

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜNEK OLMAYAN/YÜKSEK MUKAVEMETLİ METAL
SACLARIN ISITILARAK ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. M. Emin ERDİN

503001313

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Programı: İmalat Mühendisliği

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Haydar LİVATYALI

MAYIS 2003

**SÜNEK OLMAYAN/YÜKSEK MUKAVEMETLİ
METALLERİN ISITILARAK ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. M. Emin ERDİN
(503001313)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2003**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Haydar LİVATYALI
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Murat VURAL (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ (İ.T.Ü.)**

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında ve öncesinde bana her zaman bilgi birikimi ve tecrübeleriyle yardımcı olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Haydar LİVATYALI'ya ve değerli yardım ve katkılarından dolayı BİAS A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bana her zaman destek olan sevgili aileme teşekkürler.

Mayıs 2003

M. Emin ERDİN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. ŞEKİLLENDİRMEDE ETKİN MEKANİK ÖZELLİKLER	6
2.1. Akma mukavemeti	6
2.2. Plastik anizotropi	7
2.3. Deformasyon hızına duyarlılık üsteli	9
2.4. Çelik sacların şekillendirilmesi	10
2.4.1. Şekillendirilebilirlik ölçüm yöntemleri	12
2.4.1.1. Deneysel yöntemler	12
2.4.1.2. Şekillendirme sınır diyagramları	14
2.4.1.3. Bilgisayar destekli uygulamalar	15
3. DERİN ÇEKME İŞLEMİ VE ISITMA	17
3.1. Dahili - Harici Isıtma	19
3.2. Isıtma işlemi için bir yöntem önerisi	19
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
4.1. Titanyum saclar ve yarı sıcak/sıcak şekillendirilebilirlikleri	21
4.1.1. Titanyum sacların sıcak derin çekilebilirliği	22
4.1.2. Deney sonuçları	24

4.2. Alüminyum saclar ve ılık şekillendirme	27
4.2.1. Alüminyum sacların şekillendirilebilirliği	29
4.2.2. Deney sonuçları	34
4.3. Alüminyum alaşımı sacların ılık derin çekilmesinde ısı iletiminin sonlu elemanlar analizi	34
4.3.1. Deneysel prosedür	36
4.3.2. Sayısal prosedür	37
4.3.3. Deney sonuçları	40
4.4. Yoğruk magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesi	45
4.4.1. Magnezyum sacların plastik malzeme özellikleri	46
4.4.2. Magnezyum alaşımlarının derin çekilmesi	48
4.4.3. Isıtmalı derin çekme işlemine tabi tutulan magnezyum sacların gevşeme davranışını açıklamak için geliştirilen bir formülasyon	50
5. BÜNYE DENKLEMLERİ - SAYISAL ANALİZ VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	54
5.1. Bünye Denklemleri	54
5.1.1. Birinci grup bünye denklemleri	56
5.1.2. İkinci grup bünye denklemleri	60
5.2. Sac metallerin derin çekilmesinin sayısal analizi	62
5.3. Yarı Küresel Zımba ile Eksenel Simetrik Derin Çekmenin Sonlu Elemanlar Analizi	67
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	82
EKLER	84
ÖZGEÇMİŞ	95

KISALTMALAR

BŞD	: Birim Şekil Değişimi
CAE	: Bilgisayar Destekli Mühendislik
CPT	: Ticari Saf Titanyum
DR	: Derin Çekme
HD	: Hadde Doğrultusu
HSLA	: Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı
UHSLA	: Ultra Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı
LDR	: Derin Çekme Oranı
WTS	: Sacın kalınlık doğrultusundaki BŞD

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Çeşitli sacların ortalama normal anizotropi parametresi.....	8
Tablo 4.1. Titanyumun kimyasal özellikleri.....	22
Tablo 4.2. Sacların HD ile 0°, 45° ve 90° açı yapan doğrultulardaki tek eksenli çekme değerleri.....	24
Tablo 4.3. Brinell sertlik deneyi sonuçları.....	33
Tablo 4.4. Sacın kimyasal bileşimi.....	36
Tablo 4.5. Akma dayanım formülü için değerler.....	40
Tablo 4.6. Sacın termal katsayıları.....	40
Tablo 4.7. Brand bağıntısının katsayıları.....	52
Tablo 5.1. IMI 230 malzemesinin kimyasal bileşimi.....	67
Tablo 5.2. 20MnCr5 malzemesinin kimyasal bileşimi.....	67
Tablo 5.3. Titanyumun (IMI 230) derin çekme analizine ait sonuçlar.....	77

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	:Bir otomobil şasisinin sac malzemeden oluşan kısımları..... 3
Şekil 1.2	:Bir otomobile ait sac parçaların (istenen) mukavemet değerleri..... 4
Şekil 2.1	:Belirgin akma noktası sonucu oluşan lüders bantları..... 7
Şekil 2.2	:Plastik deformasyon oranı hesabında kullanılan ϵ değerleri..... 8
Şekil 2.3	:Ortalama normal anizotropi parametresinin derin çekme oranına etkisi..... 8
Şekil 2.4	:Tavşan kulağı oluşumu..... 9
Şekil 2.5	:Heckers sac çökertme deney düzeneği..... 13
Şekil 2.6	:Yarı küresel zımba ile deneye tabi tutulan parça..... 13
Şekil 2.7	:Kırılarak -yırılma- hasara uğramış deney parçası..... 14
Şekil 2.8	:Şekillendirme sınır diyagramına bir örnek..... 15
Şekil 2.9	:MSC.Superform 2002 programı ile ısı transferi modelleneniliyor...16
Şekil 3.1	:Isıtmalı derin çekme için işlem zinciri..... 17
Şekil 3.2	:Derin çekme için ısıtılabilir bir kalıp dizaynı.....18
Şekil 4.1	:Titanyum alaşımı saclar uçak sanayinde de kullanılmaktadır.....21
Şekil 4.2	:Titanyumun çeşitli kullanım alanları.....22
Şekil 4.3	:Sac kalınlığının ve kalınlık doğrultusundaki deformasyon miktarının hadde doğrultusu ile yapılan açılı ile değişimi.....25
Şekil 4.4	:Sıcaklık gradyeni uygulamasında ortaya çıkan durum.....26
Şekil 4.5	:Tüm gövdesi titanyumdan üretilen ilk seri üretim araç.....28
Şekil 4.6	:Matris sıcaklığının, dikdörtgensel kutu şekilli derin çekmede, maksimum ürün yüksekliğine etkileri..... 31
Şekil 4.7	:1050-H14 için maksimum ürün yükseklikleri..... 31
Şekil 4.8	:50 mm kenarlı sac için kritik zımba stroku..... 32
Şekil 4.9	:5754-O için maksimum konik derinlikler..... 33
Şekil 4.10	:6016-T4-O için maksimum konik derinlikler..... 33
Şekil 4.11	:Değişik sıcaklıklar için gerilme-deformasyon diyagramı..... 36
Şekil 4.12	:Silindirik derin çekme..... 37
Şekil 4.13	:Oda sıcaklığında derin çekme deneyinde hasar..... 38
Şekil 4.14	:Ilık derin çekme deneyi sonrası ürün..... 38
Şekil 4.15	:Derin çekme deneyinde hesaplanan deforme olmuş ağ yapısı..... 39
Şekil 4.16	:Ilık derin çekme deneyi için sıcaklık dağılımı ve deforme olmuş ağ yapısı..... 41
Şekil 4.17	:Ilık derin çekme deneyinde hasar..... 42

Şekil 4.18	:İlık derin çekme deneyinin simülasyonuna ait sonuçlar.....	42
Şekil 4.19	:Oda sıcaklığında ve 250 °C sıcaklıkta derin çekme testlerinde şekillendirilebilirlik.....	43
Şekil 4.20	:Sıcaklıkla derin çekilebilirliğin değişimi.....	43
Şekil 4.21	:Üniform sıcaklık şartlarında, sıcaklık ile LDR arasındaki bağıntı...	44
Şekil 4.22	:Yüksek zımba hızında (10 mm/sn) ılık derin çekme durumunda ortaya çıkan ağ yapısı ve sıcaklık dağılımı.....	45
Şekil 4.23	:Tek eksenli çekme testinde gerilme-deformasyon eğrilerinin sıcaklıkla değişimi.....	47
Şekil 4.24	:Tek eksenli çekme testinde σ - ϵ eğrilerinin deformasyon hızıyla değişimi.....	47
Şekil 4.25	:50 °C ve $\beta_0=1.45$ için derin çekme deney sonuçları.....	48
Şekil 4.26	:Sıcaklığa bağlı derin çekme oranı.....	49
Şekil 4.27	:Derin çekme oranının zımba hızına bağlı değişimi.....	49
Şekil 4.28	:250 °C’de derin çekilmiş parça.....	50
Şekil 4.29	:AZ31 ve AE21’e ait akış çizgileri.....	52
Şekil 5.1	:Rijit-ideal plastik ve elastik-ideal plastik malzeme modelleri.....	55
Şekil 5.2	:Değişik akma eğrisi şekilleri.....	58
Şekil 5.3	:Zımba, kalıp ve ağ yapısının geometri ve boyutları.....	64
Şekil 5.4	:Deformasyonla izafi kulak yüksekliğinin değişimi.....	64
Şekil 5.5	:Zımba, kalıp ve ağ yapısının geometri ve boyutları.....	65
Şekil 5.6	:Değişik anizotropi katsayı kombinasyonlarının etkileri.....	65
Şekil 5.7	:(a) $h_{max}=23.5$ mm. (b) $h_{max}=36$ mm. (c) $h_{max}=31$ mm.....	66
Şekil 5.8	:M değerinin maksimum çekme yüksekliğine etkisi.....	66
Şekil 5.9	:M değerinin kalınlık doğrultusundaki BŞD dağılımına etkisi.....	66
Şekil 5.10	:M değerinin birincil BŞD dağılımına etkisi.....	67
Şekil 5.11	:Eksenel simetrik derin çekme için alt kalıp.....	68
Şekil 5.12	:Eksenel simetrik derin çekme için sac tutucu.....	69
Şekil 5.13	:Derin çekme işlemine ait elemanlar ve geometri.....	70
Şekil 5.14.	:Oda sıcaklığında derin çekme işlemi.....	72
Şekil 5.15.	:400 °C sıcaklıkta derin çekme işlemi.....	72
Şekil 5.16.	:600 °C sıcaklıkta derin çekme yüksekliği.....	73
Şekil 5.17.	:750 °C sıcaklıkta derin çekme oranı önemli seviyede düşmüştür... 74	74
Şekil 5.18.	:850 °C sıcaklıkta derin çekme yükseklikleri.....	74
Şekil 5.19.	:20MnCr’nin derin çekilmesine ait grafik veriler.....	75
Şekil 5.20.	:25 °C sıcaklıkta titanyumun derin çekilmesi.....	76
Şekil 5.21.	:300 °C’de 45 mm derin çekildikten sonra hasar başlangıcı.....	76
Şekil 5.22.	:Değişik sıcaklıklarda derin çekme yükseklikleri.....	77
Şekil 5.23.	:Titanyumun (IMI 230) derin çekme analiz ait ekran görüntüleri....	78

SEMBOL LİSTESİ

a ve b	:Sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı parametreler
C	:Spesifik ısı
CMλaa₁bb₁	:Deneysel parametre ve fonksiyonlar
D	:Tane boyutu
d_o	:Boşluk çapı
d_p	:Zımba çapı
I_R, I_Z	:Sınır yüzeyin doğrultman kosinüsleri
k, p, l	:Malzeme sabitleri
m	:BŞD hızı duyarlılığı
M(T)	:Malzemenin elastik özelliklerinin sıcaklıkla değişimini ifade eden fonksiyon
n, n₁	:Pekleşme katsayıları
n_i	:Mühendislik ve teorik BŞD lerine ait bir fonksiyon
P($\dot{\epsilon}$,T)	:BŞD hızının değişmesiyle gerilmenin ani değişimi
Q	:Aktivasyon enerjisi
q	:Isı üretim oranı
R	:Ortalama plastik deformasyon oranı
R[*]	:Normal plastik anizotropi
R, Z	:Sac düzleminin koordinatları
r	:Ortalama plastik BŞD oranı
r_d	:Kalıp profil yarıçapı
s_m	:Doyma değerleri sabiti
T	:Sıcaklık
T	:Zaman
{T}	:Nodal sıcaklık vektörü
T_a	:Havanın yada takımın sıcaklığı
T_v=T[1-K.ln($\dot{\epsilon}$ /$\dot{\epsilon}_0$)	:BŞD hızına göre düzenlenmiş sıcaklık
W	:Sıcaklığa bağlı sabit
Z=$\dot{\epsilon}$ exp(Q/RT)	:Sıcaklığa göre düzenlenmiş BŞD hızı
z_i	:Teorik BŞD
α	:Isı geçiş katsayısı
σ	:Gerçek gerilme
σ_p	:Akma dayanımı
σ_{p0}	:Hasar noktası

σ_{pB}	:Minimum sıcaklık ve deformasyondaki temel eğri
σ_{pm}	:Maksimum çekme dayanımındaki akma gerilmesi
σ_{ps}	:Doyma gerilmesi
$\sigma_w(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$	:İçyapı durum parametresi
σ_p^* ve $\dot{\epsilon}^*$	:Gerilme ve BŞD durumlarına ait indisler
ϵ	:Gerçek BŞD
ϵ_0	:Temel BŞD hızı
ϵ_m	:Kritik BŞD
ϵ_o	:Başlangıç BŞD değeri
$\dot{\epsilon}_{vp}$	:Viskoplastik BŞD oranını
$\dot{\epsilon}_w$	:İçyapı durum değişim oranını
$\delta\sigma_p/\delta\epsilon$	:Pekleşme oranı
$\delta\sigma_{pB}/\delta\epsilon$	:Benzeş sıcaklıktaki pekleşme oranı
$\delta\sigma_{pR}/\delta\epsilon$	:Dinamik rekristalizasyon pekleşme oranı
ΔR	:Düzlemsel anizotropi parametresi
ρ	:Yoğunluk
$(\gamma_o/\epsilon)(\sigma_{pB}I_{\epsilon+\Delta\epsilon} - \sigma_p I_{\epsilon}) \exp(q \sigma_p^2)$	:Dinamik telafi gevşeme oranı
λ	:İçyapı değişkenlerinin doyma noktasına ulaşmasını ifade eden sabit
λ	:Isıl iletkenlik
$\lambda_s \dot{\epsilon}_{vp}$	:Dinamik telafiye bağlı deformasyon gevşemesi
$\lambda_{sm} \dot{\epsilon}_{vp}$	:Lineer BŞD pekleşmesi

SÜNEK OLMAYAN/YÜKSEK MUKAVEMETLİ METAL SACLARIN ISITILARAK ŞEKİLLENDİRİLMESİ

ÖZET

Günümüzde, ekonomiklik sağlaması nedeniyle hafif ve yüksek mukavemetli metallerin endüstride kullanımı önem kazanmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe yakıt tüketiminin azaltılması amacıyla taşıt ağırlıkları düşürülmeye çalışılmakta, bu nedenle de HSLA/UHSLA çelikleri, alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımlarının kullanımı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle, otomobil gövdelerinin saclarında hafif metallerin kullanılması önemli ağırlık kazançları sağlayabilmekte, fakat bu metallere ait saclara şekil verme işlemi oda sıcaklıklarında gerçekleştirildiğinde ürün kalitesi düşük olmakta ve işlem etkin bir şekilde gerçekleştirilememektedir. Bunun yanında metal sacların sıcak veya yarı sıcak şekillendirilmesi gerek ısıtma tekniğinden gerekse düşük kütleline karşılık geniş yüzeyi sonucu oluşan kalıba ve çevreye hızlı ısı geçişinden dolayı pek çok teknolojik zorluk ve bilinmez içermektedir. Bu çalışma yüksek sıcaklıklarda sac şekillendirme işleminin sınırlarının belirlenmesi ve etkinliğinin incelenmesi amacıyla. Literatürde bulunan deneysel ve analitik çalışmaların bir kısmı özetlendikten sonra, MSC Superform ticari programı kullanılarak düşük alaşımlı çelik ve titanyum malzemenin sıcak/yarı sıcak şartlarda yarıküresel zımba ile eksenel simetrik derin çekmesi simüle edilmiştir. Bu simülasyon sonuçları daha sonra yapılacak deneysel ve analitik çalışmalara öncülük ve kılavuzluk edecektir.

FORMING OF HIGH STRENGTH/LOW FORMABILITY METAL SHEETS AT ELEVATED TEMPERATURES

SUMMARY

Today, the use of light and high strength metals in industry is more important than ever because of the economic conditions. Especially, in the automotive industry there are many studies to decrease the weight of vehicles and thus fuel consumption. To achieve this, light and high strength metals such as HSLA/UHSLA steels, aluminum, magnesium and titanium alloys etc. have to be used in the vehicle bodies. This process provides a significant weight reduction in the vehicle bodies and fuel consumption; however, formability of these types of metals at room temperature is low and product quality problems may occur due to poor formability. On the other hand, warm or hot forming of sheet metals has some technical difficulties and unknowns because of heating techniques and quick heat transfer to the environment and matrix, which is a result of large surface-to-mass ratio of the workpiece. This study aims to determine the boundaries and investigation of efficiency of the sheet metal deformation processes at elevated temperatures. After summarizing published studies on this topic, the commercial MSC Superform analysis program is used to simulate the axial symmetric warm/hot deep drawing of low alloy steel and titanium sheets with a spherical punch at various temperature and heat transfer conditions. Results of these simulations would be able to pioneer and be a guide to the experimental and analytical studies in the future.

1. GİRİŞ

Derin çekme işlemi metal saclarının şekillendirilmesinde geniş endüstriyel uygulama alanına sahip bir metottur. Ancak bu işlemde büyük miktarda deformasyonlar ortaya çıktığı için oda sıcaklığında bu işlemin gerçekleştirilmesi malzemelerin akma sınırları nedeniyle zorluklar içerir ve ürün yüzeyinde malzemenin anizotropisinden kaynaklanan buruşmalar, kırışmalar ve tavşan kulağı -kulaklanma- oluşumu gibi durumlar ortaya çıkar. Ayrıca derin çekmede derin çekme oranı denilen bir parametre vardır ve bu limit değer, istenilen ürünün oluşturulmasını, en azından tek kademede oluşturulmasını, engelleyebilir. Yüksek sıcaklık şartları malzemelerin akma dayanımlarını düşürüp, sünekliklerini arttırdığı için deformasyonu da kolaylaştırır. Kısaca açıklamak gerekirse; sıcaklık artışı malzemelerin şekillendirilebilirliğini artırır. Yukarıdaki ifade genel olarak doğru olmakla birlikte, dikkat edilmesi gereken nokta, preslemede etkin olan temel mekanizmanın plastik şekil değişimi olduğu ve deformasyon sıcaklığının bu husus dikkate alınarak seçilmesi gerektiğidir. Dolayısıyla, derin çekmenin uygun bir yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilmesi derin çekmenin seviyesini yani derin çekme oranını artırır, ürün yüzeylerinin daha kaliteli olmasını sağlar ve işlemin gerçekleşmesi için gerekli pres kuvvetlerini düşürür.

Yüksek sıcaklıkta derin çekme işleminin gerçekleştirilmesi için ısıtma yöntemi olarak iki değişik yol öne sürülebilir. Bunlardan birinde, derin çekilecek malzeme fırın ortamında ısıtılır ve pres ortamına taşınır. Bu yöntemle homojen bir ısıtma sağlanır, ancak malzemenin taşınması problem yaratır ve taşıma sırasında sıcaklık kaybı ortaya çıkar. İkinci yöntemde, kalıplardan ve sacdan elektrik akımı geçirilerek ısıtma gerçekleştirilir. Bu yöntemde işlem daha pratik bir şekilde gerçekleşir. Ayrıca lokal ısıtmalara imkan sağlaması önemli bir avantajdır. Böylece daha çok deformasyona uğrayacak kısımlar (daha çok) ısıtılarak uygun deformasyonlar gerçekleştirilebilir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, yüksek sıcaklık dışında,

sıcaklık gradyeni uygulaması da derin çekme işleminin gerçekleştirilmesini kolaylaştıran bir parametredir. Örneğin, kalıplardan birinin (zımba yada alt kalıp) soğuk tutulurken, diğerinin ve sacın ısıtılmasının derin çekilebilirliği arttırdığı gözlenmiştir.

Yüksek sıcaklık uygulamasının gerekli olduğu durumlar vardır. Örneğin; alüminyum, magnezyum, titanyum ve HSLA çeliği gibi malzemelerin oda sıcaklığında deformasyon yetenekleri çok zayıftır. Dolayısıyla bu malzemelerin oda sıcaklığında derin çekilmesi etkin bir endüstriyel uygulama olamamaktadır. Bu malzemelere ait sacların derin çekme ile ürün haline getirilebilmesi için yüksek sıcaklık şartları mecburi bir hal almaktadır.

Günümüzde derin çekme işleminin yüksek sıcaklık şartlarında gerçekleştirilmesine ait uygulamalar etkin bir şekilde kullanılamamaktadır. Ancak, özellikle otomotiv sektöründeki gelişmeler yüksek sıcaklıkta derin çekme işleminin gelecekte önemli bir uygulama sahasına sahip olacağını göstermektedir. Son yıllarda, bu sektörde yakıt tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalar, araçların ağırlıklarının azaltılmasının gerekli olduğunu göstermektedir. Bunu sağlamak içinde, araç ağırlığının %30~35'lik kısmını oluşturan ve büyük ölçüde derin çekmeyle üretilen saclardan oluşan araç gövdelerinin ağırlığını azaltma çabaları önem kazanmaktadır. Bunu sağlamak için ise düşük yoğunluklu malzemelerin kullanılması gerekmekte, ancak bunlar da oda sıcaklığı civarında düşük seviyede şekillendirilebilirliklere sahip olduklarından sorun yaşanmaktadır. Dolayısıyla bu malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin maksimum olduğu sıcaklıkların belirlenmesi ve bu sıcaklıklarda derin çekme işleminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Daha öncede bahsedildiği üzere, yüksek sıcaklıkta şekillendirme işlemi endüstride yoğun bir uygulama halini almamıştır ve bazı belirsizlikler içerir. Konuyla ilgili literatür kapsamı da çok dardır. Bu yüzden bu işleme ait parametrelerin belirlenmesi ve olayın bilgisayar ortamında simüle edilmesi işlemin endüstriyel bir hal alabilmesi için öncelikli olarak gerçekleştirilmesi gereken aşamalardır. Bu konularda gerçekleştirilecek çalışmaların artması bu işlemin etkin bir şekilde kullanımını mümkün kılacaktır.

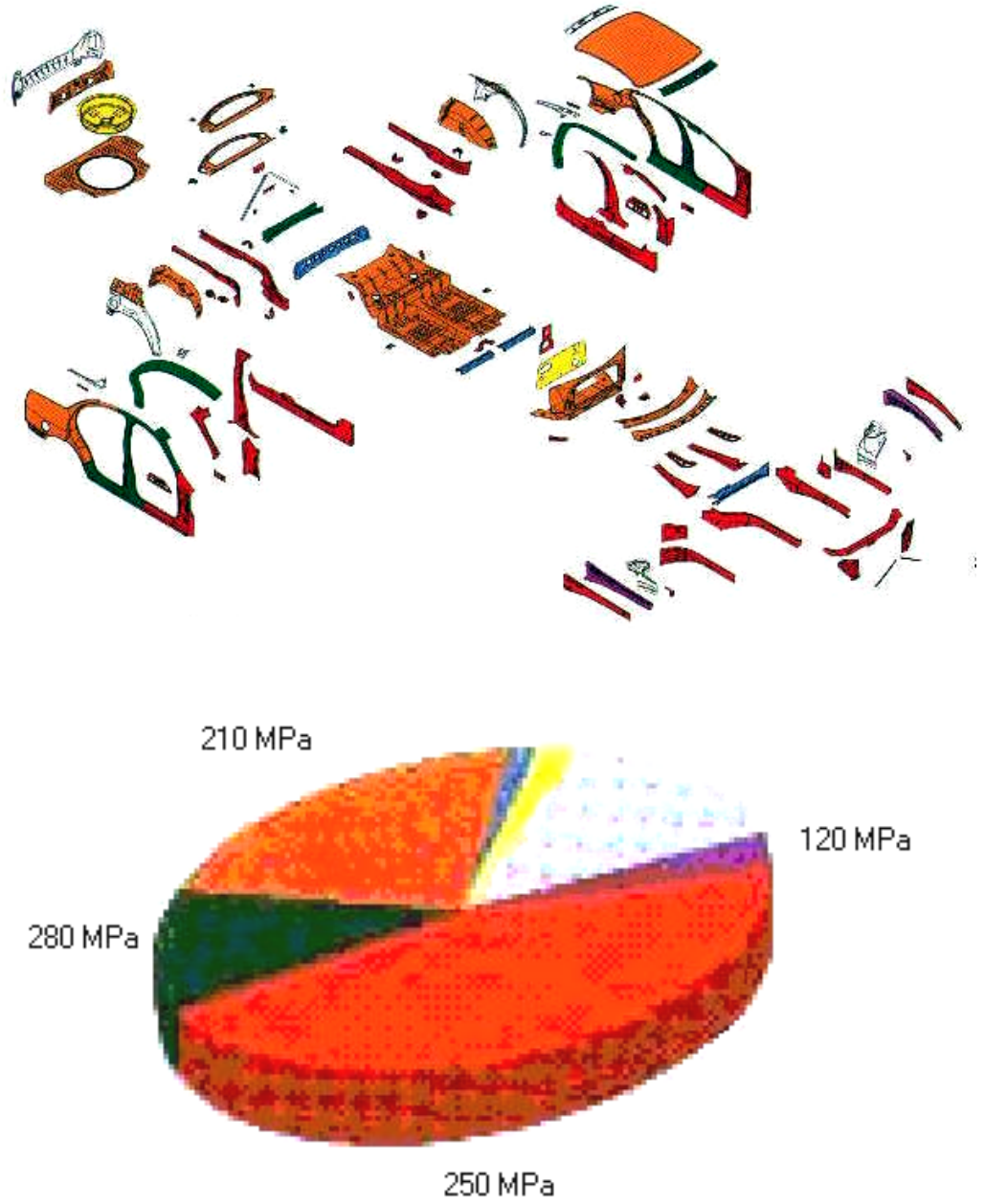
Bu çalışmanın amacı da, literatürde daha önce bu konuda yapılan çalışmaları da referans alarak işlemde etkin parametreleri belirlemek ve bilgisayar simülasyonu ile işlemin etkinliğini ve sınırlarını incelemektir. Analizlerden elde edilen sonuçlar daha önceden gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalara ait verilerle karşılaştırılarak kontrollü bir geçerlilik araştırması gerçekleştirilmiş olacaktır. Bu noktada işleme ait parametreler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. *Sıcaklık,*
2. *Sıcaklık gradyeni,*
3. *Deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$),*
4. *Deformasyon hızına duyarlılık üsteli (m),*
5. *Malzeme geçmişi.*

Yukarıda belirtilen temel işlem parametreleri göz önüne alındığında yarı sıcak/sıcak sac şekillendirme işleminin karmaşık hesaplamalar ve fonksiyonlar ile modellenebileceği görülmektedir. Buna ek olarak, özellikle sac malzemelerin işlenmesinde sac üretim yöntemine, geometriye, takım geometri ve özelliklerine bağlı pek çok etken ürün özelliklerinin işlemde önce öngörülmesini zorlaştırır. İleriki bölümlerde, çelik sacların sanayide kullanımı, sac işlemeye ait parametreler ve şekillendirilebilirlik deney düzenekleri hakkında açıklamalarda bulunulacaktır.



Şekil 1.1. Bir otomobil şasisinin sac malzemeden oluşan kısımları.



Şekil 1.2. Bir otomobile ait sac parçaların (istenen) mukavemet değerleri.

Bu tez çalışmasının içeriği kısaca sünek olmayan/yüksek mukavemetli sacların yarı sıcak/sıcak şartlar altında şekillendirilmesi olarak belirtilebilir ve tez çalışmasında bahsedilen imalat yöntemi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bölüm 2’de metal malzemelerin şekillendirilmesinde etkin mekanik özellikler üzerinde durulmuştur. Bu mekanik özelliklerin bazıları yükseltilmiş sıcaklıklar söz konusu olduğunda şekillendirilebilirlik üzerinde önemli etkilere sahip olmaktadır.

Bu bölümde ayrıca malzemelerin şekillendirilebilirliğinin tespitinde kullanılan ölçüm yöntemlerinden ve çelik sacların şekillendirilebilirliklerinden de bahsedilmiştir.

Bölüm 3'te yarı sıcak/sıcak sac şekillendirme işlemleri için sac malzemelerin ısıtılması amacıyla kullanılabilecek alternatif ısıtma yöntemleri ve bunların birbirlerine karşı avantajları ve dezavantajları üzerinde durulmuş, ayrıca dahili ısıtma işlemi için kullanılabilecek bir ısıtma sisteminden bahsedilmiştir.

Bölüm 4'te titanyum, alüminyum ve magnezyum alaşımı sacların yarı sıcak/sıcak şekillendirilmeleri ile ilgili yapılmış deneysel ve bilgisayar destekli çalışmalardan bahsedilmiş ve bu çalışmaların sonuçları irdelenmiştir. Değişik çalışmalardan elde edilmiş bulunan sonuçlar diğerleriyle karşılaştırılarak sonuçların doğruluğu ve kesinliği konusunda bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Bu bölüm sonucunda hangi malzemelerin hangi sıcaklık mertebelerinde daha iyi şekillendirilebildiği konusunda fikir edinme imkanı ortaya çıkmıştır.

Bölüm 5'te ısıtmalı derin çekme işleminin matematiksel modeli, sayısal analizinde kullanılması gereken bünyesel denklemlerin özellikleri, sonlu elemanlar yöntemi ve işlemin temelini oluşturan ısı geçişinin modellenmesi konularından bahsedilmiş, analizi gerçekleştirilecek sac şekillendirme işlemine ait geometrik ve mekanik bilgiler ile sonlu elemanlar simülasyonuna ait bilgiler sunulmuştur. Daha sonra analiz işleminin sonuçları ortaya konularak, yarı sıcak/sıcak sac şekillendirme işleminin hangi şartlarda ne derecede uygun bir imalat yöntemi olduğu konusundaki düşünceler, sonuçlar başlığı altında belirtilmiştir.

2. ŞEKİLLENDİRMEDE ETKİN MEKANİK ÖZELLİKLER

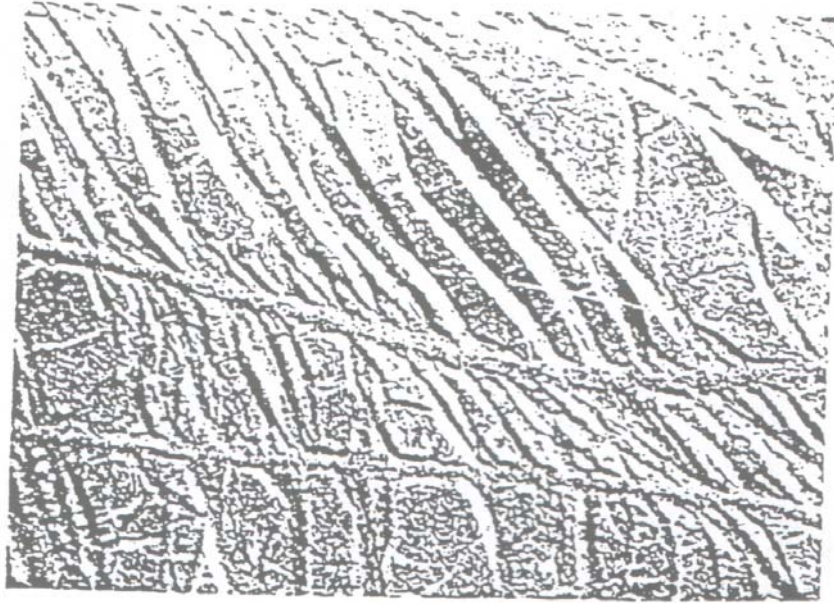
Üretim açısından sacların en önemli malzeme özellikleri dayanımları ve şekillendirilebilirlikleri olmakla birlikte, genelde daha çok şekillendirilebilme üzerinde durulur. Normal koşullar söz konusu olduğunda, sacların şekillendirilebilirliklerinin belirlenmesinde tek yönlü çekme deneyi etkin bir şekilde kullanılabilir. Ancak yarı sıcak/sıcak şekillendirmede işlemi modelleyebilecek tarz deneylerin yapılması daha uygun bir yöntem olacaktır. Her durumda, sonuçlar malzemenin malzemeye değişiklik gösterdiği ve alaşımlama durumu ile içyapı özelliklerine hassas bir şekilde bağlı olduğu için, deneylerin laboratuvar ve bilgisayar ortamlarında gerçekleştirilerek birbirleriyle karşılaştırılması en etkin yöntem olacaktır. Şekillendirilebilirliği etkileyen parametreler; akma mukavemeti, çekme mukavemeti, toplam uzama miktarı, uniform uzama miktarı, akma uzaması, plastik deformasyon oranı, yöne bağlı anizotropi, pekleşme üsteli, deformasyon sertleşmesi üsteli, şekillendirme hızı, kimyasal bileşim, döküm tekniği, soğuk/sıcak haddeleme, termo-mekanik geçmiş şeklinde verilebilir. Isıtma durumunda ise; şekil değişim hızına duyarlılık üsteli (strain rate sensitivity index) önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar [Marciniak ve Duncan, 1992].

