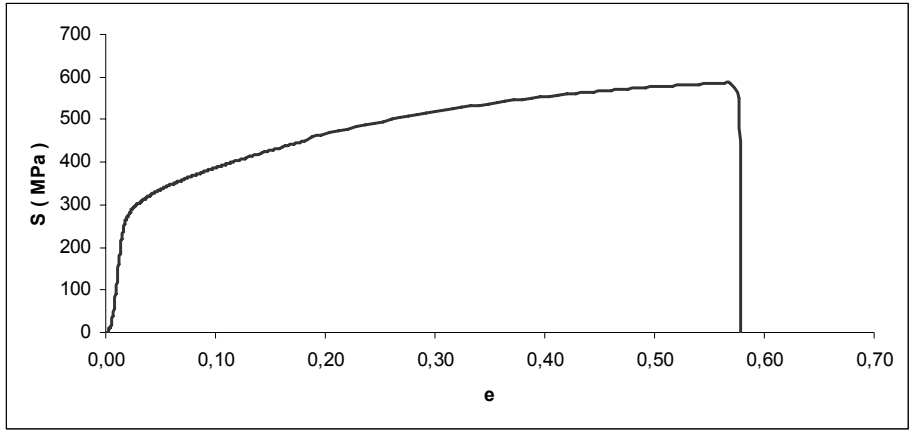


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.4

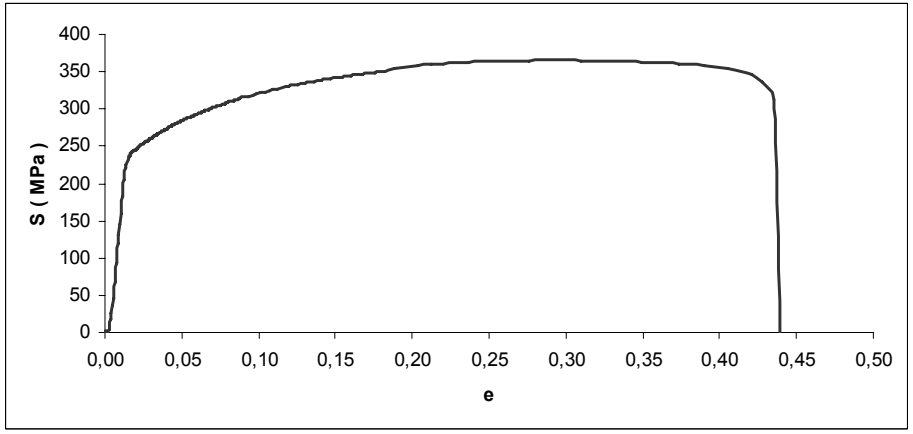


Şekil 8.29 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.4)

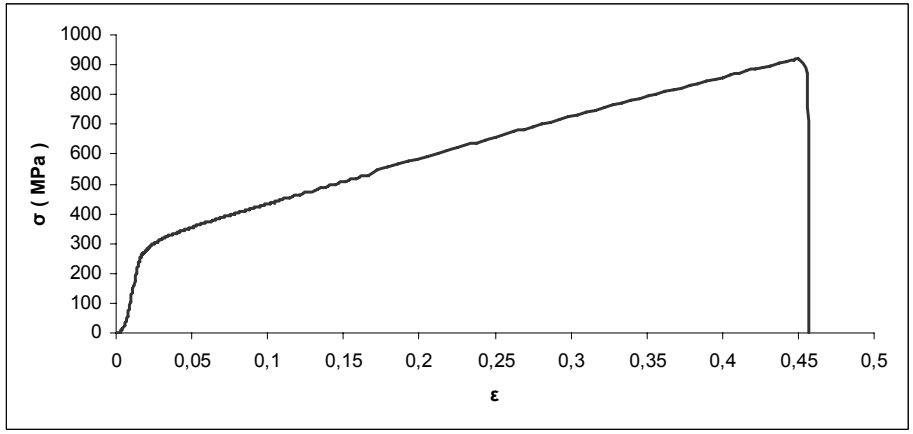
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.5



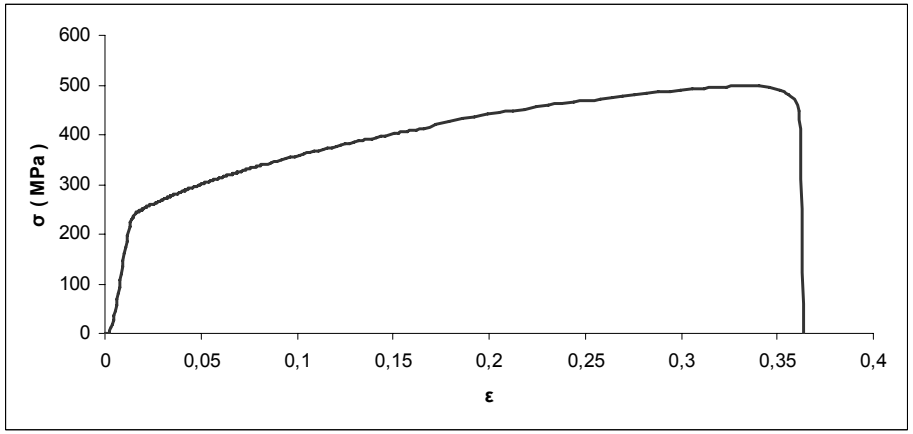
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.5



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 45° Deney No.5

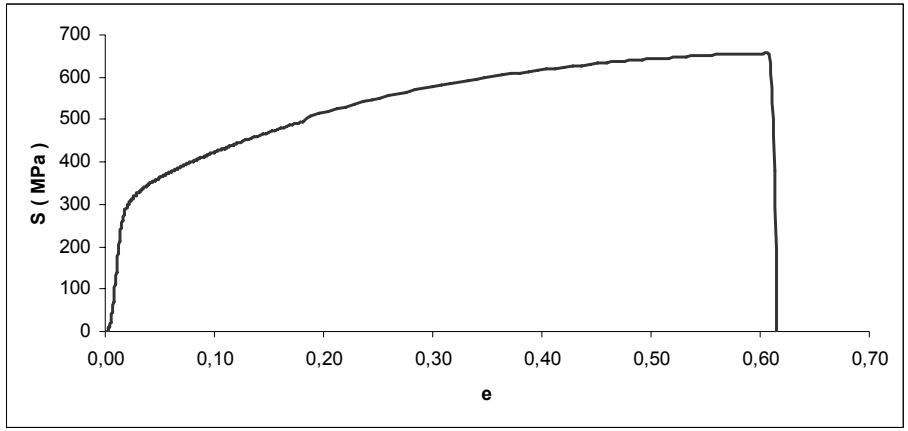


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 45° Deney No.5

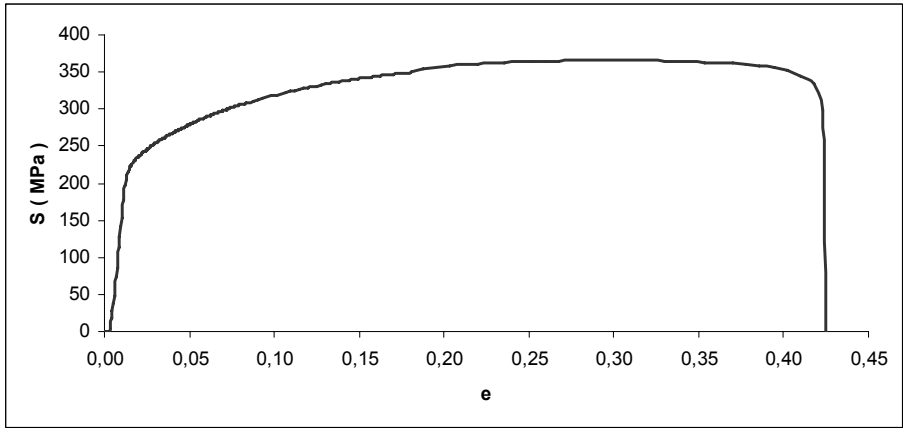


Şekil 8.30 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 45° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.5)

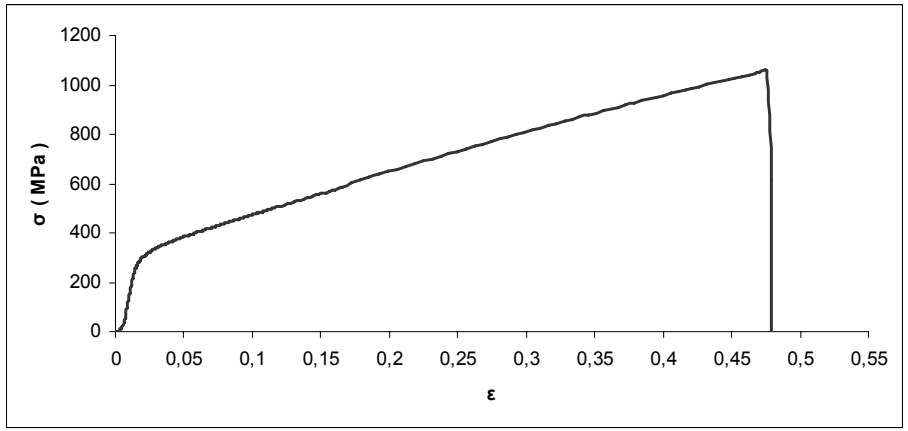
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.1



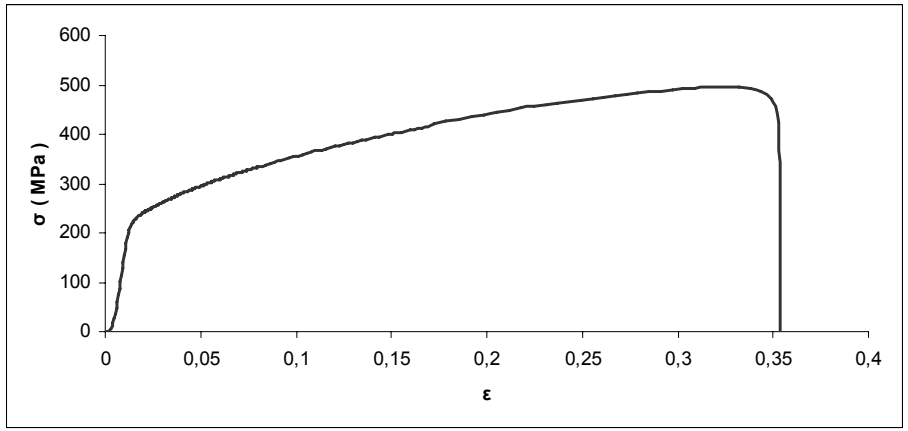
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.1



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.1

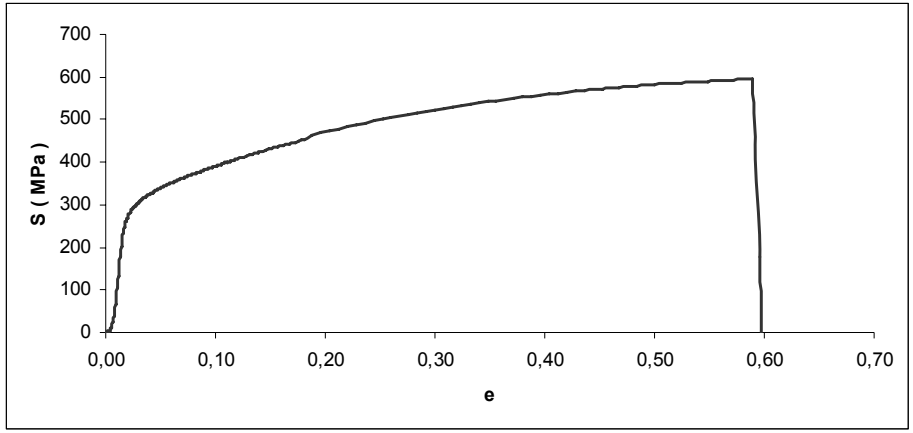


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.1

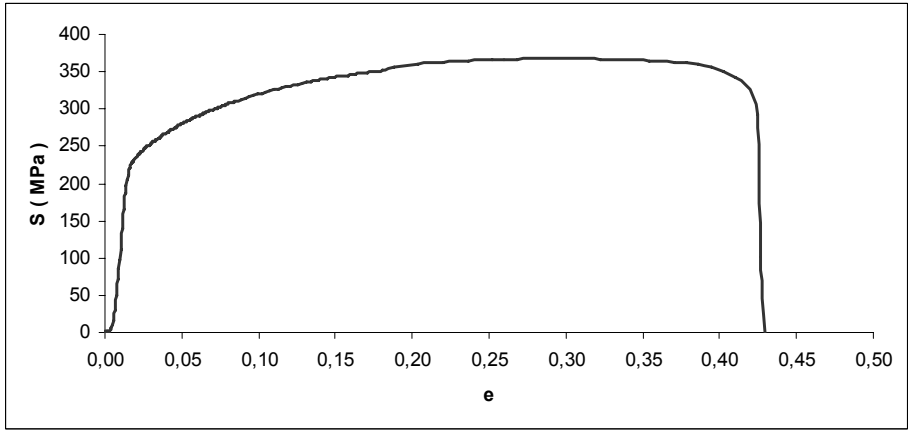


Şekil 8.31 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.1)

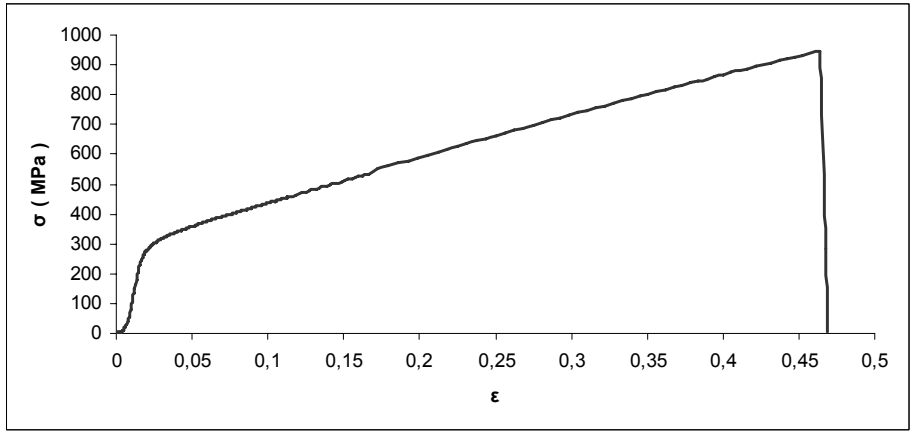
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.2



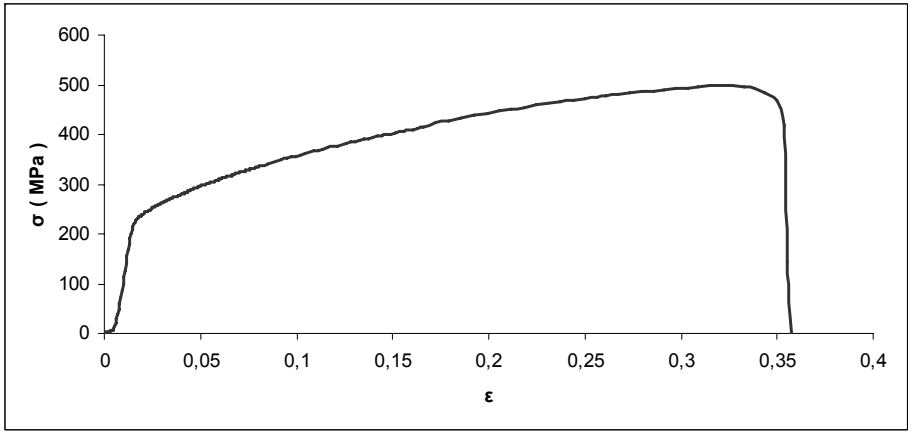
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.2



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.2

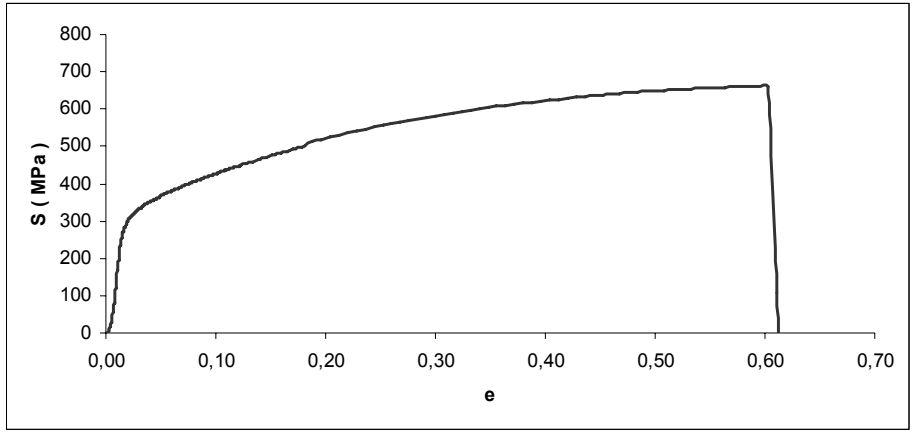


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.2

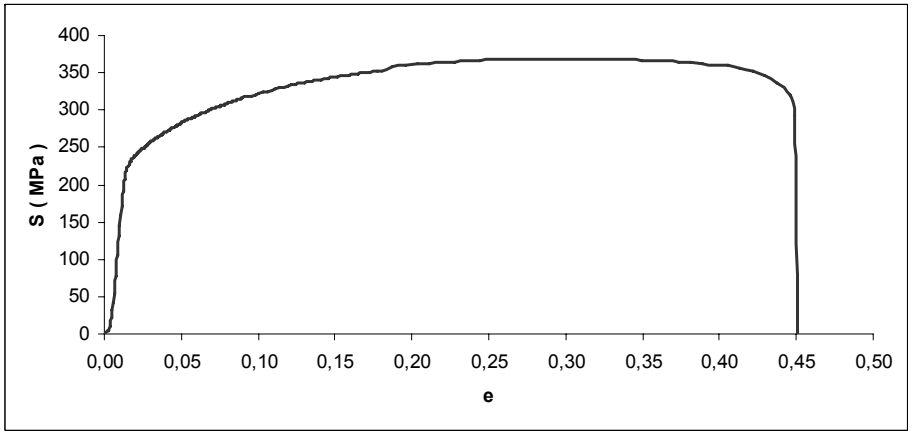


Şekil 8.32 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.2)

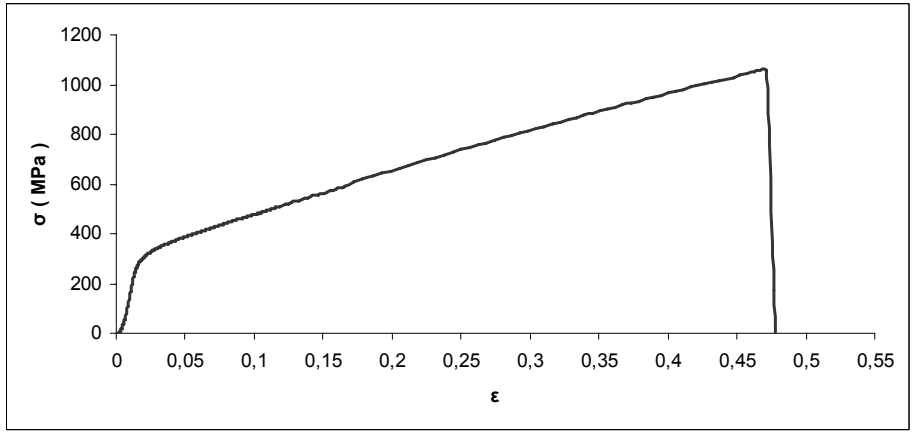
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.3



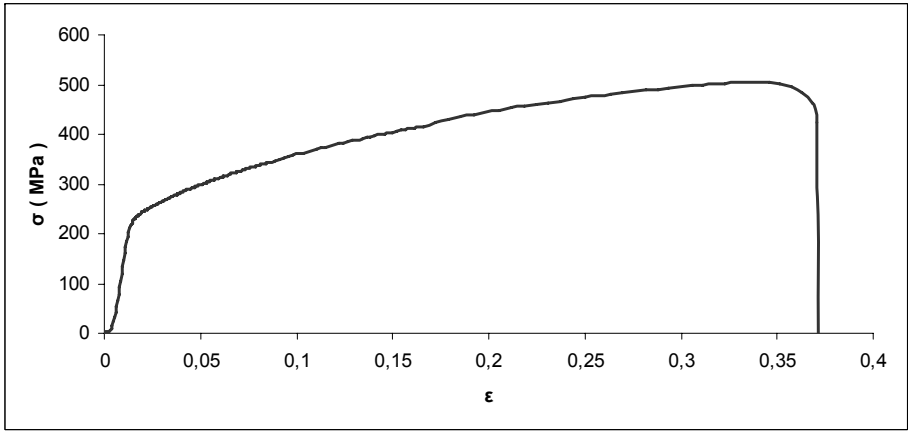
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.3