2.1. Akma mukavemeti

Sac şekillendirmede malzemenin belirgin akma göstermesi istenmez. Belirgin akma gösteren sac malzemelerde akma sırasında arayer atomlarının dislokasyonları engellemesi neticesinde yüzeyde lüders bantları olarak bilinen pürüzlü bir durum ortaya çıkması sözkonusudur.

Akma mukavemeti malzemenin dayanım ve şekillendirilebilirliğinin bir göstergesidir. Yaklaşık olarak 250 MPa akma mukavemeti ve üstü değerler aşırı geri yaylanma, hızlı kalıp aşınması ve kusurlu ürünler ortaya çıkması durumlarına neden

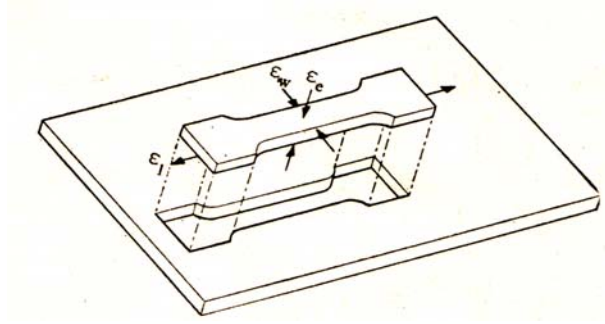
olurken, 150 MPa altındaki değerler ise malzemenin şekillendirme gerilmesine dayanamaması gibi sonuçlar doğurabilir. Dolayısıyla özellikle yüksek dayanımlı sac malzemelerin şekillendirilmesinde ısıtma işlemi mukavemet değerlerinin düşürülmesi açısından gerekli bir durumdur (Yüksek dayanımlı malzemelerin akma dayanımları 750 MPa değerlerine ulaşabilmektedir).



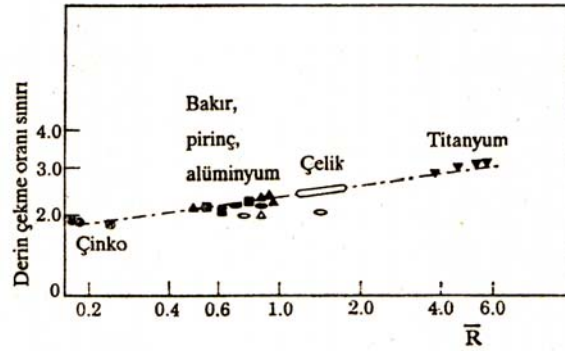
Şekil 2.1. Belirgin akma noktası sonucu oluşan lüders bantları [Hosford ve Caddell, 1983].

2.2. Plastik anizotropi

Haddelenerek üretilmiş sacların plastik deformasyon özellikleri çoğunlukla hadde yönüne bağlı olarak farklılık gösterir. Buna plastik anizotropi adı verilir [Çapan, 1990]. Çeliklerde iki tür anizotropi vardır: Normal (dikey) anizotropi ve düzlemsel (planar) anizotropi. Normal anizotropi sacın şekillendirme sırasında incelmeye karşı direncini belirler, derin çekilebilirliğin bir ölçüsüdür. Literatürde plastik deformasyon oranı veya çekilebilirlik oranı (R) olarak da anılır. Bu oran enine gerçek birim şekil değiştirme (ϵ_w) ile kalınlık yönündeki gerçek birim şekil değiştirmenin (ϵ_e) oranı ($R = \epsilon_w / \epsilon_e$) olarak ifade edilir. R değerinin yüksek olması incelmeye karşı direncin yüksek olduğunu belirtir.



Şekil 2.2. Plastik deformasyon oranı hesabında kullanılan ϵ değerleri [Çapan, 1990].



Şekil 2.3. Ortalama normal anizotropi parametresinin derin çekme oranına etkisi [Çapan, 1990].

Hadde yönüne göre değişik doğrultularda elde edilen plastik deformasyon oranlarının ortalaması sacın normal plastik anizotropisini (R^*) verir.

$$R^* = (R_0 + 2R_{45} + R_{90}) / 4 \quad (2.1)$$

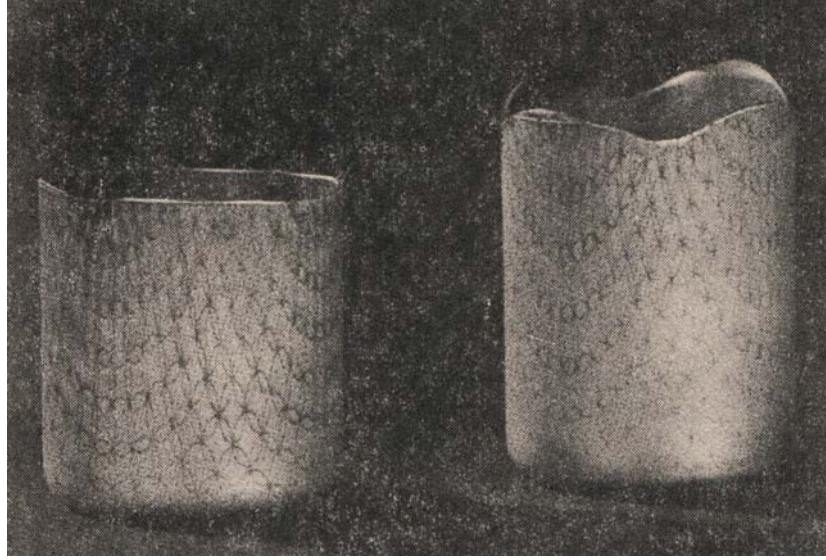
Yüksek R^* değeri daha az kademe, daha çok şekillendirilebilirlik ve daha karmaşık geometriler anlamına gelmektedir.

Tablo 2.1. Çeşitli sacların ortalama normal anizotropi parametreleri [Çapan, 1990].

Malzeme	R^*
Çinko	0.2
Sıcak haddelenmiş çelik	0.8~1
Soğuk haddelenmiş kaynar çelik	1~1.35
Soğuk haddelenmiş, Al. ile söndürülmüş çelik	1.35~1.8
Alüminyum	0.6~0.8
Bakır ve pirinç	0.8~1
Titanyum	4~6

Derin çekme işleminde düzlemsel anizotropi daha önemli -kritik- bir parametredir. Düzlemsel anizotropi (ΔR) derin çekme ve benzeri silindirik çekme işlemlerinde tavşan kulağı (ear peak) oluşumu (tarak dişleri şeklinde oluşan izler) olarak bilinen kenar hatalarının bir ölçüsü olarak ifade edilir.

$$\Delta R = (R_0 - 2R_{45} + R_{90}) / 2 \quad (2.2)$$



Şekil 2.4. Kulaklanma. Sağdaki şekilde derin çekme öncesi normalizasyon işlemi ile kulak oluşumu engellenmiş [Çapan, 1990].

2.3. Deformasyon hızına duyarlılık üsteli

Metal malzemelerde deformasyon hızı ile malzemenin akma gerilmesi arasında $\sigma^* = C \cdot \dot{\epsilon}^m$ şeklinde tanımlanabilen bir ilişki mevcuttur [Kayalı ve Ensari, 1986]. Burada $\dot{\epsilon}^*$ deformasyon hızı, m deformasyon hızına duyarlılık üsteli ve C ise bir malzeme sabitidir. Malzemedeki şekil değiştirme dağılımında rol oynayan diğer önemli özelliklerden biri de şekil değiştirme hızına duyarlılıktır. Bu özellik artan şekil değiştirme hızı ile meydana gelen akma mukavemetindeki artış olarak tanımlanır. Deformasyon hızına duyarlılık üsteli (m) nin büyük değerleri, malzemenin boyun verme olarak tanımlanan kararsız şekil değişimi olayının gecikmesine neden olmaktadır. Diğer bir deyişle, m 'nin büyük değerleri malzemenin iyi şekillendirilebilir olduğunun önemli bir göstergesi sayılmaktadır.

Şekillendirme işlemlerinde şekil değiştirme miktarı ve şekil değiştirme hızındaki artışlar, çoğunlukla sürtünme ve geometrik sınırlamalardan dolayı meydana gelmektedir. Hem pekleşme üsteli hem de deformasyon hızına duyarlılık üsteli, uniform olmayan yerel boyun vermenin azalmasında ve hasara kadar olan şekil değişim miktarının artmasında önemli rol oynamaktadır.

2.4. Çelik sacların şekillendirilmesi

Çelik saclar uzun zamandır mukavemetlerinin yüksek olması, birleştirilebilmeleri ve maliyetlerinin düşük olması nedeniyle endüstriyel ve günlük yaşamda yoğun bir kullanım alanı bulmaktadırlar. Çelik sac tüketiminin fazla olmasının asıl nedeni sadece yukarıda sayılan avantajları değil, bunların yanı sıra çok karmaşık şekillere bükülebilmeleri veya şekillendirilebilirliklerinin yüksek olmasıdır. Çeliğin başarılı bir şekilde şekillendirilmesi, çeliğin şekillendirilebilme yeteneğine, 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. Şekillendirmeden önce sacın depoda bekleme süresi, verilecek şeklin ve ekipmanların 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 [Hosford ve Caddell, 1983]. Üreticiler genelde sıcak ve soğuk haddelemeyle fireleri azaltıp biçimlendirme 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 saca verilen şekil kalıcı olmalıdır. Bunun için bölgesel ya da genel eğme, germe, düzleştirme veya bu işlemlerin bir kaçının kombinasyonu gerekli olabilir. Bir levha geometrik olarak basit görünse de anizotropik özellikleri, kalınlığında farklılıklar olması ve bölgesel düzensizlikleri 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. Bu çalışmada bahsi geçen malzemelerin yarı sıcak/sıcak şekillendirme kabiliyeti bilgisayar analizleri yoluyla tecrübe edilecektir.

Derin çekilebilirliği etkileyen faktörler temel olarak aşağıdaki şekilde özetlenebilir [Gündü, 2000].

1. Malzeme özellikleri:

- *Malzemenin kimyasal bileşimi:* C etkisi, Mn etkisi, P etkisi, S etkisi, Si etkisi, Cr etkisi, Ni etkisi, Mo etkisi, V etkisi, Cu etkisi, Nb etkisi, Ti etkisi, Al etkisi, N etkisi, Se etkisi, O etkisi
- *Çelik üretim metodu:* Sıcak çekilmiş saclar, soğuk çekilmiş saclar, kaynar çelikler, alüminyumla söndürülmüş çelikler, arayer atomu içermeyen saclar, özel yöntemlerle üretilmiş saclar
- *Mikroyapı:* Tane boyutu, ferrit tanelerinin biçimi, tercihli yönelme
- *Malzemenin mekanik özellikleri:* Akma mukavemeti, plastik anizotropi, elastisite modülü, deformasyon sertleşmesi üsteli, deformasyon hızına duyarlılık üsteli, üniform uzama, toplam uzama

2. Proses parametreleri:

- Levha kalınlığı ve tane boyutu
- Kalıp dizaynı
- Yağlama
- Operasyon hızı
- Basınç
- Ürün geometrisi

2.4.1. Şekillendirilebilirliğin ölçülmesi için kullanılan yöntemler

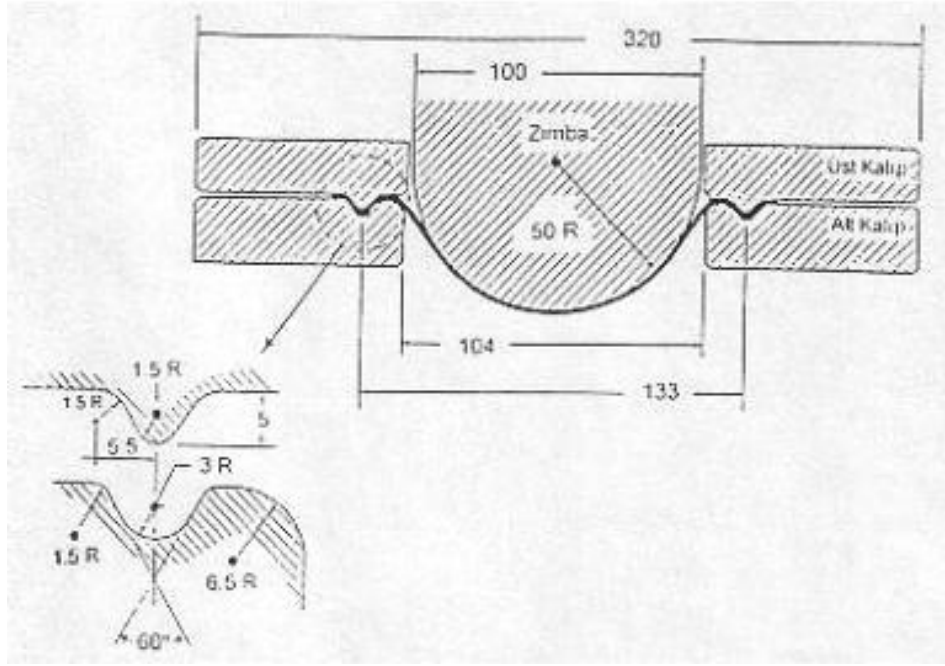
2.4.1.1. Deneysel yöntemler

Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğinin belirlenmesi için çeşitli deneyler yapmak mümkündür. Standardize olmuş bu deneyler bazı düzenlemelerden sonra ısıtma işlemi içeren durumlarda da kullanılabilir hale getirilebilir. Şekillendirilebilirlik deneyleri şekillendirmede etkili olabilecek temel karakteristik özelliklerin belirlenmesi için gerçekte uygulanan veya uygulanacak deformasyon karakteristiklerine benzeştirilerek oluşturulmuş düzeneklerde yapılarak malzemelerin deformasyon davranışları hakkında bilgi veren deneylerdir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek malzemenin tabi tutulacağı şekillendirme işlemi sonunda nasıl bir durum ortaya çıkacağı belirlenir. Şekillendirilebilirlik tespiti için yapılan deneysel çalışmalar temelde iki tipte incelenebilirler [Kunaç, 1999].

1. Klasik mekanik deneylerin sonuçlarından yararlanarak işlemin sonuçlarının belirlenmesi.
2. İşlemin laboratuvar ortamında simüle edilerek deney parçasının işlem sonrasındaki durumunun direkt olarak incelenmesi.

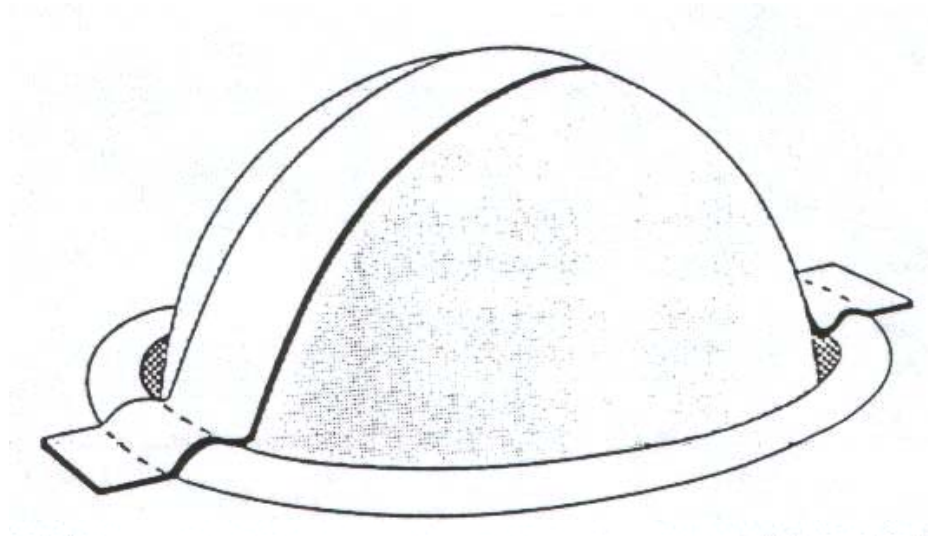
Şekillendirilebilirlik deneyleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Cekme deneyi: Malzemenin kalınlık ve yüzey özelliklerinin etkin olmadığı genel bilgiler verir. Bu bilgiler birçok sac şekillendirme işleminde kullanılabilir. Bu deneyde önemli parametre malzeme mukavemetidir. Malzemenin akma, kopma, toplam uzama gibi kritik noktaları tespit edilir.

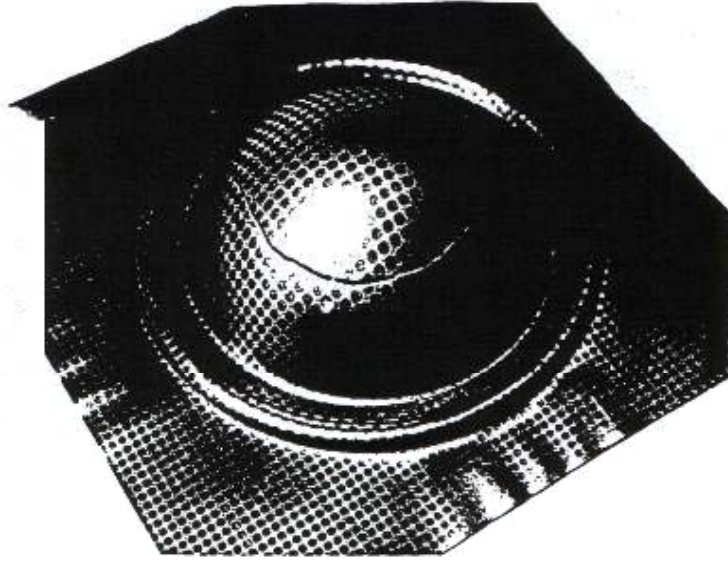


Şekil 2.5. Heckers sac çökertme deney düzeneği [Kunaç, 1999].

Çökertme deneyi: Gerçekte malzeme şekillendirilirken eğme, sıvama, germe gibi işlemlerin kombinasyonuna ait yüklere maruz kalır. Bu yüklerin ortaya çıkarabileceği durumların tespiti için yapılan deney çökertmedir. Bu deneyde levhaya bir bilya yardımıyla çökertme uygulanır ve levhada çatlak oluşuncaya kadar işleme devam edilir. Ayrıca malzemenin ezilmiş yüzeylerinin görüntüsü malzemenin tane yapısı hakkında bilgi verir.



Şekil 2.6. Yarı küresel zimba ile deneye tabi tutulan parka [Kunaç, 1999].



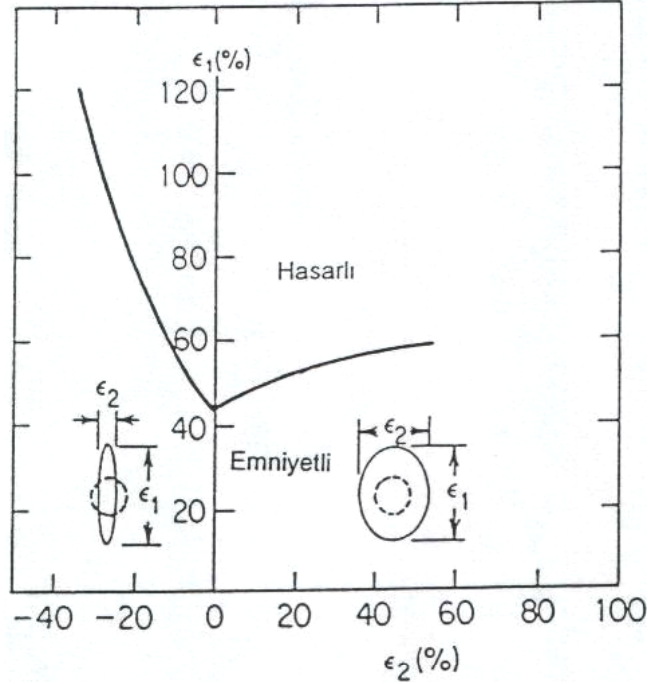
Şekil 2.7. Kırılarak -yırılma- hasara uğramış deney parçası [Kunaç, 1999].

Sıvama deneyi: Bu deney yaygın kullanıma sahip, kabul görmüş ve güvenilir bir yöntemdir. Bu deneyde yarı küresel ve düz uçlu iki çeşit zımba ile sac hasar (yırılma) meydana gelene kadar derin çekilir, böylece hasar olduğu andaki derin çekme yüksekliği değeri ile çekilen şeklin çapı karşılaştırılarak malzemenin derin çekme oranı bulunur.

Bu deneyler oda sıcaklığı dahil olmak üzere, sac malzemenin özellikleri de gözönünde bulundurularak, değişik sıcaklık şartlarında gerçekleştirilerek malzemenin şekillendirilebilirliği hakkında daha kapsamlı bilgiler elde edilebilir. Değişik sıcaklıklarda kapsamlı deneyler gerçekleştirildiğinde malzemenin şekillendirilebilirliğinin maksimum olduğu, yani derin çekme oranının en yüksek değere ulaştığı sıcaklık bulunabilir.

2.4.1.2. Şekillendirme sınır diyagramları

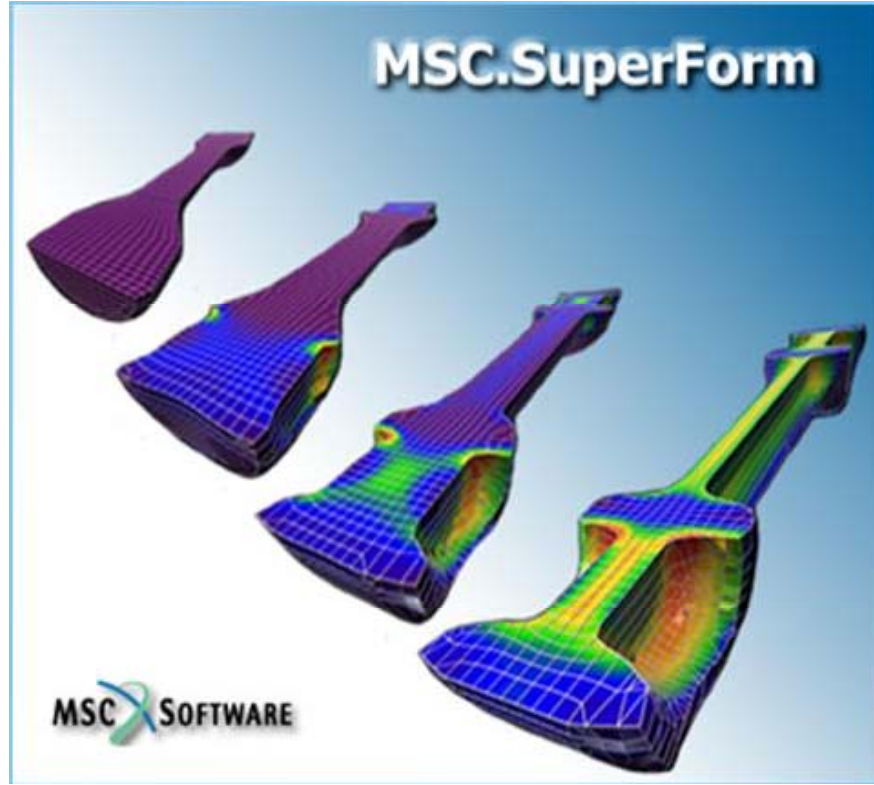
Şekillendirme sınır diyagramları (forming limit diagrams), sac düzleminde düzlemsel gerilmeler altında boyun vermenin (bazı durumlarda kırılmanın) meydana geldiği değişik şekil değişim kombinasyonlarını veren grafiklerdir. Bu grafikler sac malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin iki eksenindeki yüzey deformasyonları ile belirlenebileceği düşüncesinden ortaya çıkarılmış diyagramlardır. Çoğu durumda bu diyagramların kullanımı uygun bir metod olarak kabul görmektedir.



Şekil 2.8. Şekillendirme sınır diyagramlarına bir örnek [Gündü, 2000].

2.4.1.3. Bilgisayar Destekli Uygulamalar

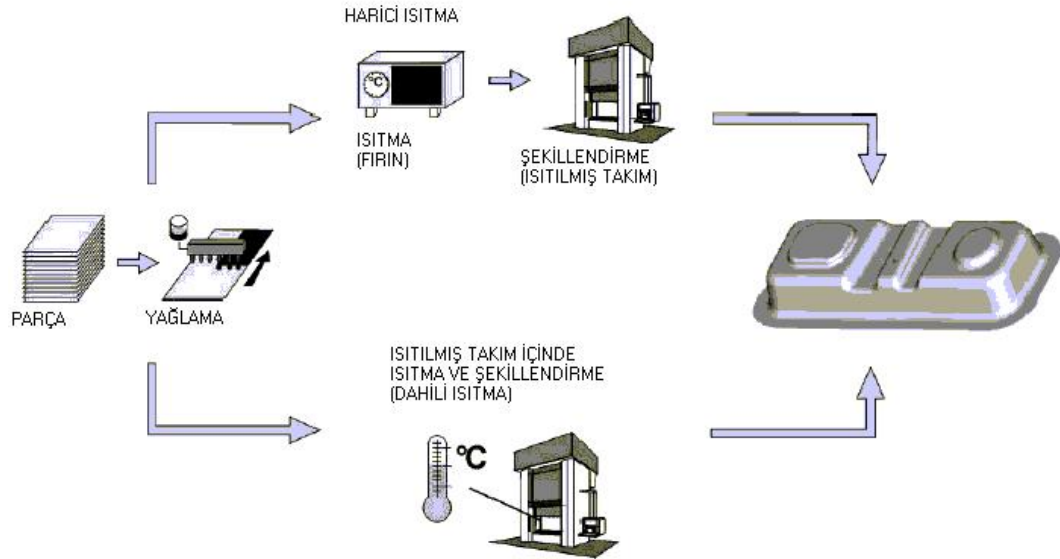
Yukarıda bahsi geçen uygulamalar her ne kadar pek çok durumda kullanılabilir olsa da, deneysel metodlar zahmetli olmaları, şekillendirme sınır diyagramları da her türlü malzeme için kesin sonuçlar vermemeleri nedeniyle çok fazla güvenilirlik içermezler. Şekillendirme sınır diyagramları malzemeye özgü oldukları için sonuçların kesin olması için parametrelerin eksiksiz bir biçimde işlenecek malzemeye ait olması gerekir ve elde edilmeleri zordur. Oysa deformasyon simülasyonu yapan pek çok bilgisayar programı, sayısız mühendislik malzemesinin mekanik, ısı, içyapısal gerekli tüm özelliklerini malzeme veritabanlarında bulundurmaktadır. Dolayısıyla dikkatli bir şekilde gerçekleştirilen bir bilgisayar simülasyonu ile malzemenin şekillendirme sonrasında alacağı durum bilgisayar ortamında gözlemlenebilir. Özellikle de yarı sıcak/sıcak şekillendirme söz konusu olduğunda, deneysel metodlar yüksek maliyetli ve zor, şekillendirme sınır diyagramı uygulamaları ise güvenilirlikten uzak olacağı için, bilgisayar destekli mühendislik (CAE) uygulamaları en uygun alternatif haline gelir. Bu çalışmada da yarı sıcak/sıcak şartlarda sacların derin çekilmesinin bilgisayar ortamında modellenmesi amacıyla MSC Software firmasına ait Superform 2002 programı kullanılacaktır.



Şekil 2.9. MSC.Superform 2002 programı ile ısı transferi modellenenilmektedir
[MSC SuperForm 2002 CD].

3. DERİN ÇEKME İŞLEMİ VE ISITMA

Oda sıcaklığında geleneksel sac metal şekillendirme işlemiyle karşılaştırıldığında, sacların şekillendirilmesinde kullanılan ısıtma işlemi şekillendirme işleminde bir aşama halini almaktadır. Isıtma işlemi için iki alternatif yöntem mevcuttur. Bunlardan birinde, sac fırında ısıtılarak pres makinasına taşınır, diğerinde ise ısıtma işlemi derin çekme takımının içinde ısı iletimi ile gerçekleştirilir.



Şekil 3.1. Isıtmalı derin çekme için işlem zinciri [Doege ve Dröder, 2001].

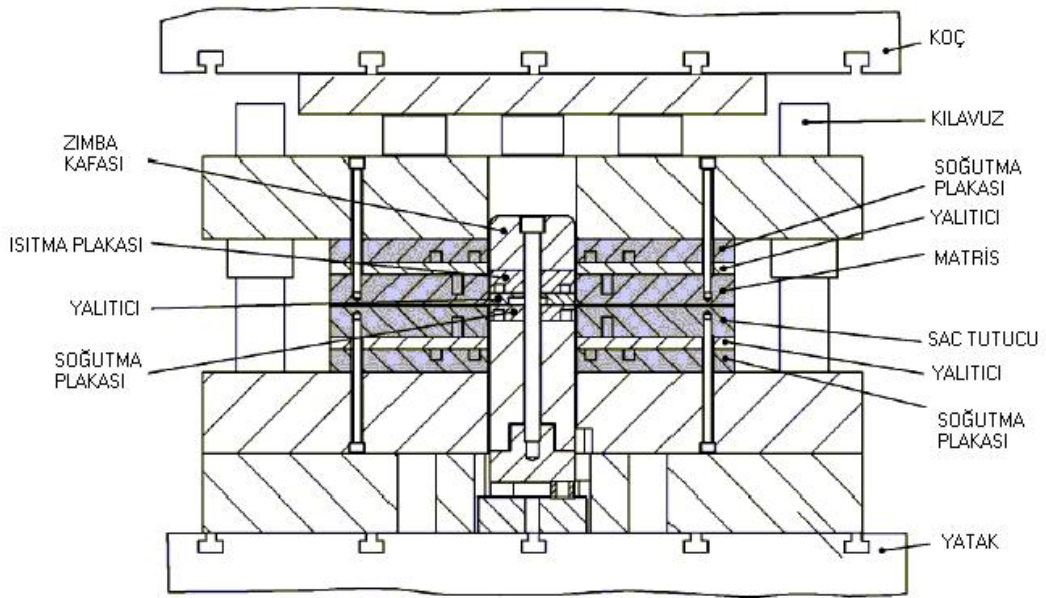
Dış ortamda ısıtmanın dezavantajı homojen sac sıcaklığı ve fırından takıma taşıma sırasında gerçekleşen ısı kaybıdır. Endüstriyel işlemler için, yalıtılmış taşıyıcılar içeren otomatize taşıma sistemleri uygulanabilir.

Takım içinde ısıtma için sac, tutucu ile kalıp arasında kısa bir süre için sıkıştırılmalıdır. Yapılan incelemeler, magnezyum alaşımlarının yüksek ısı iletim katsayısı ve düşük ısı tutma kapasitesi sayesinde birkaç saniyelik sıkıştırmanın 200 °C civarındaki sıcaklıklara ulaşılması için yeterli olduğunu göstermiştir. Takım içinde ısıtmanın bir avantajı sac üzerinde istenilen sıcaklık dağılımının

oluşturulmasına imkan vermesidir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre; zımba, kalıp ve tutuculardan daha düşük sıcaklıkta olduğu takdirde magnezyum alaşımının derin çekme oranı daha fazla arttırılabilmektedir. Sabit sıcaklık şartlarının garanti edilebilmesi için, zımba için ilave soğutma ekipmanları gerekli olabilir. Benzer sonuçlar, alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda derin çekilmesinde de ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde, yüksek sıcaklıklarda derin çekme işlemi sadece birkaç özel endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Dolayısıyla, takım ve işlem tasarımı ile ilgili bilgiler sınırlıdır. Uygulamanın ilk örneği Amerikan Havacılık Endüstrisinde gerçekleştirilmiştir. İlk başta parçalar soğuk şekillendiriliyor, işlem sonrası ısıtılarak dayanımları arttırılıyordu. Daha sonra, ısıtılabilir takım ve presler kullanılarak, işlem sıcak şartlarda gerçekleştirilmeye başlandı.

Şekil 3.2, yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere IFUM (Institute of Metal Forming & Metal Forming Machine Tools) tarafından geliştirilmiş bir derin çekme tezgahının şemasını göstermektedir.



Şekil 3.2. Derin çekme için ısıtılabilir bir kalıp dizaynı [Doege ve Dröder, 2001].

Şekildeki sistemde, ısıtma işlemi zımba, kalıp ve tutuculara entegre edilen elektriksel rezistans elemanları ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen ısı, tezgahın diğer bölgelerine yayılmasının engellenmesi amacıyla yalıtıcılar ve su soğutma plakaları kullanılmıştır.

İçerden ısıtma gerçekleştiren elektrikli ısıtma elemanlarına alternatif olarak dış kaynaklı ısı üretim ekipmanları kullanılarak elde edilen ısı ilgili bölgelere ulaştırılabilir ve bu yöntem soğutma amaçlı olarak da kullanılabilir.

3.1. Dahili - Harici Isıtma

Özellikle sac metallerin şekillendirilmesi işleminde yüksek sıcaklık kullanılacağı zaman, fırında ısıtma işlemi uygun bir yöntem olmamaktadır. Bunun en önemli nedeni sacların yüksek yüzey alanı/hacim oranlarından dolayı, sac parçaların çok çabuk bir şekilde -ani olarak- soğumalarıdır. Ayrıca fırında ısıtma işlemiyle homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilir. Bu çoğu zaman istenen bir durum değildir, çünkü yapılan çalışmalar sıcaklık gradyeni uygulamasının şekillendirme işlemini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Bu yüzden sacların ısı altında şekillendirilmesi yada şekillendirme ortamında ısıtılması, işlemin etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için uygun olacaktır. Isıtarak şekillendirmenin diğer bir avantajı da, sacların çabuk soğumaları sayesinde işlem sonunda kalıplar daha açılmadan soğumalarıdır. Bu sayede de hem parçaların boyut hassasiyetleri artar, hem de akma mukavemetleri olumlu yönde etkilenir.

3.2. Isıtma işlemi için bir yöntem önerisi

Yüksek dayanımlı metallerin şekillendirilmesi için iş parçasının elektrik akımı uygulanarak ani olarak ısıtılması ile ilgili olarak gerçekleştirilmiş bir patent çalışmasına ait şemalar ekte verilmiştir [Terziakin, 2002].

Geliştirilen yöntemde dışarıdan malzemeye ısı verilmeden, işlemin istenilen aşamasında istenilen sıcaklığa ulaşabilmek için malzeme içinden doğrudan yüksek yoğunluklu elektrik akımı geçirilir. Böylece metalin öz direncinden faydalanılarak iş parçası ısıtılmış olur. Malzemenin sıcaklığı çok hassas bir şekilde elektriksel direnç

ile ölçülebilir. Çünkü direnç ile malzemenin ısınma miktarı arasında lineer bir ilişki mevcuttur. Elektrik akımı ile ısıtma yöntemi değişik sac şekillendirme işlemlerine uygulanabilir.

- Bükme
- Germe ile şekillendirme
- Yüksek dayanımlı sac zımbalama -stamping-

Sıcak şekillendirme ile yüksek mukavemetli metallerin şekillendirilebilirlikleri artar. Bu sayede bu metallerin sanayide kullanım alanları yaygınlaşmış olur ve ürünlerin mukavemet değerleri de gerekli yerlerde arttırılabilir.

Elektrik akımı ile ısıtmada ısının istenilen bölgede tutulabilmesi için seramikten üretilmiş kalıp ve tutucuların kullanılması uygun olacaktır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Titanyum saclar ve yarı sıcak/sıcak şekillendirilebilirlikleri

Titanyum; demir, alüminyum ve magnezyumun ardından doğada en çok bulunan element olmasına karşın kimyagerler tarafından keşfedilmesi 18. yy sonlarında, saf hale getirilip kullanılmaya başlanması ise 19. yy sonlarında gerçekleşebilmiştir. Doğada saf halde bulunmayan titanyumun saflaştırılması işlemi oldukça pahalı olduğu için uzun süre ikinci planda kalmıştır. Ancak 1930lu yıllarda pervaneli uçaklardan türbinli uçaklara geçilmesiyle hafif ve dayanıklı bir metal ihtiyacı ortaya çıkmış ve üstün özellikleriyle titanyum en önemli alternatif olarak belirmiştir [Conrad, Doner ve Meester, 1973]. Bundan sonra modern üretim metodlarıyla titanyum ekonomikleşmeye başlamıştır. Titanyum üstün nitelikleri ile günümüzde de teknolojik uygulamalarda tercih edilen bir metadır. Ancak yüksek dayanımı bazı durumlarda şekillendirilebilirliğinin yetersiz olmasına neden olmakta ve dolayısıyla ısıtılarak şekillendirilmesi mecburi bir hal almaktadır.



Şekil 4.1. Titanyum alaşımı saclar uçak sanayinde de kullanılmaktadır (SR-71 Blackbird) [Bilim ve Teknik, 1998].



Şekil 4.2. Titanyumun çeşitli kullanım alanları [Bilim ve Teknik, 1998].

Kömür küllerinde ve volkanik kayalarda yoğun olarak bulunan titanyum, parlak gri renkli, düşük yoğunluklu, aşınma oranı düşük ve kimyasallara karşı dayanıklı bir metaldir.

Tablo 4.1. Titanyumun kimyasal özellikleri [Bilim ve Teknik, 1998].

Atom ağırlığı	47.90
Atom numarası	22
Yoğunluğu	4.5 g/cm³
Erime derecesi	1725 °C
25 °C özgül ısı	5.964x10⁻⁴ joule/kg.°C
20 °C elektrik direnci	55x10⁻⁹ Ω-m
(20~300 °C lineer genleşme katsayısı)	85x10⁻⁶ her °C

4.1.1. Titanyum sacların sıcak derin çekilebilirliği

Saf titanyum ve bir titanyum alaşımının sıcak şekillendirilebilirliklerinin tespiti için yapılan deneysel bir çalışmanın ortaya koyduğu sonuçlar sıcaklık şartlarının özellikle titanyum gibi yüksek dayanımlı sacların şekillendirilebilirliği üzerinde ne derece önemli etkilere sahip olduğunu göstermektedir [Shipton ve Roberts, 1991].

Çalışmada, sac haldeki ticari saf (~99,9 %) titanyum (IMI 125) ve bir titanyum bakır alaşımı (IMI 230) oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda derin çekiliyor. Silindirik kupa şeklindeki çekme işlemleri oda sıcaklığında ve 550 °C'ye kadar olan değişik sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinde, hadde doğrultusu (HD) ile 45° açı yapan 4 adet, 600 °C'nin üstüne çıkıldığında HD ile 90° ve 270° açı yapan 2 adet tavşan kulağı (kulaklanma) oluştuğu, sıcaklık gradyeni uygulamasının (soğuk zımba, sıcak kalıp) yüksek çekme oranlarına ulaşılabilmesine imkan tanıdığı görülüyor.

Derin çekme işleminde etkin iki önemli parametre derin çekilebilirliği tanımlayan LDR (limiting drawing ratio) ile sac malzemenin içyapısına ve geçmişine ait bir özellik olan normal anizotropi arasında r (average plastic strain ratio) olarak tanımlanan bir bağıntı vardır. Dolayısıyla sacın derin çekilebilirliği, malzemenin anizotropisi ile doğrudan ilgilidir. Ancak sac ısıtıldığı zaman oluşan yumuşama durumu bu bağıntının ortadan kalkma eğilimi göstermesini sağlar ve derin çekme oranını önemli ölçüde artırır. Buna ilaveten sıcaklık gradyeni uygulaması -tek kademedede- daha büyük derin çekmelere imkan sağlar. Özellikle alüminyum alaşımı saclarda, kalıp zımbadan yeterli derecede daha sıcak ise derin çekme oranı üç kattan daha fazla arttırılabilir.

Silindirik derin çekmenin bir özelliği yükseklik bölgesinde, -kupanın yan yüzeyinde- tavşan kulağı denilen dalgalanmaların oluşmasıdır. Buna sebep sacın düzlemsel anizotropisidir. Sonuç ise, duvar kalınlığının değişken olmasıdır. Dolayısıyla daha öncede bahsedildiği üzere, sac anizotropisi derin çekme oranını düşürür. Ancak ısıtma işlemi bu durumu azaltıcı yönde bir etkiye sahiptir. Oda sıcaklığında şekillendirmede 4 adet tavşan kulağı oluşurken, sıcak şekillendirmede 2 adet oluşması bu etkiyi açıkça ortaya koymaktadır. Bu deneysel çalışmanın sonuçları özellikle sıcak derin çekmenin sıcaklık gradyeni olmaksızın ve sıcaklık gradyeni ile gerçekleştirilebilirliği ve deformasyon sıcaklığındaki değişimin tavşan kulağı oluşumuna etkilerini ortaya koymaya çalışması açısından önemlidir. Aşağıda deneye ait bilgiler ayrıntılı olarak verilmiştir.

- Malzeme Ticari saf titanyum (CPT) IMI 125
 Titanyum bakır alaşımı IMI 230
- Sağlayıcı IMI Titanium Ltd. Birmingham
- Özellikler IMI 125: 0.15 wt-% Oksijen
 IMI 230: 2.5 wt-% Bakır
- Kalınlık IMI 125: 1.02 mm.
 IMI 230: 1.20 yada 1.30 mm.
- Yapı Her iki malzemede dengeli yeniden kristalleştirilmiş yapıda.
- Tane boyutu IMI 125: 20 μm .
 IMI 230: 8 μm .

- Isıtma Kalıp ve zımba ayrı ayrı dirençli ısıtıcılarla ısıtılıyor.
- Test şartları Üç ayrı modda test yapılıyor.
 - Oda sıcaklığında,
 - Zımba ve kalıp aynı yüksek sıcaklıkta,
 - Zımba kalıptan çok daha düşük sıcaklıkta.
- Yağlama: Yüksek sıcaklık yağlaması için katı film halindeki boron nitrit.
- Çap: Zımba 50 mm.
Kalıp Değişik çaplarda dairesel boşluklar kullanılmış.

Tablo 4.2. Sacların HD ile 0°, 45° ve 90° aç yapaan doğrultulardaki tek eksenli çekme değeri [Shipton ve Roberts, 1991].

HD ile aç (derece olarak)	Akma Gerilmesi (MN/mm2)	Çekme Dayanımı (MN/mm2)	Düzenli Uzama (%)	Toplam Uzama (%)	Plastik BŞD Oranı (%)
IMI 125					
0	410	478	11	30	1.3
45	420	466	6	28	2.0
90	433	483	7	29	2.5
IMI 230					
0	460	572	14	30	1.9
45	495	585	...	28	1.9
90	525	602	10	26	2.3

Çalışmada, tavşan kulağı oluşumu derin çekme sonrası tabandan eşit yükseklikteki bir hat üzerinde kalınlık ölçümü yapılarak incelenmiştir.

4.1.2.Deney sonuçları

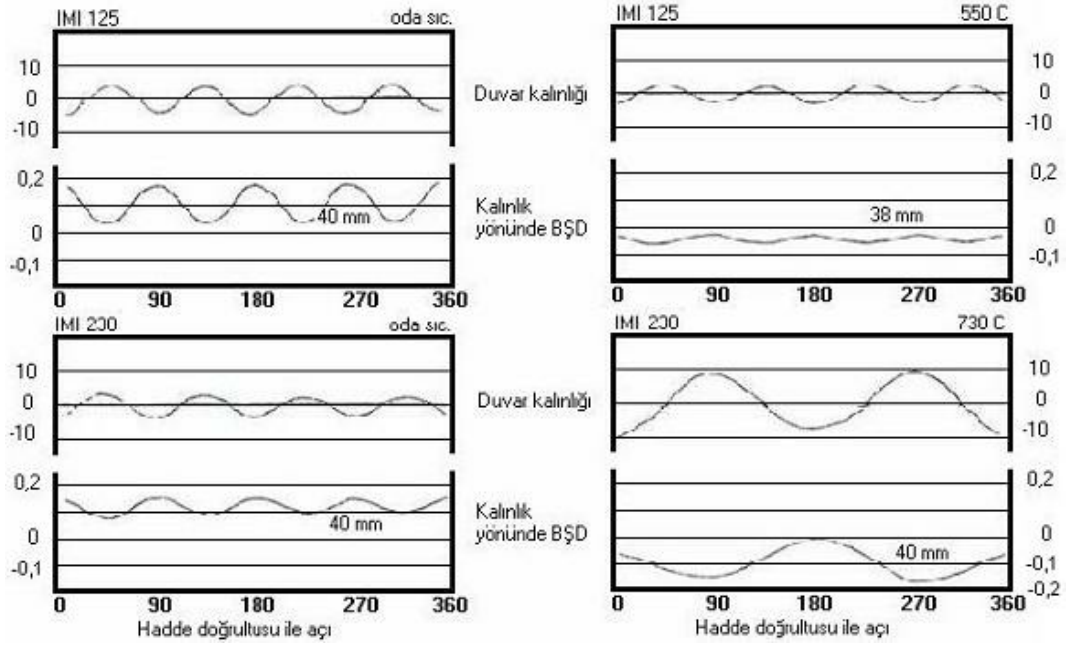
- Oda sıcaklığında;

Her iki malzemede de HD ile 45° aç yapaan tavşan kulağı oluşumu gözleniyor.

$$LDR = \text{kalıp çapı/zımba çapı} = 110/50 = 2.2$$

Oda sıcaklığı şartlarında, tabandan 40 mm. yükseklikteki hat üzerinde -tavşan kulağı oluşumu gözlenen kısımlar- HD ile 45° aç yapaan kısımlarda kalınlığın görece az olduğu gözleniyor. Malzemenin anizotropik yapısından dolayı bu bölgelerde deformasyon daha fazla gerçekleştiği için bu kısımlarda aşırı incelme görülüyor, dolayısıyla kusurlu ürün ortaya çıkıyor. Deformasyon, HD ile yapılan açıyla

bağlantılı olarak sinüsoidal bir eğri oluşturuyor. Hadde doğrultusunda ve hadde doğrultusuna dik doğrultuda deformasyon maksimum değerlere ulaşıyor.



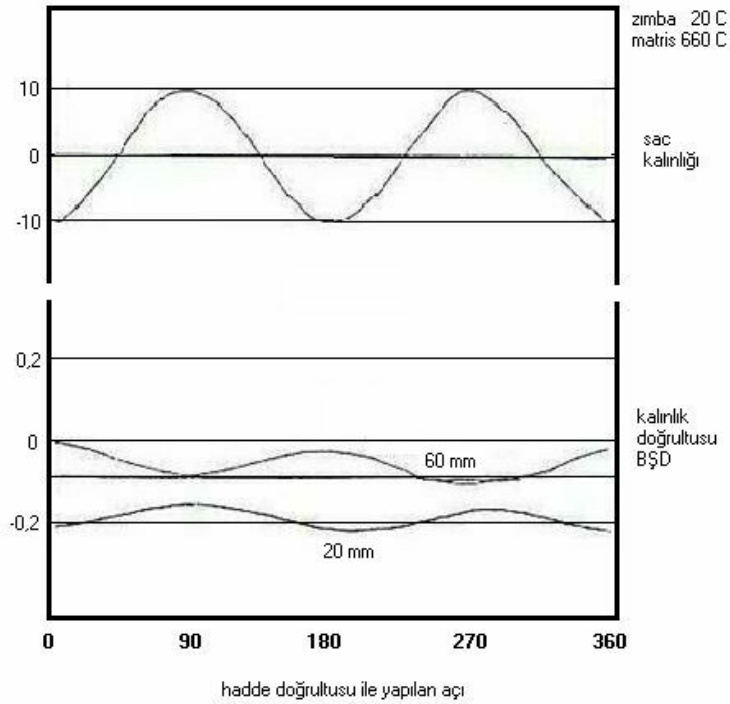
Şekil 4.3. Değişik sıcaklıklarda, sac kalınlığının ve kalınlık doğrultusundaki BŞD ($WTS = \ln(t/t_0)$ olmak üzere) miktarının hadde doğrultusu ile yapılan açı ile değişimi [Shipton ve Roberts, 1991].

- Kalıp ve zımba aynı yüksek sıcaklıkta (550 °C);

550 °C sıcaklıktaki durum genel olarak oda sıcaklığındaki duruma benziyor. Ancak sıcaklık 660 °C'ye yükseltildiğinde kulak şekli önemli ölçüde değişiyor (HD ile 90° ve 270° açı yapan doğrultularda iki adet kulak). 730 °C'ye çıkıldığında bu değişim iyice belirginleşiyor. Ortaya çıkan durumlardan da anlaşılacağı üzere, malzemenin hadde geçmişi, deformasyon oranlarının sac düzleminde değişken olmasına neden oluyor. Bu da kalınlık gradyenine ve sacda kırışmalara neden oluyor. Sac ısıtılıp şekillendirildiğinde ise, anizotropi etkileri ve de kırışmalar ortadan kalkma eğilimine giriyor.

- Soğuk zımba ve ısıtılmış kalıp;

Bu deneyde zımba su ile soğutuluyor, kalıp 600 °C'nin üzerine ısıtılıyor. HD ile 90° ve 270° açı yapan doğrultularda tavşan kulağı oluşumu gözleniyor. Sıcaklık gradyeni uygulanması tek kademedede yüksek oranda derin çekme işlemlerine olanak sağlıyor.



Şekil 4.4. Sıcaklık gradyeni uygulamasında ortaya çıkan durum [Shipton ve Roberts, 1991].

Bu deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

1. IMI 125 ile IMI 230 isimleriyle anılan saf titanyum ve titanyum bakır alaşımı için kulak oluşum davranışı deformasyon sıcaklığı ile değişir. 550 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda 4 adet tavşan kulağı hadde doğrultusu ile 45° açı yapan doğrultularda oluşurken daha yüksek sıcaklıklarda 2 adet tavşan kulağı oluşumu gözlenir. İdeal bir şekillendirmenin gerçekleşebilmesi için sac malzeme ideal bir sıcaklığa ısıtılmalıdır. Şekillendirmenin ılık veya sıcak şartlarda gerçekleştirilmesi gerektiği malzemeye bağlıdır.
2. Kübik metallere farklı olarak, titanyum için kulak oluşum davranışı plastik deformasyon oranının -r- düzlemsel anizotropisine bağlı değildir. Yüksek sıcaklıkta ve ısı gradyeniyle gerçekleştirilen şekillendirme işlemleri, sacın yüzeylerinde kırışma ve dalgalanma gibi kusurların oluşmasını engelleyememektedir.
3. 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda 90° ve 270° açılarda iki adet kulak oluşumu gözlenmesi, sıcak şekillendirmenin sac yüzeyinde olumlu

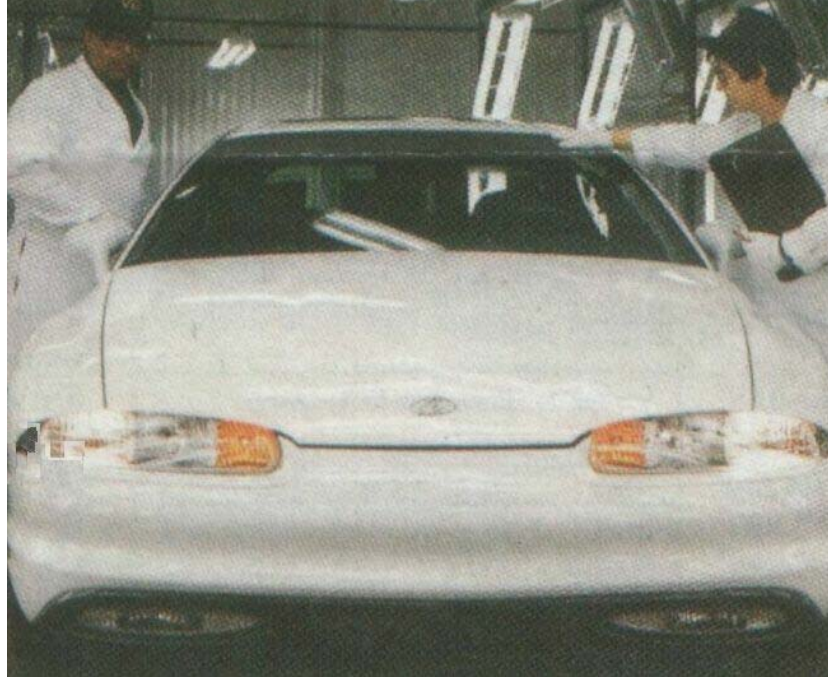
etkilerini göstermektedir, ancak bu deneysel çalışmada yüzeysel kusur içermeyen ürünler elde edilememiştir. Deney sonuçlarına göre, bu iki malzemenin derin çekme işlemleri için uygun olmadığı sonucu çıkarılabilir. Ancak diğer titanyum alaşımlarının ne şekilde davranacağı hakkında kesin bir yorum yapılamayacağı unutulmamalıdır.

4. Titanyumda, yüksek sıcaklıklardaki derin çekmede iki kulak oluşumu bazal düzlem kaymasının baskınlığı ile açıklanabilir.
5. Sıcaklık gradyeni uygulaması, yüksek çekme oranlarına imkan sağlar.

4.2. Alüminyum saclar ve yarı sıcak şekillendirme

Alüminyum, yerkürede en çok bulunan ve demir çelikten sonra en çok tüketilen metalik malzemedir. Günümüzde tüketilen her ton alüminyumun yaklaşık 250 kilogramı taşıt araçlarının üretiminde kullanılır. Diğer kullanılabilir metallere göre yoğunluğunun az olması alüminyuma bu konuda önemli avantajlar sağlamıştır. Günümüzde tipik bir otomobilde yaklaşık 80 kg alüminyum kullanılmaktadır. Bu çelik ve benzeri başka bir metalin kullanılmasına göre araç ağırlığında yaklaşık 160 kg'lık bir avantaj sağlamaktadır. Bu ağırlık farkının otomobilin ortalama kullanım süresinde tüketileceği yakıtta etkisine bakarsak yaklaşık 2400 litrelik bir benzin tasarrufu ile karşılaşırız. Bu da çevre kirlenmesinde önemli iyileştirmeleri beraberinde getirmektedir. Bugünlerde alüminyum ve demir çelik üreticileri otomotiv sektöründe alüminyum kullanımının artırılıp artırılmaması konusunda tartışmaktadırlar. Herşeye karşın alüminyumun bu alanda kullanımı günden güne artmaktadır. 1977'de otomobil başına 43.9 kg olan kullanım 1993'de 80.3 kg'a, 1994'te ise 90 kg'a kadar çıkmıştır. Bu artışın önemli nedenlerinden biri Ford, Audi, General Motors gibi büyük üreticilerin, otomobil kasası ve şasisi gibi önemli parçaları alüminyum alaşımından yapmaya başlamalarıdır. Ulaşım sektöründe otomotivden sonra, ancak daha yüksek oranlarda alüminyum kullanımı uçak sanayiindedir. Bir uçağın ağırlıkça %70'i bu metalden oluşmaktadır. Uçak yapımında alüminyum ve alaşımlarının tercih edilme nedenlerinden en önemlisi özgül dayanımlarının diğer uygulanabilir metal alaşımlarına göre yüksek olmasıdır. Bu alanda yaygın olarak kullanılan alüminyum-bakır alaşımı duralüminyum'un yerini

gelecekte alüminyum-lityum alaşımlarının alması beklenmektedir. Böylelikle uçakların %15 oranında hafiflemesi sağlanacaktır. Bunların dışında kamyon kasaları, deniz ve hava taşımacılığında hafiflikleri nedeni ile tercih edilen konteynırlar ve çağdaş ulaşım araçları hızlı trenler bu sektörde alüminyumun ne kadar yaygın olarak kullanıldığını vurgulamak için yeterlidir.



Şekil 4.5. Tüm gövdesi alüminyumdan üretilen ilk seri üretim araç
Audi A8 ASF (Audi Space Frame) [Bilim ve Teknik, 1998].

Otomotiv teknolojisinde alüminyumun getirileri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Araba gövdesinde yeniden kullanımı en kolay maddelerden biri alüminyumdur.
- Arabanın ağırlığının azalmasıyla, motor iletim ve süspansiyon sistemlerinde avantajlar sağlanır.
- Arabanın hafiflemesi ile can güvenliği artar. Yapılan “crash test”lerle can güvenliği kanıtlanan hafif arabalar, performans ve yakıt tüketimi bakımından istenen özellikleri yakalarken, motor gücünden de birşey kaybetmemektedirler.

- Çelik madde dayanıklılık açısından “iyi” olarak değerlendirilirken, son on yıldır kaza testlerinde ağırlıklı olarak kullanılmaya başlanan alüminyum “çok iyi” olarak nitelenmektedir. Bilgisayarların kullanımı da, alüminyum arabaların tasarımını kolaylaştırarak hafiflik ve can güvenliğinin optimum düzeye ulaşmasını sağlayan önemli bir etkidir.

4.2.1. Alüminyum sacların şekillendirilebilirliği

Hafifliği ve sağladığı enerji tasarrufu nedeniyle alüminyum sacların endüstrideki kullanımı önemli bir artış göstermektedir. Ancak, alüminyum presleme işlemleri yaygın endüstriyel malzeme olan çeliğe nazaran daha kritik bir işlemdir.

Alüminyumun şekillendirilebilirliği, çeliğinkinin $2/3$ 'ü kadardır [Bolt, Lamboo ve Rozier]. Alüminyumun elastisite modülü, çeliğinkinin $1/3$ 'ü kadardır. Sonuç; daha fazla kırılma ve geri yaylanma. Şekillendirilebilirliği daha yüksek olan 5xxx serisi alaşımların ise, dinamik deformasyon yaşlanması etkisiyle kullanılabilirliği düşüktür.

Alüminyumun şekillendirilebilirliği özellikle hafifliğin çok önemli olduğu otomotiv sektörünü yakından ilgilendirmektedir [Shehata vd., 1978]. Otomotiv sektöründe 5xxx alaşımlar daha yüksek şekillendirilebilirlik nedeniyle iç bölümlerde, 6xxx serisi alaşımlar ise yüzey kalitesi nedeniyle dış kısımlarda kullanılır.

Alüminyumun şekillendirilebilirliğini iyi bir seviyeye yükseltmenin etkin bir yolu ılık şekillendirme işlemini uygulamaktır [Takuda vd., 2002]. Yapılan çalışmalar, 5xxx serisi alüminyumların çekilebilirliğinin yüksek sıcaklık şartlarında artmakta olduğunu göstermektedir. Örneğin, 5754 alüminyum alaşımının kupa çekilmesinde derin çekme oranı yüksek sıcaklık uygulaması ile 1.9'dan 2.7'ye yükseltilebilmektedir (1.9:oda sıcaklığında, 2.7:kalıp 250 °C'ye ısıtılıp zımba oda sıcaklığında tutulduğunda). Yüksek sıcaklıkta şekillendirmenin bir faydası da ürün yüzey kalitesinin artmasıdır.

Otomotiv parçalarında, ılık şekillendirmenin uygulanabilirliğinin incelenmesi için 5754-O, 6016-T4 ve 1050-H14 alüminyum alaşımları üzerinde testler

gerçekleştirilmiştir. Kutu şekilli ve konik şekillendirme işlemleri laboratuvar ortamında yapılarak sonuçlar analiz edilmiştir. Kutu şekilli ürünler derin çekme ile konik olanlar ise derin çekme ve germe ile imal edilmiştir. Özellikle ikinci durum, otomotiv panellerinin stamping işlemi sırasında karşılaşılan bir durumdur.

Ilık şekillendirmenin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için test parçalarında sertlik ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum sacların 100 ila 250 °C arasındaki sıcaklıklarda şekillendirilebilirliğini belirlemek için gerçekleştirilen çalışmada, testler 1050, 5754 ve 6016 serisi alüminyum saclar üzerinde yapılmıştır. Prizmatik ve konik ürünler işlenmiş, sac tutucular ve kalıp ısıtılmış, sıcaklığın işlem limitleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Gerçekleştirilen testler neticesinde, yüksek sıcaklıklarda şekillendirmenin, ürün yüksekliğinde -özellikle de konik parçalarda- önemli oranda bir artışa imkan sağladığı, yeterli bir artış sağlamak için gereken sıcaklıkların 6016'da, 5754'e göre daha düşük olduğu ve ürünlerin sertliklerinin, oda sıcaklığında şekillendirilmiş olanlardan önemli bir fark göstermediği anlaşılmıştır.

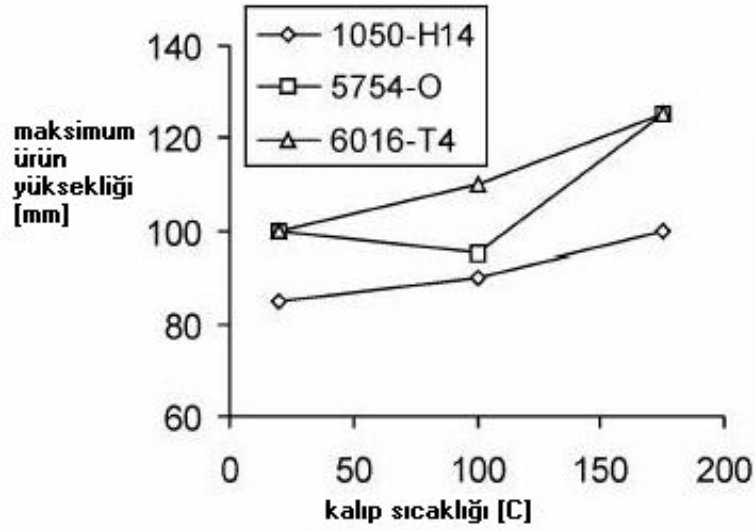
Testler, değiştirilebilir tutucu, kalıp ve zımbalı, kalıp yastıklı, 1000 kN kapasiteli bir hidrolik pres ile gerçekleştirilmiştir. Zimba hızı 120 mm/dk seçilmiştir.

Kalıp ve tutucular elektrik ısı rodları ile ısıtılacak şekilde seçilmiştir. Su veya yağ soğutma kullanılarak bir sıcaklık gradyeni oluşturmak mümkün kılınmıştır. Bu sayede bölgesel olarak malzeme akışı arttırılmış olur. Ulaşılan en yüksek kalıp sıcaklığı 250 °C idi.

Derin çekme zımbası su soğutma ile oda sıcaklığında tutulmuştur. Germe-çekme işleminde ise ısıtma ve soğutma işlemleri uygulanmamıştır. Test malzemeleri; 1.15 mm. kalınlığında 6016-T4, 1.20 mm. kalınlığında 5754-O ve 1.0 mm. kalınlığında 1050-H14 olarak seçilmiştir. Tutucuların her iki yüzeyi de pasta şeklinde bir yağlayıcı (Petrofer Isoform WP.5) ile yağlanmıştır. Bu yağlayıcı yağlama özelliklerini yüksek sıcaklıklarda koruyabildiği için tercih edilmiştir.

- Dikdörtgensel kutu şeklini derin çekilmesi;

Bütün test malzemelerinden saclar 20 °C, 100 °C ve 175 °C sıcaklıklarda derin çekmeye tabi tutulmuş, zımba sıcaklığı 20 °C sıcaklıkta sabitlenmiştir. Sıcaklığın çekilebilirlik üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için değişik yüksekliklerde derin çekme işlemi gerçekleştirilmiş, ürünlerde yırtılma veya kırışma olup olmadığı incelenmiştir.



Şekil 4.6. Matris sıcaklığının, dikdörtgensel kutu şekilli derin çekmede, maksimum ürün yüksekliğine etkileri (başlangıç sac tutucu basınçları 1050-H14, 5754-O ve 6016-T4 için sırasıyla 0.5, 2 ve 1 Mpa) [Bolt vd., 2001].



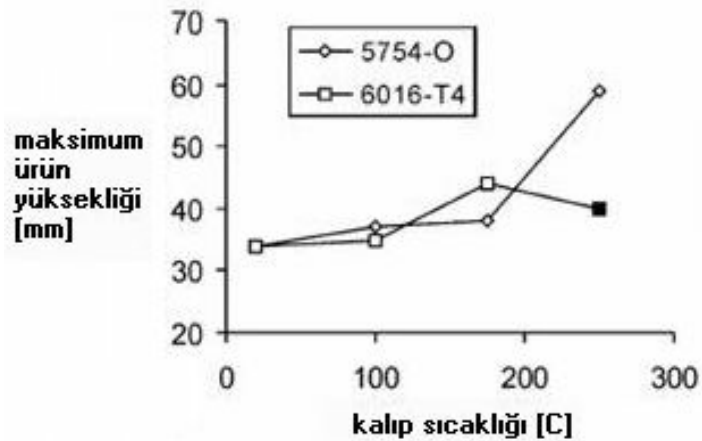
Şekil 4.7. 1050-H14 için maksimum ürün yükseklikleri (solda oda sıcaklığında 80 mm ve sağda 175 °C sıcaklıkta 100 mm) [Bolt vd., 2001].

Şekil 4.6 sıcaklıkla ürün yüksekliğinin değişimini ve şekil 4.7’de ürün örneklerini göstermektedir. 175 °C’de derin çekilen ürünlerde elde edilen ürün yüksekliği, oda sıcaklığındakilere nazaran % 20~25 daha fazladır.

Isıtma işleminin etkisi, kalıp ile tutucu arasındaki ve köşelerdeki sacı yumuşatmak ve işlem için gereken kuvveti düşürmektir. Zimba soğutulduğu için, zimba çevresinde sacın mekanik özellikleri değişmemiş ve kritik derin çekme oranı sabit kalmıştır. 1050-H14 ve 6016-T4 alaşımlarında bütün yüksek sıcaklık koşullarında bu durum gözlenirken, 5754-O alaşımında 175 °C’ye çıkmak gerekmektedir. Sonuçta 175 °C’ye çıkıldığında tüm malzemelerin derin çekilebilirliğinin arttığı ve kırılma eğiliminin azaldığı görülmüştür.