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.3

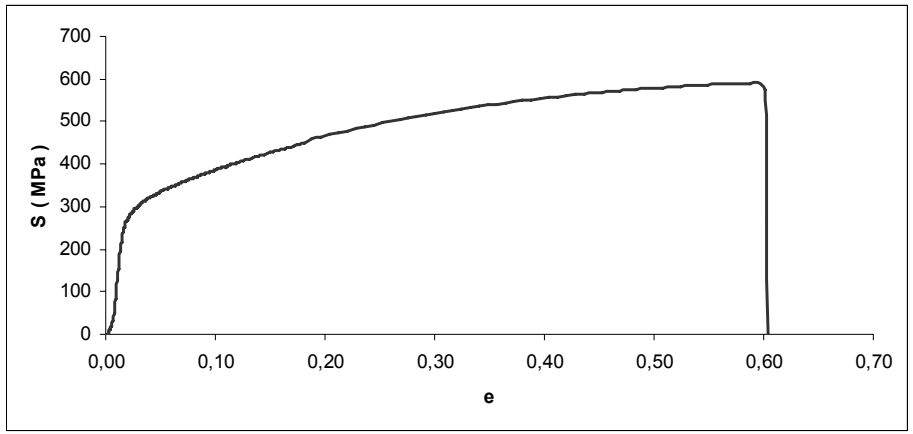


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.3

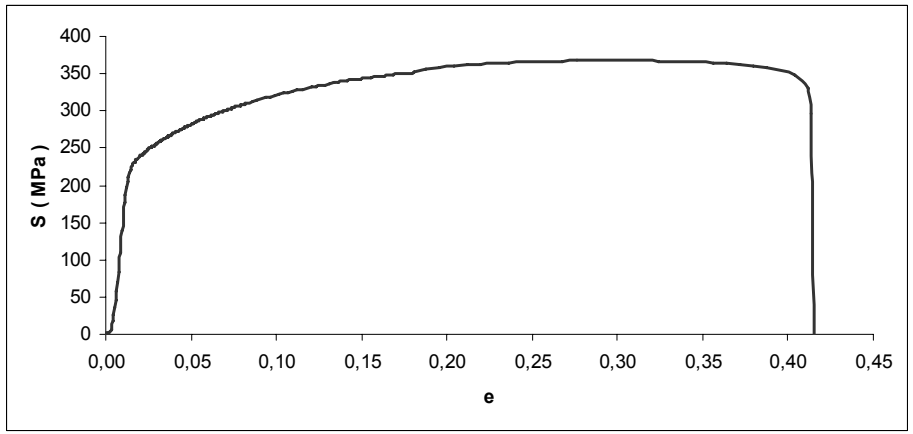


Şekil 8.33 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.3)

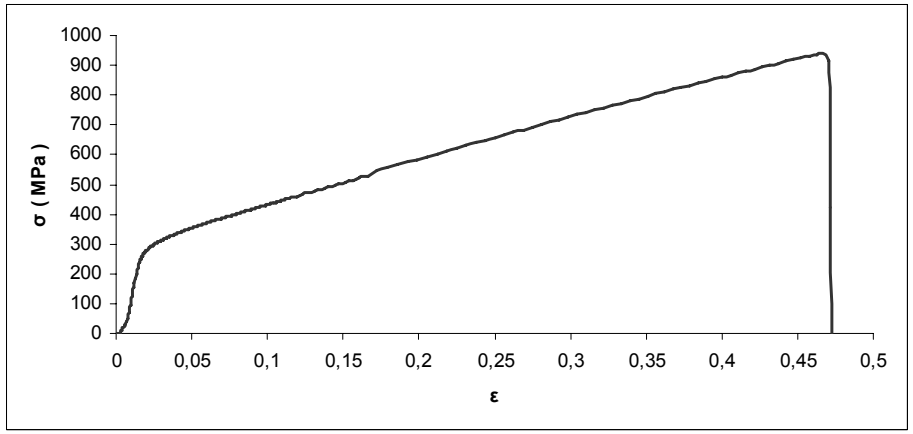
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.4



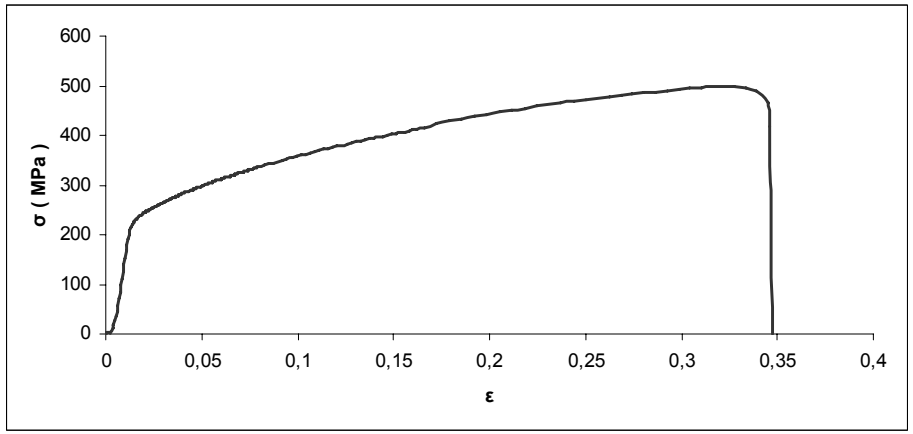
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.4



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.4

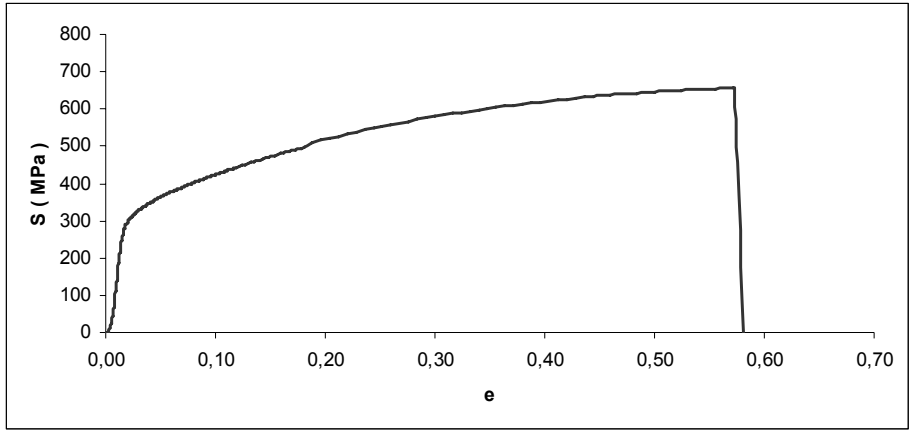


Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.4

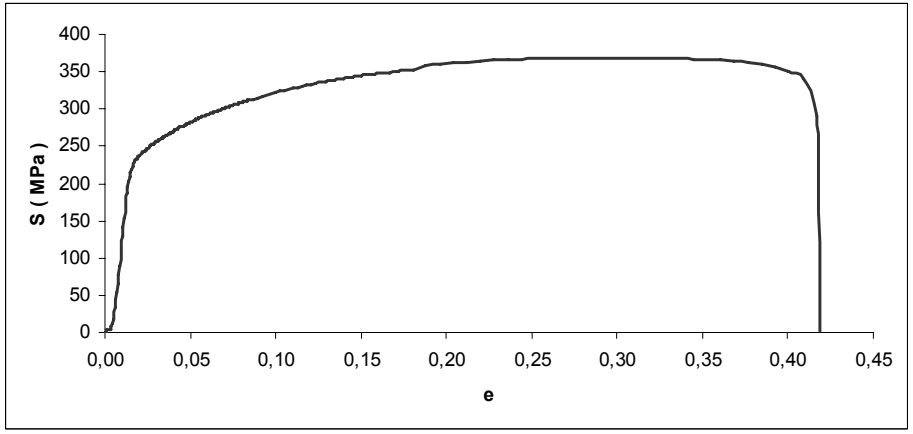


Şekil 8.34 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.4)

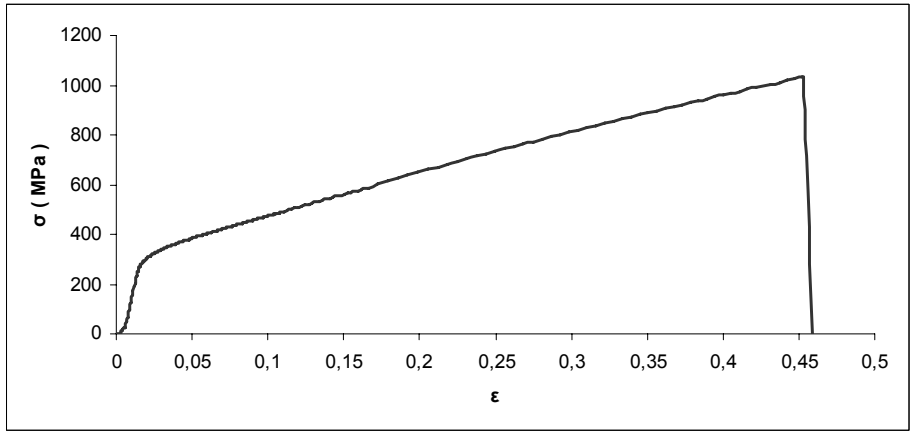
Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.5



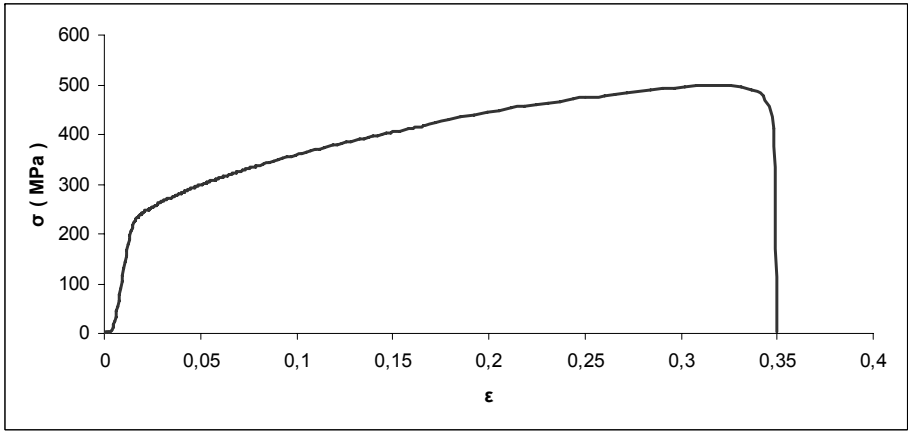
Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.5



Paslanmaz Çelik (304) Ani Hız θ = 90° Deney No.5



Galvaniz Sac (DX51) Ani Hız θ = 90° Deney No.5



Şekil 8.35 304 kalite Paslanmaz çelik ve DX51 kalite Galvaniz saca haddeleme yönüne 90° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının üç kat (32 mm/dak – 96 mm/dak) arttırılması ile nominal gerilme ve gerçek gerilmede oluşan sıçramalar (Deney No.5)

8.2.3. Farklı Çekme Hızlarında Bazı Mekanik Özelliklerdeki Değişimlerin Belirlenmesi

304 kalite paslanmaz çelik sac ile DX51 kalite soğuk haddelenmiş fosfatlanmış sac üzerine çinko kaplanmış galvaniz sac hadde yönüne paralel, hadde yönüne 45° ve hadde yönüne dik olacak şekilde farklı hızlar altında (32 mm/dak, 64 mm/dak, 96 mm/dak) çekme deneyleri uygulanmıştır. Bu deneylerden, malzemenin akma dayanımında, çekme dayanımında ve pekleşme üstelinde oluşan değişimler incelenmiştir. Bununla birlikte farklı gerinim değerlerinde (e = % 5, % 10, % 15 ve % 20) malzemelerin gerinim hızına duyarlılık üstelleri de hesaplanarak, bunların şekil değiştirme derecesi ile değişimi belirlenmiştir.

Bu hız ve doğrultularda elde edilen akma dayanımı, çekme dayanımı ve pekleşme üsteli ile e = % 5, % 10 , % 15 ve % 20 uzamalardaki gerilmeler (S ve σ), sırasıyla çizelge 8.17, 8.18, 8.19, 8.20, 8.21 ve 8.22' de verilmiştir. Değişik gerinim seviyelerindeki gerinim hızına duyarlılıklar (m) , (8.4) eşitliği kullanılarak belirlenmiştir. (Çizelge 8.24 ve 8.25)

Çizelge 8.17 304 kalite paslanmaz çelik sacın hadde yönüne 0° ' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	GERİNİM HIZI $\dot{e}$ [S^{-1}]	%0,2 AKMA DAYANIMI $\sigma_{A0,2}$ [Mpa]	ÇEKME DAYANIMI S_u [Mpa]	PEKLEŞME ÜSTELİ n	DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]
32	0,00666	288,407	660,707	0,389	1138,536
64	0,01332	292,765	663,202	0,386	1141,413
96	0,02000	296,787	665,774	0,382	1144,387

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	e=%5, 10,15 ve20 UZAMALARDAKİ GERÇEK GERİNİM HIZLARI				e=%5 UZAMADA GERİLMELER		e=%10 UZAMADA GERİLMELER		e=%15 UZAMADA GERİLMELER		e=%20 UZAMADA GERİLMELER	
	$\acute{\varepsilon}_{\%5}$ [s^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_{\%10}$ [s^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_{\%15}$ [s^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_{\%20}$ [s^{-1}]	$S_{\%5}$ [Mpa]	$\sigma_{\%5}$ [Mpa]	$S_{\%10}$ [Mpa]	$\sigma_{\%10}$ [Mpa]	$S_{\%15}$ [Mpa]	$\sigma_{\%15}$ [Mpa]	$S_{\%20}$ [Mpa]	$\sigma_{\%20}$ [Mpa]
32	0,00635	0,00606	0,00579	0,00556	568,054	913,374	626,256	1006,957	649,726	1044,694	659,127	1059,810
64	0,01269	0,01212	0,01158	0,01110	573,093	922,680	632,637	1018,546	655,227	1054,915	662,668	1066,895
96	0,01905	0,01818	0,01737	0,01670	578,763	928,915	636,796	1022,058	659,236	1058,074	667,976	1072,101

Çizelge 8.18 304 kalite paslanmaz çelik sacın hadde yönüne 45˚ ’ lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	**GERİNİM HIZI $\dot{e}$ [S^{-1}]**	**%0,2 AKMA DAYANIMI $\sigma_{A0,2}$ [Mpa]**	**ÇEKME DAYANIMI S_u [Mpa]**	**PEKLEŞME ÜSTELİ n**	**DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]**
32	0,00666	294,256	671,635	0,384	1150,715
64	0,01332	297,894	673,318	0,381	1155,417
96	0,02000	299,328	675,198	0,379	1158,832

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	**e=%5, 10,15 ve20 UZAMALARDAKİ GERÇEK GERİNİM HIZLARI**				**e=%5 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%10 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%15 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%20 UZAMADA GERİLMELER**	
	$\acute{\varepsilon}_{\%5}$ [s^{-1}]	**$\acute{\varepsilon}_{\%10}$ [s^{-1}]**	**$\acute{\varepsilon}_{\%15}$ [s^{-1}]**	**$\acute{\varepsilon}_{\%20}$ [s^{-1}]**	**$S_{\%5}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%5}$ [Mpa]**	**$S_{\%10}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%10}$ [Mpa]**	**$S_{\%15}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%15}$ [Mpa]**	**$S_{\%20}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%20}$ [Mpa]**
32	0,00635	0,00606	0,00579	0,00556	578,502	924,869	638,615	1020,973	661,697	1057,875	670,234	1071,523
64	0,01269	0,01212	0,01158	0,01110	581,962	929,655	642,427	1026,245	665,367	1062,891	672,923	1074,961
96	0,01905	0,01818	0,01737	0,01670	586,773	939,559	646,426	1035,077	668,738	1070,803	676,017	1082,459

Çizelge 8.19 304 kalite paslanmaz çelik sacın hadde yönüne 90˚ ’ lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	**GERİNİM HIZI $\dot{e}$ [S^{-1}]**	**%0,2 AKMA DAYANIMI $\sigma_{A0,2}$ [Mpa]**	**ÇEKME DAYANIMI S_u [Mpa]**	**PEKLEŞME ÜSTELİ n**	**DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]**
32	0,00666	288,878	649,879	0,394	1130,514
64	0,01332	291,965	652,935	0,392	1131,327
96	0,02000	295,863	655,235	0,389	1133,828

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	**e=%5, 10,15 ve20 UZAMALARDAKİ GERÇEK GERİNİM HIZLARI**				**e=%5 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%10 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%15 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%20 UZAMADA GERİLMELER**	
	$\acute{\varepsilon}_{\%5}$ [s^{-1}]	**$\acute{\varepsilon}_{\%10}$ [s^{-1}]**	**$\acute{\varepsilon}_{\%15}$ [s^{-1}]**	**$\acute{\varepsilon}_{\%20}$ [s^{-1}]**	**$S_{\%5}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%5}$ [Mpa]**	**$S_{\%10}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%10}$ [Mpa]**	**$S_{\%15}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%15}$ [Mpa]**	**$S_{\%20}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%20}$ [Mpa]**
32	0,00635	0,00606	0,00579	0,00556	560,976	894,756	620,342	989,446	643,344	1026,134	650,974	1038,304
64	0,01269	0,01212	0,01158	0,01110	564,311	898,947	622,942	992,346	645,186	1027,781	652,512	1039,452
96	0,01905	0,01818	0,01737	0,01670	567,370	909,494	626,115	1003,662	648,140	1038,968	654,967	1049,912

Çizelge 8.20 DX51 kalite galvaniz sacın hadde yönüne 0° ' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	**GERİNİM HIZI $\dot{e}$ [S^{-1}]**	**%0,2 AKMA DAYANIMI $\sigma_{A0,2}$ [Mpa]**	**ÇEKME DAYANIMI S_u [Mpa]**	**PEKLEŞME ÜSTELİ n**	**DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]**
32	0,00666	215,648	344,808	0,265	631,941
64	0,01332	220,704	349,231	0,263	632,318
96	0,02000	222,706	351,827	0,262	633,434

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	**e=%5, 10,15 ve20 UZAMALARDAKİ GERÇEK GERİNİM HIZLARI**				**e=%5 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%10 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%15 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%20 UZAMADA GERİLMELER**	
	$\acute{\varepsilon}_{\%5}$ [s^{-1}]	**$\acute{\varepsilon}_{\%10}$ [s^{-1}]**	**$\acute{\varepsilon}_{\%15}$ [s^{-1}]**	**$\acute{\varepsilon}_{\%20}$ [s^{-1}]**	**$S_{\%5}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%5}$ [Mpa]**	**$S_{\%10}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%10}$ [Mpa]**	**$S_{\%15}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%15}$ [Mpa]**	**$S_{\%20}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%20}$ [Mpa]**
32	0,00635	0,00606	0,00579	0,00556	300,594	424,490	331,414	468,013	344,244	486,132	348,108	491,588
64	0.01269	0,01212	0,01158	0.01110	301,771	427,865	333,124	472,320	345,019	489,185	348,937	494,740
96	0,01905	0,01818	0,01737	0,01670	302,923	430,817	333,447	474,229	345,880	491,911	349,426	496,954

Çizelge 8.21 DX51 kalite galvaniz sacın hadde yönüne 45° ' lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	GERİNİM HIZI $\dot{e}$ [S^{-1}]	%0,2 AKMA DAYANIMI $\sigma_{A0,2}$ [Mpa]	ÇEKME DAYANIMI S_u [Mpa]	PEKLEŞME ÜSTELİ n	DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]
32	0,00666	229,730	357,187	0,250	639,711
64	0,01332	232,196	361,211	0,248	642,658
96	0,02000	234,316	362,846	0,247	645,534