- Dikdörtgensel konik şeklin germe ile çekilmesi;

Bütün test malzemeleri için 20 °C, 100 °C, 175 °C ve 250 °C’lerde germe-çekme işlemi uygulanmıştır. Zimba aktif olarak soğutulmamıştır. Test sırasında önemli derecede bir sıcaklık artışına rastlanmamıştır. Kalıp sıcaklığının germe-çekme üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için test malzemelerinde yırtılma gerçekleşene kadar işleme devam edilmiştir.



Şekil 4.8. 50 mm kenarlı sac için kritik - yırtılmanın başladığı - zimba stroku (başlangıç sac tutucu basıncı 4 MPa)

Not: içi boş şekiller yırtılmanın zimba köşesi çevresinde, içi dolu kare ise sacın yanal yüzeyindeki uzun bir hat üzerinde olduğunu belirtir [Bolt vd., 2001].



Şekil 4.9. 5754-O için maksimum konik derinlikler (solda oda sıcaklığında ve sağda 250 °C sıcaklıkta) [Bolt vd., 2001].



Şekil 4.10. 6016-T4-O için maksimum konik derinlikler (solda oda sıcaklığında ve sağda 175 °C sıcaklıkta) [Bolt vd., 2001].

Şekil 4.8’de yırtılmaya neden olan kritik zımba strokları, şekil 4.9 ve şekil 4.10’da ise çeşitli ürünlerde ortaya çıkan durumlar belirtilmiştir. Görüldüğü üzere, yüksek sıcaklık uygulamaları ürün yüksekliklerinde önemli bir artışı mümkün kılmaktadır. Isıtma neticesinde ortaya çıkan yumuşama malzeme akışını artırıp yırtılma ve kırılma olmaksızın çekilebilirliği yükseltmektedir.

Tablo 4.3, kutu şekilli ve konik ürünlerin yüzeylerinde yapılan Brinell sertlik deneylerinin sonuçlarını göstermektedir. Testlerin gerçekleştirildiği sıcaklık aralığı göz önüne alındığında görüldüğü üzere, ısıtma işlemi malzemelerin sertliklerinde önemli bir değişime neden olmamaktadır. Ürünler - sacın konumlandırılması, takımın kapatılması, şekillendirme, takımın açılması ve ürünün uzaklaştırılması dahil olmak üzere - pres makinasında birkaç dakika süre ile tutulmakta ve daha sonra hava ile soğutulmaktadır.

Tablo 4.3. Brinell sertlik deneyi sonuçları [Bolt vd., 2001].

Şekillendirme öncesinde ve sonrasında brinell sertliği (2.5 mm çaplı bilya)						
Malzeme	Düzlem sac	Kutu şekilli, yanal yüzde			Konik, yanal yüzde	
Sıcaklık		RT	100	175	175	250
5754-O	61	75	80	79	-	69
6016-T4	60	77	74	70	67	67

4.2.2. Deney sonuçları

Alüminyumun yüksek sıcaklıklarda şekillendirilmesi ürün yüksekliğinde önemli seviyede bir yükselmeye imkan tanımaktadır. Kalıp sıcaklığının 175 °C'ye çıkarılması, derin çekme ürünlerinin yüksekliğinde % 25 seviyelerinde bir artış sağlamaktadır. Kalıp sıcaklığının 250 °C'ye çıkarılması, konik germe-çekme ürünlerinin yüksekliğinde % 65 seviyelerinde bir artış sağlamaktadır. Etkin bir artışın sağlanabilmesi için gereken minimum kalıp sıcaklığı, 6016-T4 için daha düşüktür. Örneğin; 175 °C'de germe-çekme işleminde, 6016-T4 sacının yüksekliği % 30 arttırılabilirken, 5754-O sacının ki yalnızca % 11 arttırılabilmektedir.

Ilık şekillendirme, karmaşık yapılı alüminyum sac ürünlerinin çekilebilmesine imkan sağlar. Benzer ürünlerin oda sıcaklığında imal edilebilmesi için ekstra şekillendirme veya birleştirme işlemlerine ihtiyaç duyulur. Ilık şekillendirmede kullanılan takımların karmaşıklığı ve şu anda endüstride bu konuda deneyimin olmayışı işlemin etkin kullanımını imkansız hale getirmektedir ancak ileride bu yöntem etkin bir konuma gelecektir. Üzerinde önemle durulması gereken noktalar:

- (i) Ilık şekillendirmenin malzeme özelliklerine etkisi,
- (ii) takım parçalarının bölgesel ısıtılma ve soğutulması,
- (iii) ısı genleşme ve sacın ısıtılması,
- (iv) yağlama

şeklinde belirtilebilir.

4.3. Alüminyum alaşımı sacların ılık derin çekilmesinde ısı iletiminin sonlu elemanlar simülasyonu

Alüminyum alaşımı sacların yüksek sıcaklıklarda silindirik (kupa) derin çekilmesinde deformasyon davranışı ve sıcaklık değişimi rijid plastik ve ısı iletimi sonlu elemanlar metodlarının bir kombinasyonu şeklinde simüle edilebilir. Deneysel sonuçlar şekillenme limitlerinin ve boyun verme, kulak oluşumu gibi durumların simülasyon ile iyi bir şekilde belirlenebildiğini göstermektedir. Sayısal ve deneysel

sonuçlar göstermektedir ki, ılık derin çekmede derin çekme oranı kalıp profil çapıyla artmaktadır [Takuda vd., 2002].

Çalışma sıcaklığının artmasıyla alüminyum malzemenin sünekliğinin önemli ölçüde arttığı bilinmektedir. Alüminyum alaşımı sacların yüksek ölçüde şekillendirilebilmesi için bilinen bir yol ılık şekillendirmedir. Bu konuda Finch et al. ve ardından da Fukui, Lenz, Miyagawa ve Tozawa tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda değişik sıcaklık, takım boyutu, yağlama, vs. koşullarında silindirik derin çekmede şekillendirme sınırları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Düzgün sıcaklık dağılımı durumlarında önemli derin çekme oranında herhangi bir artış gözlenmemektedir. Ancak artan sıcaklık silindir yüksekliğini yani zımba strokunu artırır. Derin çekme oranının arttırılabilmesi için kalıp veya zımba ile soğutma yapılmalıdır, yani sıcaklık gradyeni oluşturulmalıdır.
- Deneysel çalışmalar alüminyum alaşımı sacların sıcak derin çekilmesiyle karmaşık yapıli parçaların preslenebileceğini göstermiş olmasına rağmen, alüminyum sacların sıcak derin çekilmesi endüstride geniş kullanım alanları bulamamıştır.
- Alüminyum alaşımı sacların ılık derin çekilmesi için gerekli optimum şartların sağlanabilmesi için mekanik özelliklerin sıcaklığa bağlı değişiminin yanında, işlem sırasındaki ısı iletimi de dikkate alınmalıdır. Bu iki olay iyi bir şekilde simüle edilmelidir.

Bu bölümde, plastik deformasyon ve sıcaklık dağılımını birlikte simüle edebilen bir sonlu elemanlar uygulaması incelenecektir. Simülasyonda hem deformasyon hem de akma gerilmesi sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Simülasyonun gösterdiği şekillendirilebilme limitleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve optimum şartlar tartışılmıştır.

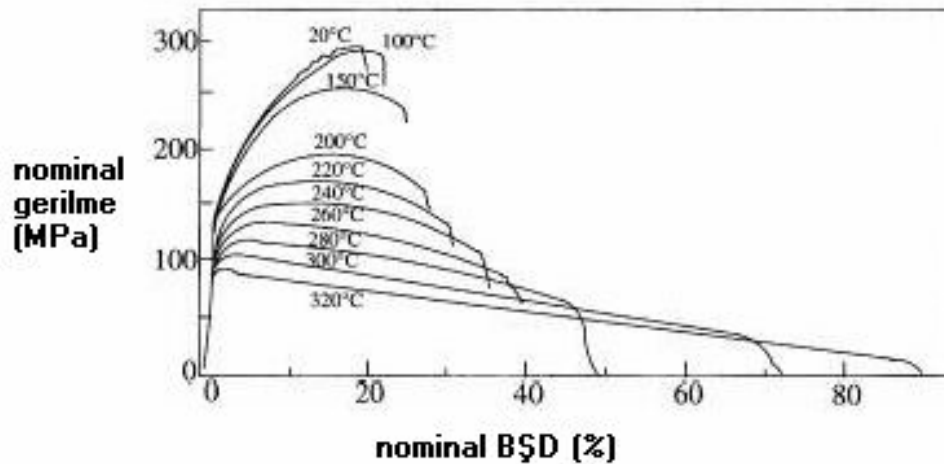
Tablo 4.4. Sacın kimyasal bileşimi (% kütle) [Takuda vd., 2002].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.10	0.20	0.04	0.30	4.51	0.04	0.01	Balance

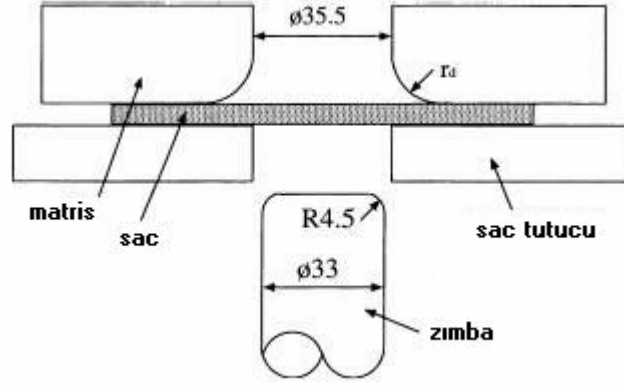
4.3.1. Deneysel prosedür

Kullanılan malzeme bir alüminyum alaşımı olan A5182-O, 1 mm. kalınlığında sacdır. Tablo 4.4'te kimyasal bileşimi, şekil 4.11'de dayanımın ve deformasyonun sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Şekil 4.11'deki değerler tek eksenli çekme deneyinden alınmıştır. 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda artan sıcaklık kopma uzamasını arttırırken akma için gerekli olan yükü azaltmaktadır. Normal anizotropi parametresi -r- yaklaşık olarak 0.7 değerini korumaktadır ve sıcaklıktan bağımsız olarak sabit alınabilmektedir.

Silindirik derin çekme işlemi şekil 4.12'de şematize edilmiştir. Bu işlemde yassı kafalı zımba kullanılır. Zımba çapı 33 mm ve profil yarıçapı 4.5 mm alınmıştır. Profil yarıçapları 3, 5, 7.5 ve 10 mm olan dört değişik tip kalıp kullanılmıştır. Kalıp çapı 35.5 mmdir. Yağlama sabun ve molibden disülfitle sağlanmıştır. Sac tutuculara uygulanan kuvvet 5.9 kN'da sabitlenmiştir. Zımba hızı yaklaşık 2.5 mm/sn'dir.



Şekil 4.11. Değişik sıcaklıklar için gerilme - BŞD diyagramı [Takuda vd., 2002].



Şekil 4.12. Silindirik derin çekme [Takuda vd., 2002].

Testler oda sıcaklığında ve 250 °C’de gerçekleştirilmiştir. Ilık derin çekme deneyi için kalıp ve tutucular bir fırında 250 °C’ye ısıtılmış ve deney hemen gerçekleştirilmiştir. Zımba oda sıcaklığında tutulmuştur.

4.3.2. Sayısal Prosedür

Isı iletiminin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edildiği bir çalışmada rijid-plastik model kullanılmıştır. Bu matematiksel model özet bir şekilde aşağıda tarif edilmeye çalışılmıştır [Osakada vd., 1982].

Geçiş bölgesindeki ısı iletimine ait diferansiyel eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\lambda \left\{ (1/R) (\delta / \delta R) (R \delta T / \delta R) + (\delta^2 T / \delta Z^2) \right\} - c_p (\delta T / \delta t) + q' = 0 \quad (4.1)$$

Deformasyon ve sürtünme dolayısıyla üretilen (toplam) ısı rijid-plastik sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilmiştir. Isı geçişi için sınır şartlar,

$$\lambda [(\delta T / \delta R) I_R + (\delta T / \delta Z) I_Z] + \alpha (T - T_a) = 0 \quad (4.2)$$

denklemleri ile tanımlanmaktadır.

Bu simülasyonda, takım içindeki sıcaklık üniform kabul edilmiş ve yalnızca sac metal için sıcaklık dağılımı hesaplanmıştır. Her bir elemandaki sıcaklık, şekil fonksiyonu {N} vasıtasıyla aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

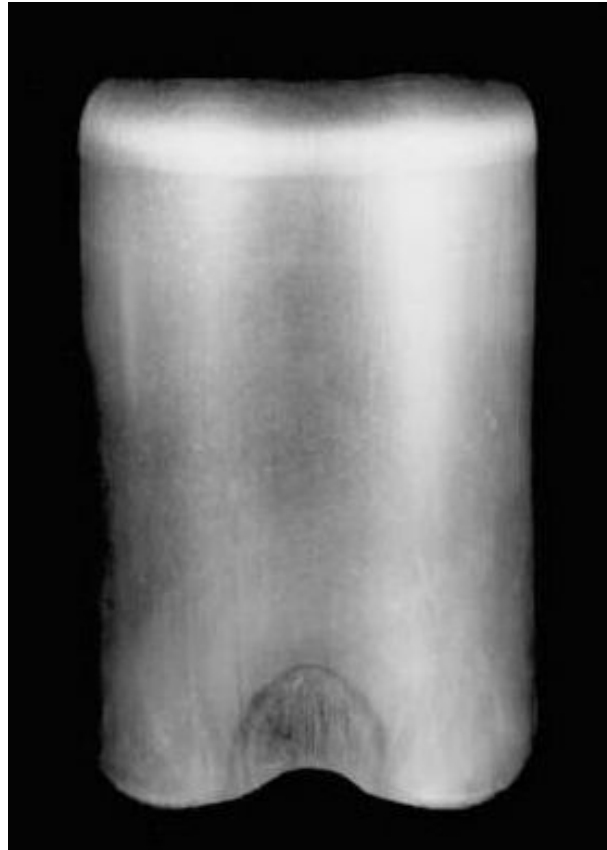
$$T = \{N\} \{T\} \quad (4.3)$$

Sonlu elemanlar yönteminde, ilgili diferansiyel denklem aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

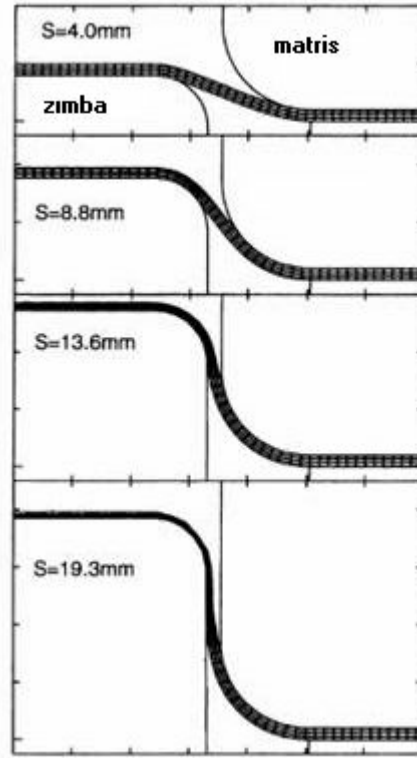
$$\lambda \left\{ \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{\delta}{\delta R} \right) \left(R \frac{\delta \{N\} \{T\}}{\delta R} \right) + \left(\frac{\delta^2 \{N\} \{T\}}{\delta Z^2} \right) \right\} - c \rho \left(\frac{\delta \{N\} \{T\}}{\delta t} \right) + q = 0 \quad (4.4)$$



Şekil 4.13. Oda sıcaklığında derin çekme deneyinde hasar (DR=2.4 ve $r_d=7.5$ mm) [Takuda vd., 2002].



Şekil 4.14. İlk derin çekme deneyi sonrası ürün (DR=2.68 ve $r_d=7.5$ mm) [Takuda vd., 2002].



Şekil 4.15. Derin çekme deneyinde hesaplanan deforme olmuş ağ yapısı
(DR=2.4 ve $r_d=7.5$ mm) [Takuda vd., 2002].

Eşitlik (4)'e Galerkin metodu uygulanırsa,

$$\begin{aligned} & \int_V \{N\}^T \lambda [(1/R)(\delta/\delta R)(R \delta \{N\} \{T\}/\delta R) + (\delta^2 \{N\} \{T\}/\delta Z^2)] dV \\ & - \int_V \{N\}^T c_p (\delta \{N\} \{T\}/\delta t) dV + - \int_V \{N\}^T q' dV = 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

ifadesi elde edilir. Gauss teorimi ve eşitlik (2)'deki sınır şartları ile eşitlik (5),

$$\begin{aligned} & \int_V \lambda [(\delta \{N\}^T/\delta R) (\delta \{N\}/\delta R) + (\delta \{N\}^T/\delta Z) (\delta \{N\}/\delta Z)] dV \{T\} \\ & + \int_s \alpha \{N\}^T \{N\} dS \{T\} + \int_V c_p \{N\}^T \{N\} dV (\delta \{T\}/\delta t) \\ & = \int_V \{N\}^T q' dV + \int_s \alpha \{N\}^T T_a dS \end{aligned} \quad (4.6)$$

halini alır. Δt süre önceki sıcaklık, $T_{t-\Delta t}$, kullanılarak, nodal sıcaklığın lineer ani denklemini elde edilir.

$$\begin{aligned} & [\int_V \lambda [(\delta \{N\}^T/\delta R) (\delta \{N\}/\delta R) + (\delta \{N\}^T/\delta Z) (\delta \{N\}/\delta Z)] dV \\ & + \int_s \alpha \{N\}^T \{N\} dS + \int_V c_p \{N\}^T \{N\} (dV/\Delta t)] \{T\} \\ & = \int_V \{N\}^T q' dV + \int_s \alpha \{N\}^T T_a dS + \int_V c_p \{N\}^T T_{t-\Delta t} (dV/\Delta t) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Bu hesaplamalara ait sonuçlar, hesaplamalarda kullanılan parametrik malzeme verilerinin aşağıda belirtilen kabuller ve tespitler uyarınca gerçekleştiği kabul edilerek elde edilmişlerdir. Tek eksenli çekme testinden elde edilen, saca ait akış eğrileri,

$$\sigma = F \varepsilon^n \quad (4.8)$$

eşitliği ile tarif edilmiştir. Değişik sıcaklık değerleri için F ve n değerleri Tablo 4.5’de verilmiştir. Sacın ısııl katsayısı Tablo 4.6’da verilmiştir. Takım-sac arasındaki ısı geçiş katsayısı $1400 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ olarak alınmıştır. Sac ile hava arasındaki katsayı ise $40 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ olarak alınmıştır. İşlem esnasında takımların sıcaklıkları sabit kabul edilmiştir. Sac ile takım arasındaki sürtünme katsayısı 0.05 kabul edilmiştir.

Tablo 4.5. Akma dayanım formülü (denklem 8) için değerler [Takuda vd., 2002].

Sıcaklık (°C)	20	100	150	200	220	240	260	280	300
F-değeri (Mpa)	700	635	489	296	256	208	165	134	98
Pekleşme üsteli, n	0.34	0.34	0.27	0.15	0.13	0.10	0.05	0.02	0.00

Tablo 4.6. Sacın termal katsayıları [Aluminium Handbook, 1990].

C(J kg ⁻¹ K ⁻¹)	P(kg m ⁻³)	λ(W m ⁻¹ K ⁻¹)
920	2700	121

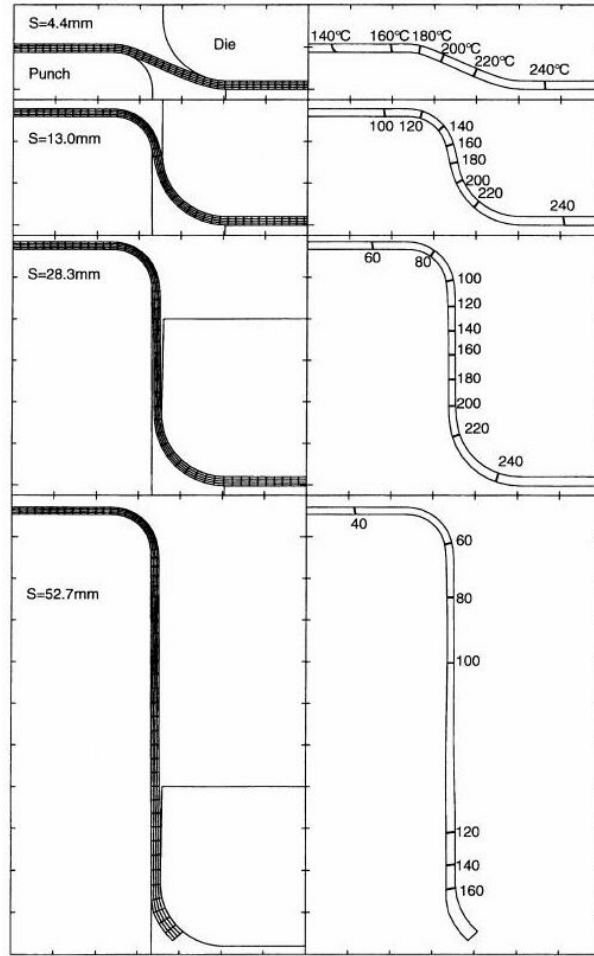
4.3.3. Deney sonuçları

Şekil 4.13, kalıp profil yarıçapı, r_d , 7.5 mm olan bir durumda oda sıcaklığında derin çekme sonrası parçanın şeklini göstermektedir. Resimden görüldüğü üzere hasar zımba köşelerinin çevresindeki bölgelerde meydana gelmektedir. Oda sıcaklığında derin çekme için çekme oranı limiti 2.4’ten daha düşüktür. Şekil 4.15, bu durumun sonlu elemanlar analizi ile simülasyonunu göstermektedir. Hesaplamalar da zımba köşelerine yakın kısımlarda boyun vermenin oluşacağını ve hasarın olasılığını ortaya koymaktadır.

$$DR = d_o / d_p \quad (\text{çekme oranı=drawing ratio})$$

Şekil 4.14, 250 °C’de ılık derin çekme durumunda işlem sonrası deney parçasının aldığı durumu göstermektedir. Bu durumda derin çekme oranı 2.68 gibi yüksek bir değere ulaşmış ve hasarsız bir çekme işlemi gerçekleştirilebilmiştir. Bu durumun sonlu elemanlar analizi ile simüle edilmesi ile elde edilen sonuç Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Şekilde sıcaklık dağılımının durumu geometrinin sağ tarafında simüle edilmiştir. Zımbanın bulunduğu kısmın ani olarak soğutulması sonucu akma gerilmesi artmış ve boyun verme gerçekleşmemiştir.

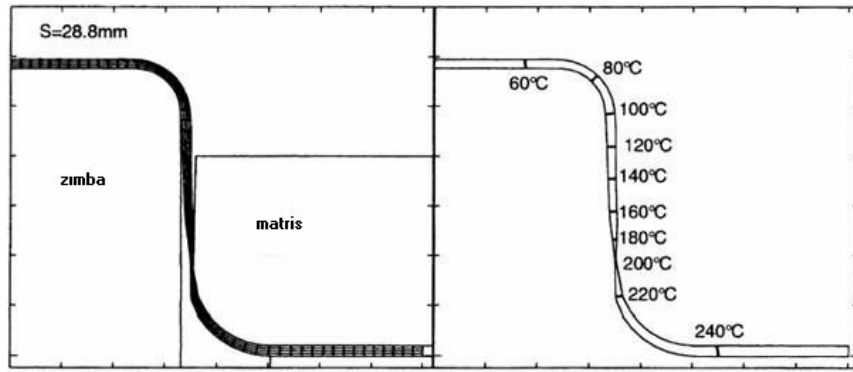
Şekil 4.17, çekme oranının 2.8 olduğu durumda ılık derin çekme testine tabi tutulan parçanın test sonrası aldığı şekli göstermektedir. Oda sıcaklığındaki durumdan farklı olarak hasar başlangıcı kalıp köşelerindedir. Hasarın kalıp köşelerinde oluşmasının sebebi sıcaklığın görece yüksek olmasıdır. Şekil 4.18’de gösterilen sonlu elemanlar analizi de aynı bölgede hasar oluşumunu öngörmektedir.



Şekil 4.16. Ilık derin çekme deneyi için sıcaklık dağılımı ve deforme olmuş ağ yapısı (DR=2.68 ve $r_d=7.5$ mm) [Takuda vd., 2002].

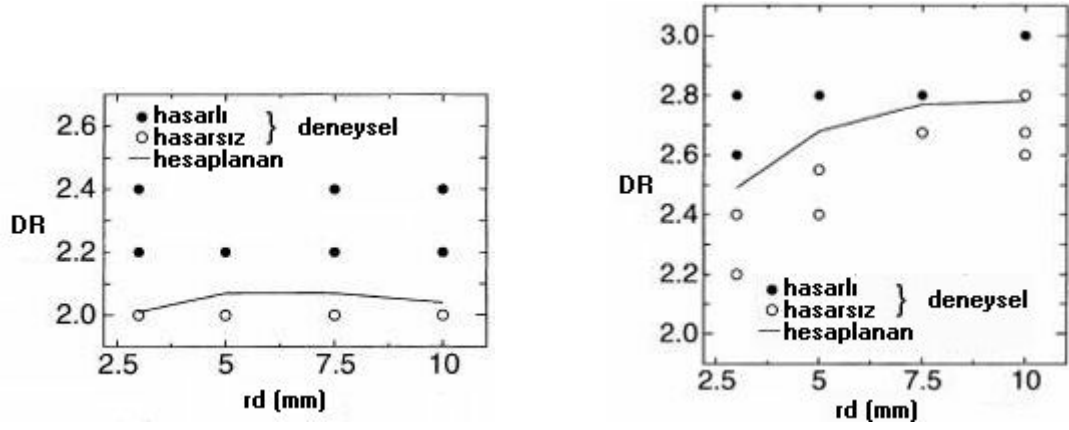


Şekil 4.17. Ilık derin çekme deneyinde hasar ($DR=2.8$ ve $r_d=7.5$ mm) [Takuda vd., 2002].



Şekil 4.18. Ilık derin çekme deneyinin simülasyonuna ait sonuçlar ($DR=2.8$ ve $r_d=7.5$ mm) [Takuda vd., 2002].

Şekil 4.19, sırasıyla oda sıcaklığında ve 250 °C sıcaklıkta derin çekmeler için, kalıp profil yarıçaplarının şekillendirilebilme sınırlarına etkilerini göstermektedir. İçi boş yuvarlaklar sacın hiçbir hasar oluşmadan, başarılı bir şekilde çekilmesi durumundaki deneysel sonuçları, içi dolu olanlar ise hasar meydana gelen durumundaki deneysel sonuçları belirtmektedir. Kalın çizgi ise sonlu elemanlar analizi sonucunda belirlenen derin çekme oranını belirtmektedir. Oda sıcaklığında çekme durumunda, şekillendirilebilme sınırı zımba köşelerindeki hasara bağlıdır ve derin çekme oranı, neredeyse kalıp profil yarıçapından bağımsız olarak, 2.1 gibi düşük bir değerdedir. Ilık derin çekmede ise, şekillendirilebilme sınırı kalıp köşelerindeki hasara bağlıdır ve çekme oranı sınırı kalıp profil yarıçapı ile artış gösterir ve $r_d=10$ mm. için 2.8 değerine ulaşır. Sonlu elemanlar analizi neticesinde elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla nitelik ve nicelik olarak büyük benzerlik göstermektedir.

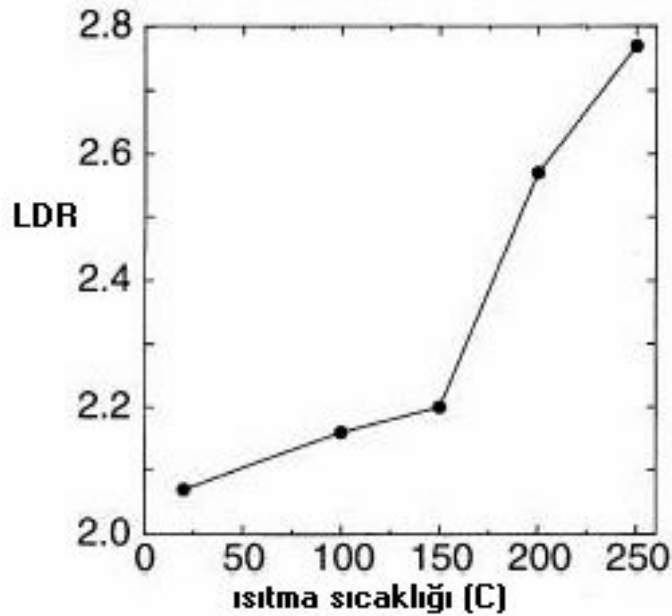


Şekil 4.19. Oda sıcaklığında ve 250 °C sıcaklıkta derin çekme testlerinde şekillendirilebilirlik [Takuda vd., 2002].

Deneysel sonuçlarla hesaplamalar arasındaki karşılaştırmalar yukarıda özetlenen simülasyon yönteminin güvenilirliğini ve etkinliğini ortaya koymaktadır.

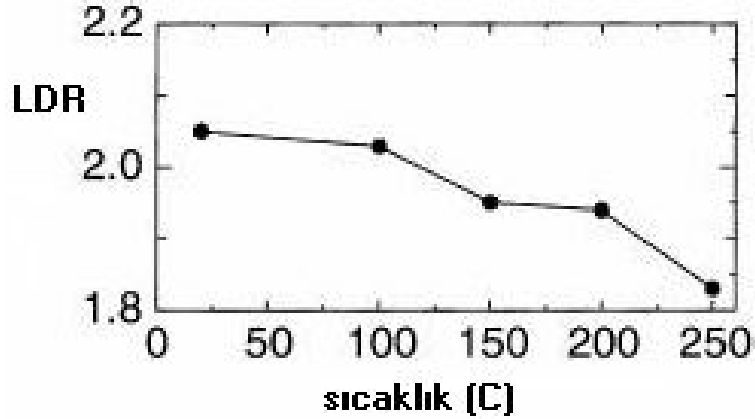
Şimdi de bahsi geçen sonlu elemanlar yönteminin etkinliğini, bazı sayısal yöntemlerle karşılaştırarak inceleyelim.

Şekil 4.20, zımba oda sıcaklığında olmak üzere, sacın ve takımların değişik sıcaklıkları için hesaplanan derin çekme oranı değerlerini göstermektedir. Derin çekme oranı, ısıtma sıcaklığının artışı ile artar.



Şekil 4.20. Sıcaklıkla derin çekilebilirliğin değişimi ($r_d=7.5$ mm) [Takuda vd., 2002].

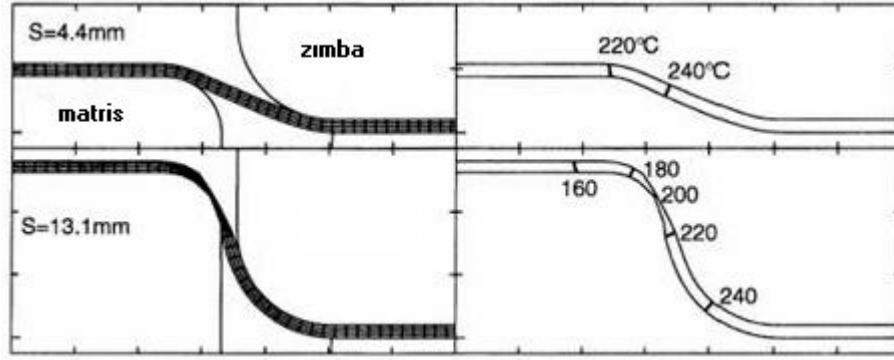
100 °C'ye kadar sıcaklığın etkisi azdır, çünkü 100 °C'deki akma dayanımı oda sıcaklığındaki ile neredeyse eşittir (Şekil 4.20). Derin çekme oranını yeterli derecede arttırabilmek için 200 °C'nin üzerine çıkmak gerekmektedir. 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar ise alüminyum sacın yapısında değişikliklere neden olmak suretiyle metalurjik sorunlar yaratacaktır.



Şekil 4.21. Uniform sıcaklık şartlarında, sıcaklık ile LDR arasındaki bağıntı ($r_d=7.5$ mm) [Takuda vd., 2002].

Şekil 4.21, sıcaklık gradyeni uygulanmayan durumu temsil etmektedir. Bu durumda hasar sıcaklıktan bağımsız olarak, her sıcaklıkta, zımba köşelerinde oluşmaktadır. Şekil 4.21 göstermektedir ki, pek çok araştırmacı tarafından daha önce deneysel olarak belirtildiği üzere, sıcaklıktaki uniform artış derin çekme oranını düşürmektedir. Bu olay sıcaklıktaki artış ile pekleşme üstelinin, n, düşmesi ile açıklanabilir (Tablo 4.5).

Elde edilen analitik ve deneysel sonuçlar göstermektedir ki, daha yüksek çekilebilirlikler elde etmek için, sıcaklık gradyenleri uygulanarak sacda uygun - yeterli- seviyede bir akma gerilmesi dağılımı -değişimi- elde edilmelidir. Bu nedenle, zımba köşesindeki sac gerektiği ölçüde soğutulmalıdır. Zımba hızı çok yüksek tutulduğunda bu imkansız hale gelmektedir. Şekil 4.22, şekil 4.18 ile aynı şartlarda yapılmış bir deneyin sonuçlarını göstermektedir, ancak ilk durumda 2.5 mm/sn olan zımba hızı 10 mm/sn'ye yükseltilmiştir. Bu durumda zımba köşelerindeki sac sıcaklığı hala yüksektir ve neticede boyun verme meydana gelir.



Şekil 4.22. Yüksek zımba hızında (10 mm/sn) ılık derin çekme durumunda ortaya çıkan mesh yapısı ve sıcaklık dağılımı [Takuda vd., 2002].

4.4. Yoğruk magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesi

Yoğruk magnezyum alaşımları, döküm olanlara göre daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları için otomotiv sektöründe geniş bir kullanım alanı olasılığına sahip oldukları aşikardır. Magnezyum alaşımlarının ısıtmalı takımlar kullanılarak şekillendirilmesi geniş yüzeyli ve ince parçaların üretilmesini mümkün kılar. Bu ve benzeri çalışmaların temel amacı, kompleks geometrilerin oluşturulmasında malzeme davranışlarının ve uygun işlem metotlarının ortaya konulabilmesidir.

Halihazırda, magnezyumun otomotiv sektöründe kullanımı kalıp döküm yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem çok karmaşık yapıli parçaların üretimine imkan verirken, çoğunlukla gerekli mekanik özelliklerin elde edilebilmesine imkan tanımamaktadır. Bu bağlamda alternatif bir üretim metodu olarak şekillendirme işlemi ortaya atılabilir. Bu yöntem yüksek mekanik kalitede, düşük tane boyutlu ve gözeneksiz parçaların üretimini mümkün kılmaktadır [Doege ve Droder, 2001]. Ancak magnezyum alaşımlarının işlenmesi için kullanılması uygun olan pek çok üretim teknolojisi, uygun parametrelerin bilinmemesi ve teknoloji tecrübesinin eksikliği nedeni ile yasaklanmış durumdadır. Otomobil gövdelerinin konstrüksiyonu magnezyum sac metal bileşenlerin kullanımı için geniş bir potansiyel sunmaktadır. Genel olarak, otomobil gövdesi tamamen metal sac parçalardan oluşur ve yaklaşık olarak toplam araç kütleinin %25'ini meydana getirir. Böylece, geleneksel metaller yerine magnezyumun kullanımı kütlede önemli bir düşüşe imkan sağlayacaktır.

Son zamanlarda ortaya çıkan gelişmeler yüksek sıcaklıklarda işleme durumunda magnezyum sacların mükemmel bir şekillenme kabiliyetine haiz olduğunu göstermiştir. Şekillendirilebilirlikle ilgili olarak, magnezyum sacların mekanik özelliklerini değerlendirebilmek için, değişik sıcaklık ve deformasyon hızlarında tek eksenli çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Magnezyum alaşımları; AZ31B, AZ61B ve M1 ile gerçekleştirilen derin çekme deneyleri bu malzemenin 200~250 °C aralığında çok iyi seviyede şekillendirilebilirliği olduğunu göstermiştir. Sıcaklığa ilaveten, şekillendirme hızının da derin çekme oranı değeri üzerinde önemli etkisi vardır.

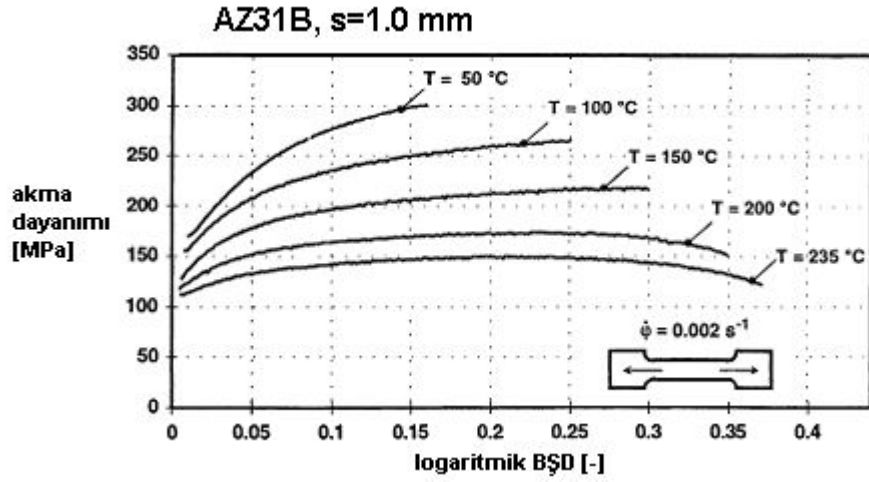
4.4.1. Magnezyum sacların plastik malzeme özellikleri

Magnezyum alaşımları oda sıcaklığında sınırlı seviyede bir şekillendirilebilirliğe sahiptirler. Bunun sebebi, heksagonal kristal yapı ve ikizlenme mekanizmasının çalışmamasıdır. Dikkate değer seviyede bir şekillendirilebilme kalitesi sağlamak için sıcaklığın artırılması gerekmektedir. Alaşımlama yüzdelere bağlı olarak ideal şekillendirilebilme sıcaklığı 200~225 °C arasında değişir [Siebel, 1940]. Sıcaklığın bu etkisi, heksagonal yapılarda piramit kayma düzlemlerinin ısısal aktivasyonu ile açıklanır [Ullmans Encyclopedia of Industrial Chemistry, 1990].

- Şekillendirme sıcaklığının akma gerilmesi üzerindeki etkisi

Magnezyum sacların deformasyon özelliklerinin iyi bir şekilde analiz edilebilmesi için, malzemenin karakteristik özelliklerinin -anizotropi, akış eğrisi gibi- belirlenmesi gerekir. Şekil 4.23, EN 10002, tek eksenli çekme deneyi sonucu elde edilen, AZ31B sacının değişik sıcaklıklardaki akış eğrilerini göstermektedir.

Gerilmelerin ve deformasyonun işlem sıcaklığına büyük oranda bağlı olduğu açıktır. 200 °C üzerindeki sıcaklıklarda akma gerilmesinin düşmesi sıcaklığa bağlı gevşemeden kaynaklanır.

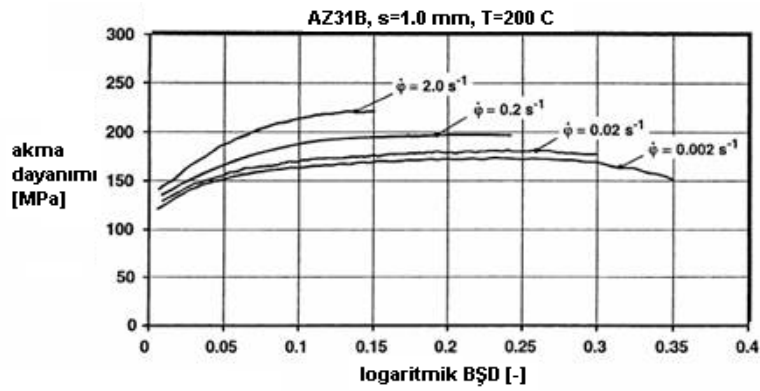


Şekil 4.23. Tek eksenli çekme testinde gerilme-deformasyon eğrisinin sıcaklıkla değişimi [Doege ve Kruz,2001].

- BŞD hızının akma gerilmesi üzerindeki etkisi

Magnezyum alaşımlarının deformasyon hızına duyarlılıklarını belirleyebilmek için, değişik hızlarda tek eksenli çekme testleri yapılmıştır. Şekil 4.24, 200 °C sıcaklıkta, AZ31B'den mamul bir sacın akma gerilmesi üzerinde test hızının etkilerini göstermektedir. Deformasyon hızının ($\dot{\epsilon}$) 0.002 s^{-1} 'den 2.0 s^{-1} 'e yükseltilmesi akma dayanımında önemli bir artışa neden olmaktadır. Test daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiği zaman bu etki daha düşük seviyede kalmaktadır.

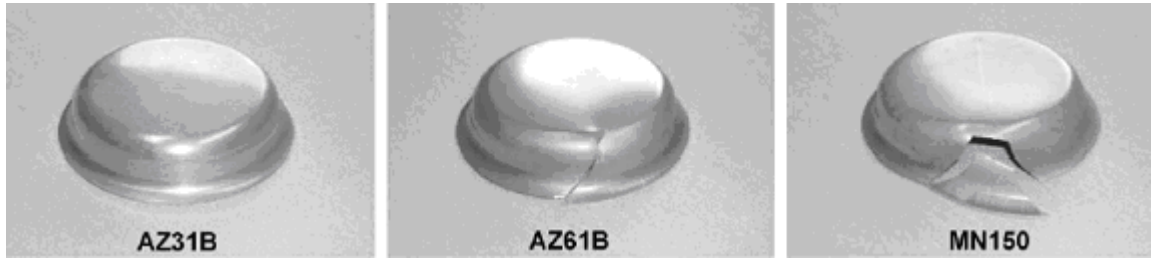
Sonuç olarak, çekme testleri, herhangi bir sıcaklıkta, hızın arttırılmasının maksimum uzamayı düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 4.24. Tek eksenli çekme testinde gerilme - deformasyon eğrilerinin deformasyon hızıyla değişimi [Doege ve Dröder, 2001].

4.4.2. Magnezyum alaşımlarının derin çekilmesi

Magnezyum sacların şekillendirilebilirliğinin incelenmesi için, silindirik bir takım kullanılarak değişik şekillendirme sıcaklıklarında gerçekleştirilen derin çekme deneylerinin sonuçları göstermektedir ki, düşük sıcaklıklarda (50 °C), AZ31B alaşımı düşük çekme oranında ($\beta_0=1.45$) derin çekilebilmekte (çekme derinliği 30 mm.), ancak AZ61B ve M1 alaşımları çabucak hasara uğramaktadır (şekil 4.25). Çekme oranı yükseltildiğinde ($\beta_0=1.6$) bütün alaşımlar benzer şekilde hasara uğramaktadır. Bu sonuçlar da, düşük sıcaklıkta magnezyumun şekillendirilebilirliğinin düşük veya yok olduğu anlamına gelmektedir.

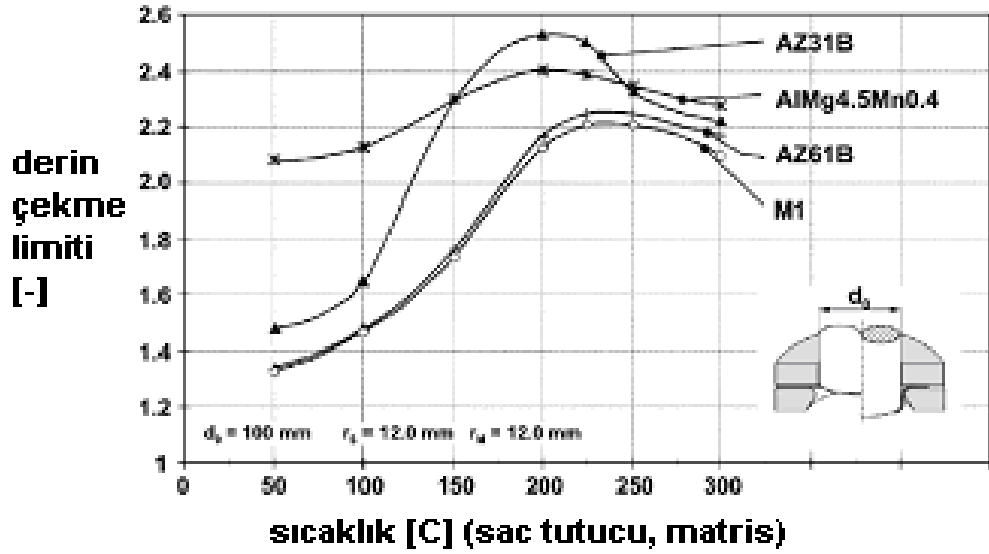


Şekil 4.25. 50 °C ve $\beta_0=1.45$ için derin çekme deney sonuçları [Doege ve Dröder, 2001].

Bununla birlikte, incelenen magnezyum alaşımları yüksek sıcaklıklarda çok iyi şekillendirilebilirlik göstermektedirler (Şekil 4.26). 200 °C’de, AZ31B alaşımı maksimum çekme oranına ($\beta_{o,max}=2.52$), AZ61B ve M1 alaşımları da 2.20~2.25 civarında çekme oranlarına ulaşmaktadırlar (AlMg4.5Mn0.4 alaşımına ait değerler karşılaştırma yapılabilmesi için grafiğe eklenmiştir. Alüminyum alaşımlarının oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirlikleri iyi olduğu için sıcaklığa bağlı çekme oranı artışı magnezyum alaşımlarına göre düşük seviyede kalmaktadır).

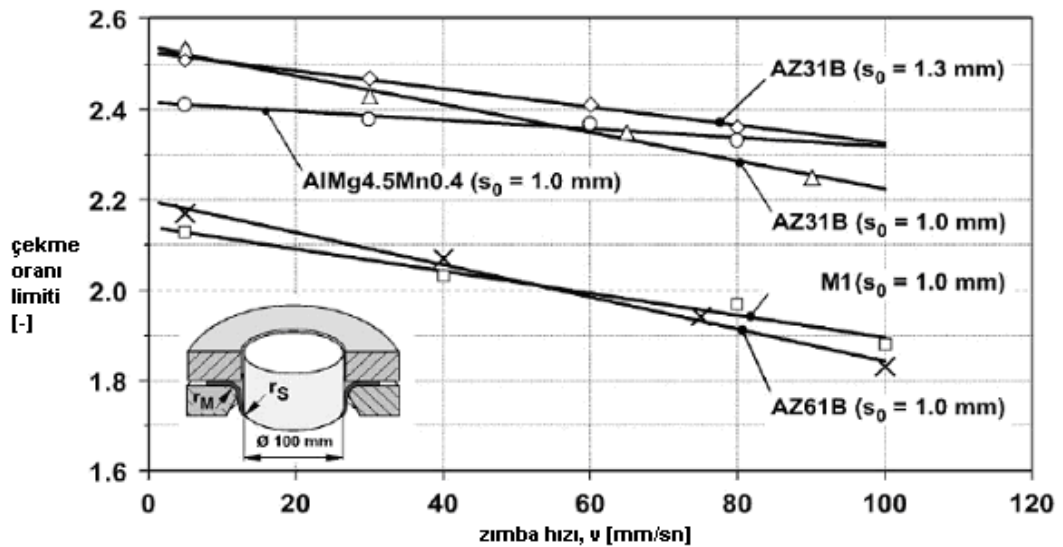
Çekme deneyinden elde edilen sonuçlar deformasyon hızının mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Şekil 4.27, 200 °C’de derin çekme işleminde derin çekme oranının zımba hızına bağlı değişimini göstermektedir. Yüksek hızlarda, ihtiyaç duyulan gerilmelerin artması ve deformasyon oranının düşmesi, derin çekme oranının önemli bir düşüş göstermesine neden olmaktadır (bir karşılaştırma olması açısından, şekillendirme hızının çekilebilirliğe etkisinin alüminyum alaşımı olan AlMg4.5Mn0.4’te magnezyum alaşımlarına oranla daha az olduğu söylenebilir).

Derin çekme oranının 2.2'den büyük olması için, AZ31B alaşımında, zımba hızının 100 mm/sn civarında tutulması gerekmektedir.



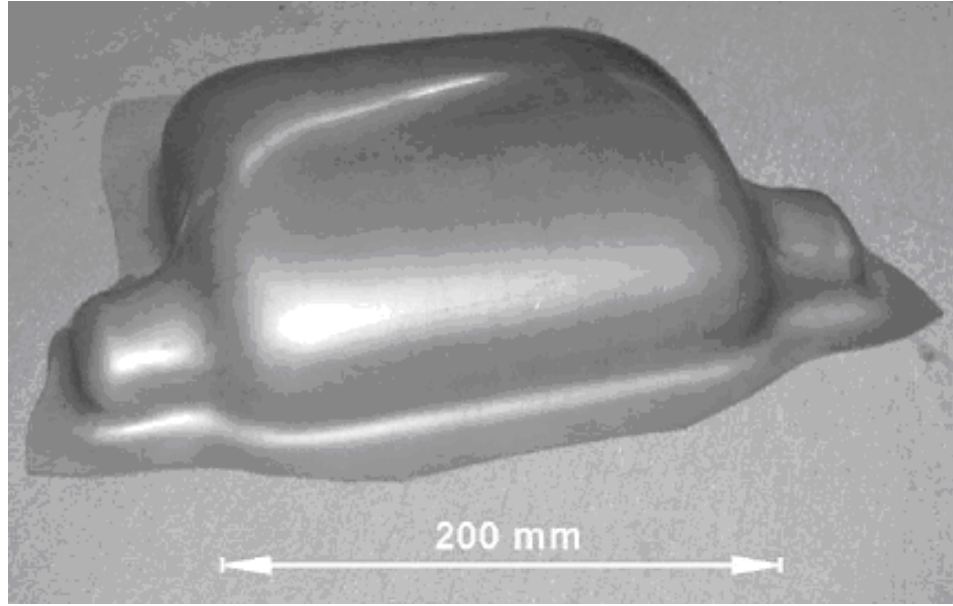
Şekil 4.26. Sıcaklığa bağlı derin çekme oranı ($d_0=100 \text{ mm}$) [Doege ve Dröder, 2001].

Şu ana kadar ki incelemeler, magnezyum için şekillendirme hızının derin çekme oranına etkilerinin geleneksel metallerdekinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu sebeple, magnezyumun şekillendirilmesi için yüksek hızlarda çalışan mekanik makinalar yerine hidrolik preslerin kullanılmasının daha uygun olacağı söylenebilir [Taylor ve Boyer, 1969].



Şekil 4.27. Derin çekme oranının zımba hızına bağlı değişimi [Doege ve Dröder, 2001].

Daha karmaşık geometrili takımlar kullanılarak yapılan derin çekme deneyleri sonucunda magnezyumun derin çekilmesinin endüstriyel uygulamalar için uygun olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.28. 250 °C’de derin çekilmiş parça ($s_0=1.0$ mm, malzeme AZ31B) [Doege ve Dröder, 2001].

4.4.3. Isıtmalı derin çekme işlemine tabi tutulan magnezyum sacların gevşeme davranışını açıklamak için geliştirilen bir formülasyon

Yüksek sıcaklıkta, magnezyum sacların mükemmel seviyede şekillendirilebilirliklere sahip oldukları yapılan çeşitli deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Sıcaklığın bu etkisi saf magnezyumun deformasyon mekanizmalarının 225 °C’ye kadar olan sıcaklıklarda hekzagonal kristal kafesin temel düzleminde kayma ve ikizlenme olması ve 225 °C’nin üzerine çıkıldığında yeni kayma düzlemlerinin ortaya çıkarak deformasyonun kolaylaşması ile açıklanmıştır [IFUM:Institute for metal forming and metal forming machine tools]. Lokal ısıtmaların gerçekleştirildiği, sıcaklık dağılımının uygulandığı derin çekme işleminin magnezyum alaşımlarının şekillendirilebilme sınırlarını daha da arttırdığı bilinmektedir. Geleneksel alüminyum ve çelik sacların yerine -spesifik dayanımı oldukça yüksek olan- yoğun yapıli magnezyum alaşımı sacların endüstriyel uygulamalarda kullanılması mümkündür. Ancak endüstriyel uygulamaların gerçekleştirilebilmesi için gevşeme karakteristiginin iyi bir şekilde anlaşılıp modellenenebilmesi gerekir.

Temel akış bağıntı ve eğrileri (örneğin, Rheile veya Hollomon kanunları) sıcaklık şartlarını hesaba katmaz veya sabit oda sıcaklığı kabulüne dayanır. Literatürde Hollomon kanununa dayandırılarak geliştirilmiş sıcaklık bağımlı değişik akış eğrileri bulunmaktadır, ancak bunlar da magnezyuma özgü gevşeme karakteristiğini ortaya koyamamaktadır.

Örneğin, alüminyum alaşımlarının 150~300 °C aralığındaki akış eğrileri aşağıdaki kanunla açıklanabilir.

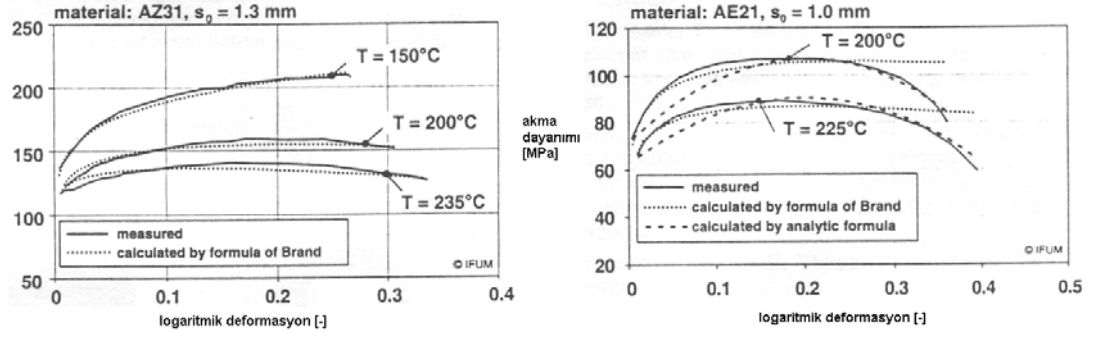
$$k_{f(T)} = C \cdot \varphi^{\tilde{n}} \cdot \varphi^* \cdot \tilde{m} \cdot T^{\tilde{t}} \quad (4.9)$$

(*C*, sabit; $\tilde{n}$, *pekleşme etkisi için üs*; $\tilde{m}$, *hız etkisi için üs*; $\tilde{t}$, *sıcaklık etkisi için üs*)

Bu yasanın en önemli dezavantajı şekillendirilirken gevşeme davranışı gösteren magnezyum gibi malzemelerde, bu davranışı karakterize edememesidir. Bunun nedeni de, pekleşme üstelinin deformasyondan bağımsız kabul edilmesidir. Pekleşmedeki değişimi, Brand tarafından ortaya atılmış olan daha genişletilmiş bir bağıntı göz önüne alır [Doege ve Kruz, 2001].

$$k_{f(T)} = k \cdot e^{m_1 T} \cdot \varphi^{* m_2} \cdot \varphi^{m_3} \cdot e^{m_4 \varphi} \quad (4.10)$$

Bu bağıntıda, akma gerilmelerinin şekillendirme parametrelerine bağımlılığı birbirinden bağımsız faktörlerle tanımlanmıştır. Dolayısıyla sıcaklığın, deformasyonun ve deformasyon hızının etkileri ayrı ayrı ele alınabilir. Değişken pekleşme davranışının etkisi de $e^{m_4 \varphi}$ terimi ile fonksiyona ilave edilmiştir. Bu formülasyonun işlem modelleme açısından geçerliliği, bu formülden elde edilen sayısal değerlerin AZ31 magnezyum alaşımına ($s_0=1.3$ mm) ait deneysel verilerle karşılaştırılması ile, bir örnek teşkil etmesi açısından, ispatlanmıştır. Ancak bu bağıntının AZ31 dışındaki magnezyum alaşımlarına uygun olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni magnezyum alaşımlarında görülen gevşeme davranışının değişik alaşımlar arasında farklılıklar göstermesi, dolayısıyla farklı alaşımların değişik karakteristikte akma eğrilerine sahip olmalarıdır. Bu farklılık şekil 4.30 ve şekil 4.31 arasında açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.29. AZ31 ($s_0 = 1.3 \text{ mm}$, $\dot{\epsilon} = 0.004 \text{ s}^{-1}$) ve AE21'e ($s_0 = 1.0 \text{ mm}$, $\dot{\epsilon} = 0.004 \text{ s}^{-1}$) ait akış çizgileri [Doege ve Kruz, 2001].

m_1 , m_2 , m_3 , m_4 ve k katsayıları kabul edilebilir analizler sonucu elde edilmiştir. 150~235 °C sıcaklıkları aralığında, (2) numaralı bağıntı ile elde edilen akış eğrilerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması şekil 4.30'da verilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki ufak sapmalar (2) yasasının AZ31 magnezyumuna ait akış eğrilerini hesaplamak için uygun olduğunu göstermektedir. Tablo 4.7'de bu formülde kullanılan m_1 , m_2 , m_3 , m_4 ve k katsayılarının listesi verilmiştir.

Tablo 4.7. Brand bağıntısının katsayıları [Doege ve Kruz,2001].

			T=150 °C	T=200	T=235
k	[MPa.s]		190	141	112
m₁	[-]	Akma dayanımının sıcaklığa bağımlılığı	$18 \cdot 10^{-4}$		
m₂	[-]	Akma dayanımının deformasyon hızına bağımlılığı	10^{-4}		
m₃	[-]	Deformasyona bağlı pekleşme katsayısı (n)	0.12	0.103	0.072
m₄	[-]	gevşeme davranışını temsil eden katsayı	0	-0.52	-0.62

m_4 üssünün düşük değerleri, sıcak şekillendirmede güçlü dinamik gevşeme davranışının görüleceği anlamına gelmektedir. 150 °C sıcaklıkta ($m_4=0$) hiçbir gevşeme davranışı yoktur ve deformasyon sertleşmesi katsayısı sabittir. Brand metodunun gösterdiği bazı yetersizlikler nedeniyle, aynı analitik modele dayanan daha etkin bir bağıntı geliştirilmiştir.

$$k_{f(T)} = R_{p0.2} + \Theta.T\varphi^2\left(\frac{1}{\varphi} - \psi\right) \quad (4.11)$$

Burada; Θ , sıcaklık spesifik faktörü (AE21 için 200 °C de 1.75, 225 °C de 1.22 değerini alır); Ψ , malzeme spesifik faktörüdür (AE21 için 2.5 değerini alır).

Diğer malzemelerde olduğu gibi magnezyumda da kalıp ve tutucularda lokal sıcaklık dağılımları uygulanarak şekillendirme sınırları genişletilebilir. Magnezyumun tek eksenli çekilmesi deneylerinde karşılaşılan yüksek sıcaklıklardaki gevşeme davranışı aynı zamanda ısıtılmalı derin çekme işlemini de etkilemektedir. Bu yüzden, derin çekme oranı 200~250 °C aralığında yeni kayma düzlemlerinin ortaya çıkması nedeniyle maksimum değerine ulaşırken, sıcaklık daha da arttırıldığında gevşeme mekanizmaları ortadan kalkarak malzemenin derin çekme oranı düşmeye başlar.

Karmaşık ve düzensiz parçaların derin çekilmesi işlemi uniform olmayan durumların ortaya çıkmasına neden olur. Bu gibi durumlarda derin çekilen malzemenin farklı bölgelerinde farklı gerilme ve deformasyon durumları ortaya çıkar. Örneğin, düzgün ve ince olarak bükülen yerlerde genel gerilme durumu radyal olurken, köşe kıvrımları hem radyal hem teğetsel gerilmelere maruz kalmaktadır [Yoshida vd., 1972].

Bu yüzden işlem sırasında malzemenin lokal olarak ısıtılması ürün kalitesinin artmasında etkili bir yöntem olarak ortaya çıkar. Örneğin, gerçek deformasyonun yüksek olduğu köşe kısımları, kenar kısımlarına göre daha çok ısıtılır. Bölgesel olarak değişen sıcaklık dağılımı uygulaması derin çekme işlemi esnasındaki yük dağılımını düzenleyerek şekillendirilebilirliği artırır. Böylece, işlem için harcanan enerjiyi azaltabilmek için parçanın kenar kısımlarını daha az ısıtmak gerektiği söylenebilir.

5. BÜNYE DENKLEMLERİ VE SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

5.1. Bünye Denklemleri

Isıtma işlemi söz konusu olduğunda, bilgisayar simülasyonlarının etkin bir şekilde kullanılabilmesi için ilgili formülasyonların çok iyi bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. Deformasyon şartlarına bağlı olarak akma dayanımında ortaya çıkan değişimleri hesaplayacak değişik modeller, basitten çok karmaşığa doğru, gruplandırılmışlardır. Modeller, değişik deformasyon parametre gruplarıyla karakterize edilen, iki temel gruba ayrılabilir. Bazı modeller soğuk şekillendirmeye uygulanabilirken, bazıları (daha karmaşık olanlar) yarı sıcak ve sıcak şekillendirmede kullanılabilirler. Yarı sıcak ve sıcak deformasyon şartlarında kullanılacak modellerle doğru sonuçlara ulaşılabilmesi için malzemelerin deformasyon geçmişlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Metal ve alaşımlarının şekillendirilmesinde en önemli amaçlardan biri istenen mikroyapı ve özelliklerde ve kusur içermeyen parçaların imalidir. Bu amaca ulaşmak için, daha iyi dizayn ve hesap metodları kullanılmalı ve deformasyona ait parametreler iyi bir şekilde kontrol edilmelidir. Bunun içinde malzemelerin deformasyonunda etkin fenomenler hakkında yeterli bilgi edinilmesi ve deforme edilen malzemenin özellikleri ile deformasyon şartları arasındaki ilişkilerin iyi anlaşılması gerekmektedir.

Metal şekillendirme işlemini tanımlayan matematik modelin doğruluğu ve kesinliği temelde, kabul edilen sınır şartlarına, malzeme modeline ve sayısal hesaptaki hatalara bağlıdır. Bu tür bir işleme ait bilgisayar simülasyonunun en önemli elemanı, deformasyon şartlarına ait akma gerilmesi fonksiyonunu ifade eden malzeme modelidir. Bu malzeme modelinin doğruluğu hem matematiksel yapıya hem de malzeme parametrelerinin çıkartıldığı deneylere dayanır. Matematiksel yapı

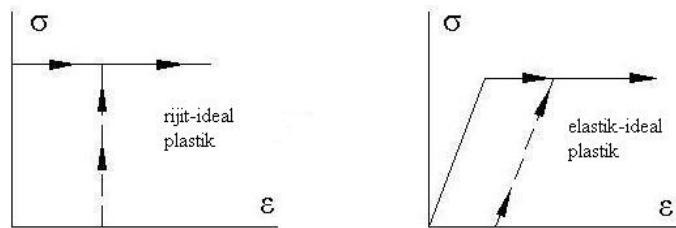
malzemede ortaya çıkan fiziksel olguları ihtiva etmelidir. Bu oluşumlar malzemenin tipine, deformasyon şartlarına, deformasyon geçmişine ve bilgisayar simülasyonuna özgü olgulara bağlıdır.

Akma dayanımındaki değişimleri açıklayan denklemler genellikle iki gruba ayrılırlar. İlk gruba dahil olanlar, direkt olarak, sıcaklık ve deformasyon derecesi gibi deformasyon şartlarına bağlı olarak malzemenin akma dayanımındaki değişimleri açıklarlar. Bu modeller genelde deformasyon geçmişini göz önüne almazlar. Bu modeller, malzemenin durumunu belirleyen baskın faktör pekleşme olduğu zaman, akma dayanımını doğru olarak hesaplayabilirler. Ancak termal aktivasyonlu gevşemenin ortaya çıktığı durumlarda bu modeller hatalı sonuçlar vermeye başlar ve ikinci gruba geçmek gerekir.

İkinci grupta bulunan modeller malzemenin içyapısını etkileyen deformasyon geçmişini hesaba katarlar [Marciniak ve Konieczny, 1987], çünkü malzemenin deformasyon davranışı üzerinde içyapı özelliklerinin etkisi büyüktür. Bu tip durumlarda, malzemenin davranışı iki yönlü olarak analiz edilir:

- deformasyonla malzeme içyapısının değişimi,
- deformasyon şartlarındaki değişime malzeme içyapısının tepkisi.

Son zamanlara kadar, plastik şekil verme işlemlerinin analiz ve simülasyonunda çok basit bünye denklemleri kullanılıyordu. Sonlu elemanlar metodu geliştirilmeden önce, rijit-ideal plastik veya elastik-ideal plastik malzeme modelleri kullanılıyordu, çünkü ancak bu modeller için görece basit çözüm yolları oluşturulabiliyordu. Bu tip modeller plastik şekil verme işlemindeki malzeme davranışını kesin anlamda tanımlamaktan oldukça uzaktır.



Şekil 5.1. Rijit-ideal plastik ve elastik-ideal plastik malzeme modelleri [Çapan, 1990].

Sonlu elemanlar metodu, konuyla ilgili profesyonel yazılımlar -MSC SUPERFORM, MSC MARC, ABAQOUS, DEFORM ve AUTOFORGE gibi- ve yeni jenerasyon yüksek kapasiteli bilgisayarlar geliştirilince gerçek malzeme davranışlarını tanımlayabilmek ve farklı imalat yöntemlerini kesin doğrulukla analiz etmek mümkün hale geldi.