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	e=%5, 10,15 ve20 UZAMALARDAKİ GERÇEK GERİNİM HIZLARI				e=%5 UZAMADA GERİLMELER		e=%10 UZAMADA GERİLMELER		e=%15 UZAMADA GERİLMELER		e=%20 UZAMADA GERİLMELER	
	$\acute{\varepsilon}_{\%5}$ [s^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_{\%10}$ [s^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_{\%15}$ [s^{-1}]	$\acute{\varepsilon}_{\%20}$ [s^{-1}]	$S_{\%5}$ [Mpa]	$\sigma_{\%5}$ [Mpa]	$S_{\%10}$ [Mpa]	$\sigma_{\%10}$ [Mpa]	$S_{\%15}$ [Mpa]	$\sigma_{\%15}$ [Mpa]	$S_{\%20}$ [Mpa]	$\sigma_{\%20}$ [Mpa]
32	0,00635	0,00606	0,00579	0,00556	310,473	434,467	342,523	479,316	355,882	498,011	359,887	503,615
64	0.01269	0,01212	0,01158	0.01110	311,469	435,714	343,830	480,984	356,107	498,158	360,151	503,815
96	0,01905	0,01818	0,01737	0,01670	312,420	440,700	344,116	485,410	357,075	503,691	360,534	508,569

Çizelge 8.22 DX51 kalite galvaniz sacın hadde yönüne 90˚ ’ lik doğrultuda ve değişik hızlar altında uygulanan çekme deneylerine göre, bazı mekanik özelliklerinde ve farklı uzamalardaki gerilme seviyelerinde meydana gelen değişimler

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	**GERİNİM HIZI $\dot{e}$ [S^{-1}]**	**%0,2 AKMA DAYANIMI $\sigma_{A0,2}$ [Mpa]**	**ÇEKME DAYANIMI S_u [Mpa]**	**PEKLEŞME ÜSTELİ n**	**DAYANIM KATSAYISI K [Mpa]**
32	0,00666	214,872	343,122	0,266	622,811
64	0,01332	215,498	346,635	0,265	623,953
96	0,02000	221,101	348,135	0,262	626,313

ÇEKME HIZI $V_{çek}$ [mm/dak]	**e=%5, 10,15 ve20 UZAMALARDAKİ GERÇEK GERİNİM HIZLARI**				**e=%5 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%10 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%15 UZAMADA GERİLMELER**		**e=%20 UZAMADA GERİLMELER**	
	$\acute{\varepsilon}_{\%5}$ [s^{-1}]	**$\acute{\varepsilon}_{\%10}$ [s^{-1}]**	**$\acute{\varepsilon}_{\%15}$ [s^{-1}]**	**$\acute{\varepsilon}_{\%20}$ [s^{-1}]**	**$S_{\%5}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%5}$ [Mpa]**	**$S_{\%10}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%10}$ [Mpa]**	**$S_{\%15}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%15}$ [Mpa]**	**$S_{\%20}$ [Mpa]**	**$\sigma_{\%20}$ [Mpa]**
32	0,00635	0,00606	0,00579	0,00556	298,573	417,814	329,786	461,493	340,877	477,013	345,257	483,142
64	0,01269	0,01212	0,01158	0,01110	299,048	418,338	330,119	461,803	341,407	477,594	345,789	483,724
96	0,01905	0,01818	0,01737	0,01670	300,497	423,881	331,427	467,511	342,137	482,619	346,045	488,131

Çizelge 8.23 304 kalite paslanmaz çelik sacın Vçek = 32 mm / dak ve Vçek = 96 mm/ dak' lık hız değerleri altında uygulanan çekme deneylerine göre, değişik uzama değerlerinde hesaplanan gerinim hızına duyarlılık üstelleri.

	e = % 5, % 10, % 15 ve % 20 UZAMA DEĞERLERİNDEKİ GERİNİM HIZINA DUYARLILIK ÜSTELLERİ			
HADDELEME VE ÇEKME YÖNÜ ARASINDAKİ AÇI	$m_{\%5}$	$m_{\%10}$	$m_{\%15}$	$m_{\%20}$
0°	0,015357	0,013549	0,011583	0,010484
45°	0,014344	0,012488	0,011057	0,009232
90°	0,014870	0,012985	0,011314	0,010109

Çizelge 8.24 DX51 kalite galvaniz sacın Vçek = 32 mm / dak ve Vçek = 96 mm/ dak' lık hız değerleri altında uygulanan çekme deneylerine göre, değişik uzama değerlerinde hesaplanan gerinim hızına duyarlılık üstelleri

	e = % 5, % 10, % 15 ve % 20 UZAMA DEĞERLERİNDEKİ GERİNİM HIZINA DUYARLILIK ÜSTELLERİ			
HADDELEME VE ÇEKME YÖNÜ ARASINDAKİ AÇI	$m_{\%5}$	$m_{\%10}$	$m_{\%15}$	$m_{\%20}$
0°	0,013467	0,012010	0,010757	0,009871
45°	0,012966	0,011500	0,010322	0,008901
90°	0,013123	0,011793	0,010635	0,009340

8.2.4 Plastik Gerinim Oranının Belirlenmesi

304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz sacın, haddeleme yönüne 0° , 45° ve 90° 'lik doğrultularda uygulanan 3 adet çekme deneyine göre e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısı (R) belirlenmiştir. Deneyden önce bir mikrometre ile numunelerin genişliği, ölçme uzunluğu içerisinde 5 ayrı noktada hassas olarak ölçülmüş ve ekstansometre ölçme uzunluğu her deneyden önce kalibre edilmiştir. Deneyler e = % 15 uzamada sona erdirilmiş ve numunelerdeki daralma gerinimleri, yine bu 5 noktada tekrar ölçüm yapmak suretiyle belirlenmiştir. Kalınlık ölçümü ile incelme gerinimlerinin belirlenmesi hatalara neden olabileceğinden bu gerinimler, hacim sabitliği esasına göre hesaplanmıştır. ($\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$) Sonuç olarak, haddeleme yönüne 0° , 45° ve 90° ' lik doğrultulardaki numuneler için plastik gerinim oranları, sırasıyla Çizelge 8.25, Çizelge 8.26, Çizelge 8.27, Çizelge 8.28, Çizelge 8.29 ve Çizelge 8.30' daki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 8.25 304 kalitesindeki paslanmaz çelik saca, hadde yönü 0° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_0) belirlenmesi

		DENEY 1			DENEY 2			DENEY 3		
		b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)	b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)	b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)
ÖLÇÜM NOKTALARI	1	20,056	19,123	-0,933	20,052	19,119	-0,933	20,034	19,125	-0,909
	2	20,021	19,119	-0,902	20,048	19,121	-0,927	20,036	19,119	-0,917
	3	20,033	19,122	-0,911	20,051	19,123	-0,928	20,039	19,122	-0,917
	4	20,009	19,123	-0,886	20,047	19,122	-0,925	20,037	19,118	-0,919
	5	20,072	19,119	-0,953	20,053	19,117	-0,936	20,036	19,121	-0,915
ORTALAMA		20,038	19,121	-0,917	20,050	19,120	-0,930	20,036	19,121	-0,915
e_1		0,150000			0,150000			0,150000		
$\varepsilon_1=\ln(1+e_1)$		0,139762			0,139762			0,139762		
$e_2=\Delta b/b_0$		-0,045763			-0,046374			-0,045687		
$\varepsilon_2=\ln(1+e_2)$		-0,046843			-0,047483			-0,046763		
$\varepsilon_3=-(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$		-0,092919			-0,092279			-0,092999		
$R= \varepsilon_2 / \varepsilon_3$		0,504			0,515			0,503		
ORTALAMA R_0		**0,507**								

Çizelge 8.26 304 kalitesindeki paslanmaz çelik saca, hadde yönü 45° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_{45}) belirlenmesi

		DENEY 1			DENEY 2			DENEY 3		
		b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)	b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)	b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)
ÖLÇÜM NOKTALARI	1	20,056	19,189	-0,867	20,052	19,188	-0,864	20,034	19,186	-0,848
	2	20,021	19,193	-0,828	20,048	19,187	-0,861	20,036	19,189	-0,847
	3	20,033	19,187	-0,846	20,051	19,191	-0,860	20,039	19,191	-0,848
	4	20,009	19,188	-0,821	20,047	19,190	-0,857	20,037	19,188	-0,849
	5	20,072	19,192	-0,880	20,053	19,191	-0,862	20,036	19,192	-0,844
ORTALAMA		20,038	19,190	-0,848	20,050	19,189	-0,861	20,036	19,189	-0,847
e_1		0,150000			0,150000			0,150000		
$\varepsilon_1=\ln(1+e_1)$		0,139762			0,139762			0,139762		
$e_2=\Delta b/b_0$		-0,042339			-0,042932			-0,042283		
$\varepsilon_2=\ln(1+e_2)$		-0,043262			-0,043881			-0,043203		
$\varepsilon_3=-(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$		-0,096500			-0,095881			-0,096559		
$R= \varepsilon_2 / \varepsilon_3$		0,448			0,458			0,447		
ORTALAMA R_{45}		**0,451**								

Çizelge 8.27 304 kalitesindeki paslanmaz çelik saca, hadde yönü 90° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_{90}) belirlenmesi

		DENEY 1			DENEY 2			DENEY 3		
		b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)	b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)	b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)
ÖLÇÜM NOKTALARI	1	20,056	19,067	-0,989	20,052	19,076	-0,976	20,034	19,066	-0,968
	2	20,021	19,058	-0,963	20,048	19,071	-0,977	20,036	19,063	-0,973
	3	20,033	19,069	-0,964	20,051	19,068	-0,983	20,039	19,057	-0,982
	4	20,009	19,054	-0,955	20,047	19,072	-0,975	20,037	19,053	-0,984
	5	20,072	19,061	-1,011	20,053	19,067	-0,986	20,036	19,055	-0,981
ORTALAMA		20,038	19,062	-0,976	20,050	19,071	-0,979	20,036	19,059	-0,978
e_1		0,150000			0,150000			0,150000		
$\varepsilon_1=\ln(1+e_1)$		0,139762			0,139762			0,139762		
$e_2=\Delta b/b_0$		-0,048727			-0,048847			-0,048791		
$\varepsilon_2=\ln(1+e_2)$		-0,049954			-0,050081			-0,050022		
$\varepsilon_3=-(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$		-0,089808			-0,089681			-0,089740		
$R= \varepsilon_2 / \varepsilon_3$		0,556			0,558			0,557		
ORTALAMA R_{90}		**0,557**								

Çizelge 8.28 DX51 kalite galvaniz sacın, hadde yönü 0° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_0) belirlenmesi

		DENEY 1			DENEY 2			DENEY 3		
		b_0 (mm)	**b1 (mm)**	**Δb (mm)**	**b_0 (mm)**	**b1 (mm)**	**Δb (mm)**	**b_0 (mm)**	**b1 (mm)**	**Δb (mm)**
ÖLÇÜM NOKTALARI	**1**	20,053	18,522	-1,531	20,051	18,545	-1,506	20,039	18,556	-1,483
	2	20,045	18,526	-1,519	20,043	18,551	-1,492	20,041	18,553	-1,488
	3	20,053	18,531	-1,522	20,052	18,548	-1,504	20,042	18,557	-1,485
	4	20,039	18,539	-1,500	20,049	18,544	-1,505	20,041	18,563	-1,478
	5	20,048	18,534	-1,514	20,050	18,553	-1,497	20,038	18,554	-1,484
ORTALAMA		20,048	18,530	-1,517	20,049	18,548	-1,501	20,040	16,867	-1,484
e_1		0,150000			0,150000			0,150000		
$\varepsilon_1=\ln(1+e_1)$		0,139762			0,139762			0,139762		
$e_2=\Delta b/b_0$		-0,075680			-0,074857			-0,074031		
$\varepsilon_2=\ln(1+e_2)$		-0,078697			-0,077807			-0,076915		
$\varepsilon_3=-(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$		-0,061065			-0,061955			-0,062847		
$R= \varepsilon_2 / \varepsilon_3$		1,289			1,256			1,224		
ORTALAMA R_0		**1,256**								

Çizelge 8.29 DX51 kalite galvaniz sacın, hadde yönü 45° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_{45}) belirlenmesi

		DENEY 1			DENEY 2			DENEY 3		
		b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)	b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)	b_0 (mm)	b1 (mm)	Δb (mm)
ÖLÇÜM NOKTALARI	1	20,053	18,621	-1,432	20,051	18,645	-1,406	20,032	18,656	-1,376
	2	20,041	18,634	-1,407	20,047	18,651	-1,396	20,031	18,653	-1,378
	3	20,043	18,629	-1,414	20,048	18,648	-1,400	20,035	18,657	-1,378
	4	20,049	18,619	-1,430	20,046	18,652	-1,394	20,042	18,652	-1,390
	5	20,051	18,633	-1,418	20,052	18,648	-1,404	20,039	18,649	-1,390
ORTALAMA		20,047	18,627	-1,420	20,049	18,649	-1,400	20,036	16,867	-1,382
e_1		0,150000			0,150000			0,150000		
$\varepsilon_1=\ln(1+e_1)$		0,139762			0,139762			0,139762		
$e_2=\Delta b/b_0$		-0,070842			-0,069830			-0,068996		
$\varepsilon_2=\ln(1+e_2)$		-0,073477			-0,072388			-0,071492		
$\varepsilon_3=-(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$		-0,066285			-0,067374			-0,068270		
$R= \varepsilon_2 / \varepsilon_3$		1,108			1,074			1,047		
ORTALAMA R_{45}		**1,077**								

Çizelge 8.30 DX51 kalite galvaniz sacın, hadde yönü 90° ‘ lik doğrultuda uygulanan çekme deneylerinden, e = % 15 uzamadaki anizotropi katsayısının (R_{90}) belirlenmesi

		DENEY 1			DENEY 2			DENEY 3		
		b_0 (mm)	**b1 (mm)**	**Δb (mm)**	**b_0 (mm)**	**b1 (mm)**	**Δb (mm)**	**b_0 (mm)**	**b1 (mm)**	**Δb (mm)**
ÖLÇÜM NOKTALARI	**1**	20,056	18,467	-1,589	20,052	18,476	-1,576	20,034	18,506	-1,528
	2	20,021	18,458	-1,563	20,048	18,471	-1,577	20,036	18,503	-1,533
	3	20,033	18,469	-1,564	20,051	18,468	-1,583	20,039	18,507	-1,532
	4	20,009	18,443	-1,566	20,047	18,472	-1,575	20,037	18,503	-1,534
	5	20,072	18,461	-1,611	20,053	18,467	-1,586	20,036	18,515	-1,521
ORTALAMA		20,038	18,460	-1,579	20,050	18,471	-1,579	20,036	16,867	-1,530
e_1		0,150000			0,150000			0,150000		
$\varepsilon_1=\ln(1+e_1)$		0,139762			0,139762			0,139762		
$e_2=\Delta b/b_0$		-0,078780			-0,078772			-0,076341		
$\varepsilon_2=\ln(1+e_2)$		-0,082056			-0,082048			-0,079412		
$\varepsilon_3=-(\varepsilon_1+\varepsilon_2)$		-0,057706			-0,057714			-0,060350		
$R= \varepsilon_2 / \varepsilon_3$		1,422			1,422			1,316		
ORTALAMA R_{90}		**1,386**								

8.3 Erichsen Çökertme Deneyleri

304 kalitesindeki paslanmaz çelik sacla galvaniz levhalardan 90 mm genişlikte kesilen şeritler, kuru olarak ve grafitli gres ile yağlanarak, değişik hızlar altında Erichsen çökertme testlerine tabi tutulmuştur. Deneylerde ERICHSEN deney makinesi kullanılmıştır. Sac numunenin genişliği 90 mm ve kalınlığı 0.5 mm olduğundan kullanılması gereken küresel uçlu ıstampanın uç yarıçapı 20 mm' dir. Ayrıca kalıbın delik çapı 27 mm olarak seçilmiştir. Kalıp ile tutucu arasına konulan numuneye yaklaşık 1000 kp bir kuvvet uygulanmalıdır. Çökertme işlemleri aynı sac şeritler üzerinde yapılabilir, ancak çökertilen sac bölgesinin merkezinin kenarlara olan uzaklığı minimum 45 mm ve diğer çökertilen bölgenin merkezine olan uzaklığı minimum 90 mm olmalıdır.

DIN 50101 Standardına bakılarak çökertme hızları 5, 10, 15 ve 20 mm / dak. seçilmiştir. Her bir durum için uygulanan 3 deneyin ortalaması alınmıştır. 100 mm / dak. olarak seçilen hız değeri ise yüksek hızdaki şekil değiştirmelerde fikir vermesi açısından yapılmıştır. Erichsen çökertme deneylerinde deney sonu, yükün maksimuma erişmesinden sonra ani bir düşüş yaptığı an (sacın çökertme ile yırtıldığı an) olarak belirlenmiştir ve cihazın skalasında o anda okunan çökertme kuvveti okunarak ($F_{çök}$) $_{max}$ bulunur.

Çizelge 8.31 304 kalite paslanmaz çelik saca, kuru ve grafitli gres yağı ile yağlamalı olarak değişik hızlar altında uygulanan çökertme deneylerinden elde edilen Erichsen çökertme değerleri ve maksimum çökertme kuvvetleri

Deney Hızı Vçök [mm/dak]	Yağlama	Deney No	EÇD [mm]	F(çök)max [kN]
5	KURU	1	12,9	19,8
		2	12,8	19,8
		3	12,7	19,7
		ORT	**12,8**	**19,8**
10	KURU	1	12,4	19,1
		2	13,3	19,4
		3	12,4	19,1
		ORT	**12,7**	**19,2**
20	KURU	1	11,4	17,0
		2	11,6	17,0
		3	11,3	17,0
		ORT	**11,4**	**17,0**
100	KURU	1	12,1	17,0
		2	12,0	17,0
		3	11,6	17,0
		ORT	**11,9**	**17,0**

Deney Hızı Vçök [mm/dak]	Yağlama	Deney No	EÇD [mm]	F(çök)max [kN]
5	YAĞLI	1	13,3	19,0
		2	13,7	18,8
		3	13,3	18,8
		ORT	**13,4**	**18,9**
10	YAĞLI	1	13,1	18,1
		2	13,0	18,2
		3	12,7	18,1
		ORT	**12,9**	**18,1**
20	YAĞLI	1	13,3	19,5
		2	13,1	19,5
		3	13,6	19,8
		ORT	**13,3**	**19,6**
100	YAĞLI	1	12,1	17,0
		2	12,2	17,2
		3	12,4	17,2
		ORT	**12,2**	**17,1**

Çizelge 8.32 DX 51 kalite galvaniz saca, kuru ve grafitli gres yağı ile yağlamalı olarak değişik hızlar altında uygulanan çökertme deneylerinden elde edilen Erichsen çökertme değerleri ve maksimum çökertme kuvvetleri

Deney Hızı Vçök [mm/dak]	Yağlama	Deney No	EÇD [mm]	F(çök)max [kN]
5	KURU	1	8,7	8,2
		2	8,4	7,9
		3	8,4	7,9
		ORT	**8,5**	**8,0**
10	KURU	1	8,3	7,9
		2	8,2	7,8
		3	8,3	7,9
		ORT	**8,3**	**7,9**
20	KURU	1	8,0	7,8
		2	8,0	7,5
		3	7,8	7,1
		ORT	**7,9**	**7,5**
100	KURU	1	8,4	8,0
		2	8,5	8,0
		3	8,1	7,9
		ORT	**8,3**	**8,0**

Deney Hızı Vçök [mm/dak]	Yağlama	Deney No	EÇD [mm]	F(çök)max [kN]
5	YAĞLI	1	9,4	8,0
		2	9,4	8,1
		3	9,6	8,1
		ORT	**9,5**	**8,1**
10	YAĞLI	1	10,0	8,8
		2	9,6	8,5
		3	9,4	8,5
		ORT	**9,7**	**8,6**
20	YAĞLI	1	9,7	8,1
		2	9,4	8,0
		3	9,3	8,0
		ORT	**9,5**	**8,0**
100	YAĞLI	1	9,2	8,1
		2	9,6	8,1
		3	9,4	8,0
		ORT	**9,4**	**8,1**

8.4 Derin Çekme Deneyleri

Genişliği 90 mm olan elimizdeki sac şeritlerden değişik çaplarda kesilen dairesel ilkel pullar, ERICHSEN deney makinesinde derin çekme deneylerine tabi tutulmuşlardır. ERICHSEN deney cihazında ayrı bir ünite olarak kesme kalıpları da mevcuttur. Makine üzerindeki kesme kalıpları Ø 55 mm'den Ø 77 mm'ye kadar bir aralıkta 5 mm aralıklarla artan kalıp çaplarına sahiptir. Bu deneyler, Swift derin çekme deneyleri ile prensip olarak aynı olmasına rağmen, takım boyutları açısından farklılık göstermektedir. Deneylerde kullanılan düz tabanlı ıstampanın çapı d = 33 mm, kalıbın delik çapı d_k =34.90 mm (sac kalınlığı 1 mm'den küçükler için) , kalıp ağzı köşe ve ıstampa köşe yuvarlatma yarıçapları ise $r_d = r_s = 5$ mm' dir. Derin çekme işleminde bastırıcının uyguladığı basınç bulunmaktadır.

$$P_b = \%0{,}75\ \sigma_A \qquad (8.8)$$

Bastırıcı kuvveti ilkel pul çaplarına göre hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan hızlar ise 100, 200 ve 400 mm / dak olarak seçilmiştir. Standartlarda belirli bir derin çekme hızı bulunmamaktadır, ancak işletmede şekillendirilen sacların şekillendirme hızına uygun olacak şekilde hız değerleri seçilmiştir.Ayrıca derin çekilebilme oranı (LDR = D_{max} /d) hesaplanarak kullanılan sacların derin çekilebilirliği araştırılmıştır.