5.1.1. Birinci grup bünye denklemleri

Birinci grubun geniş ölçüde kullanıma sahip olan ve ortam sıcaklığında ve düşük deformasyon miktarlarındaki metal şekillendirmelerin analiz, simülasyon ve dizaynını yapan eşitlikleri aşağıda sıralanmıştır [Gronostajski, 2000]. Bu bağıntılarda plastik deformasyon nedeniyle ortaya çıkan sıcaklık artışının akma dayanımı üzerindeki etkileri ihmal edilmiştir.

- Hollomon bağıntısı:

$$\sigma_p = C \varepsilon^n \quad (5.1)$$

- Ludwig bağıntısı:

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + C \varepsilon^n \quad (5.2)$$

- Ludwig bağıntısı (Hartley tarafından genelleştirilmiş):

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + C(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (5.3)$$

- Swift (Krupkowski) bağıntısı:

$$\sigma_p = C(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (5.4)$$

- Krupkowski bağıntısı:

$$\sigma_p = C z_i^n \quad (5.5)$$

- Samantha bağıntısı:

$$\sigma_p = \sigma_{p0} + C \ln \varepsilon \quad (5.6)$$

- Voce bağıntısı:

$$\sigma_p = \sigma_{ps} - (\sigma_{ps} - \sigma_{po}) \exp(-n\varepsilon) \quad (5.7)$$

- Sellars bağıntısı:

$$\sigma_p = \sigma_{po} + (\sigma_{pm} - \sigma_{po}) [1 - \exp(-n\varepsilon)]^n \quad (5.8)$$

- Misiolek bağıntısı:

$$\sigma_p = C \varepsilon^n \exp(n_1 \varepsilon) \quad (5.9)$$

Pek çok sayıda bağıntının çıkarılmış olmasından da anlaşılacağı üzere, hiçbir bağıntı tüm malzemeler için tatmin edici bir analiz sonucu sağlayamamaktadır. Yukarıda verilen basit bağıntılar sadece bazı malzeme gruplarının σ - ε davranışlarını tatmin edici bir şekilde simüle edebilirler. 1~6 numaralı bağıntılar düşük seviyede deformasyon söz konusu olduğunda, 7~9 numaralı olanlar ise yüksek seviyede deformasyon söz konusu olduğu durumlarda kullanıma uygundur.

Deformasyon ile birlikte deformasyon hızını da dikkate alan bağıntılar aşağıda verilmiştir:

- Fields ve Backofen bağıntısı:

$$\sigma_p = C \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (5.10)$$

- Hart bağıntısı:

$$\sigma_p = \sigma_p^* \exp[-(\dot{\varepsilon}^* / \dot{\varepsilon})^\lambda] + \sigma_o(\dot{\varepsilon})^{1/M} \quad (5.11)$$

Üstteki, 11 numaralı, bağıntının ilk terimi ısı aktivasyondan kaynaklanan plastik akışı, ikinci terimi ise dislokasyon kaymasını temsil etmektedir. Bu bağıntı benzeş sıcaklık >0.4 değerleri için kullanılacaksa, tane sınırlarındaki kaymada hesaba katılmalıdır.

- Wagoner bağıntısı:

$$\sigma_p = C (\varepsilon + \varepsilon_0)^n (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)^m \quad (5.12)$$

- Grosman bağıntısı:

$$\sigma_p = C \varepsilon^n \exp(n_1 \varepsilon) \dot{\varepsilon}^m \quad (5.13)$$

Deformasyon derecesi ve hızından ayrı olarak, sıcaklığı da hesaba katan bağıntılar aşağıdaki formlarda bulunurlar.

- $\sigma_p = C \varepsilon^n \exp(n_1 \varepsilon) \dot{\varepsilon}^m \exp(\alpha_1 T)$ (5.14)

- $\sigma_p = C \varepsilon^n \exp(n_1 \varepsilon) \dot{\varepsilon}^{(m+bT)} \exp(\alpha_1 T)$ (5.15)

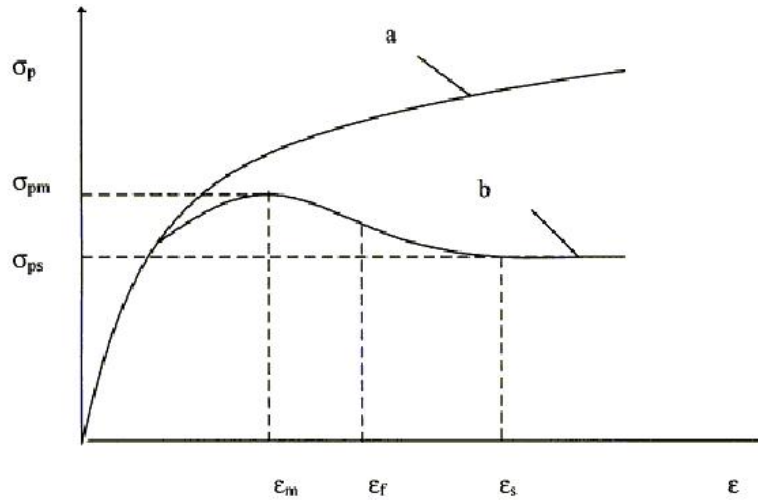
- $\sigma_p = C \varepsilon^{(n+b_2 T)} \exp(n_1 \varepsilon) \dot{\varepsilon}^{(m+bT)} \exp(\alpha_1 T)$ (5.16)

- $\sigma_p = C \varepsilon^n \exp(n_1 \varepsilon / \varepsilon_m) \dot{\varepsilon}^{(m+b/T)} \exp(\alpha_1 T)$ (5.17)

- $\sigma_p = C \varepsilon^n \exp(n_1 / \varepsilon) \dot{\varepsilon}^{(m+bT)} \exp(\alpha_1 T)$ (5.18)

- $\sigma_p = C \varepsilon^n \exp(n_1 / \varepsilon) \dot{\varepsilon}^{(m+bT)} \exp(\alpha_1 T) T^\alpha$ (5.19)

Yukarıda verilen bağıntılar basit σ - ε eğrilerinin yanı sıra pekleşme, zayıflama ve kararlı plastik akışı gibi kompleks eğrileri de açıklayabilirler.



Şekil 5.2. Değişik akma eğrisi şekilleri [Gronostajski, 2000].

Yüksek deformasyon ve yarı sıcak/sıcak şekillendirme söz konusu olduğunda, deformasyonun akma dayanımı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Böyle bir durumda, uyum sağlamak için, değişik sıcaklık ve deformasyon hızı değerleri kullanılarak bağıntılar elde edilir. Zener ve Hollomon sıcaklığa bağlı düzenlenmiş deformasyon hızı bağıntısını geliştirmişlerdir.

$$\sigma_p = f [\dot{\epsilon} \exp(Q/RT)] = f(Z) \quad (5.20)$$

Benzer şartlar için kullanılan diğer bir bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_p = (1/\alpha) \ln \{ (Z/A)^{1/n} + [(Z/A)^{2/n} + 1]^{1/2} \} \quad (5.21)$$

Bu model aşağıdaki bağıntıdan elde edilir.

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma_p)]^n \exp (-Q/RT) \quad (5.22)$$

MacGregor ve Fisher tarafından ortaya konan alternatif bir form aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_p = f [T(1 - K \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0))] = f(T_v) \quad (5.23)$$

Sabit aktivasyon enerjisi değerleri sıcaklıktan bağımsız olarak benzeş sıcaklık değerinin 0.5 olduğu şartlarda bazı saf metaller ve alaşımlar için çıkartılmıştır. Bu değerlerin düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlemler ve karmaşık yapıları alaşımların deformasyonunda kullanılması mümkün olmamaktadır.

Malzemenin iç yapısını dikkate almayan, ama karmaşık fonksiyonlarla malzeme davranışını modelleyen, yüksek plastik deformasyon durumlarında geçerli olan bir diğer model, Nakanishi ve asistanları tarafından geliştirilmiştir. Akma (σ - ϵ) eğrilerinin çıkarılması için pek çok malzeme parametresini kullanan model diferansiyel bir bağıntıdır. Pekleşme oranı aşağıdaki bağıntıyla açıklanır.

$$\delta\sigma_p/\delta\epsilon = (\delta\sigma_{pB}/\delta\epsilon) - (\gamma_o/\epsilon) (\sigma_{pB} I_{\epsilon+\Delta\epsilon} - \sigma_p I_{\epsilon}) \exp(q \sigma_p^2) - (\delta\sigma_{pR}/\delta\epsilon) \quad (5.24)$$

Nakanishi'nin bu ifadesi, deformasyon artımı $\Delta\epsilon=0.004$ olan ve Runge-Kutta-Gilla metoduna göre çözülmüş bir diferansiyel artış eşitliğidir. Bu bağıntıdan elde edilecek sonuç artımın büyüklüğüne bağlı olacaktır. Artımın sıfıra gitmesi durumunda dinamik telafiden kaynaklanan gevşemeye ait terim ortadan kalkar. Uygulamanın bir diğer zorluğu da, çok fazla sayıda malzeme parametresi içermesidir.

Bütün eğriyi hesaplamak için, Schindler Şekil 5.2’de görülen eğriyi sıralı üç parçaya ayırmıştır. Birinci bölge deformasyonun sıfırdan ε_f değerine kadar olan kısmını oluşturur ve bu bölgeye 13 numaralı denklem uygulanır. Üçüncü bölgede ise, dengeli akış söz konusudur ($\varepsilon \geq \varepsilon_0$ durumu) ve sabit seviyedeki gerilme durumu aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir:

$$\sigma_{ps} = L \sigma_{pm} \quad (5.25)$$

Burada L, bir malzeme sabitidir.

İkinci bölge ise birinci ve üçüncü bölgelerin sınırlarını sınır şart kabul eden $\sigma_p = f(\varepsilon)$ parabolik fonksiyonu ile ifade edilir.

Düşük karbonlu çeliklerin akma dayanımlarını açıklamak için Rao 22 numaralı bağıntısı kullanır. Bu bağıntı, malzeme parametreleri n, A ve Q’nun deformasyon ile aşağıdaki ilişki uyarınca değiştiğini kabul eder.

$$Y = (C_n / \varepsilon_n^B) + D_n \quad (5.26)$$

Burada, Y; Q, n veya ln A parametrelerini; B_n, C_n, D_n ise Q, n, ln A parametrelerinin her biri için değişik değerler alan sabitleri temsil eder.

5.1.2. İkinci grup bünye denklemleri

22 numaralı bağıntı, içyapı değişkenleri eklenerek, sabit deformasyon hızı koşullarını içine alacak bir şekle dönüştürülebilir. Bu durumda bağıntı şöyle bir hal alır.

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = A [\sinh(\sigma_p/s)]^n \exp(-Q/RT) \quad (5.27)$$

Burada s, malzeme durumunu karakterize eden içyapı değişkenlerini temsil eder. S değişkeninin oransal ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\dot{s} = \lambda (s_m - s) \dot{\varepsilon}_{vp} \quad (5.28)$$

Dengeli akma durumuna yüksek deformasyon seviyelerinde ulaşılır. Bu durumdaki gerilme ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_{ps} = S_m \sinh^{-1}[(\dot{\epsilon}/A) \exp(Q/RT)]^{1/n} \quad (5.29)$$

Deneysel Voce bağıntısının, Kocks bağıntısı ile genişletilmesi ile elde edilen ve sıcaklığa ve deformasyon hızına bağımlılığı hesaba katan ve dislokasyon yoğunlaşması ve dinamik telafi oranı gibi içyapı özelliklerini de içeren bağıntı da bu gruba aittir.

Marciniak ve Konieczny başka bir malzeme modeli geliştirmişlerdir. Bu model, σ_w terimi ile deformasyon geçmişini de hesaba katar. Bu bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_p' = (\delta\sigma_p/\delta\epsilon') \epsilon'' + (\delta\sigma_p/\delta\sigma_w)F_1 \epsilon' + (\delta\sigma_p/\sigma_w)F_0 \quad (5.30)$$

Burada, F_0 ve F_1 terimleri deformasyon şartlarına bağlı durum parametrelerini ifade eden fonksiyonlardır.

Bu bağıntının sağ tarafındaki ilk terim deformasyon oranlarındaki ani değişimlere malzemenin tepkisini ifade eder. İkinci terim gerilme-deformasyon eğrisinin şeklini belirleyen pekleşme-gevşeme olaylarını temsil eder. Son terim ise, zamanla gerilmedeki değişimleri belirler. Yukarıdaki model düşük karbonlu çelikler (%0.1 karbon) için kullanılır. Bu modelde ortaya çıkan fonksiyonlar ve durum parametreleri karmaşık bağıntılarla ifade edilebilirler.

Şu ana kadar incelenen genel kabul görmüş bağıntılar gözönünde bulundurularak, malzemenin içyapı durumlarının değişimlerini hesaba katan ve plastik deformasyon durumlarının büyük çoğunluğuna uygulanabilen bir model geliştirilmiştir. Bu modelde dayanım aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$\sigma_p(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) = M(T) P(\dot{\epsilon}, T) \sigma_w(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) \quad (5.31)$$

Bu bağıntıda içyapı durumlarındaki değişimin oranını belirleyen ifadeler de aşağıda verilmiştir.

$$(d\dot{\epsilon}_w/d\epsilon) = W[\dot{\epsilon}(\epsilon) - \dot{\epsilon}_w(\epsilon)] \quad (5.32)$$

$$\dot{\epsilon}_w(d\sigma_w/d\epsilon) = [a - b\epsilon](\sigma_{wB}/\delta\epsilon) \quad (5.33)$$

Bu modelde düşük sıcaklık ve deformasyon şartlarında telafi mekanizmalarının oluşmadığı varsayılır. Bu modeli kullanacak kişinin; temel pekleşme eğrilerini, maksimum gerilme (σ_{PM}), kararlı deformasyon gerilmesi (σ_{ps}) ve deformasyon sıcaklığı arasındaki bağıntıları ve deformasyon hızını bilmesi gerekmektedir. Deformasyon miktarları aşağıdaki bağıntı kullanılarak çıkarılabilir.

$$\epsilon = kD^p Z^l \quad (5.34)$$

Isı geçişinin analizini gerçekleştirilebilen ve literatürde önemli bir yere sahip diğer bir modelde Johnson ve Cook tarafından geliştirilen Johnson-Cook (JC) bağıntısıdır. Bu bağıntı malzemenin akma gerilmelerini BŞD, BŞD hızı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplar [Özel ve Zeren, 2003].

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n][1 + C \ln(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_0})][1 - (\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}})^m] \quad (5.35)$$

5.2. Sac metallerin derin çekilmesinin sayısal analizi

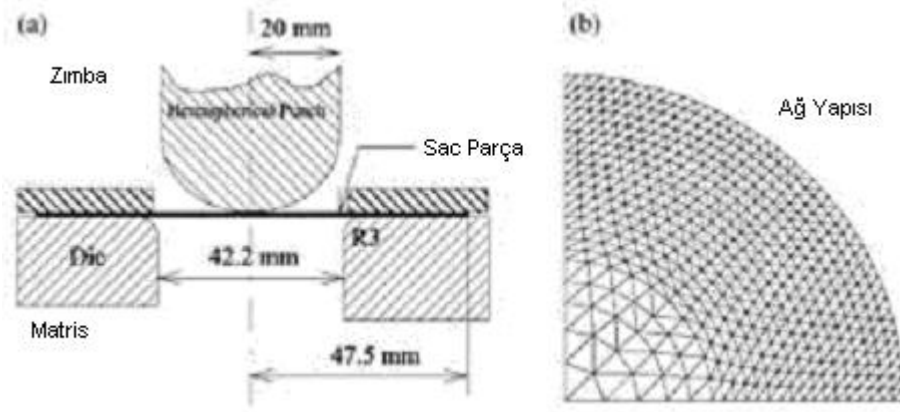
Güçlü anizotropik özellikler gösteren sac metallerin derin çekilmesi işlemindeki tavşan kulağı oluşumu yüksek seviyede deformasyonlara ait elastoplastik sonlu elemanlar formülasyonu ile sayısal analize tabi tutulabilir. Bu formülasyon ile elde edilen sayısal sonuçların, silindirik derin çekme deneyi sonuçları ile karşılaştırılması formülün geçerliliği hakkında önemli veriler içerecektir. Son onbeş yıl içerisinde sonlu elemanlar metodunun sac metallerin derin çekilmesi işleminde kullanımı önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Anizotropik sacların derin çekilmesi işlemi non-lineer karakteristik gösterir. Dolayısıyla analiz sırasında tek eksenli çekme gibi basit testlerin kullanılması ve sonlu elemanlar analizinde ortogonal kurala dayalı klasik

plastik akış teorisinin kullanılması hatalı sonuçlara neden olmaktadır. Bu nedenle pek çok araştırmacı, non-ortogonal kurala dayalı plastik oluşum teorisi çevresinde yoğunlaşmıştır [Hu vd., 1998].

Sac metaller genellikle daha önce tabi tutuldukları işlemler nedeniyle anizotropik yapıda olurlar. Bu durum sacın şekillendirilebilirliğini etkilemektedir. Derin çekme işleminde tavşan kulağı oluşumu önemli bir işlem kusurudur. Bunun sebebi, sac metalin derin çekme sırasında uğradığı plastik deformasyonun anizotropiyle birlikte sacın düzlem yapısını bozmasıdır.

1989 yılında, Barlat ve Lian [1989], anizotropik sac metallerin akma davranışını iyi bir şekilde açıklayabilen, kuadratik olmayan düzlemsel anizotropik akma fonksiyonunu ortaya attılar. Bu fonksiyon, izotropik Mises ve Hill akma fonksiyonuna (1948) uyumlu olduğu gibi, düzlem gerilme halindeki sac metallerin akış davranışlarını da temsil edebiliyordu. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması neticesinde, Barlat-Lian akma fonksiyonunun anizotropik sacların tek eksenli çekme deformasyonlarının simülasyonunda çok kullanışlı olduğu görüldü.

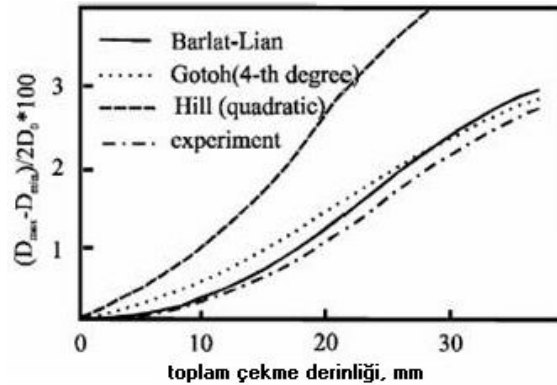
Barlatt-Lian hasar fonksiyonunun ve DKT (üçgen plaka kabuk) eleman modelinin geçerliliğini araştırmak için hesaplanan sonuçlar, yarıküresel kafalı zımba ile gerçekleştirilen silindirik derin çekme simulasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Testte kullanılan sac metal, kenarlı çeliktir ve orijinal kalınlığı 0.8 mm'dir. Bu malzemenin, yarıküresel zımba ile şekillendirilmesine ait sabitleri, $\sigma_0=19,3 \text{ kg/mm}^2$; $n=0,245$; $R_0=1,21$; $R_{45}=1,09$; $R_{90}=1,5$ olarak belirlenmiştir. Zımba ve kalıbın boyutları şekil 5.3(a)'da verilmiştir. Sürtünme yükleri Coulomb yasasına göre belirlenmiş ve sac ile takım arasındaki sürtünme katsayısı 0.05 alınmıştır. Şekil 5.3(b)'de görüldüğü üzere, simetriden dolayı dairesel sacın yalnızca dörtte birlik kısmı incelenmiş ve bu kısım 529 nod içeren 928 üçgensel elemana bölünmüştür.



Şekil 5.3. Zimba, kalıp ve mesh yapısının geometri ve boyutları [Liu vd., 2002].

- (a) yarıküresel zimba ile derin çekme deneyi.
(b) ¼'lük mesh yapı (968 eleman, 529 nod).

Şekil 5.4, kulak oluşumunun toplam çekme derinliğine bağlı değişimini ifade etmektedir. Şekil aynı zamanda, karşılaştırma amaçlı deneysel eğriyi de ihtiva etmektedir. Şekilden, kuadratik Hill fonksiyonu dışındaki fonksiyonların Barlat-Lian fonksiyonu ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

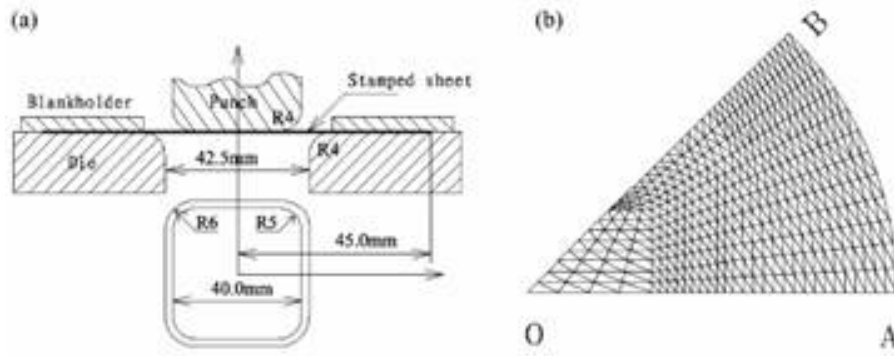


Şekil 5.4. Deformasyonla izafi kulak yüksekliğinin değişimi [Liu vd., 2002].

Dairesel kesitlerin aksine, karesel kesitli bir germe işlemi simetrik olmayan bir derin çekme işlemidir. Karesel derin çekmelerin en önemli problemi yüzeyler, kenarlar ve köşelerde metalin akış oranlarının değişik değerler almasıdır. Bu sorun işlemi zorlaştırır ve şekillendirilen parçalarda çarpılmalara neden olur. İlave olarak, malzemelerin düzlemsel anizotropi karakteristikleri de şekillendirilebilirlikte etkilidir.

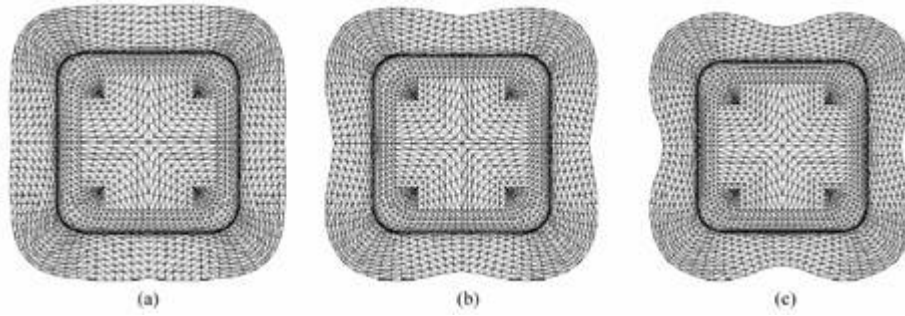
Karesel zımbalı germede bilgisayar simülasyonu gerçekleştirilirken, düzlemsel anizotropi katsayılarının (R_0 , R_{45} , R_{90}) değişik dağılımlarının ve Barlat-Lian akma

dayanımı üstelinin (M), derin çekme oranına ve deformasyon kabiliyetine etkileri incelenmelidir. Simülasyonda 0.9 mm kalınlığında 08Al sac metali kullanılmıştır. Tek eksenli testlerden malzeme sabitleri ile ilgili olarak, $E=206.8$ GPa; $\mu=0.3$; $\sigma_s=110.3$ MPa; $K=537$ N/mm²; $n=0.21$ verileri elde edilmiştir. Sac malzeme ile zımba, kalıp ve tutucu arasındaki sürtünme katsayıları sırası ile 0.2, 0.1 ve 0.1 alınmıştır. Şekil 5.5(a), silindirik derin çekme deneyi için geometri ve boyutları göstermektedir.



Şekil 5.5. Zımba, kalıp ve ağ yapısının geometri ve boyutları [Liu vd., 2002].
 (a) Karesel zımba ile derin çekme deneyi.
 (b) 1/8'lik mesh yapı (718 eleman, 399 nod).

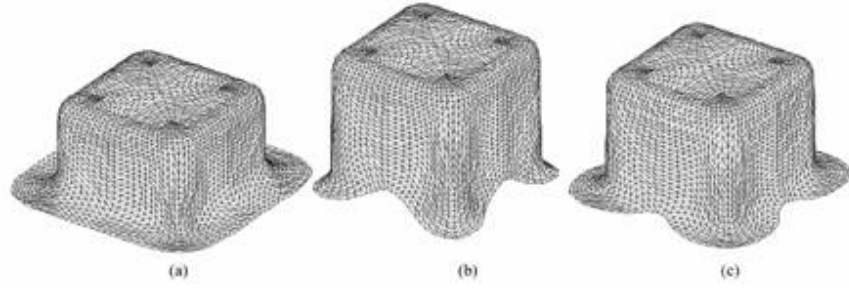
Şekil 5.6'da, değişik normal anizotropi parametreleri ve normal anizotropi dağılımları için karesel zımba ile germe işlemine ait simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir.



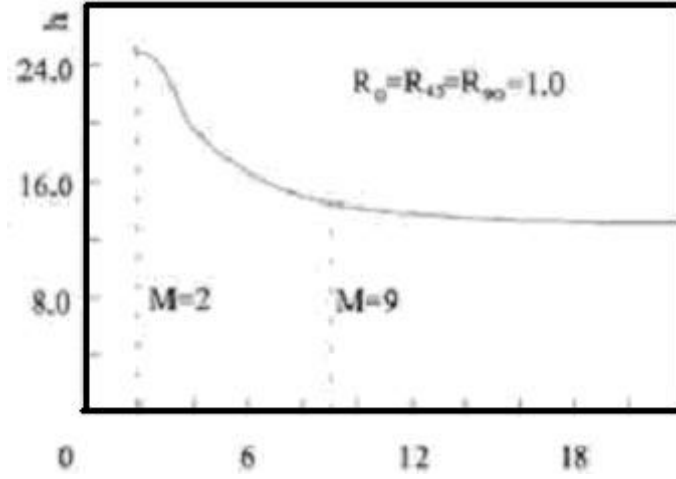
Şekil 5.6. Değişik anizotropi katsayı kombinasyonlarının etkileri ($M=2$, $R=2$, $h_p=23$ mm) [Liu vd., 2002].

- (a) $R_0=R_{90}=3.0$, $R_{45}=1.0$
- (b) $R_0=R_{90}=R_{45}=2.0$
- (c) $R_0=R_{90}=1.0$, $R_{45}=3.0$

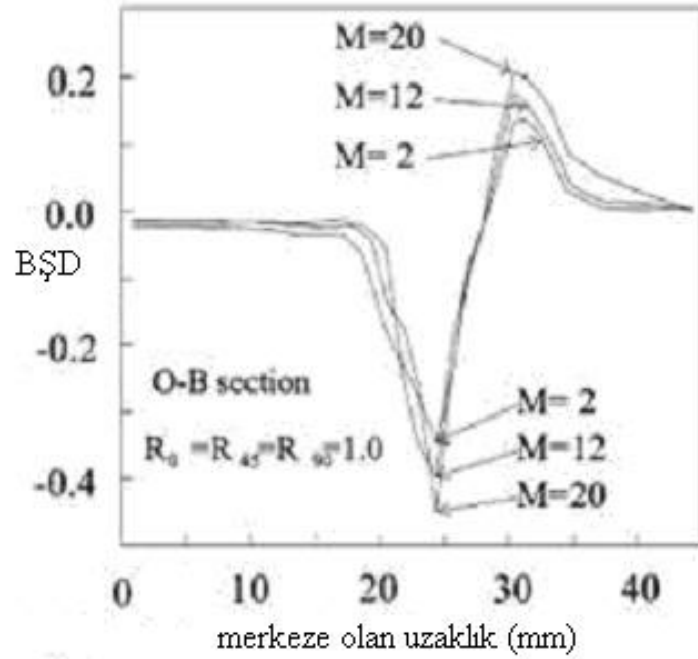
Şekil 5.7, karesel zımba ile germede, değişik düzlemsel anizotropi dağılımlarının derin çekme yüksekliğine etkilerini göstermektedir.



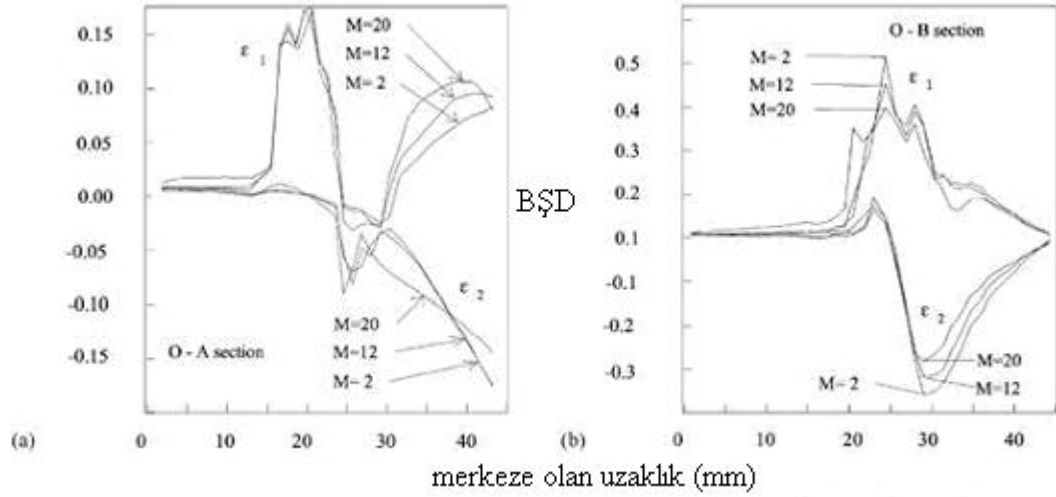
Şekil 5.7. (a) $h_{\max}=23.5$ mm. (b) $h_{\max}=36$ mm. (c) $h_{\max}=31$ mm. [Liu vd., 2002]



Şekil 5.8. M değerinin maksimum çekme yüksekliğine etkisi [Liu vd., 2002].



Şekil 5.9. M değerinin kalınlık doğrultusundaki BŞD dağılımına etkisi ($h=11.0$ mm) [Liu vd., 2002].



Şekil 5.10. M değerinin birincil BSD dağılımına etkisi (h=11.0 mm) [Liu vd., 2002].

5.3. Yarı Küresel Zımba ile Eksenel Simetrik Derin Çekmenin Sonlu Elemanlar Analizi

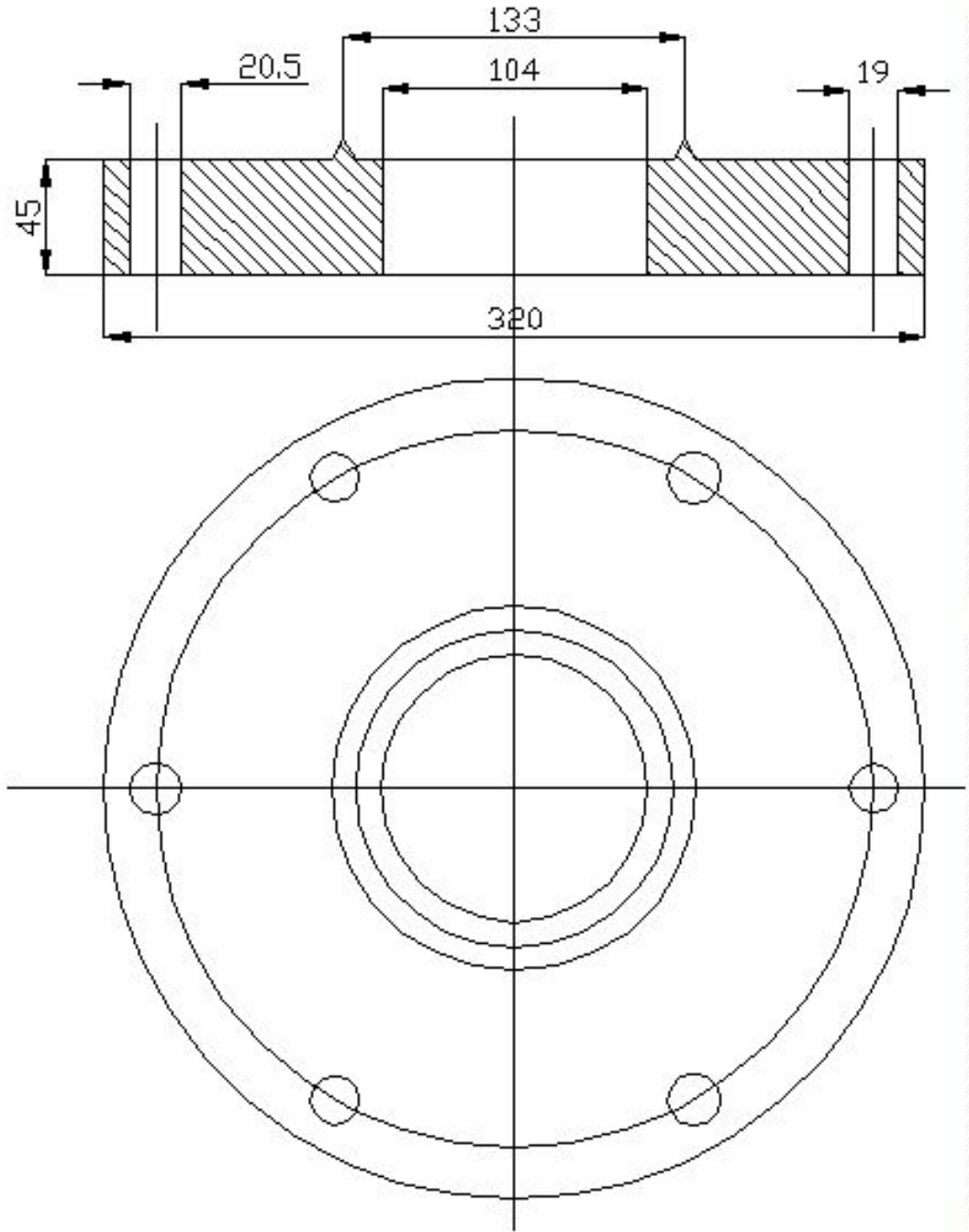
Bu tez çalışmasında sıcak/yarı sıcak derin çekme işleminin sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmek için MSC Software firmasına ait Superform 2002 isimli ticari program kullanılmıştır. Analizler iki boyutlu eksenel simetrik bir modelde gerçekleştirilmiştir. Yarı küresel zımba ile eksenel simetrik derin çekme işleminin simülasyonu değişik sıcaklık şartlarında gerçekleştirilerek derin çekme oranları tespit edilmeye çalışılmıştır. Analizlerin bir kısmında zımba oda sıcaklığında yada farklı bir düşük sıcaklıkta tutularak sıcaklık gradyeni uygulamasının işlem üzerindeki etkileri incelenmiştir. Simülasyonda sac malzeme olarak IMI 230 ve 20MnCr5 kullanılmıştır. IMI 230, bir titanyum bakır alaşımıdır. 20MnCr5 ise düşük alaşımlı bir çeliktir. Tablo 5.1 ve 5.2’de bu iki malzemenin kimyasal bileşimleri verilmiştir. Şekil 5.11 ve 5.12’de eksenel simetrik derin çekme işlemi için temel kalıp geometrileri görülmektedir.