Çizelge 8.33 304 Kalite paslanmaz çelik sac için farklı hızlarda ve koşullardaki maksimum derin çekme kuvveti

			KURU DERİN ÇEKME	YAĞLI DERİN ÇEKME	
D (mm)	**F_b (kN)**	**$V_{dç}$ (mm/dak)**	**$[(F_{dç})_{max}]_{kuru}$ (kN)**	**$[(F_{dç})_{max}]_{yağlı}$ (kN)**	**LDR**
Ø55	4,04	100	25,8	25,8	**1,67**
		200	26,0	25,8	
		400	25,8	25,7	
Ø60	4,123	100	32,0	31,5	**1,81**
		200	32,5	32,0	
		400	32,5	31,8	
Ø65	5,15	100	43,0	40,5	**1,96**
		200	41,0	40,0	
		400	41(-)	40,0	
Ø70	6,212	100	40(-)	40(-)	**2,12**
		200	40(-)	40(-)	
		400	40(-)	40(-)	

Çizelge 8.33 de görülen (-) işaretleri numunenin çekilemediği ve yırtıldığı anlamına gelmektedir. Şekil 8.36'da derin çekme testleri yapılmış farklı pul çaplarındaki saclar görülmektedir.

Şekil 8.36 Farklı pul çaplarına göre yapılan derin çekme testleri (Arçelik A.Ş., 2008)

Çizelge 8.34 DX 51 Kalite galvaniz sac için farklı hızlarda ve koşullardaki maksimum derin çekme kuvveti

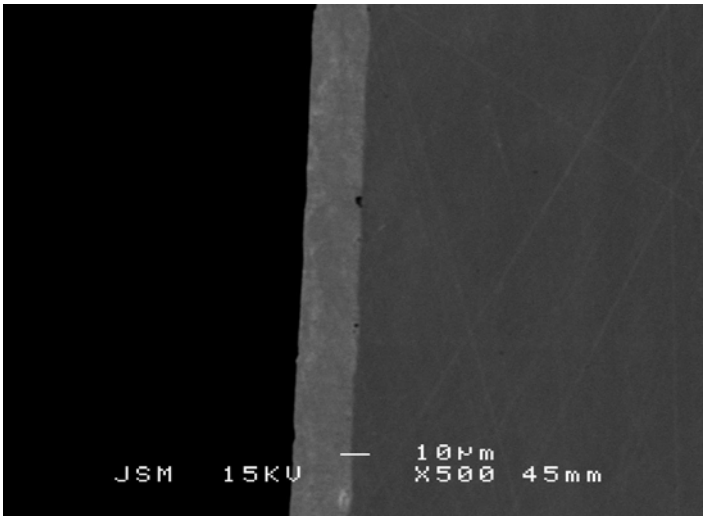
			KURU DERİN ÇEKME	YAĞLI DERİN ÇEKME	
D (mm)	**F_b (kN)**	**$V_{dç}$ (mm/dak)**	**$[(F_{dç})_{max}]_{kuru}$ (kN)**	**$[(F_{dç})_{max}]_{yağlı}$ (kN)**	**LDR**
Ø55	3,400	100	14,0	13,9	**1,67**
		200	14,3	14,0	
		400	14,1	14,0	
Ø60	3,452	100	18,0	17,9	**1,81**
		200	17,8	17,0	
		400	17,8	17,5	
Ø65	4,312	100	21,5	21,0	**1,96**
		200	21,8	21,0	
		400	21,0	20,5	
Ø70	5,022	100	23,9	22,5	**2,12**
		200	24,0	22,5	
		400	24,0	22,5	

8.5 DX51 Kalite Galvaniz Sacın Kaplama Kalınlığının Belirlenmesi

Kaplama kalınlığının belirlenmesi işlemi için 5 mm x 10 mm lik üç adet numune gereklidir. Numunelerin kenarları zımparalandıktan sonra küçük bir kalıba yerleştirilir ve kalıba Struer Epofix Kit, sacların kesitleri bu epoksi reçineye gömülene kadar dökülür. 8 saat kürlenme süresinden sonra reçine kalıptan çıkarılır ve yüzeyi lebleme işlemine tabi tutulur. Örnek yüzeyden kaplama kalınlığına bakabilmek için yüzey karbon ile kaplanmıştır. Karbonlama işlemi Fusion Instrument Polaron E6200 Model turbo coater cihazında yapılmıştır.

Kaplanmış örnek JSM-6400 Scanning microscopy (SEM) cihazında görüntüsü elde edilmiştir. SEM de elde edilen görüntü SEM cihazına bağlı olarak çalışan SEMAFOR programı yardımı ile kaplama kalınlığı ölçülmüştür.

Şekil 8.37’ de SEM cihazından çıkan numune kesit görüntüdür. Soldaki koyu siyah alan epoksi, ortadaki parlak hat kaplama kalınlığı ve soldaki gri alan ise matrikstir. Kaplama kalınlığı deney sonunda 19 ±1 μm ölçülmüştür.

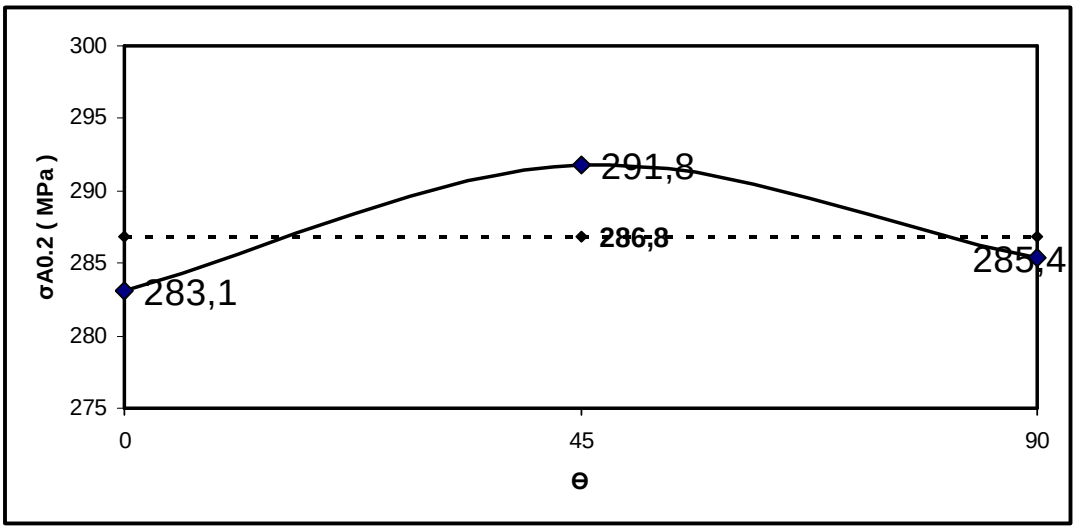


Şekil 8.37 SEM Cihazında kaplama kalınlığı ölçülen DX51 kalite galvaniz sac malzeme
(Arçelik A.Ş., 2008)

9. 304 KALİTE PASLANMAZ ÇELİK ve DX51 GALVANİZ SACIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ve ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

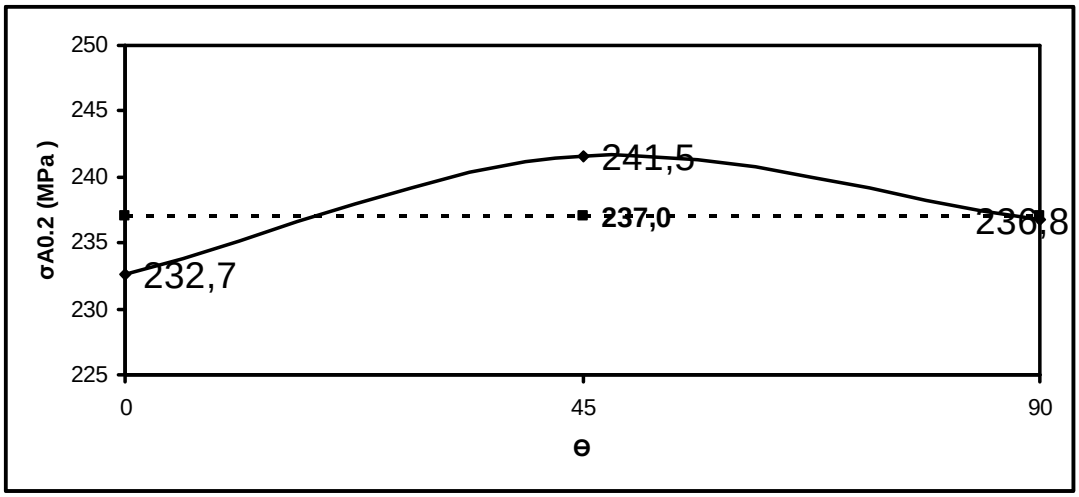
304 Kalite paslanmaz çelik ve DX51 galvaniz sac malzemelere uygulanan farklı amaçlara yönelik tek eksenli çekme deneylerinden, değişik şartlar altındaki Erichsen çökertme deneylerinden ve derin çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar, Bölüm 8.' de çizelgeler halinde belirtilmiştir. Bu sonuçlara göre, malzeme ve işlem faktörleri açısından sacların şekillendirilebilirlik özelliği değerlendirilmeye çalışılacaktır.

Paslanmaz çelik ve galvaniz sac malzemelere uygulanan tek eksenli çekme deneylerinden ($V_{çek}$ = 32 mm/dak) elde edilen mekanik özellikler, sac anizotropisinden dolayı, haddeleme yönüne göre değişiklikler göstermektedir. 304 kalite paslanmaz çelik sacın akma dayanımının haddeleme yönü ile 0°, 45° ve 90° ' lik açılarda göstermiş olduğu değişim şekil 9.1' de görülmektedir. Bu değerlere göre, en yüksek akma dayanımının, haddeleme yönüne yaklaşık 45 ^{o}' lik doğrultuda ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 9.1 304 kalite paslanmaz çelik sacda, akma dayanımının haddeleme yönüne göre değişimi

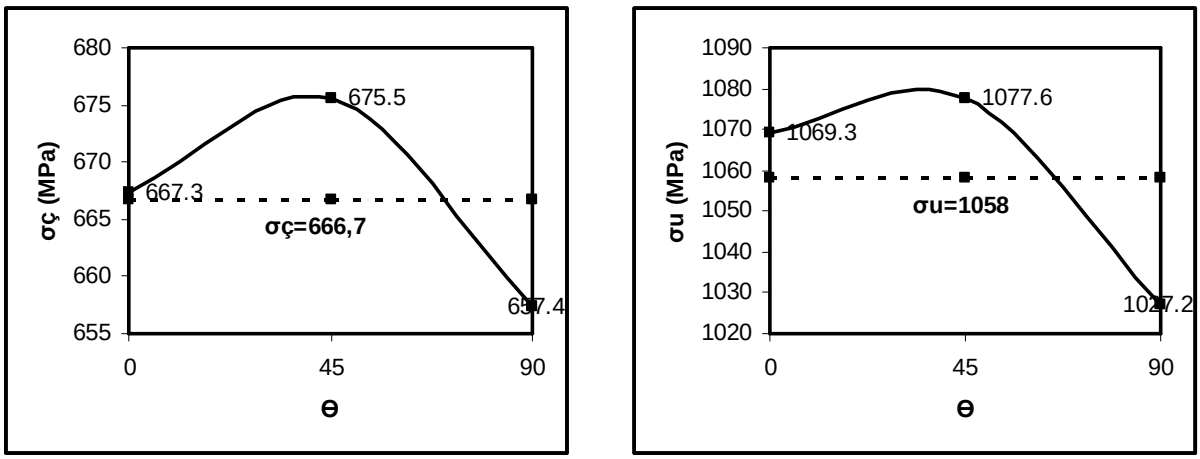
DX51 kalite galvaniz sacın akma dayanımının haddeleme yönü ile 0°, 45° ve 90° ' lik açılarda göstermiş olduğu değişim ise şekil 9.2' de görülmektedir. Bu değerlere göre, en yüksek akma dayanımının, galvaniz sac için de haddeleme yönüne yaklaşık 45 ^{o}' lik doğrultuda ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 9.2 DX51 kalite galvaniz sacda, akma dayanımının haddeleme yönüne göre değişimi

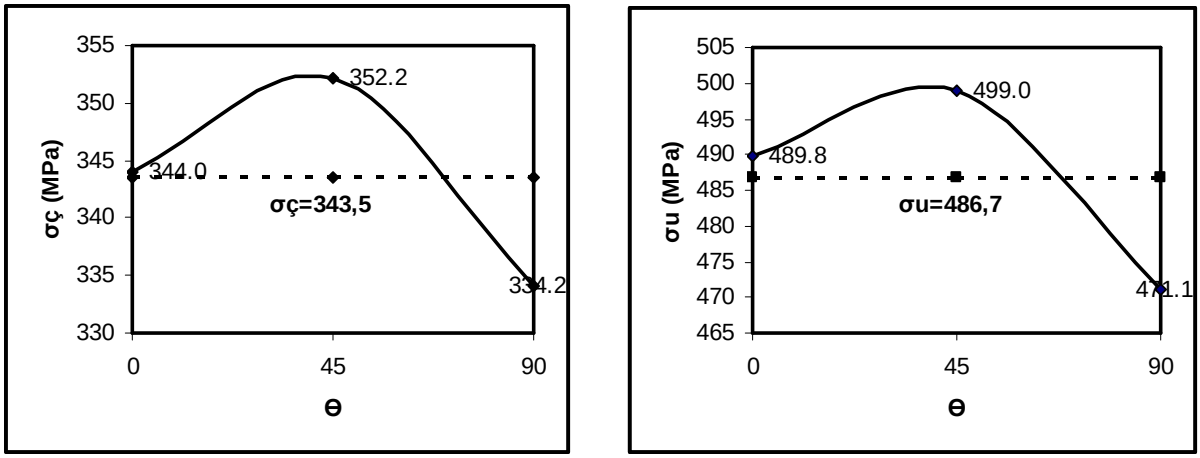
Malzemenin plastik şekil değiştirmeye başladığı noktadaki bu değişim, metal tanelerinin tercihli yönlenmesi sonucu oluşan kristalografik anizotropiye dayanmaktadır. Haddeleme yönündeki ve buna dik yöndeki akma dayanımlarının birbirine çok yakın değerlerde ve düşük olması, kübik hacim merkezli (KHM) kafes yapısına sahip malzemede, kaymaların öncelikle meydana geldiği < 111 > doğrultu ailelerinin büyük çoğunlukla bu yönlere denk gelmesinden dolayıdır. Bu nedenle, bu doğrultularda gerçekleştirilen deformasyonlara karşı malzeme direnci de daha düşük kalmaktadır. Haddeleme yönüne 45° ' lik doğrultudaki akma dayanımının yüksek olması ise, bu yönde < 111 > doğrultularına yönlenmenin daha zor gerçekleşmesinden ve deformasyona karşı direncin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Tek eksenli çekme deneylerinde, ilerleyen deformasyon seviyelerinde ve özellikle kopmaya yaklaşan gerinim düzeylerinde, mekanik anizotropi sonucunda liflenmiş yapının da etkisi açıkça ortaya çıkmaktadır. Haddeleme ile bu yönde paralel olarak uzamış inklüzyon, empürite ve boşlukların, deformasyon ile birlikte, sacın özellikle haddeleme yönüne dik doğrultudaki dayanımının düşmesine neden olduğu bilinmektedir. 304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 galvaniz saca uygulanan çekme deneylerinde de, maksimum yükün meydana geldiği noktadaki nominal gerilme değeri olan çekme dayanımı ve bu noktadaki gerçek gerilme için, böyle bir durum gözlenmektedir. (Şekil 9.3 ve Şekil 9.4) Malzemenin akma direnci, haddeleme yönünde ve buna dik doğrultuda birbirine çok yakın değerlerde iken; çekme dayanımı, haddeleme yönüne dik doğrultuda daha düşük bir seviyede kalmaktadır. Haddeleme yönüne 45 ^{o}' lik doğrultudaki dayanımın diğer yöndekilerden yüksek olma hali, maksimum yükün meydana geldiği bu noktada geçerli olmaktadır.



(a) (b)

Şekil 9.3 304 kalite paslanmaz çelik sacda, çekme dayanımının (a) ve maksimum yükteki gerçek gerilmenin (b) haddeleme yönüne göre değişimi

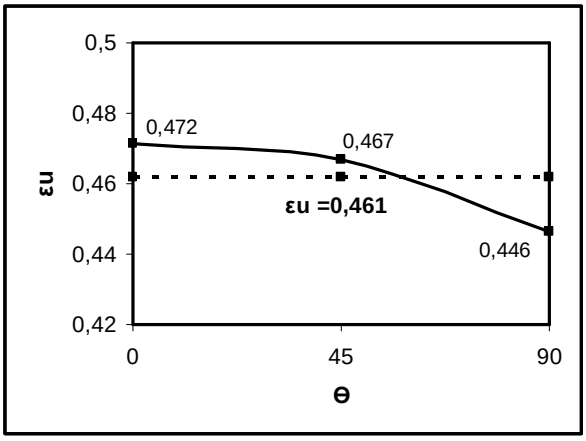


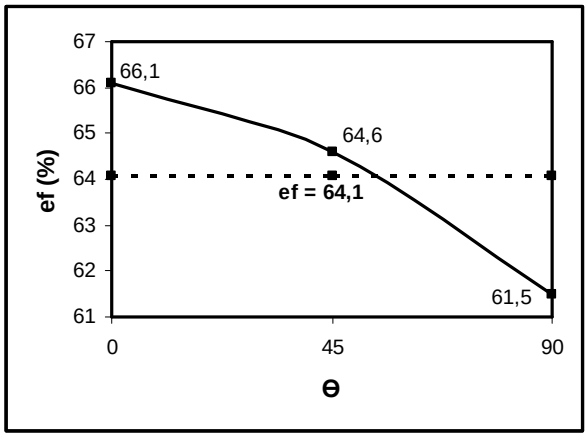
(a) (b)

Şekil 9.4 DX51 kalite galvaniz sacda, çekme dayanımının (a) ve maksimum yükteki gerçek gerilmenin (b) haddeleme yönüne göre değişimi

Paslanmaz çelik ve galvaniz sacın, maksimum gerinim ve kopmadaki uzama yüzdesi değerlerinin, haddeleme yönüne 0° , 45° ve 90°’ lik açılardaki değişimi, şekil 9.5 ve 9.6’ da görülmektedir. Elde edilen bu dağılıma göre çizilen eğriden belirgin sapmalar görülse de, genelde haddelemeye paralel doğrultudaki uzama değerleri, malzemenin kristalografik ve mekanik anizotropisinin bir sonucu olarak, haddeleme yönüne 45°’ lik doğrultudaki uzamalardan beklendiği gibi daha yüksek çıkmıştır. Haddeleme yönüne dik doğrultudaki maksimum üniform uzama ve kopma uzaması değerlerinin ise, genel dağılıma göre, diğer iki yöndekilerden daha düşük bir düzeyde kaldığı gözlenmektedir. Kristalografik anizotropi

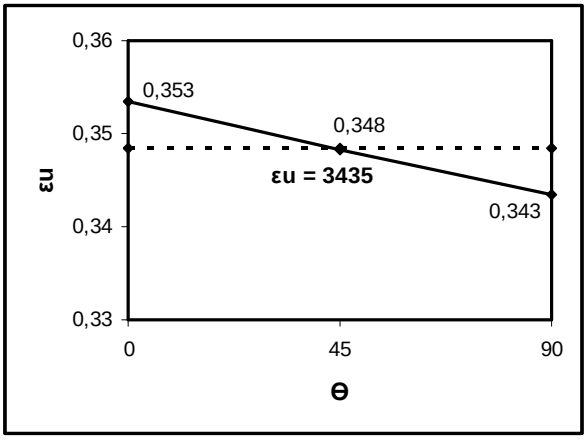
nedeniyle, bu yöndeki uzama değerlerinin daha yüksek mertebelere erişmesinin beklenmesine rağmen, boyunlanmanın ve kopmanın erken oluşmasını sağlayan bazı etkenler mevcuttur. Haddeleme yönüne dik doğrultudaki çekme deneylerinde, bunların kesitte meydana getirdiği süreksizlik etkisi, bu yöndeki sınır üniform gerinimin beklenenden daha düşük bir düzeyde kalmasına neden olmaktadır. Sonuçta , bu yöndeki çekme deneylerinde, kesitteki boyunlanma daha erken oluşmakta; kopma uzaması ve de malzeme sünekliği azalmaktadır.