Tablo 5.1. IMI 230 malzemesinin kimyasal bileşimi.

Bileşen	cu	ti
% Ağırlık	2.5	97.5

Tablo 5.2. 20MnCr5 malzemesinin kimyasal bileşimi.

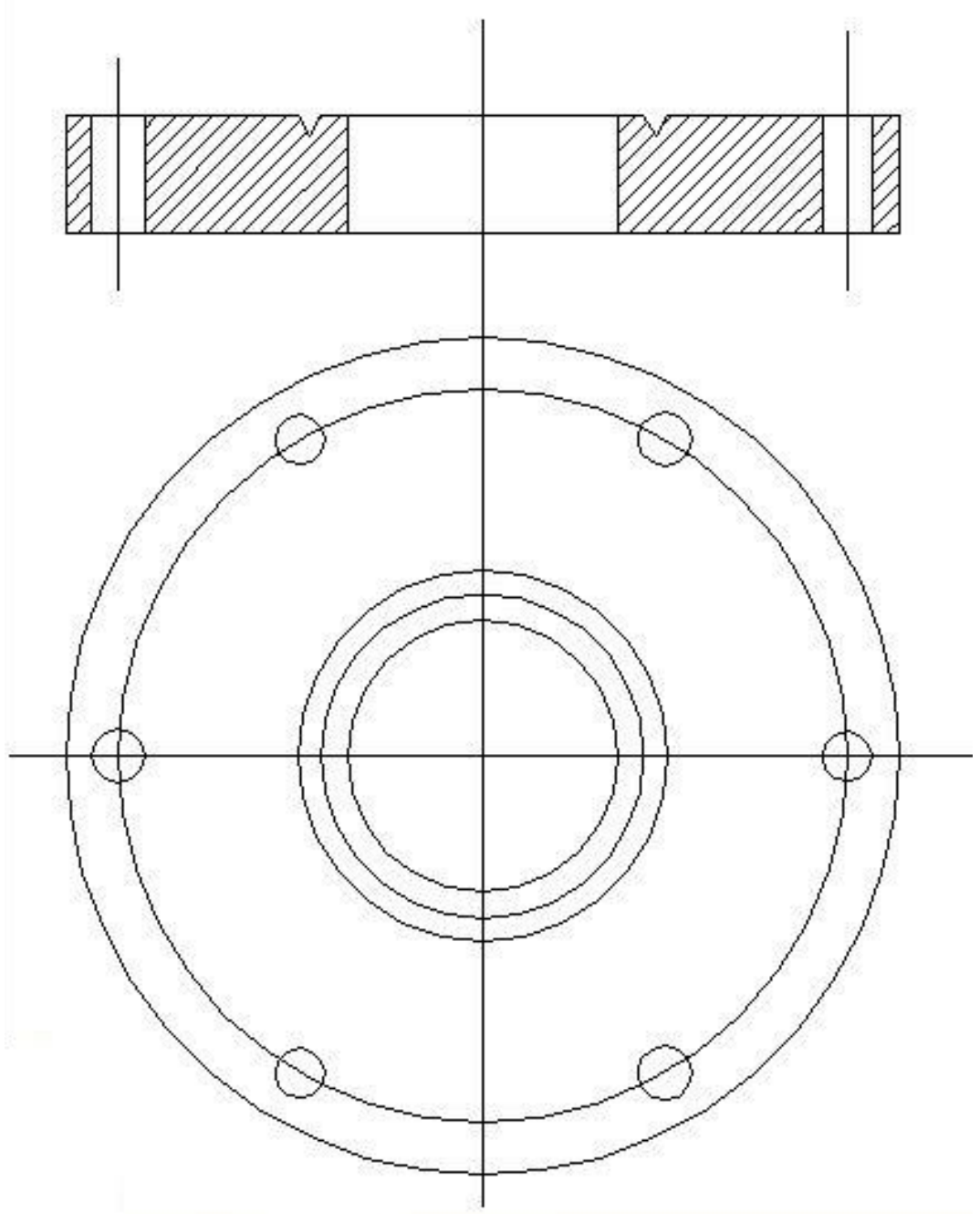
Bileşen	c	cr	fe	mn	p	s	si
% Ağırlık	2.5	0.8	8	0.8	Max 0.035	Max 0.04	0.23



Şekil 5.11. Eksenel simetrik derin çekme için alt kalıp.

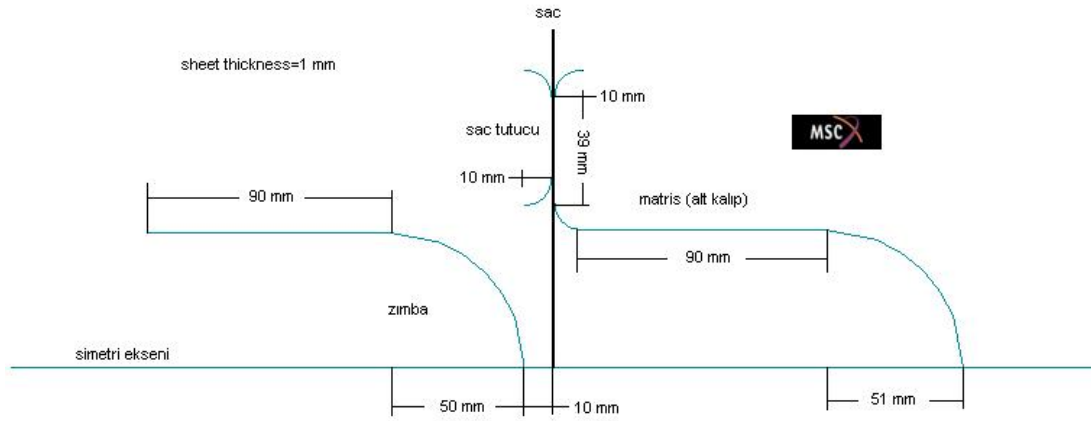
İş parçası olarak seçilen saclar düşük alaşımlı ve mukavemet değerleri yüksek malzemelerdir. Bu malzemelere ait fiziksel, mekanik, elektriksel ve termal özellikler Ek-2’de verilmiştir. Ayrıca Ek-3’te IMI 230 ve 20MnCr5’in değişik sıcaklık ve BŞD hızlarındaki akma eğrilerine ait grafikler bulunmaktadır. Bu tip malzemelerin oda sıcaklığı şartlarında şekillendirilebilirlikleri çok sınırlıdır. Yüksek pres kuvvetleri

altında soğuk şekillendirilebilirler, ancak söz konusu sac malzeme olduğunda çok düşük deformasyon seviyelerinde hasara uğrarlar. Bu nedenle bu tip malzemelere ait sacların şekillendirilebilmesi için malzeme ısıtılarak mukavemet düşürülmelidir.



Şekil 5.12. Eksenel simetrik derin çekme için sac tutucu.

Eksenel simetrik derin çekme işlemi için kullanılan zimba silindirik ve yarı küresel kafalıdır. Şekil 5.13'te sac şekillendirme işleminin simülasyonu için kullanılan model görülmektedir. Analizde rijit kalıplar kullanılmıştır ve 1 mm. kalınlığındaki sac malzemenin sıcak/yarı sıcak şartlarda derin çekme işlemi simüle edilmiştir. Kullanılan yarı küresel kafalı zımbanın yarıçapı 50 mm, sac tutucu ve matrisin köşelerindeki yuvarlatma yarıçapları 10 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 5.13. Derin çekme işlemine ait elemanlar ve geometri.

Şekillendirme işlemi eksenel simetrik olduğu için 2 boyutlu modelin $\frac{1}{2}$ 'lik kısmı üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13'te görülen sac 1 mm kalınlığında ve 125 mm uzunluğundadır. Bu sac geometrisi kalınlık doğrultusunda 5, uzunluk doğrultusunda 400 eşit parçaya bölünerek 2000 dörtgensel eleman içeren bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Elasto plastik deformasyon modeli seçilmiş, deformasyon esnasında termal genleşme ve ısı geçişini göz önünde bulunduran bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Sıcak şekillendirme şartlarında grafit esaslı bir yağlayıcı seçilerek sürtünme katsayısı düşük bir presleme ortamı elde edilmeye çalışılmıştır. Derin çekme işleminde büyük deformasyonlar ortaya çıkacağı için kalıp ile sac arasındaki sürtünmenin yüksek olması sacın akışını engelleyerek hasarın çabuk ortaya çıkmasına neden olabilir. Gerçekleştirilen analizlerde sürtünme katsayısı 0.1'dir.

Derin çekme BŞD hızına hassas bir şekilde bağlıdır ve deformasyonun çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesi durumunda akma gerçekleştiremeyeceğinden sacda yırtılma

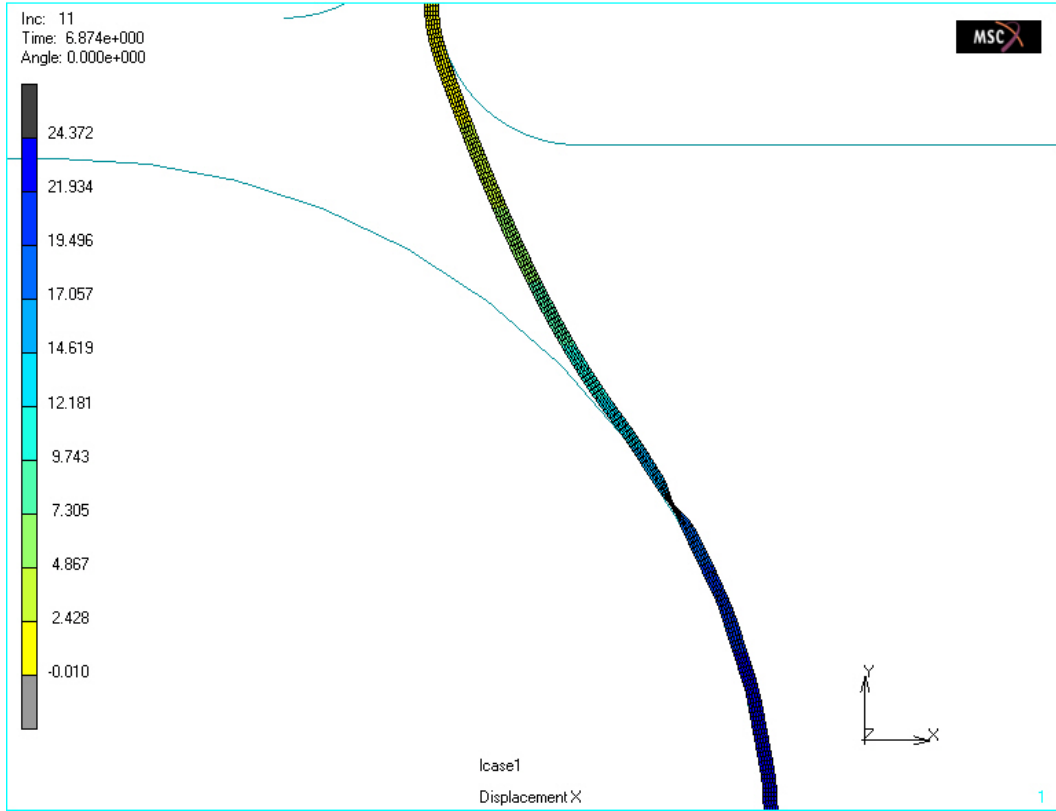
meydana gelecektir. Derin çekme işlemi için hidrolik pres makinası kullanılmış ve sac deformasyon aşaması için 5 mm/sn, zımbanın kalıptan çıkışı için ise 50 mm/sn hız seçilmiştir.

Bilindiği üzere derin çekme işleminin etkinliği mutlak şekilde sıcaklığın seviyesine bağlı değildir. Değişik malzemeler, aynı malzeme grubuna dahil olsalar bile değişik sıcaklık şartlarında daha yüksek derin çekme oranlarına sahip olabilmektedirler. İşlemi etkin şekilde gerçekleştirebilmek için doğru sıcaklığın bulunması gerekmektedir. Bu yüzden malzemenin yarı sıcak ve sıcak şekillendirme sıcaklıkları arasındaki sıcaklıklarda pek çok analiz gerçekleştirilerek doğru sıcaklık tespit edilmeye çalışılmıştır. Titanyum malzemenin derin çekilmesi işlemi 300~750 °C, çelik malzemenin derin çekilmesi işlemi ise 400~850 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir.

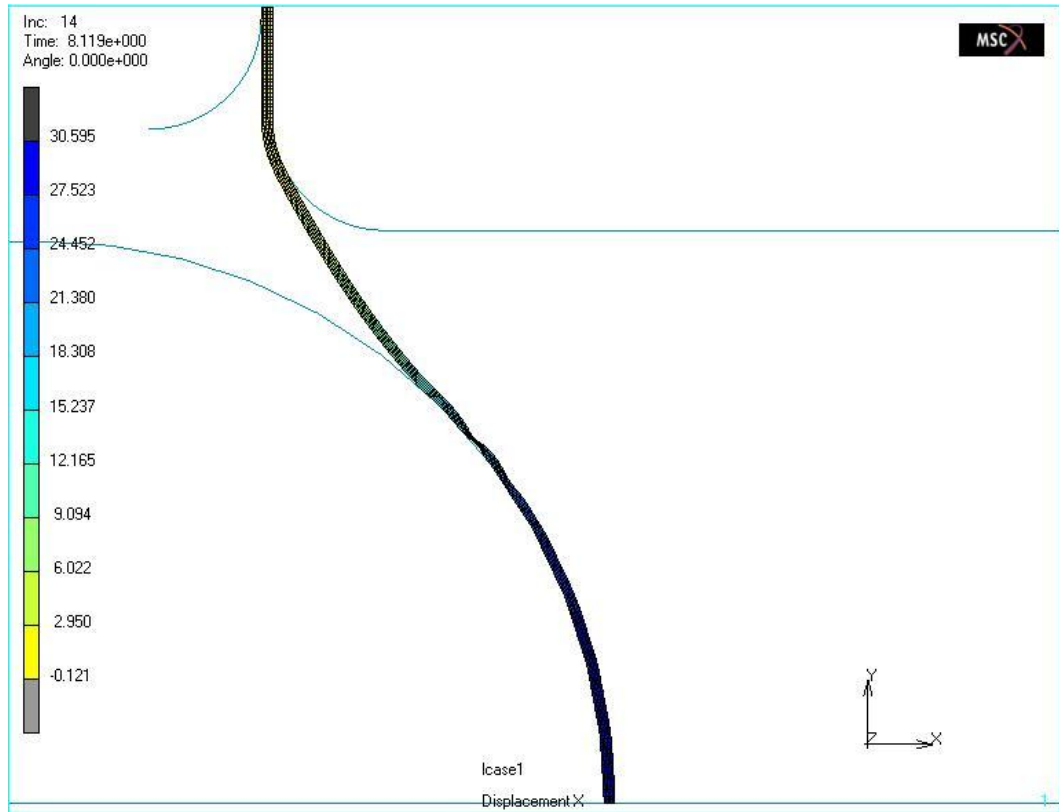
- MnCr5 ile gerçekleştirilen analizler

20MnCr5'in derin çekilmesinin simülasyonları 25, 400, 500, 550, 600, 650, 700, 750 ve 850 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca zımbanın sıcaklığı düşük tutularak analizler gerçekleştirilerek, sıcaklık gradyeninin derin çekme oranı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. 400 °C'nin altındaki sıcaklıklar malzemenin derin çekme oranında dikkate değer bir artış sağlayamamakta, 800 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda ise malzeme aşırı hassas bir hal almakta yüzeyde aşırı kırışmalar meydana gelmektedir. Derin çekme işleminin başlangıcında kalıplar ısıtılmış, sac parça ise daha düşük bir sıcaklıkta tutulmuştur. İşlem esnasında saca ısı geçişi olmaktadır. Simülasyonlar sırasında yeniden ağ oluşturma (remeshing) seçeneği kullanılmamıştır. Bunun sebebi ince parçalarda bu uygulamanın parçanın yapısını bozup beklenmeyen hasar oluşumları ortaya çıkarmasıdır.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen analizde 24 mm'lik derin çekme yüksekliğinde sacda önemli oranda incelme ortaya çıktığı ve ardından hızlı bir şekilde hasarın gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Şekil 5.14). 400 °C sıcaklıkta ise derin çekme yüksekliğinde yaklaşık 6 mm'lik bir artış gözlemlenmiş, 500 ve 550 °C sıcaklıklarda derin çekme seviyesinde kayda değer bir değişiklik olmamıştır (Şekil 5.15).

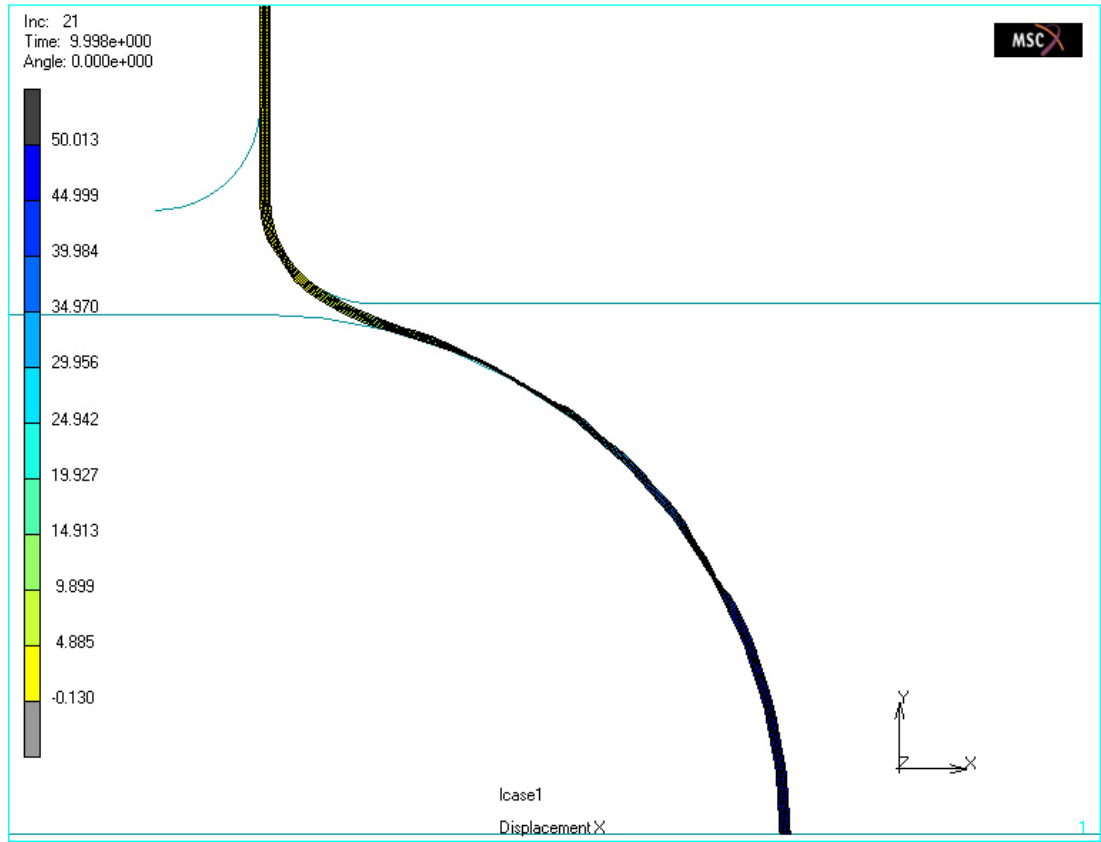


Şekil 5.14. Oda sıcaklığında derin çekme işlemi.



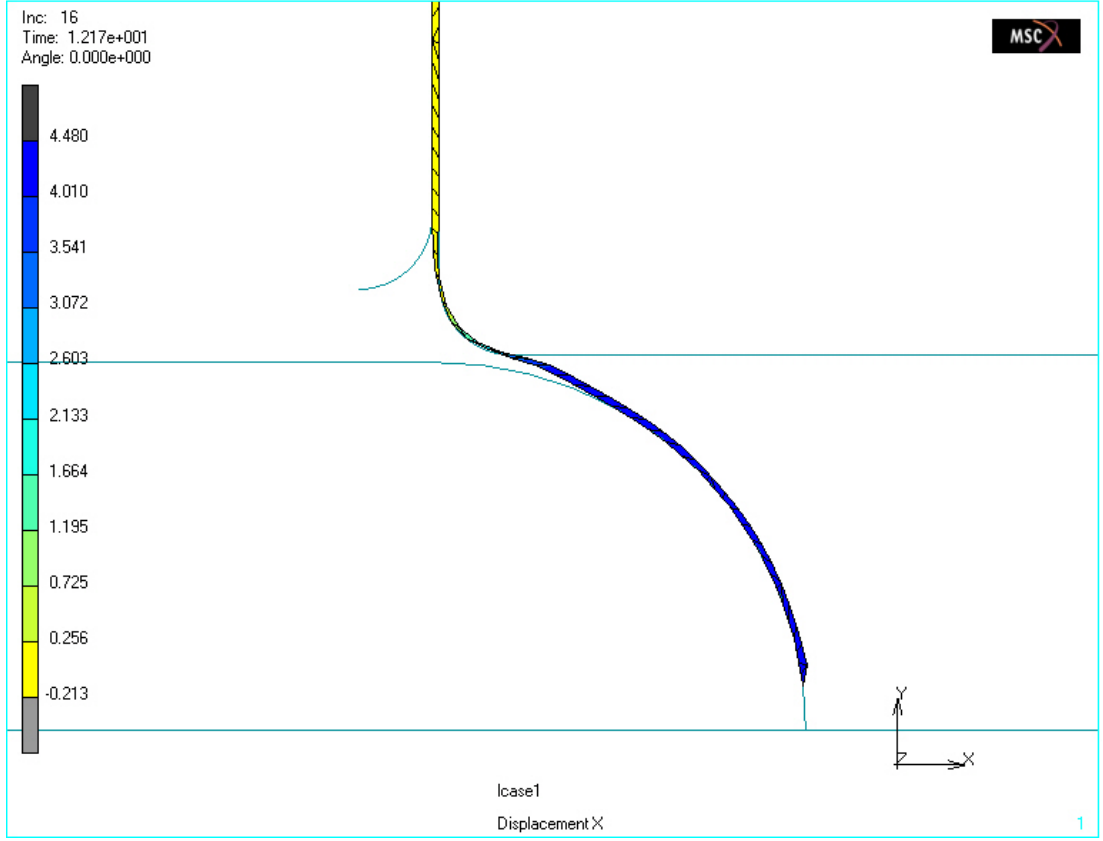
Şekil 5.15. 400 °C sıcaklıkta derin çekme işlemi.

600 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen analizde derin çekme oranında önemli bir artış ortaya çıkmıştır. Burada sac malzemede incelme meydana gelmiştir, ancak incelme sac yüzeyinde homojen bir şekilde gerçekleştiği - bölgesel olmadığı - için hasar sözkonusu değildir. Bu sıcaklık seviyesinde işparçası 50 mm'ye düzgün bir şekilde çekilebilmiştir (Şekil 5.16). 600 ve 650 °C sıcaklıkta sıcaklık gradyeni ile gerçekleştirilen analizlerde derin çekme yükseklikleri homojen sıcaklık şartlarına göre bir düşüş göstermiştir.



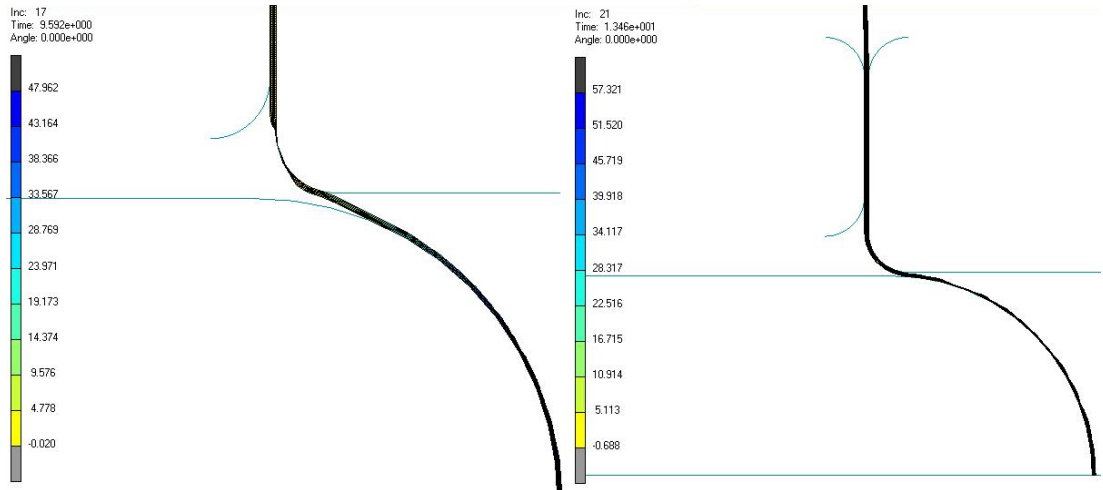
Şekil 5.16. 600 °C sıcaklıkta derin çekme yüksekliği.

700 ve 750 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen analizlerde, analiz şartları değişmemiş olmasına rağmen derin çekme oranının önemli seviyede düştüğü görülmektedir (Şekil 5.17). Zımbanın tepe noktasında sacda zayıflama meydana gelmiş ve bu noktada yırtılma gerçekleşmiştir. Bu durum sıcak/yarı sıcak derin çekme işlemleri uygulanırken doğru sıcaklığın kesin bir şekilde tespit edilip uygulanması gerektiğini göstermesi açısından önemlidir.



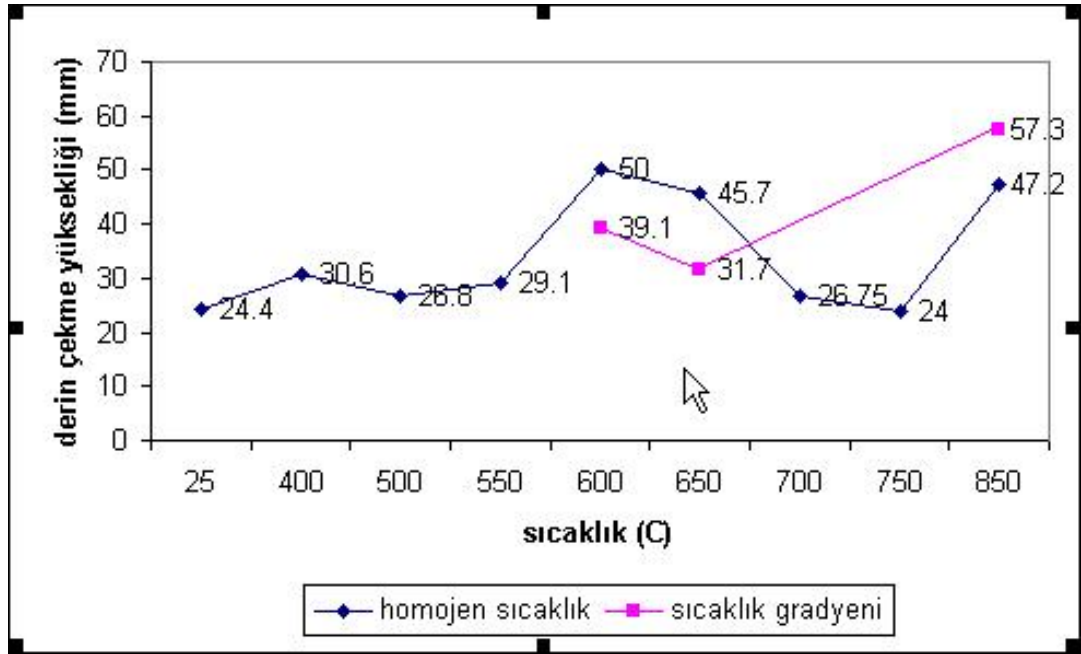
Şekil 5.17. 750 °C sıcaklıkta derin çekme oranı önemli seviyede düşmüştür.

Şekil 5.18’de 850 °C sıcaklıkta ortaya çıkan durumlar görülmektedir. Sıcaklık gradyeni uygulaması derin çekme yüksekliğini 10 mm’lik bir artışla 57 mm’ye kadar yükseltmiştir.



Şekil 5.18. 850 °C sıcaklıkta derin çekme yükseklikleri
(soldaki şekil: 850 °C ve sıcaklık gradyeni yok, sağdaki şekil 850 °C ve sıcaklık gradyeni uygulanmış).

Analizlerin bir kısmında matris köşesinde gözlenen aşırı sac incelmesinin giderilmesi lokal soğutma ile mümkün olabilir, ancak derin çekme uygulamalarında bu bölge genelde ürüne ait olmadığından bu kısımlardaki incelmeler dikkate alınmaz. Ayrıca endüstriyel uygulamalarda sac parçaların derin çekilmesinde genelde sacın kalıplar arasında sıkıştırılması elde edilecek ürünün yüzey kalitesini arttıracak ve kalınlığın homojen olmasını sağlayacaktır. Düşük alaşımlı 20MnCr5 sacı ile gerçekleştirilen derin çekme analizlerinin sonuçları Tablo 5.3'te grafik olarak verilmiştir.



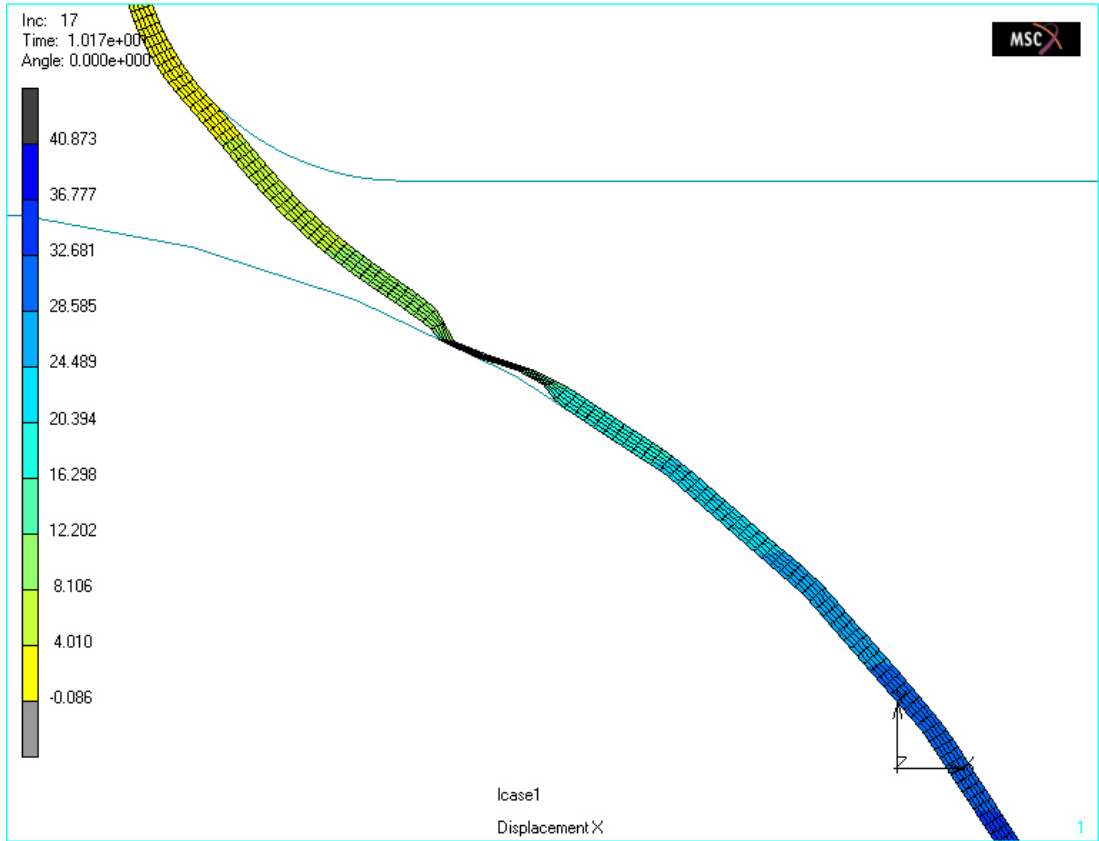
Şekil 5.19. 20MnCr'nin derin çekilmesine ait grafik veriler.