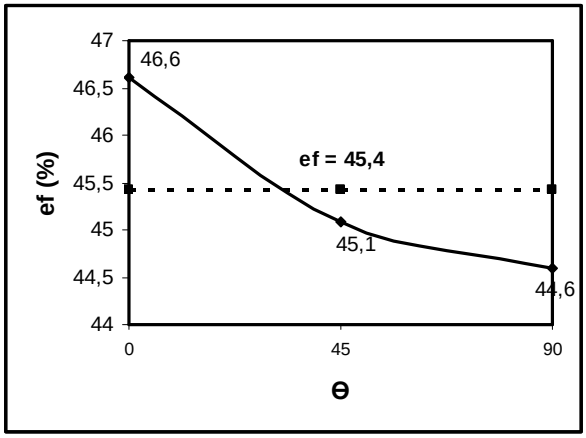




(a) (b)

Şekil 9.5 304 kalite paslanmaz çelik sacda, çekme deneylerinden elde edilen maksimum üniform gerinimin (a) ve kopmadaki uzama yüzdesi değerlerinin (b), haddeleme yönüne göre değişimi

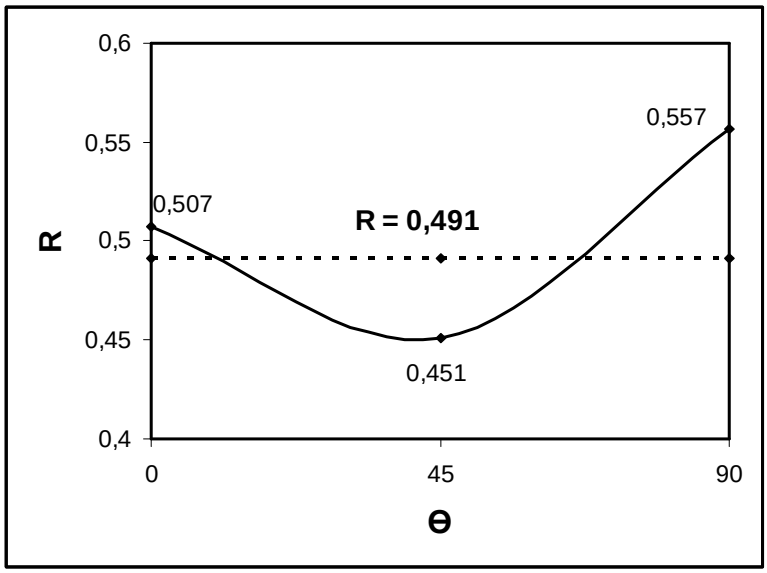




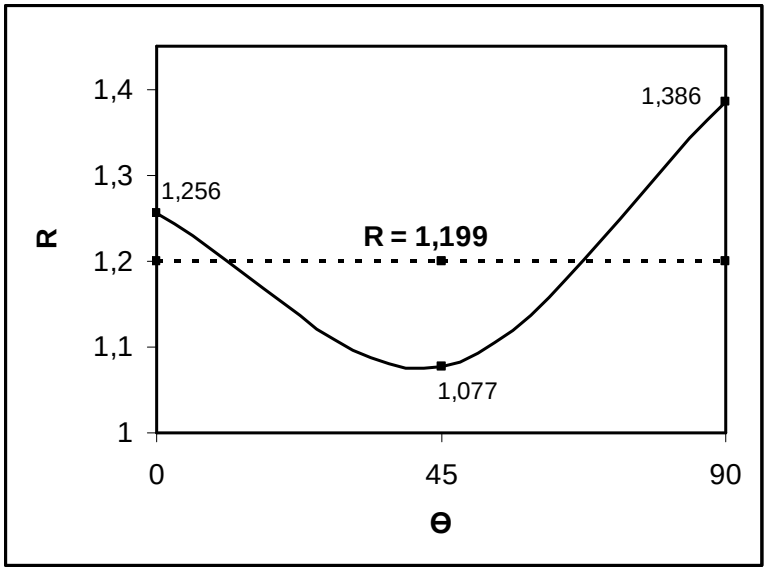
(a) (b)

Şekil 9.6 DX51 kalite galvaniz sacda, çekme deneylerinden elde edilen maksimum üniform gerinimin (a) ve kopmadaki uzama yüzdesi değerlerinin (b), haddeleme yönüne göre değişimi

Sacların deformasyonunda incelmeye karşı direnci ifade eden plastik gerinim oranı (R), 304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz sacda e = % 15 uzamada belirlenmiştir. Bu parametrenin haddeleme yönüne göre değişimi, Şekil 9.7 ve Şekil 9.8' de görülmektedir. Ortalama plastik gerinim oranı, 304 paslanmaz çelik sac için $\overline{R}_{paslanmaz}$ = 0,4915, DX51 galvaniz sac için $\overline{R}_{galvaniz}$ = 1,199 olarak hesaplanmıştır.

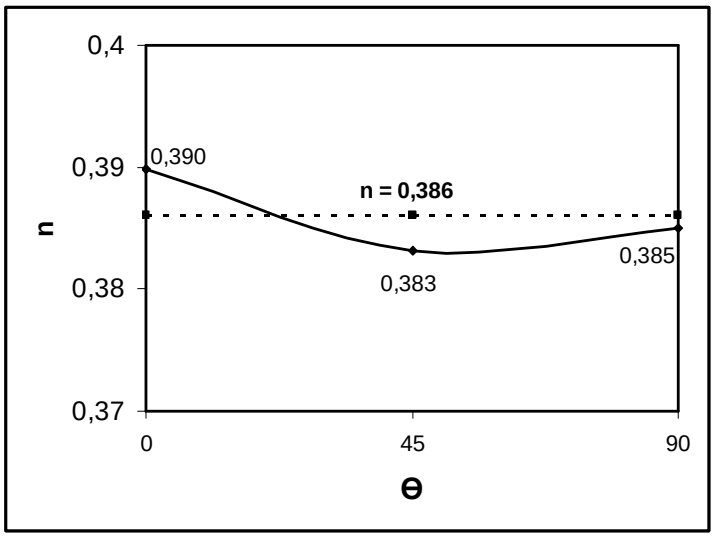


Şekil .9.7 304 kalite paslanmaz çelik sacda, plastik gerinim oranının haddeleme yönü ile değişimi

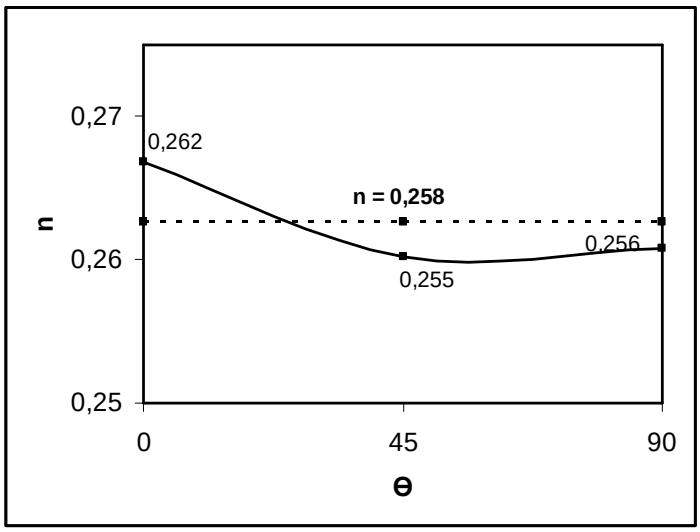


Şekil .9.8 DX51 kalite galvaniz sacda, plastik gerinim oranının haddeleme yönü ile değişimi

304 kalite paslanmaz çelik sac ve DX51 kalite galvaniz saca uygulanan tek eksenli çekme deneylerinde malzemenin pekleşme üsteli (n), INSTRON S IX Software programı ile, üniform uzama bölgesinde herhangi bir logoritmik eğri çizimine gerek kalmaksızın belirlenmiştir. Teorik olarak, $\sigma = K\varepsilon^n$ denklemindeki gibi bir gerçek gerinim – gerçek gerilme eğrisi veren malzemede, maksimum üniform gerinim ε_u = n olarak ifade edilmektedir. Dolayısıyla, n değeri yüksek olan malzemelerde, pekleşme sonucu kesitin yük taşıma kapasitesi de artmaktadır. Sonuçta, üniform deformasyon alanı büyümekte ve kesitte boyunlanma daha geç ortaya çıkmaktadır. Gerçek malzemelerde ise eğri, bu denklemden az da olsa sapmalar gösterebilmektedir. Çekme deneylerine tabi tutulan 304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz sac malzemede, n değerinin, haddeleme yönüne 0° , 45° ve 90°’ lik doğrultularda elde edilen dağılımına göre çizilen eğriler, Şekil 9.9 ve 9.10’ da görülmektedir. Buna göre, en yüksek n değerleri, genelde haddeleme yönüne paralel doğrultularda uygulanan çekme deneylerinden elde edilmiştir. Zira, bu yöndeki maksimum üniform uzama değerleri de, daha yüksek bir düzeye erişmektedir. Haddeleme yönüne 45°’ lik ve 90°’ lik doğrultuda ise, n ve ε_u değerlerinin, birbirine yakın ve daha düşük bir düzeyde kaldığı görülmektedir. Uygulanan çekme deneylerinde ε_u, hiçbir yönde n değerine eşit çıkmamış, fakat yakın değerler göstermiştir. Bu iki değer arasında en belirgin sapmaların, 90° ‘ lik doğrultuda olduğu gözlenmiştir. Bu yöndeki n değerlerine nazaran, maksimum üniform uzama değerleri daha düşük bir düzeyde kalmaktadır. Bu doğrultuda, kesitte belirgin bir süreksizlik meydana getirdiği düşünülen haddeleme yönünde uzamış kalıntıların, üniform gerinimin daha düşük değerde sonlanmasına ve kesitteki boyun oluşumunun daha erken başlamasına neden olduğu anlaşılmaktadır.

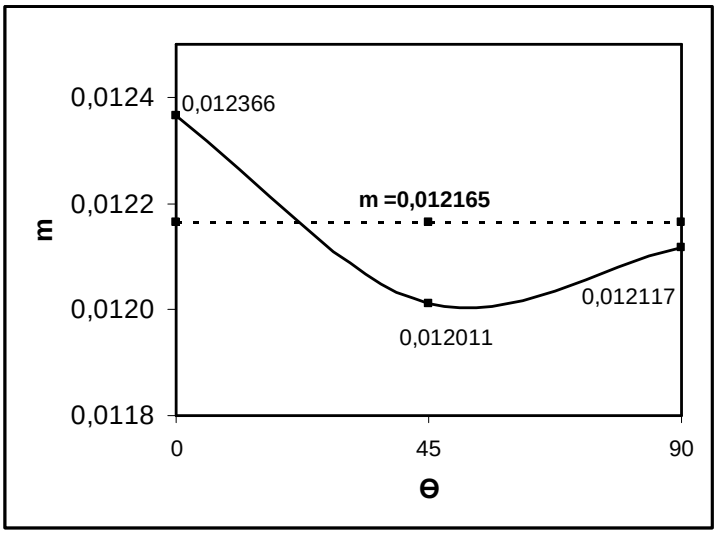


Şekil 9.9 Paslanmaz çelik sacda, pekleşme üstelinin (n) haddeleme yönüne göre değişimi

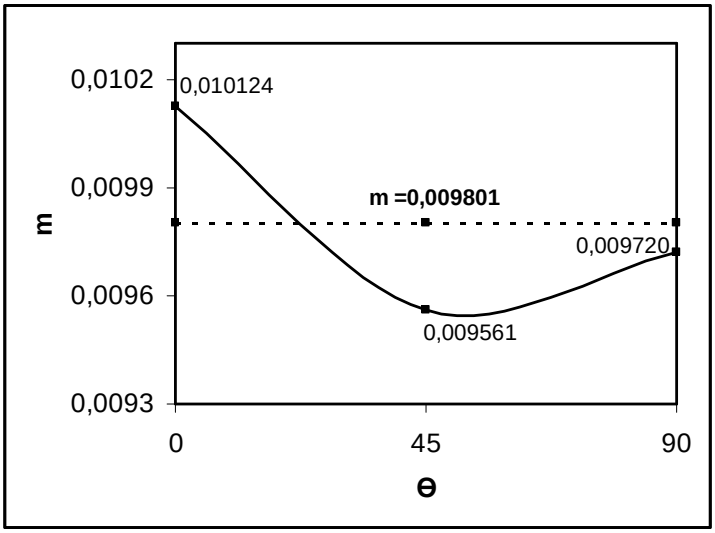


Şekil 9.10 Galvaniz sacda, pekleşme üstelinin (n) haddeleme yönüne göre değişimi

304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz saca uygulanan çekme deneylerinde, e=%15 uzamada çekme hızının ani olarak 32 mm/dak' tan 96 mm/dak'a arttırılması sonucu, malzemenin gerinim hızına duyarlılık üsteli (m) belirlenmiştir. m değerinin haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°' lik doğrultulardaki değişimi, paslanmaz çelik için Şekil 9.11, galvaniz sac için Şekil 9.12' de görülmektedir. Sac malzemelerde önemli bir kriter olan m değeri, özellikle boyunlanma sonrası meydana gelen uzamayla ilgili olmaktadır. Malzemelerin gerinim hızına duyarlılığı arttıkça, maksimum yükten sonra göstermiş olduğu uzama miktarı da artmaktadır.

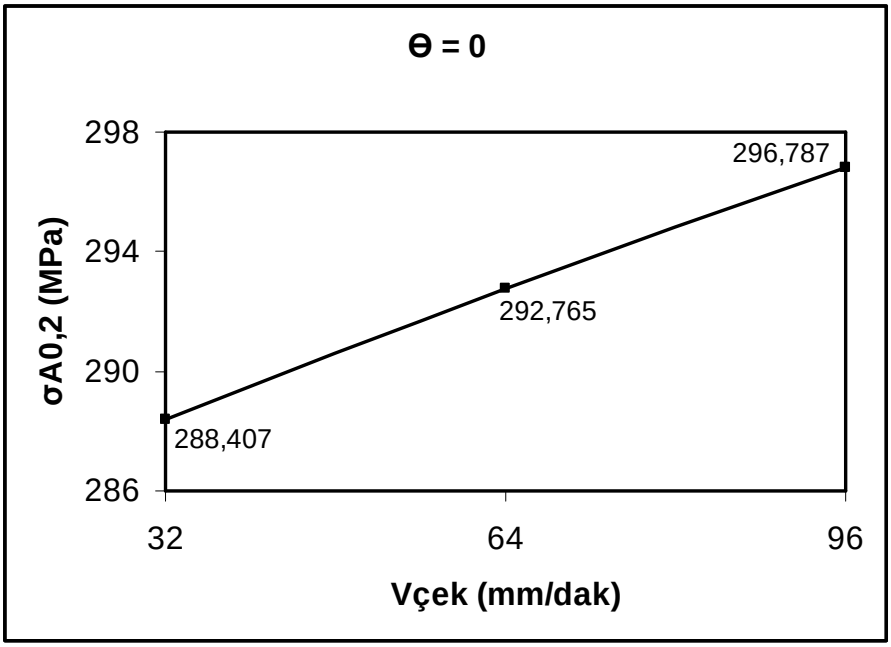


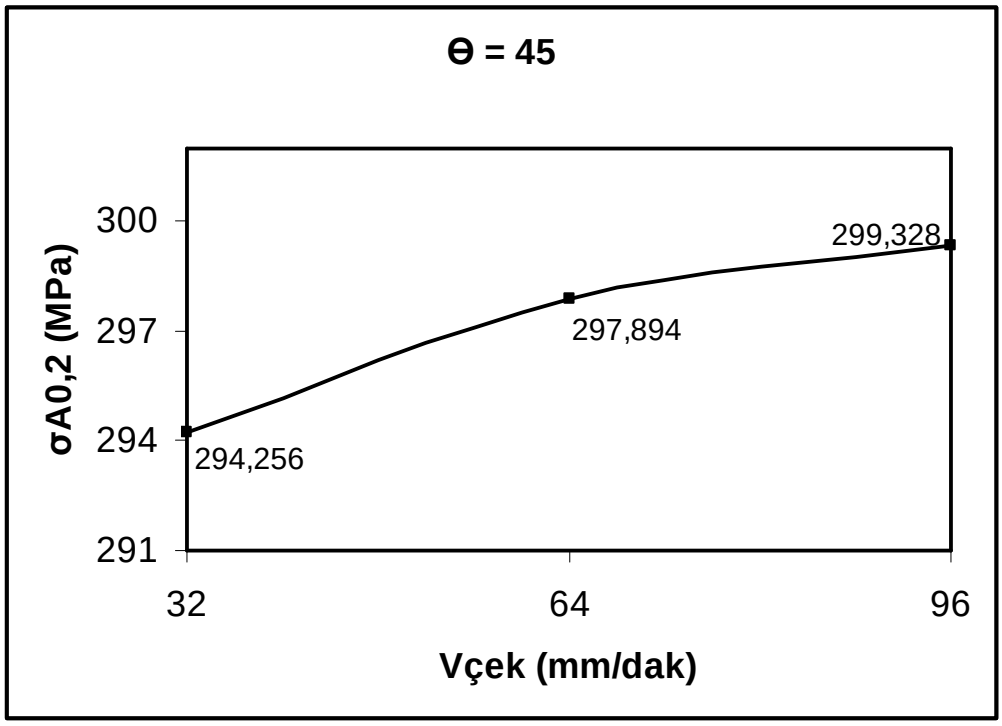
Şekil 9.11 304 kalite paslanmaz çelik sacda, gerinim hızına duyarlılık üstelinin (m) haddeleme yönüne göre değişimi

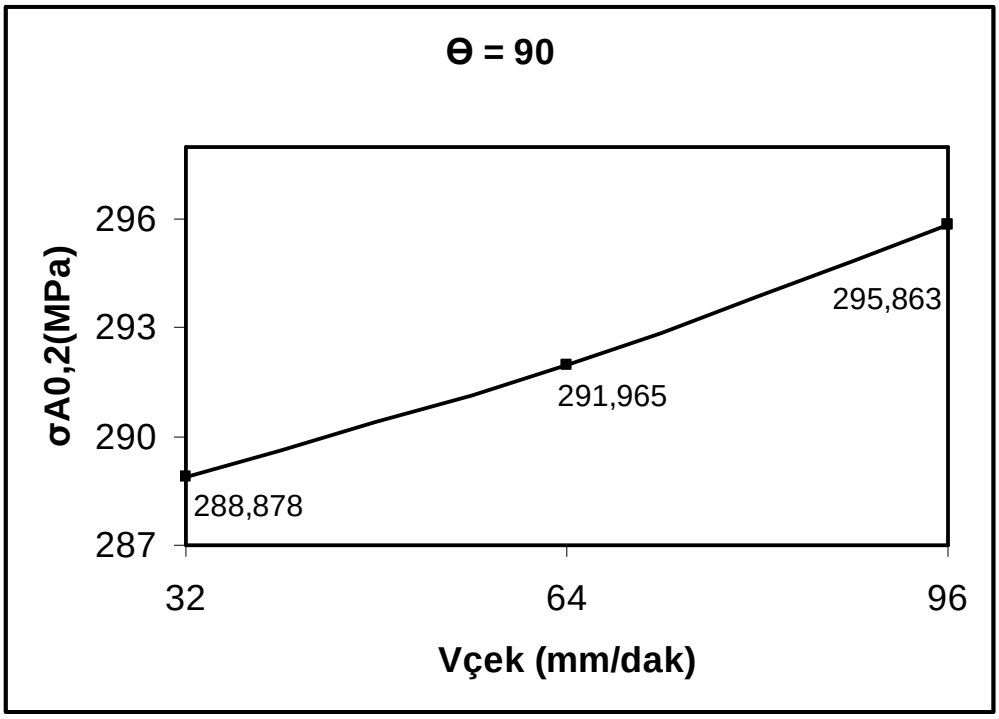


Şekil 9.12 DX51 kalite galvaniz sacda, gerinim hızına duyarlılık üstelinin (m) haddeleme yönüne göre değişimi

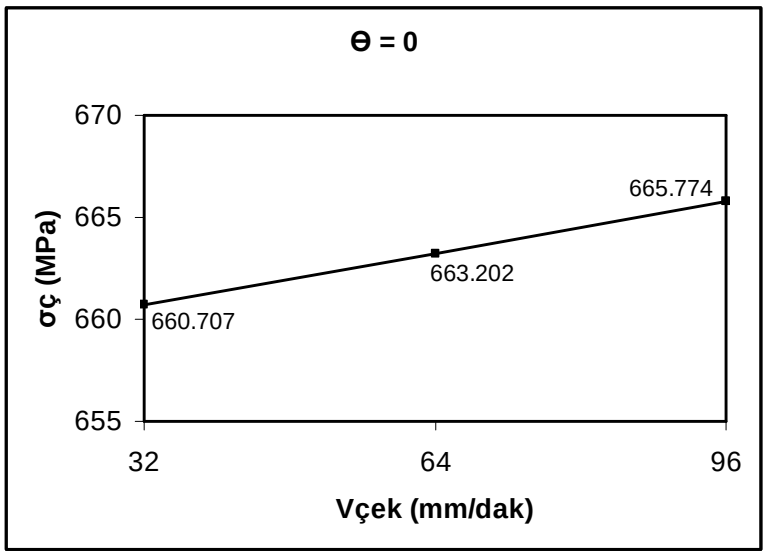
304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz saca değişik hızlarda uygulanan çekme deneylerinde, çekme hızına göre malzemenin akma ve çekme dayanımında meydana gelen değişimler, şekil 9.13, şekil 9.14, şekil 9.15 ve şekil 9.16' da görülmektedir. Malzemenin gerinim hızına duyarlılığı pozitif olduğundan, deformasyon hızının artması ile birlikte dayanım düzeyi de artmaktadır.

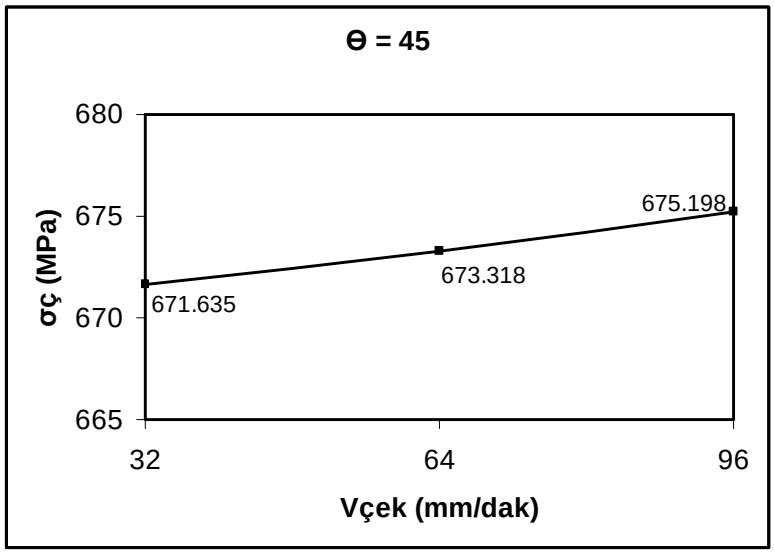


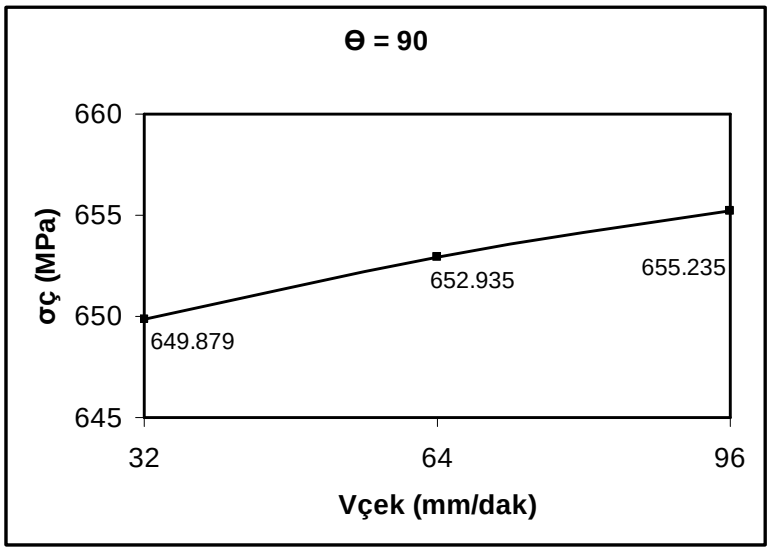




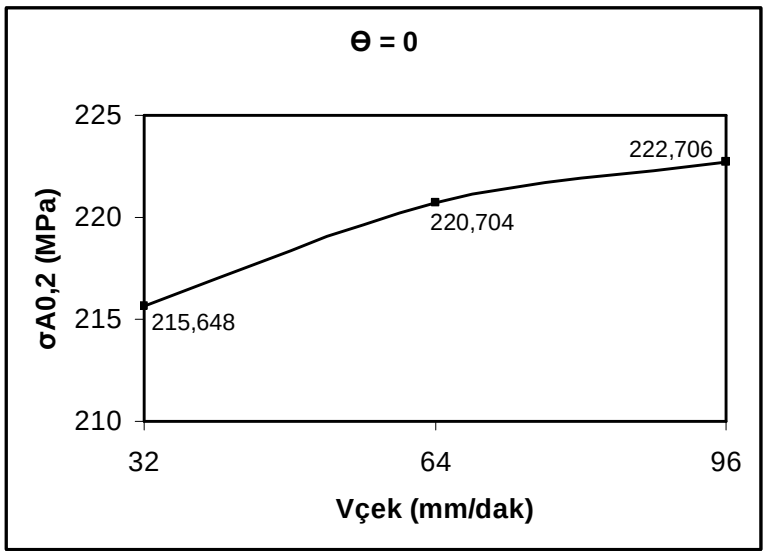
Şekil 9.13 Paslanmaz çelik sacda, haddeleme yönüne göre farklı doğrultulardaki akma dayanımının, çekme hızı ile değişimi

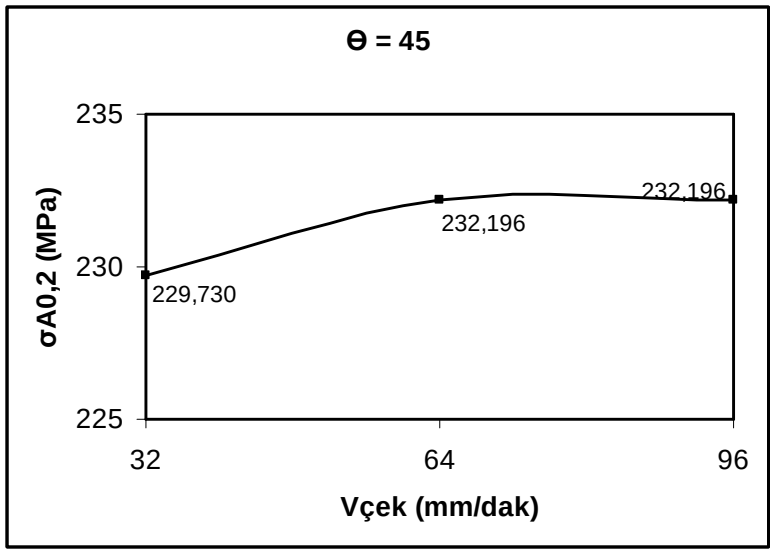


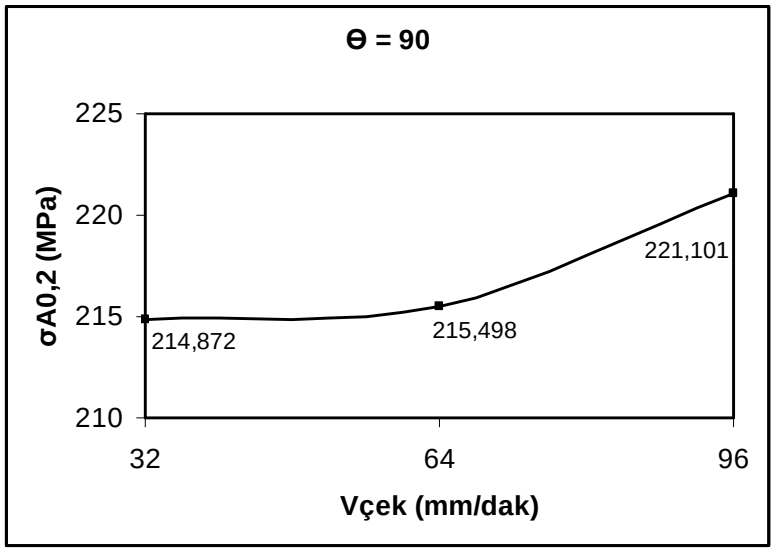




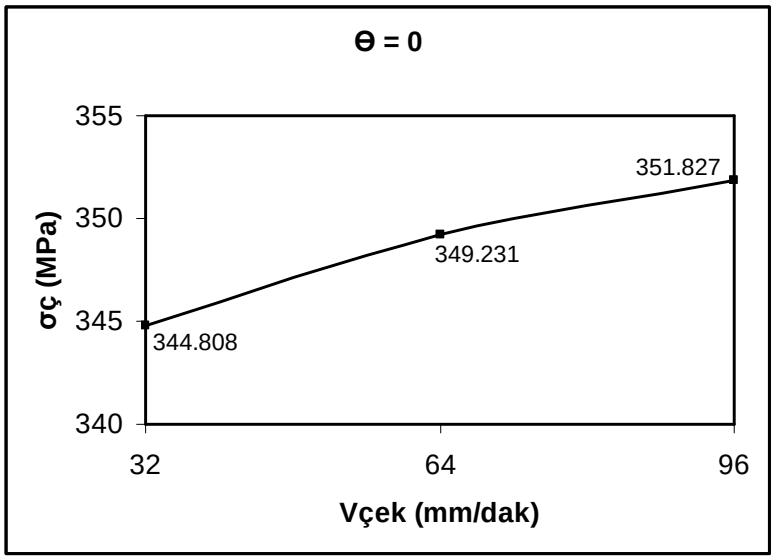
Şekil 9.14 Paslanmaz çelik sacda, haddeleme yönüne göre farklı doğrultulardaki çekme dayanımının, çekme hızı ile değişimi

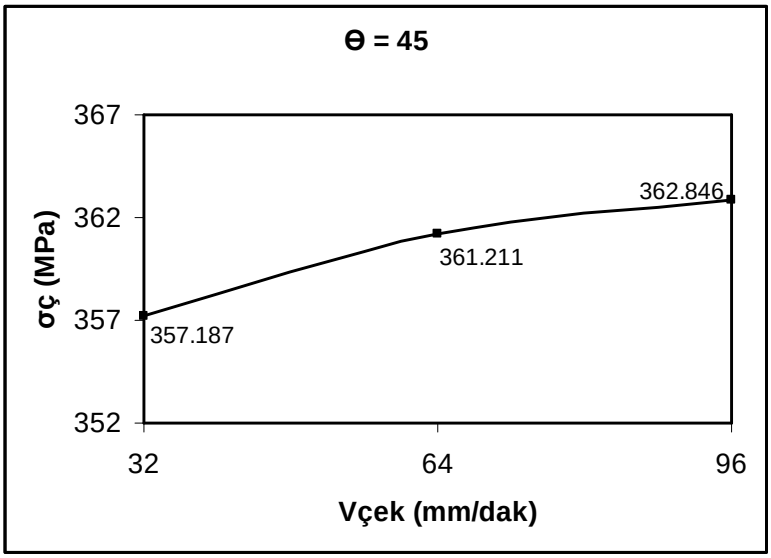


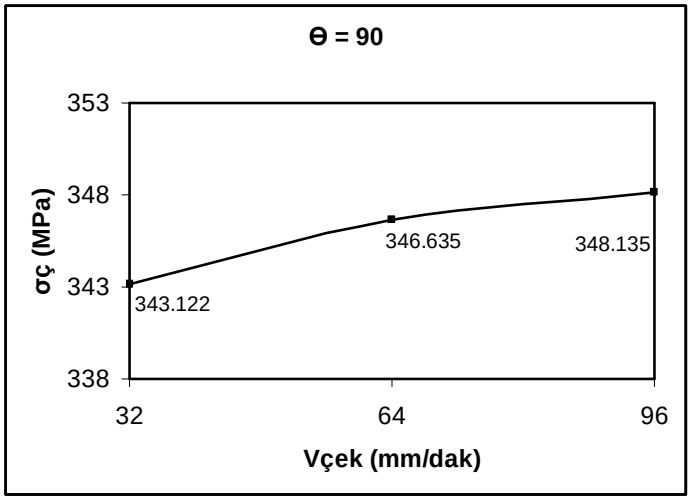




Şekil 9.15 Galvaniz sacda, haddeleme yönüne göre farklı doğrultulardaki akma dayanımının, çekme hızı ile değişimi



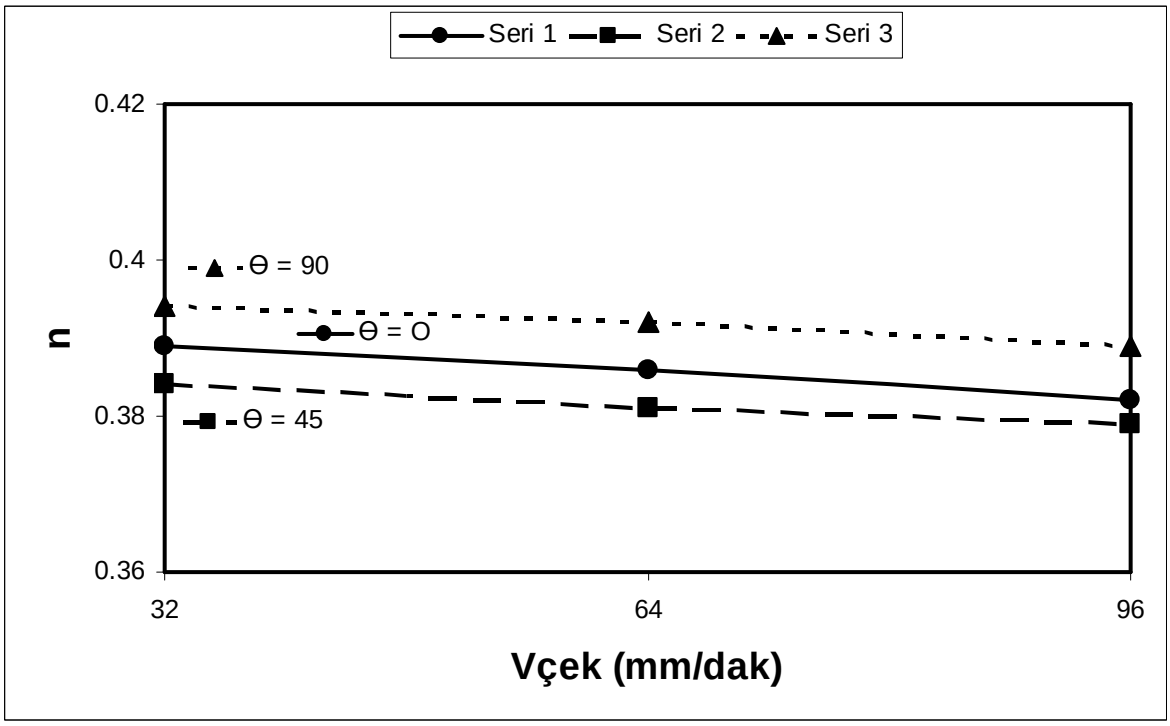




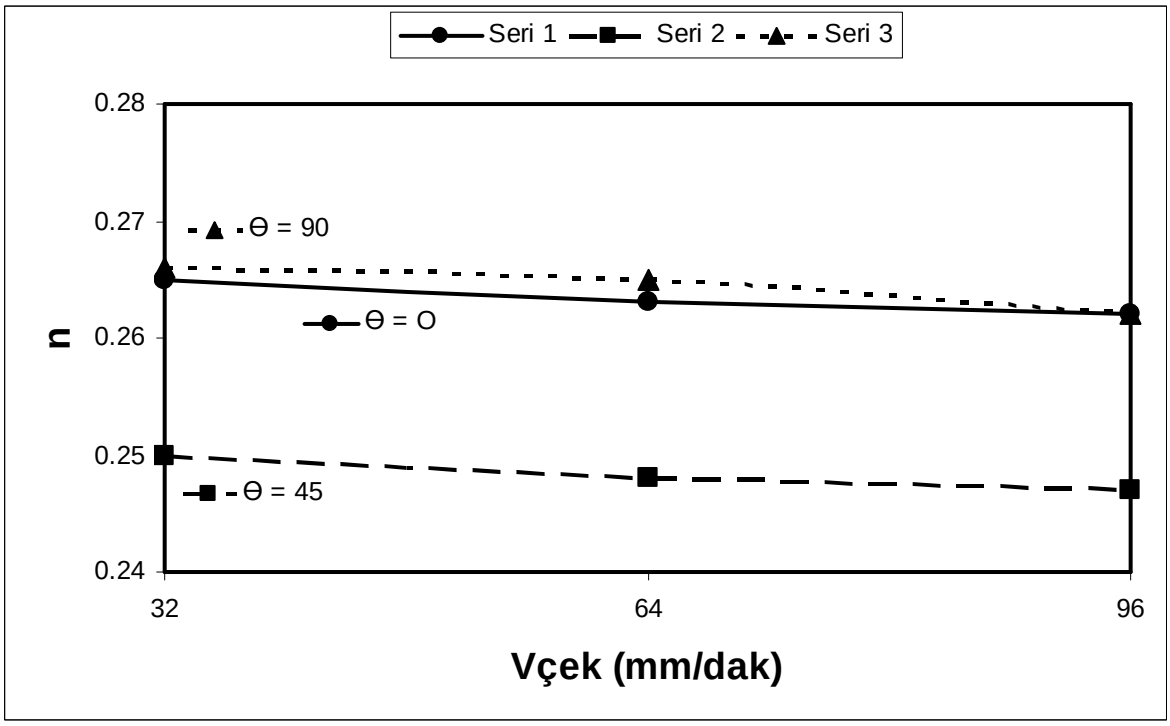
Şekil 9.16 Galvaniz sacda, haddeleme yönüne göre farklı doğrultulardaki çekme dayanımının, çekme hızı ile değişimi

Malzemelerin gerinim hızına duyarlılık üsteli, belli bir gerinim seviyesinde hızın ani olarak arttırılması veya değişik hızlarda elde edilen sürekli çekme eğrilerinin karşılaştırılması ile belirlenebilmektedir. Ani hız arttırma yönteminde m değeri, aynı numune üzerinde belirlendiğinden, daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Sürekli çekme eğrilerinin karşılaştırılması yönteminde ise farklı numuneler kullanıldığından ve genelde sac özellikleri ruloda bölgesel değişimler gösterebileceğinden dolayı, çok hassas sonuçlar elde edilemeyebilmektedir. Malzemenin şekil değiştirme derecesi arttıkça, bütün yönlerdeki gerinim hızına duyarlılıklar, beklendiği gibi düşmektedir. Ani hız arttırma ile belirlenen m değerleri, yöntemin daha uygun olmasından dolayı, malzemenin gerinim hızına duyarlılığı olarak benimsenmiştir.

304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz saca değişik hızlarda uygulanan çekme deneylerinden, malzemenin haddeleme yönüne göre 0°, 45° ve 90°' lik doğrultulardaki pekleşme üstelinin, deformasyon hızı ile değişimi de incelenmiştir. Gerinim hızının artmasıyla pekleşme üsteli, beklendiği gibi bir düşme göstermektedir. (Şekil 9.17 ve Şekil 9.18)



Şekil 9.17 304 kalite paslanmaz çelik saca uygulanan çekme deneylerinde, hız ile pekleşme üsteli arasındaki ilişkinin logaritmik eğilimi

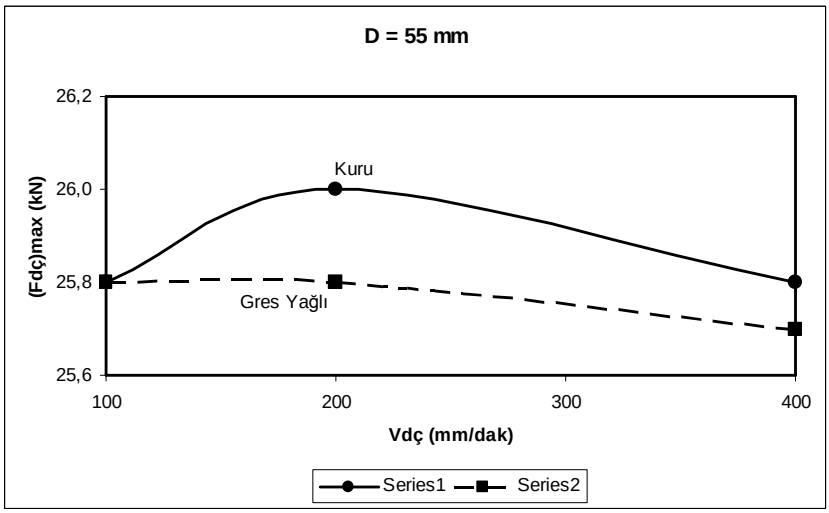


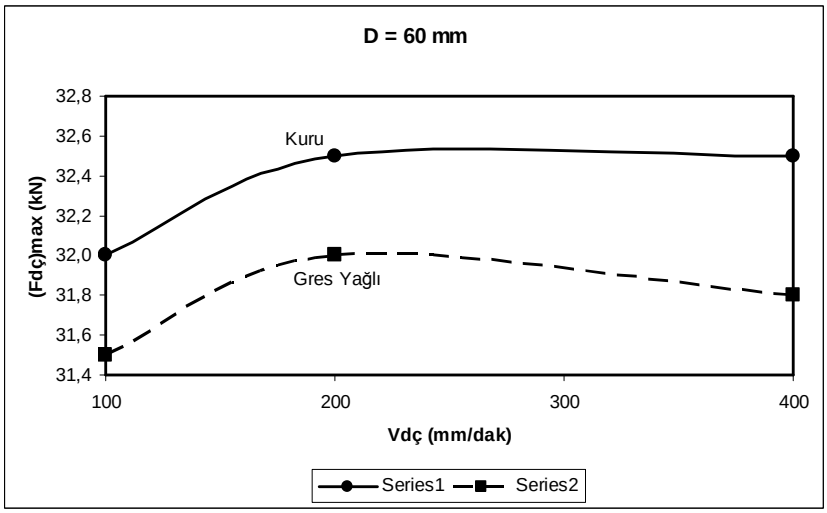
Şekil 9.18 DX51 kalite galvaniz saca uygulanan çekme deneylerinde, hız ile pekleşme üsteli arasındaki ilişkinin logaritmik eğilimi

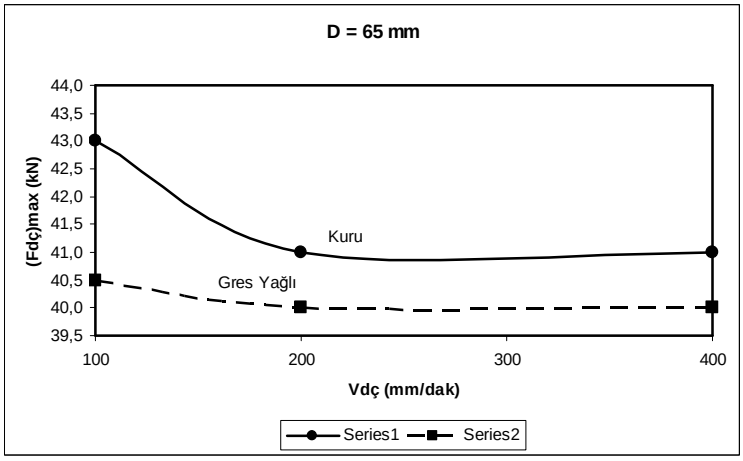
Paslanmaz çelik ve galvaniz levhalardan kesilen farklı çaplardaki ilkel pullar, kuru ve grafitli gres ile yağlamalı olarak değişik hızlarda derin çekme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Bu deneylerdeki maksimum derin çekme kuvvetlerinin değişimi Şekil 9.19 ve Şekil 9.20' de görülmektedir. En yüksek kuvvet, Ø 65 mm çapındaki ilkel pulun çekilmesinden meydana gelmiştir. Pul çapının artması ile deformasyon derecesi ve sürtünme kuvvetleri artmakta, dolayısıyla da daha yüksek derin çekme kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Aynı pul çapı ve derin çekme hızı gözönüne alındığında, yağlamalı olarak gerçekleştirilen deneylerde, kuru şartlardaki deneylere nazaran daha düşük derin çekme kuvvetlerinin meydana geldiği görülmektedir. Yağlama ile flanştaki sürtünme kuvvetlerinin azalması, derin çekme kuvvetlerindeki bu düşümün nedeni olmaktadır. Sınır derin çekme oranına hızın etkisi yorumlama açısından oldukça karmaşıktır ve hızın yağlama durumuna göre etkisi belirginleşmektedir. Çok düşük derin çekme hızlarında (özellikle 5 ve 10 mm/dak) flanştaki sürtünmenin yüksek boyutlarda olması, bu hızlarda LDR' nin düşük bir seviyede kalmasına neden olmaktadır. Sürtünmenin artmasıyla flanşın kalıp boşluğuna akışında direnç meydana gelmekte ve kap cidarındaki çekme gerilmeleri artmaktadır. (özellikle ıstampa radyüsünün hemen üzerinde) Yağlamalı olarak gerçekleştirilen derin çekmelerde, bu etkinin daha az olduğu görülmektedir. Çok yüksek hızlarda ise malzemenin plastiklik özellikleri kötüleşmektedir. Özellikle kuru olarak gerçekleştirilmiş işlemlerde, yüksek hızlarda ısınma

sonucu malzemenin hem plastiklik özellikleri, hem de dayanımı düşerek, kap cidarının çekme kuvvetlerine karşı direnci azalmaktadır. Yağlamalı olarak gerçekleştirilmiş işlemlerde, yüksek hızlarda ısınmadan kaynaklanan bu olumsuz etkiler daha düşük bir düzeyde kalmaktadır. Kuru derin çekme deneylerinde en yüksek LDR değeri 20 – 100 mm/dak hız aralığında elde edilirken, yağlı derin çekmede bu aralık daha geniştir. (20 – 200 mm/dak) Bu hız aralıklarının, genelde maksimum yükün artım gösterdiği aralıklar ile yaklaşık aynı olduğu gözlemlenmiştir. Hızdaki artım ile birlikte cidarda kritik bölgedeki dayanım belli bir noktaya kadar artarak, yırtılmaya karşı bir direncin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu hız aralıklarında malzeme dayanımını düşürecek ve plastik özelliklerini kötüleştirecek bir sıcaklık artımı söz konusu olmamakta (yağlamalı işlemlerde bu daha geniş bir alandır), bunun sonucunda da flanştaki sürtünme azalmasının işlem üzerine olan etkisini hissettirebilme imkanı doğmaktadır.

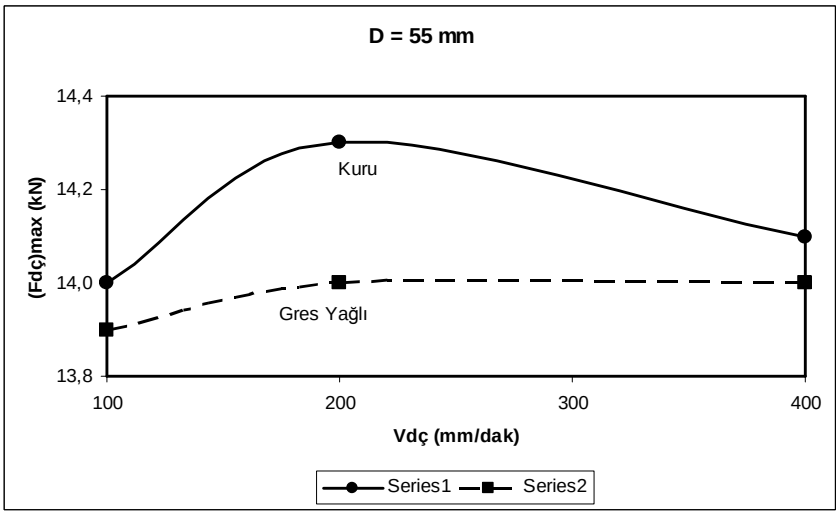
Derin çekme hızının, işlemlerde oluşan maksimum kuvvete etkisi oldukça belirgindir. Kuvvet, hız ile birlikte artma eğilimindedir. Kuru olarak gerçekleştirilen derin çekme deneylerinde oluşan maksimum yük, ilkel pul çapına göre genelde 5- 100 mm/dak derin çekme hızları arasında artım göstermektedir. Daha yüksek hızlardaki derin çekme deneylerinde ise kuvvet düşmektedir. Genelde 100 mm/dak hızdan sonra yükte meydana gelen bu düşüş, hızın yüksek değerlere çıkması ile birlikte malzemenin bir deformasyon ısınmasına maruz kalması ve bunun sonucunda ısıl yumuşama göstermesi olarak yorumlanmıştır. Yağlamalı olarak gerçekleştirilen deneylerde ise bu yük düşümü çok daha az olmakta, hatta yük belli bir hız değerinden sonra neredeyse sabit kalmaktadır. Bu da, yağlamanın deformasyon ısınması karşı etkisini açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, hızın artması ile flanştaki sürtünmenin azaldığı da bilinmektedir. Belli bir hızdan sonra maksimum kuvvetin düşmesine, malzemenin ısınarak yumuşamasının yanısıra, sürtünmedeki azalmanın da etki ettiği düşünülmektedir. Yükün artım gösterdiği bölgedeki hızlar, malzemenin gerinim hızına duyarlılığını üst düzeyde yansıtırken, yükte düşüşün olduğu bölgelerde ise bu diğer faktörlerin etkisi belirginleşmektedir. Bu bölgelerdeki yük düşüşünün karşılanamaması, yüksek hızlarda gerinim hızına duyarlılığın azalmasının bir kanıtı olmaktadır.

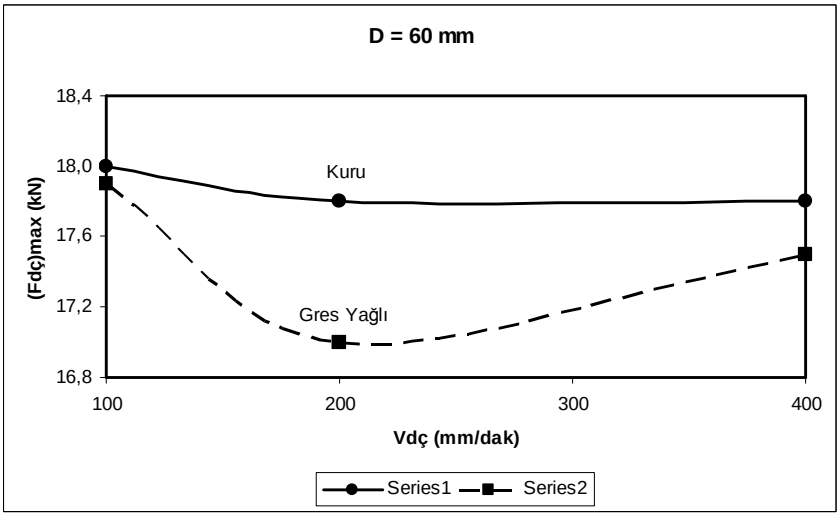


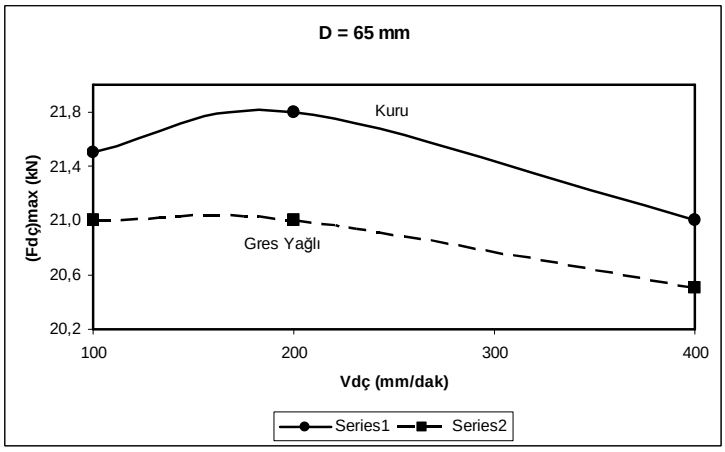




Şekil 9.19 304 kalite paslanmaz çelik sacdan farklı çaplarda kesilen ilkel pulların, kuru ve gres yağlamalı olarak değişik hızlarla derin çekilmesinde oluşan maksimum derin çekme kuvvetleri





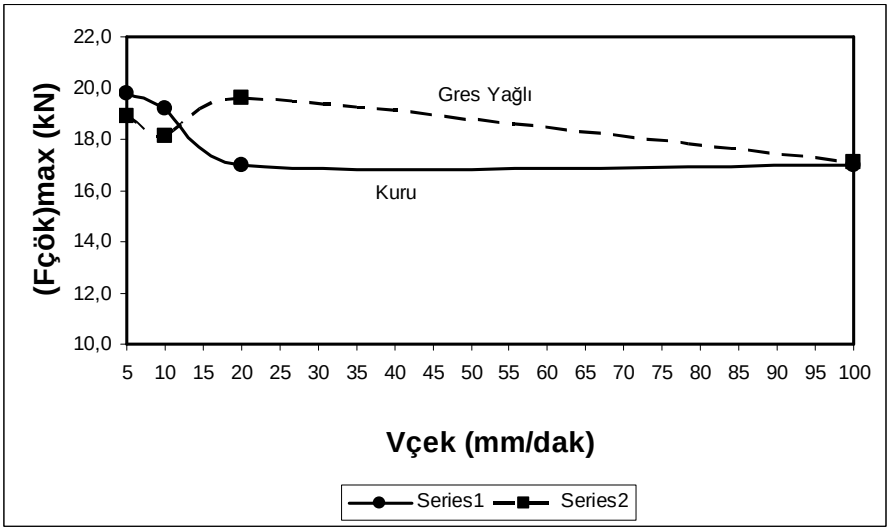


Şekil 9.20 DX51 kalite galvaniz sacdan farklı çaplarda kesilen ilkel pulların, kuru ve gres yağlamalı olarak değişik hızlarla derin çekilmesinde oluşan maksimum derin çekme kuvvetleri

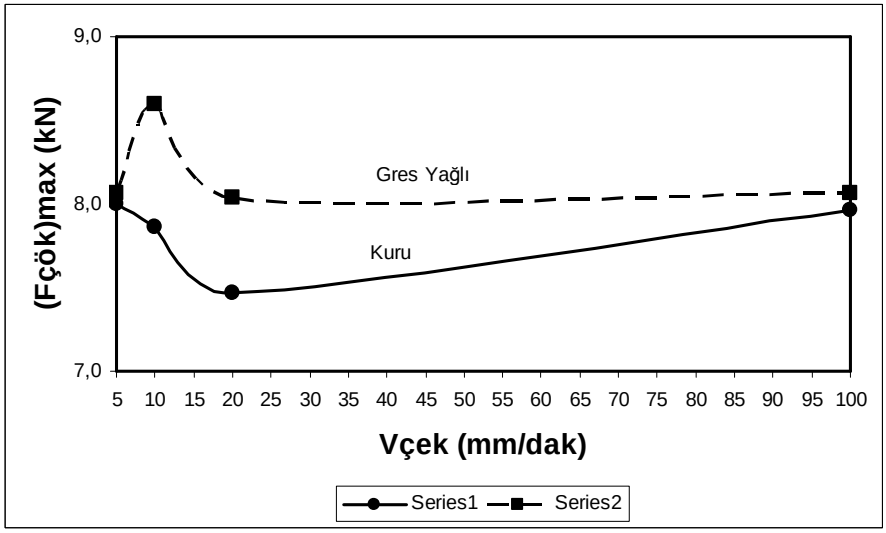
304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz saca, kuru ve grafitli gres ile yağlamalı olarak değişik hızlarda uygulanan Erichsen çökertme deneylerinde oluşan maksimum çökertme kuvvetleri, şekil 9.19 ve şekil 9.20' deki gibi değişim göstermektedir. Aynı hız değerleri altında uygulanan deneylerde, kuru şartlarda ortaya çıkan maksimum kuvvet, yağlamalı olarak gerçekleştirilen çökertmelere nazaran daha yüksektir. Kuru çökertmelerde, hızın artması ile, malzemenin hıza duyarlılığından dolayı kuvvet de belli bir değere kadar artmaktadır. Daha yüksek hızlarda ise kuvvet düşmektedir. Çökertme kuvvetindeki bu düşüm, malzemenin yüksek hızlarda ısınarak yumuşama göstermesi ve dayanımının düşmesi olarak yorumlanmıştır. Yağlamalı olarak gerçekleştirilen çökertmelerde ise bu hız aralığındaki düşüş çok daha azdır.

Kuru ve grafitli gres ile yağlamalı olarak değişik hızlarda uygulanan Erichsen çökertme deneylerinde, maksimum çökertme derinliği veya Erichsen çökertme değerleri de ölçülmüştür. Deneylerin bitiş noktasının, ani yük düşümünün meydana geldiği nokta olarak alınması uygun görülmüştür. Bu noktalarda bir zayıf bölge veya bir boyun oluşması ile birlikte çökertme kuvvetinin de düştüğü görülmektedir. Bununla birlikte, 100 mm/dak' dan daha yüksek hızlarda yapılan deneylerde, yükün düşmeye başladığı anda yüksek hızdan dolayı ıstampa ani olarak duramadığından, çökertme değerlerinin çok yüksek çıktığı gözlenmiştir. Bu nedenle, EÇD' nin yalnızca 5 – 100 mm/dak hızlar arasındaki değişimi incelenmiştir. İlgili standartta Erichsen çökertme deneylerinin 5 – 20 mm/dak hız aralıklarında uygulanması önerilmektedir. Aynı zamanda, yüksek hızlarda gerçekleştirilen deneylerde, şerit numunenin uzun kenarlarının içbükey hale gelme eğiliminin arttığı gözlenmiştir. Bu durum, Erichsen deneylerinde bastırıcı kuvvetinin, malzemenin kalıbın içerisine akışını önlemede yetersiz kalabildiğini açıkça göstermektedir. Böyle bir oluşum, tam bir germe işlemi yerine, derin çekme ve germe olayının birlikte meydana geldiğini göstermektedir.

304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz saca kuru ve yağlamalı olarak değişik hızlarda uygulanan çökertme deneylerinden elde edilen dağılım, Şekil 9.21 ve 9.22' de görülmektedir. Yağlamalı olarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen Erichsen çökertme değerleri, kuru şartlarda gerçekleştirilenlere göre daha yüksek olmaktadır. Bu da yağlamanın şekillendirilebilirlik üzerine etkisini bir kez daha açıkça göstermektedir.



Şekil 9.21 304 kalite paslanmaz çelik saca kuru ve grafitli gres ile yağlamalı olarak uygulanan Erichsen çökertme deneylerinde, ölçülen maksimum çökertme kuvvetlerinin hıza göre değişimi



Şekil 9.22 DX51 kalite galvaniz saca kuru ve grafitli gres ile yağlamalı olarak uygulanan Erichsen çökertme deneylerinde, ölçülen maksimum çökertme kuvvetlerinin hıza göre değişimi

Haddeleme yönüne paralel, dik ve 45°' lik doğrultulardaki numunelerle gerçekleştirilen çekme deneylerinden, malzemenin şekillendirilebilirlik özelliğinin, haddeleme yönüne paralel doğrultuda en iyi düzeyde olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle, sac şekillendirme işlemlerindeki büyük gerinimlerin (e_1), haddeleme yönünde oluşacak şekildeki ilkel pul tasarımı, şekillendirilebilirlik açısından avantaj teşkil etmektedir.

10. GENEL SONUÇLAR

304 Kalite paslanmaz çelik ve galvaniz sacların biçimlendirme kabiliyetlerinin çeşitli yönleri ile incelendiği bu çalışmadan elde edilen genel sonuçlar, aşağıda belirtildiği üzeredir.

1. Sacların şekillendirilebilirlik özelliğini etkileyen faktörler, malzeme faktörleri ve işlemsel faktörler olmak üzere iki grup altında toplanmaktadır. Malzemenin mekanik özellikleri, uygulanan çekme deneyleri ile belirlenebilmektedir. Sacların şekillendirme proseslerine yatkınlığı ise, daha çok benzeşim deneyleri ile değerlendirilmektedir. Erichsen ve Olsen çökertme, Swift derin çekme, Fukui konik kap çekme ve delik genişletme deneyleri, bu benzeşim deneylerine verilebilecek örneklerin başında gelmektedir. Çökertme deneylerinden elde edilen çökertme yüksekliği değerleri, sacların özellikle gerilerek şekillendirilebilme kabiliyetini yansıtmaktadır. Derin çekme deneylerinden, başarılı olarak çekilebilen maksimum ilkel pul çapının, ıstampa çapına oranı şeklinde hesaplanan sınır derin çekme oranı LDR ise, sac malzemenin derin çekilebilirliğini ifade etmektedir. Saclarda sınır gerinimleri ifade eden şekillendirme sınır eğrileri ise, benzeşim deneylerine göre daha güvenilir değerlendirmelere olanak sağlamaktadır.

2. Sac malzemenin kimyasal bileşimi ve alaşım elemanlarının oranı, mekanik özellikleri etkileyen faktörlerin başında gelmektedir.

3. Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini belirleyen mekanik özelliklerin başında dayanım, sertlik ve uzama değerleri gelmektedir. Sac malzemelerin akma dayanımının ve sertlik değerinin artması, şekillendirilebilirlikteki düşümün başlıca göstergesi olmaktadır. Diğer taraftan akma dayanımının çok düşük seviyelerde olması, şekillendirme işlemleri sırasında sacın oluşan kuvvetlere dayanım gösterememesi olarak sonuçlanmaktadır. Uzama değerlerinden kopma uzaması ve boyunlanmanın oluşum sınırı olan maksimum uniform uzama değeri, malzeme sünekliğini doğrudan ifade etmekte ve yüksek değerlerde olmaları istenmektedir. Bunlara ek olarak, sac malzemenin elastiklik modülünün düşük olması, şekillendirme işlemlerinde geri esnemenin azalmasına neden olmaktadır.

4. Paslanmaz çelik sacların kesilmesi için, pekleşme özelliklerinden dolayı eşdeğer karbonlu saclara göre daha fazla kuvvet gerektirmektedir.

5. Sac malzemelerde tane büyüklüğü önemli bir kriterdir. Küçük taneli malzemelerde dayanım ve sertlik değerleri yüksek olmakta; şekillendirilebilirlik ise düşük bir düzeyde kalmaktadır. Tane iriliğinin artması ile dayanım düşmekte ve şekillendirilebilirlik iyileşmektedir. Bununla birlikte, tane büyüklüğünün özellikle ASTM 5 değerinin altına

düşmesi ile, sac yüzeyinde portakal kabuğu görünümünde bozukluklar meydana gelmektedir. Bu nedenle ideal tane büyüklüğü, ASTM 7 veya ASTM 8 olarak kabul edilmektedir.

6. Sac kalınlığının artması ile kalınlık yönünde daha yüksek bir gerinim düzeyine ulaşılabilmekte, dolayısıyla şekillendirme sınır eğrileri ve FLD_0 noktası yükselmektedir. Bu ise şekillendirilebilirlik yönünden artım ifade etmektedir.

7. Çelik sacın mekanik özelliklerinde değişimlerin ortaya çıkmasına neden olan önemli işlem değişkenlerinden biri de sıcaklıktır. Sürekli döküm, slab ısıtma, sıcak haddeleme, rulo sarma ve tavlama esnasında değiştirilebilen parametre olan sıcaklık, malzeme mikroyapı değişkenliklerini doğrudan etkilemektedir.

8. Çelik sacın pekleşme üstelinin yüksek olması, üniform gerinim alanının büyümesi ve boyunlanmanın daha geç ortaya çıkması demektir. Bu durum, şekillendirilebilirliğin ve özellikle gerilebilirliğin artmasının önemli göstergesidir.

9. Derin çekilebilirliği ifade eden mekanik özellik, (R) yani anizotropi katsayısıdır. Plastik anizotropi değerinin artması sacın incelmeye veya kalınlaşmaya karşı direncinin artması demektir. Bu da, pres operasyonlarında şekillendirilebilirliğin artımının en önemli göstergesidir. Kulaklanma diye tabir edilen imalat kusurunun oluşmasında, plastik anizotropi katsayısının değişik doğrultulardaki değerlerinden elde edilen düzlemsel anizotropi katsayısı Δr ‘ nin etkisi büyüktür. Malzeme ıskarta oluşturduğu için oluşması istenmeyen kulaklanmanın ortadan kalkması için Δr değerinin sıfıra yaklaşması gerekmektedir.

10. Paslanmaz çelik saclarla imalat yapılması sırasında, genel olarak diğer saclara göre daha fazla güç kullanılması, kullanılan takım, kalıp, aparat ve ekipmanlarının daha sık tamiri veya değiştirilmesi sonucunu doğurmakta ve parça yüzeyine daha fazla özen gösterilmesi gerekmektedir.

11. Paslanmaz çelik ve galvaniz saclarda yağlayıcı kullanmadan da kalıpta kesme yapılabilir. Fakat yağlayıcının kullanılması durumunda kuvvet ve güç ihtiyacı düşmekte, kullanılan takımların ömrü artmaktadır.

12. Östenitik paslanmaz çelik grubuna ait olan 304 Kalite paslanmaz çelikler, sünek olmaları sebebiyle özellikle soğuk sac şekillendirmede en çok kullanılan türlerdir. Özellikle östenitik paslanmaz çeliklere yüksek oranlarda çekme uygulanabilir.

13. Derin çekmede gerekli olan zımba kuvveti; ideal deformasyon kuvveti, sürtünme kuvvetleri ve varsa ütüleme için gerekli olan kuvvetlerin toplamıdır ve zımba strokunun uzunluğu ile değişmektedir.

14. Pot çemberi basıncı, katlamaları önleyecek derecede yüksek olmalıdır. İlk derin çekme kademesinde sorun çıkmaz ise genellikle daha sonraki kademelerde de genellikle sorun çıkmamaktadır. Ancak pot oluşmuş ise bunun ilerideki kademelerde giderilmesi mümkün değildir.

15. Özellikle karmaşık şekilli parçaların çekilmesinde, kritik bölgelerdeki malzeme zayıflamasını arttıracak ve yırtılmalara sebep olacak yüksek hızlardan kaçınılmalıdır.

16. Paslanmaz çelik malzeme ile yapılan imalat, karbon ve az alaşımlı çeliklerden daha farklı özellikler taşır. Bu farklılık, genellikle malzemelerin akma dayanımı ile pekleşme davranışlarının değişik olmasından kaynaklanır ve her bir paslanmaz çelik türü için ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir.

17. Sac şekillendirilebilirliği etkileyen işlem faktörlerinden ilk akla geleni, takım geometrisi ve boyutları olmaktadır. Derin çekme işlemlerinde, kalıp ağzı ve ıstampa köşe yuvarlatma yarıçapı önemli parametrelerdir. Söz konusu kavisler gereğinden küçük tutulursa, kap cidarının tabanına yakın kesiminde oluşan gerinim yığılması nedeni ile, derin çekme kabiliyetinin düşmesi kaçınılmaz olmaktadır. Istampa köşe yuvarlatmasının gereğinden büyük tutulması ise, derin çekmeden ziyade bir germe etkisinin oluşmasına sebep olacaktır. Özellikle paslanmaz çelik saclarda kalıp ağzındaki yuvarlatmanın gereğinden büyük tutulması halinde, kırışma hataları ortaya çıkmaktadır.

18. Paslanmazların bükme ve kenarlama işlemleri diğer çeliklere oranla daha fazla özen ve % 50- 60 daha fazla kuvvet gerektirmektedir.

19. Çelik sacın mekanik özellikler bakımından tutarlılığının iyi olması, pres operasyonlarında malzemeden kaynaklanan ıskartaların azalması ve dolayısıyla onun şekillendirilme verimliliğinin iyi düzeyde olması demektir. Çelik sacdan, şekillendirilecek bir parça için şekillendirilebilme yeteneğinin aranmasının yanında, şekillendirilme verimliliğinin de üst seviyelerde olması arzu edilmektedir.

20. Özellikle paslanmaz çeliklerde kesme kuvvetinin düşürülmesi için kalıp veya zımbanın açılı yapılması gerekmektedir.

21. Farklı hızlarda yapılan çekme deneylerinde akma ve çekme dayanımının hız arttıkça bir miktar daha arttığı gözlemlenmektedir. İncelenen 304 kalite paslanmaz çelik sacın “ m “ değerlerinin pozitif çıkması, galvaniz saca göre boyunlanma sonrası uzamasının daha fazla olacağının göstergesidir.

22. 304 paslanmaz çelikte haddeye paralel ve dik doğrultularda akma dayanımı daha fazladır. Yine çekme dayanımı da bu yönlerde yüksektir. Tablolara bakarak, haddelemeye dik yöndeki maksimum üniform uzama ve kopma uzaması değerlerinin, mekanik anizotropi sonucunda en düşük düzeyde kaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, mekanik liflenmeyi oluşturan ve haddeleme yönünde uzamış olan kalıntıların, bu yöne dik doğrultularda kesitte etkin bir süreksizlik oluşturması şeklinde açıklanmaktadır.

23. Derin çekme işlemlerinde malzeme iç yapısı gereği DX 51 galvaniz sac malzemenin çekilebilirliğinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Derin çekme deneylerinde, başarılı olarak çekilebilen numunelerin sınır derin çekme oranları (LDR) hesaplanmıştır ve galvaniz malzemede bu değerin daha yüksek olması 304 kalite paslanmaz çeliğe göre derin çekilebilirliğinin daha iyi olduğunun bir göstergesidir.

24. Özellikle korozyon dayanımının yüksek olması istenen parçalarda 304 kalite paslanmaz çelik, galvaniz saclara göre tercih edilmektedir.

25. Galvaniz sacların maliyetlerinin ve ıskarta oranlarının paslanmaz çelik saclara göre daha düşük olması, sanayide giderek artan bir şekilde galvaniz sac kullanımına geçilmesi sonucunu doğurmaktadır.

11. SONUÇ

304 Kalite paslanmaz çelik ve DX51 kalite galvaniz sacların biçimlendirme kabiliyetlerinin çeşitli yönleri ile incelenmesi için yapılan deneysel çalışmalar neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır :

Yüzey kalitesi ve korozyon dayanımı gerektiren durumlarda 304 kalite paslanmaz çelik saclar, DX51 kalite galvaniz saclara göre tercih edilmektedir.

304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 galvaniz sac için her biri kendi içinde değerlendirildiğinde çekme ve akma dayanımı, haddeleme yönünde ve buna dik doğrultuda birbirine çok yakın değerlerdedir. En yüksek dayanım, haddeleme yönüne yaklaşık 45°' lik doğrultuda ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık haddeleme yönüne 45°' lik doğrultuda sac kullanımı, ıskarta sac oranını arttıracağı için seri imalat şartları ve yüksek üretim adetleri göz önünde bulundurulduğunda, endüstride uygulanabilirliği yoktur.

Çekme deneyleri sırasında yapılan ani hız arttırımında, her iki sac malzeme için de kuvvet ve gerilme değerlerinde ani piklerin oluşmaması 304 kalite paslanmaz çelik ve DX51 galvaniz sacların gerinim hızına duyarlılıklarının düşük olduklarının göstergesidir.

İncelmeye karşı direnci ifade eden anizotropi katsayısı (R), DX51 galvaniz saclarda 304 kalite paslanmaz çeliğe göre daha yüksektir. Anizotropi katsayısının yüksek olması, pres operasyonlarında şekillendirilebilirliğin artımının en önemli göstergesidir. Basit geometrili sac parçalarda DX51 kalite galvaniz sacın derin çekilebilirliği, 304 kalite paslanmaz çelik saca göre daha iyidir. Buna karşılık ΔR değerinin yüksek olması kulaklanma diye tabir edilen imalat kusurunun oluşmasına sebep olmaktadır. Kulaklanma da malzeme ıskarta oranını arttırması sebebiyle seri üretimde istenmemektedir. Kulaklanmanın ortadan kaldırılabilmesi için ΔR değerinin sıfıra yaklaşması gerekmektedir. Bu sebeple özellikle karmaşık şekilli ve derin çekme yüksekliği fazla olan parçalarda, 304 kalite paslanmaz çelik kullanımı DX51 galvaniz saca göre tercih edilmektedir.

Pekleşme üsteli (n) değeri yüksek olan malzemelerde, pekleşme sonucu kesitin yük taşıma kapasitesi de artmaktadır. Sonuçta, üniform deformasyon alanı büyümekte ve kesitte boyunlanma daha geç ortaya çıkmaktadır. 304 kalite paslanmaz çelik sacın pekleşme üsteli değerinin, DX51 kalite galvaniz saca göre yüksek olması, paslanmaz çelik sacda boyunlanmanın daha geç oluşması sonucunu doğurmaktadır. Boyunlanma oluşumu mekanik dayanım açısından istenmeyen bir durumdur. 304 kalite paslanmaz çelik sacların kesilmesi için gerekli olan kuvvet, pekleşme özelliklerinden dolayı DX51 kalite galvaniz saclara göre

daha yüksektir.

304 Kalite paslanmaz çelik saclarla imalat yapılması sırasında, genel olarak DX51 kalite galvaniz saclara göre daha fazla güç kullanılması, kullanılan takım, kalıp, aparat ve ekipmanların daha sık tamiri veya değiştirilmesi sonucunu doğurmaktadır. Paslanmazların bükme ve kenarlama işlemlerinde galvaniz saclara oranla daha fazla özen ve % 50- 60 daha fazla kuvvete ihtiyaç vardır . Gerekli olan şekillendirme ve kesme kuvvetini düşürebilmek için özellikle paslanmaz çeliklerde kalıp veya kesme takımının açılı yapılması gerekmektedir.

Maliyet açısından yapılacak bir değerlendirmede ise, DX51 galvaniz saclar 304 kalite paslanmaz çeliklere göre yaklaşık % 50 daha ucuzdur.

304 kalite paslanmaz çelikler ile DX51 kalite galvaniz saclar mukayese edildiğinde, paslanmaz çelik saclar maliyet dezavantajına karşılık, korozyon dayanımlarının yüksek olması, yüzey kalitelerinin üstünlüğü ve şekillendirme kabiliyetleri ile mekanik dayanım avantajları sebebiyle özellikle karmaşık geometrilere sahip parçalarda tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR

Altıntaş, S., (1984), “ Biçimlendirme Sınır Diyagramları ve Kullanımı “, 8. Metalurji Sempozyumu, İstanbul.

Aran, A., (2005), “ Paslanmaz Çelik Yassı Mamuller “, Sarıtaş.

Arkun, E., (2006), “ Paslanmaz Çelik Saclarda Şekillendirme Karakteristikleri “, (Yüksek Lisans Tezi), YTÜ F.B.E. Makine Mühendisliği, İmal Usulleri Programı, İstanbul.

ASSDA, (2006) Australian Stainless Stell Development Association), http://www.assda.asn.au

Bodur, H.O., (1975), “ Metallere Plastik Şekil Verme Usulleri “, Birsen Kitabevi.

Borçelik Çelik San. Tic. A.Ş., (1999), “ Soğuk Haddelenmiş Sacların İmalatı ve Standartları”, seminer notları, İstanbul.

Can, A.Ç., (2006), “ Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi “ Birsen Yayınevi, İstanbul.

Colombier, L. ve Hochmann, J., Stainless and Heat Resisting Steels, Edward Arnold Publishers Ltd.

Çapan, L., (2003), Metallere Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitapevi.

Değirmenci, H., (2006), “ Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişimler ve Nedenleri ile Bunların Şekillendirme Prosesi Üzerindeki Etkileri “, (Yüksek Lisans Tezi), YTÜ F.B.E. Makine Mühendisliği, İmal Usulleri Programı, İstanbul.

Dervişoğlu, A. Kerim, (2008), “ Dünden Bugüne Demir Çelik “, Demir Çelik Store Dergisi.

Dieter, G.E., (1984), “ Workability Testing Techniques “, ASM, Chapter 7.

Dieter, G.E., (1988), Mechanical Metallurgy, McGraw- Hill, London.

Eary, F.D. ve Reed, E.A., (1974), Techniques of Pressworking Sheet Metal, Prentice- Hall, New Jersey.

Eren, V., Çanakçı, İ., Altıntaş, S., (1985), “ Sheet Metal Formability and Factors Affecting Formability “, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Erhuy, C.G., (2001), “Soğuk Haddelenmiş Düşük Karbonlu Çelik Sacların Şekillendirilebirlik Özellikleri ve Mekanik Karakteristikleri”, (Yüksek Lisans Tezi), YTÜ F.B.E. Makine Mühendisliği, İmal Usulleri Programı, İstanbul.

Eshel, G., Barash, M. ve Johnson, W., (1986), “ Rule Based Modeling for Planning Axisymmetrical Deep – Drawing “, Journal of Mechanical Working Technology, 14(1):1-115.

Ghosh, A.K., Hecker, S.S. ve Keeler, S.P., (1984), “ Sheet Metal Forming and Testing”, Workability Testing Techniqes- edited by Dieter, G.E., American Society of Metals, Ohio.

Granzow, W.G., (1990), “ Sheet Formability of Steels “, Metals Handbook – Vol.1 (Proporties and Selection : Iron, Steels and High Performance Alloy), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Hecker S.S., (1975), “ Simple Technique for Determining Forming Limit Curves”, Sheet Metal Industries, Vol : 52 (No. 11)

Hecker, S.S., (1983) “Experimental Studies of Sheet Stretchability”, Formability, AIME, New York.

Hosford, W.F. ve Caddell, R.M., (1983), Metal Forming – Mechanics and Metallurgy, Prentice- Hall, New Jersey.

Hosford, W.F., (1992) “ Overview of Tensile Testing “, Tensile Testing – edited by Han, P., American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Hosford, W.F. ve Duncan, J.L., (1999), Sheet Metal Forming, The Minerals, Metals and Materials Society, JOM Journal.

Huang, Y.M. ve Chen, J.M., (1995), “ Influence of the Die Arc on Formability in Cylindrical Cup- Drawing”, Journal of Materials Processing Technology, 55: 360 – 369.

Kalpakjian, S., (1991), Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison Wesley, New York.

Kaluç, E., (2002), “ Demir Çelik Teknolojisi – Ders Notları “, Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.

Kayalı, E.S., Ensari, C., Silahtaroğlu, S., (1979), “Derin Çekme Kalitesindeki Saclarda Özellikleri Etkileyen Faktörler”, 3.Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara.

Kayalı, E.S. ve Ensari, C., (1986), “ Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları”, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya- Metalurji Fakültesi, İstanbul.

Kayır, Y.Ziya, (2007), “Dünyada ve Türkiye’ de Paslanmaz Çelik”, KOSGEB

Keeler, S.P. ve Brazier, W.G., (1977) “ Relationship Between Laboratory Material Characterization and Press-Shop Formability “, Microalloying 75, Union Carbide Corporation, New York.

Kerim Çelik, (2007), “ Ürün Kataloğu “

Lange, K., (1985), “ Handbook of Metal Forming “, McGraw Hill, New York.

Lankford, W. T., (1985), “ The Making, Shaping and Treating of Steel “, New York.

Li, M. ve Chandra, A., (1999), “ Influence of Strain – Rate Sensitivity on Necking and Instability in Sheet Metal Forming”, Journal of Materials Processing Technology, 96:133-138

Marciniak, Z ve Duncan, J., (1992), Mechanics of Sheet Metal Forming, Edwards Arnold, London.

Mielnik, E.M., (1992), “ Metalworking Science and Engineering “, McGraw Hill Inc., New York.

Newby, J.R., (1978), “ Formability of Steel Sheet “, Metals Handbook – Vol.1 (Proporties and Selection: Iron and Steels), American Society for Metals, Metal Park, Ohio.

Outokumpu Stainless, (2004), Corrosion Handbook.

Rao, K.P. ve Sing, W.M., (2000), “On the Prediction of the Effect of Process Parameters upon Forming Limit Strains in Sheet Metals”, International Journal of Mechanical Sciences, 42: 451 – 472

Taylor, B., (1985), “ Sheet Formability Testing “, Metals Handbook – Vol. 8 (Mechanical Testing), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Taylor, B., (General Motors Corporation), (1988), “ Formability Testing of Sheet Metals”, Metals Handbook – Vol. 14 (Forming and Forging), American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Temel, M.A. ve Aran, A., (2004) “ Paslanmaz Çelik Katoloğu “, Sarıtaş Teknik Yayın No: 1

Tülbentçi, K. ve Kaluç, E. , (1995), Paslanmaz Çelikler ve Kaynaklanabilirliği Seminer Notları, Kocaeli Üniversitesi.

Vural, M., (2003), “ Üretim Yöntemleri – Ders Notları “ , İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Yurci, M.E., (1991), Talaşsız Şekil Verme Analizleri ve Gelişmeler – 1, Yüksek Lisans Ders Notları.

Yurci, M.E., (1997), Kalıp İmal Tekniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

Yurci, M.E., (2008), Sac Şekillendirme Semineri – MMO Seminer Notları, İstanbul.

Zhu, X., (1999), “ Theoretical Analysis of Sheet Metal Formability “ , (A. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy), Mechanical Engineering Department, Michigan Technological University, Michigan.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	16.03.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1989-1996	Üsküdar Anadolu Lisesi
Lisans	1996-2002	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2002-Devam ediyor ARÇELİK A.Ş.