Analiz sonuçlarından elde edilen verilere göre; oda sıcaklığında gerçekleştirilen derin çekme ile 850 °C sıcaklıkta ve sıcaklık gradyeni uygulaması ile gerçekleştirilen derin çekme arasında önemli farklar vardır. Derin çekme yüksekliği 24.4 mm'den 57.3 mm'ye çıkmış, yaklaşık % 130'luk bir artış meydana gelmiştir.

- IMI 230 ile gerçekleştirilen analizler

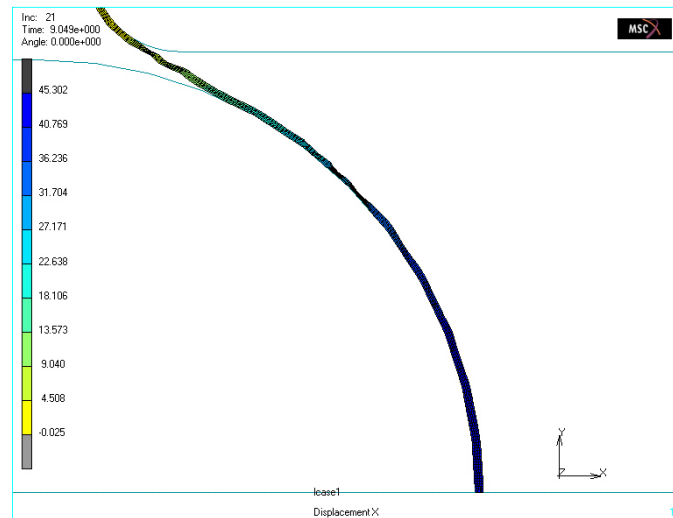
Titanyum sac ile derin çekme analizleri 25, 300, 550, 650 ve 750 °C sıcaklıklarda yapılmıştır. 300~750 °C sıcaklık aralığı bu malzeme için sıcak/yarı sıcak şekillendirme seviyelerine karşılık gelmektedir. Ayrıca zımba düşük sıcaklıkta tutularak analizler gerçekleştirilerek, sıcaklık gradyeninin derin çekme oranı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

25 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen analizde sac malzeme 38 mm'ye kadar hasarsız çekilmiş, 40 mm'de başlayan incelme kısa sürede hasarın oluşmasına yol açmıştır. Bu analize ait görüntü Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.20. 25 °C sıcaklıkta titanyumun derin çekilmesi.

300 °C'de gerçekleştirilen analizde sac 5 mm daha fazla çekildikten sonra hasara uğramıştır (Şekil 5.20).

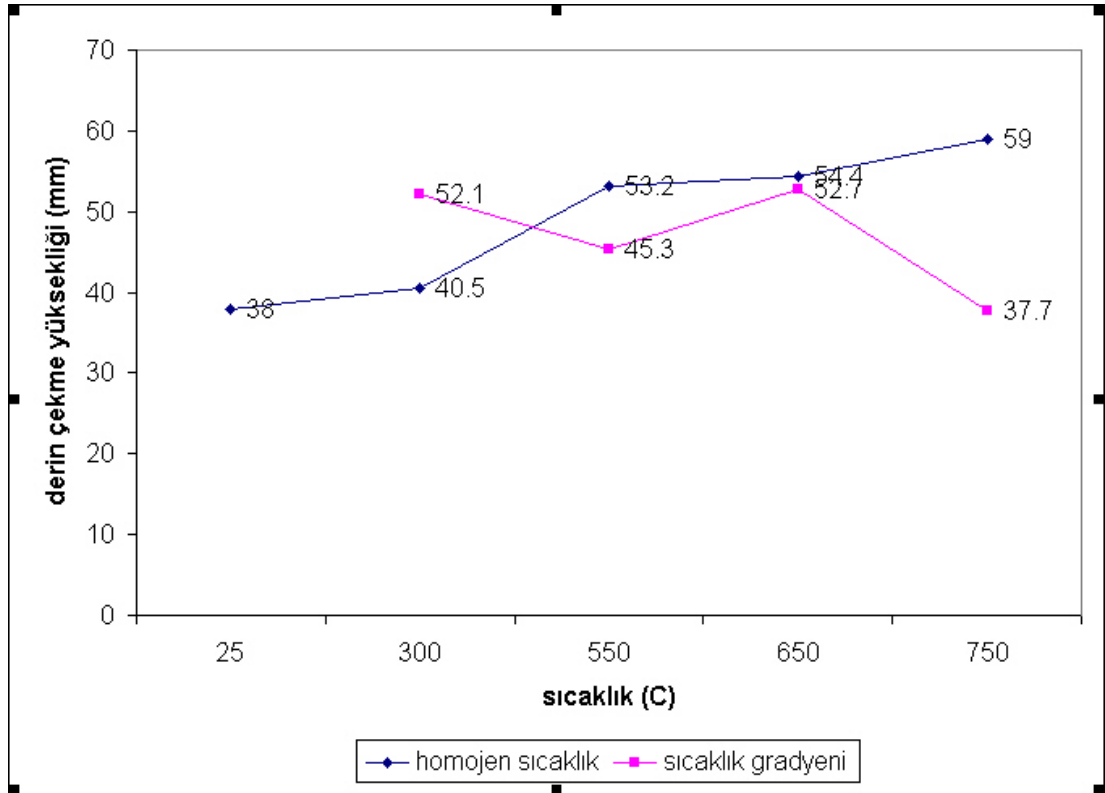


Şekil 5.21. 300 °C'de 45 mm derin çekildikten sonra hasar başlangıcı.

Titanyumun derin çekilmesine ait diğer veriler Tablo 5.3'te, simülasyon sonuçları Şekil 5.23'te ve değişik sıcaklıklarda derin çekme yüksekliklerini gösteren grafikler de Şekil 5.22'de verilmiştir.

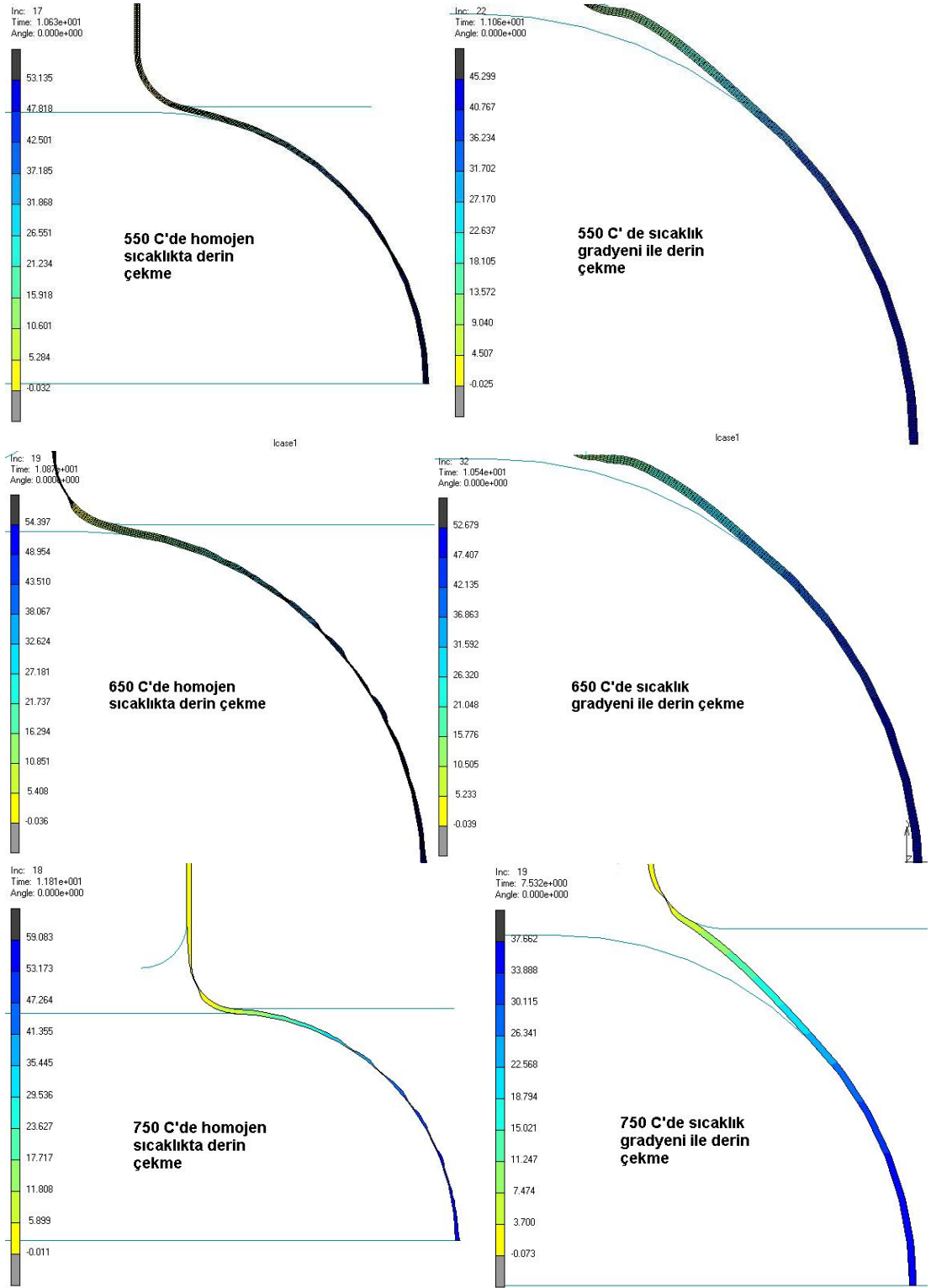
Tablo 5.3. Titanyumun (IMI 230) derin çekme analizine ait sonuçlar.

T (°C)	Elde edilen derin çekme yükseklikleri (mm)	
	Homojen Sıcaklık	Sıcaklık Gradyeni
25	38	
300	40.5	52.1
550	53.2	45.3
650	54.4	52.7
750	59	37.7



Şekil 5.22. Değişik sıcaklıklarda derin çekme yükseklikleri.

Analizlerden elde edilen sonuçlara bakarak sıcaklığın artışıyla birlikte derin çekme yüksekliklerinin arttığı söylenebilir. Sıcaklık gradyeni uygulaması ise yarı sıcak şekillendirme şartlarında derin çekme yüksekliğini arttırmış, fakat sıcak şekillendirme söz konusu olduğunda derin çekme oranının düşmesine neden olmuştur. Analizlerin ortaya koyduğu bir diğer sonuç, sıcaklık gradyeni uygulamasının ürün kalitesini yükselttiğidir.



Şekil 5.23. Titanyumun (IMI 230) derin çekme analizine ait ekran görüntüleri.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikle derin çekme işlemi ve derin çekme işleminde etkin role sahip olan malzeme ve işlem parametreleri hakkında elde edilen bilgiler sunulmuştur. Bu bilgiler ışığında yüksek mukavemetli malzemelerin derin çekilmesinin bir takım zorluklar ve bilinmezler içerdiği, bu yüzden de günümüzde etkin bir şekilde gerçekleştirilemediği görülmektedir. Yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu sacların derin çekilmesi işlemi özellikle otomotiv sektöründe üzerinde durulması gereken bir konudur. Ancak bu işlemin oda sıcaklığı şartlarında gerçekleştirilmesi mümkün olmamaktadır.

Sıcak/yarı sıcak derin çekme işleminin uygulanabilmesi için ortaya konan ısıtma teknikleri ve bunların birbirlerine göre iyi ve/veya kötü yanları ile ilgili veriler tez kapsamında incelenmiştir. Tezin 4. bölümünde, ayrıntılı bir literatür çalışması sonucunda, sıcak/yarı sıcak derin çekme işlemi ile ilgili daha önce hazırlanmış - analitik ve deneysel veriler içeren - makaleler özetlenerek bu çalışmaların sonuçları gözden geçirilmiştir. Literatür taraması ve yapılan sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Sacların plastik deformasyon özellikleri hadde yönüne bağlı olduğu için plastik anizotropi derin çekilebilirlik konusunda önemli bir parametredir. Normal anizotropi sacların şekillendirme sırasında incelmeye karşı direncini belirler. Bu yüzden derin çekilecek sacın anizotropik özellikleri iyi belirlenmelidir.
- Ancak sac ısıtıldığı zaman malzemenin hadde geçmişi ve dolayısıyla anizotropik özellikleri ortadan kalktığı için şekillendirme esnasında sacın beklenmedik kusurlar gösterme olasılığı zayıflar. Dolayısıyla ısıtma işlemi anizotropiyi ortadan kaldırdığı ve malzemenin dayanımını düşürdüğü için

yırtılma - kırılma gibi kusurlar ortaya çıkmadan yüksek derin çekme oranlarına ulaşılmasını sağlar.

- Derin çekme ile sacların şekillendirilmesinde ısıtma işlemi uygulanırken sıcaklık gradyeni oluşturulması çoğu uygulamada şekillendirilebilirliği olumlu yönde etkilemektedir. Bazı durumlarda ısıtma işlemi önemli bir derin çekme oranı artışı sağlayamazken sıcaklık gradyeni uygulanması derin çekme oranını önemli ölçüde arttırabilmektedir. Genelde sıcaklık gradyeni oluşturmak için alt kalıp (matris) ve sac ısıtılırken, üst kalıp (zımba) oda sıcaklığında tutulur.
- Isıtma ile derin çekilebilirliğin arttırılabilmesi için işlem ve malzeme özelliklerine bağlı olarak belli bir sıcaklık seviyesine çıkmak gerekir. İdeal sıcaklıklar malzemeden malzemeye değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla bu işlem öncesinde belirli araştırma faaliyetleri yapılarak malzeme için en uygun şekillendirme sıcaklıklarının tespit edilmesi gerekmektedir.
- Sıcaklık gradyeni ile ısıtma işlemi, daha düşük pres kuvvetleri ile sacların daha yüksek derin çekme oranı seviyelerine ve - tek kademede - daha karmaşık geometrilere çekilebilmesine olanak sağlarken aynı zamanda da daha pürüzsüz ve homojen yüzeyler elde edilmesini mümkün hale getirebilmektedir.
- Bir sac malzemenin en iyi derin çekilebilme sıcaklığının tespiti için en uygun yöntem işlemi bilgisayar ortamında modelleyerek değişik sıcaklıklarda analizler gerçekleştirmek ve elde edilen sonuçları (daha önce gerçekleştirilmiş) deneysel çalışmalarla ve mümkünse o malzemeye ait şekillendirme sınır diyagramı ile karşılaştırmaktır.

Bu çalışma, sıcak/yarı sıcak derin çekme işlemi ile ilgili literatürden derlenmiş ve çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş analitik ve deneysel veriler ve pek çok farklı malzemeye ait bilgiler içermektedir. Bu bilgiler ileride gerçekleştirilecek çalışmalarda yol gösterme ve karşılaştırma amaçlı olarak kullanıldığında faydalı olacak niteliktedir. Bu çalışmaya konu olan sac malzemelerin sıcak/yarı sıcak derin çekilmesi ile ilgili gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar elde edilen sonuçların karşılaştırılması neticesinde daha kesin neticelere varılabilmesi ve

doğru yorumlar yapılabilmesi açısından yararlı olacaktır. Yüksek mukavemetli malzemelerin derin çekilmesi işleminin yaygın şekilde kullanılabilmesi için pek çok malzeme ile geniş sıcaklık aralıklarında ve değişik kalıp geometrileri ile deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Aluminium Handbook, 1990, 4th edition, Japan Light Metal Association, Tokyo, p.25.

Barlat F., Lian J., 1989, Plastic behavior and stretch-ability of sheet metals I: a yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions, *Int. J. Plasticity* 5 51.

Bolt P. J., Lamboo N. A. P. M., Rozier P. J. C. M., 2001, Feasibility of warm drawing of aluminium products, TNO Institute of Industrial Technology, P. O. Box 6235, 5600 Eindhoven, The Netherlands.

Conrad H., Doner M., Meester B. de, 1973, Titanium science and technology, vol 2, 969, New York, Plenum Press.

Çapan L., 1990, *Metallere Plastik Şekil Verme*, Çağlayan Yayınları, İstanbul.

Doege E., Droder K., 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys – formability and process technology, *J. of Materials Processing Technology* 115 14-19.

Doege E., Kruz G., 2001, Development of a formulation to describe the work softening behaviour of Magnesium sheets for heated deep drawing processes, *Annals of the CIRP* vol. 50/1, p. 177-180.

Gronostajski Z., 2000, The constitutive equations for FEM analysis, *J. of Mat. Processing Technol.* 106 40-44.

Gündü T., 2000, Derin çekme saclarında derin çekilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi, KİM UZ792 GÜN, İ.T.Ü. Kütüphanesi.

Hosford W. F., Caddell R. M., 1983, *Metal Forming*, Prentice-Hall.

Hu P., Lian J., Liu Y. Q., Li Y. X., 1998, A quasi-flow corner theory of elastic plastic finite deformation, *Int. J. Solids Struct.*, 35 (15) 1827.

Kayalı E., Ensari C., 1986, *Metallere plastik şekil verme ilke ve uygulamaları*, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.

Kunaç M. B. Aksakal, 1999, Çok düşük karbonlu çeliklerin sac şekillendirilebilirliği, MAK UZ742 KUN.

Liu Y. Q., Wang J. C., Hu P., 2002, The numerical analysis of anisotropic sheet metals in deep-drawing processes, *Journal of Mat. Processing Technol.* 120 45-52.

Marciniak Z., Duncan J. L., 1992, *The Mechanics of Sheet Metal Forming*.

Marciniak Z., Konieczny A., 1987, *J. Mech. Work. Technol.*, 15 15.

Osakada K., Nakano J., Mori K., 1982, Finite element method for rigid-plastic analysis of metal forming formulation for finite deformation, *Int. J. Mech. Sci.* 24, 459-468.

Özel T., Zeren E., 2003, Determination of work material flow stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting tests, *Proceedings of AMPT*, Dublin, Ireland.

Shehata F., Painter M. J., Pearce R., 1978, Warm forming of aluminium/magnesium alloy sheet, *J. Mech. Work. Technol.* 2 279-291.

Shipton M. H., Roberts W. T., 1991, Hot deep drawing of titanium sheet, *Mat. Sci. & Technology*, June, vol. 7, 537-540.

Siebel G., 1940, *Technology of magnesium and its alloys*, Hughes, London.

Takuda H., Mori K., Masuda I., Abe Y., Matsuo M., 2002, Finite element simulation of warm deep drawing of aluminium alloy sheet when accounting for heat conduction, *Journal of Materials Processing Technology* 120 412-418.

Taylor L., Boyer H. E., 1969, *Metals Handbook*, 8th edition, vol. 4, American Society of Metals, Cleveland, OH.

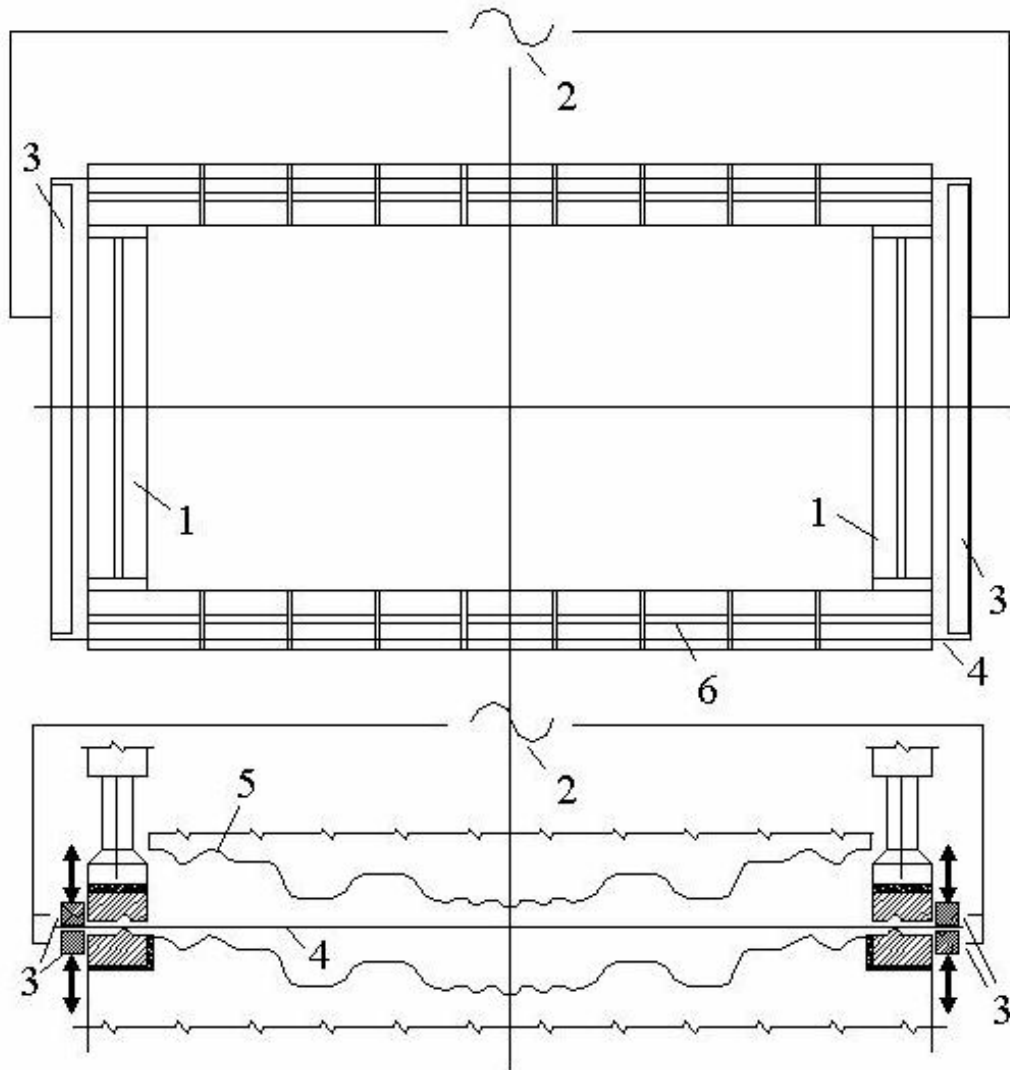
Terziakın, 2002, Patent, International Publication Number WO 00/74441 A1, International Publication Date 07.12.2000, International Application Published Under The Patent Cooperation Treaty (PCT).

Ullmans Encyclopedia of Industrial Chemistry, 1990, Magnesium and magnesium alloys, Reprint of articles from 5th edition, VCH, Weinheim.

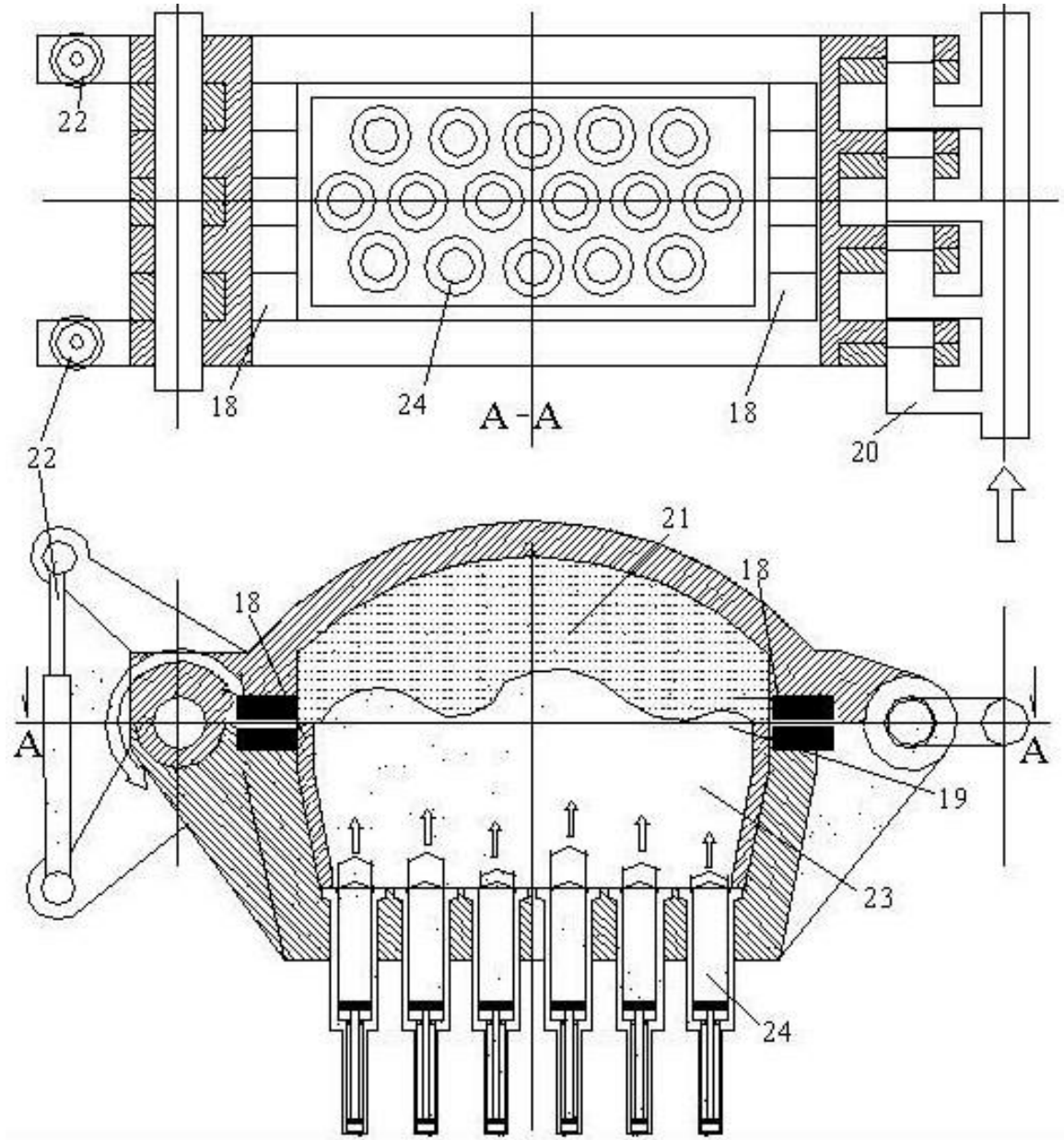
Yoshida K., Miyauchi K., Hayashi H., Kuriyama S., 1972, Flange behaviour analysis of complex geometries, 10th Biennial Congress of the IDDRG, p. 1-27].

EKLER

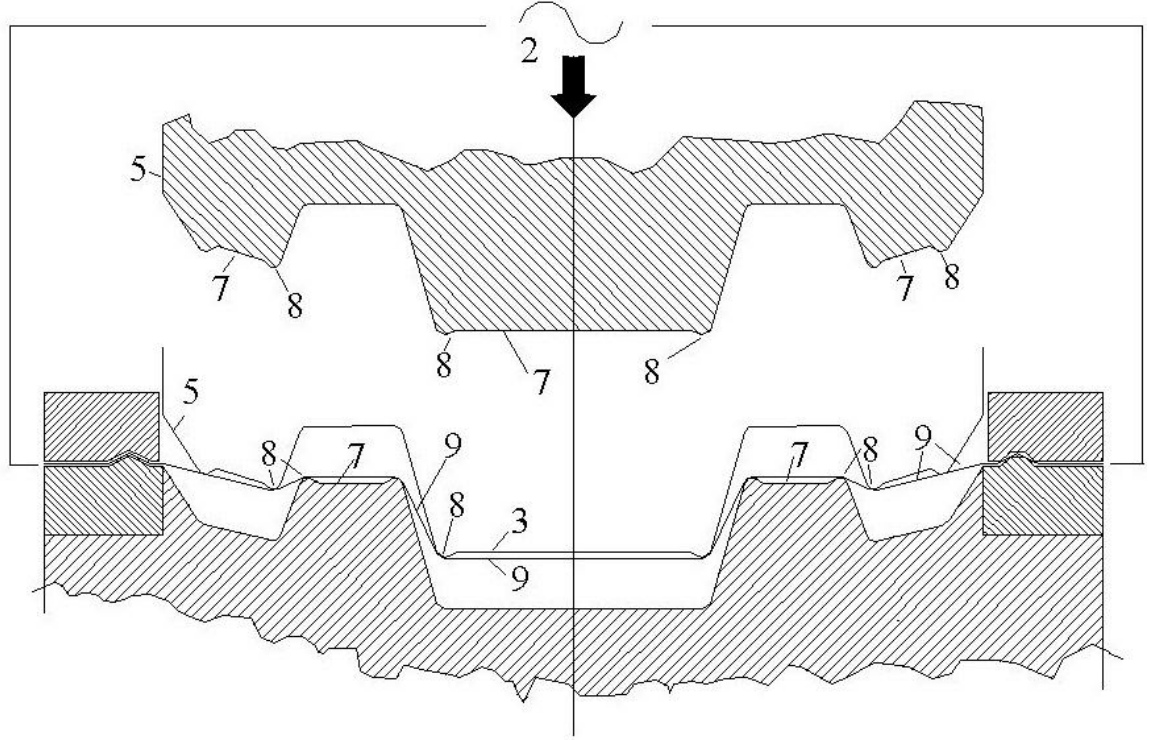
Ek 1. Isıtma işlemi için bir yöntem önerisi: Çalışmaya ait imalat şemaları aşağıda görülmektedir [Terziakın, 2002].



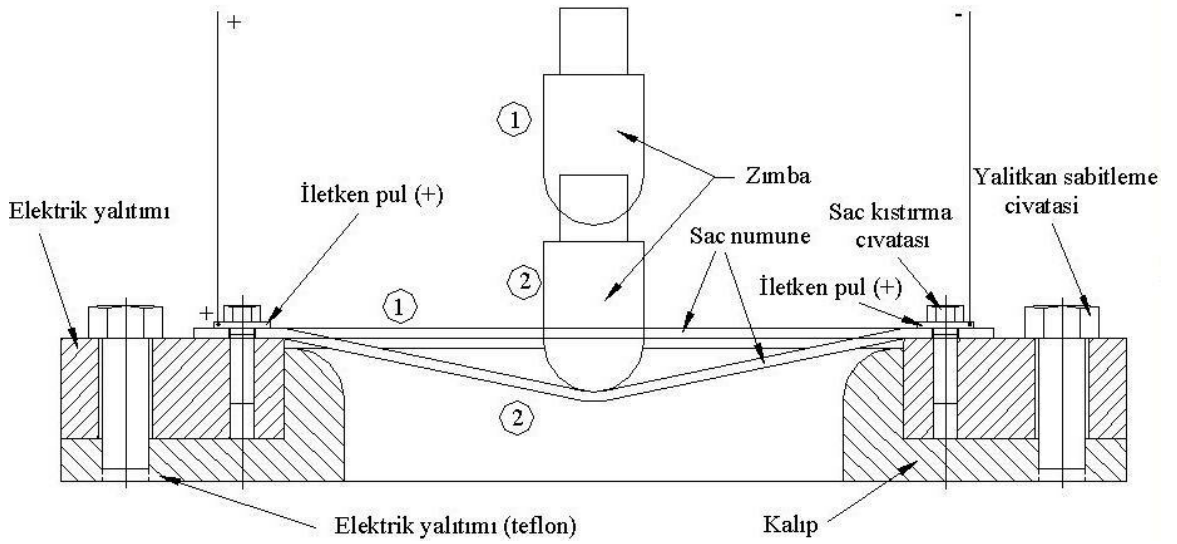
Sacın elektrik akımıyla ani olarak ısıtılmasına ait bir tasarım. (1: Sac tutucular, 2: Yüksek Yoğunluklu elektrik akımı, 3: Elektrodlar, 4: Sac, 5: Üst Kalıp, 6: Alt Kalıp)



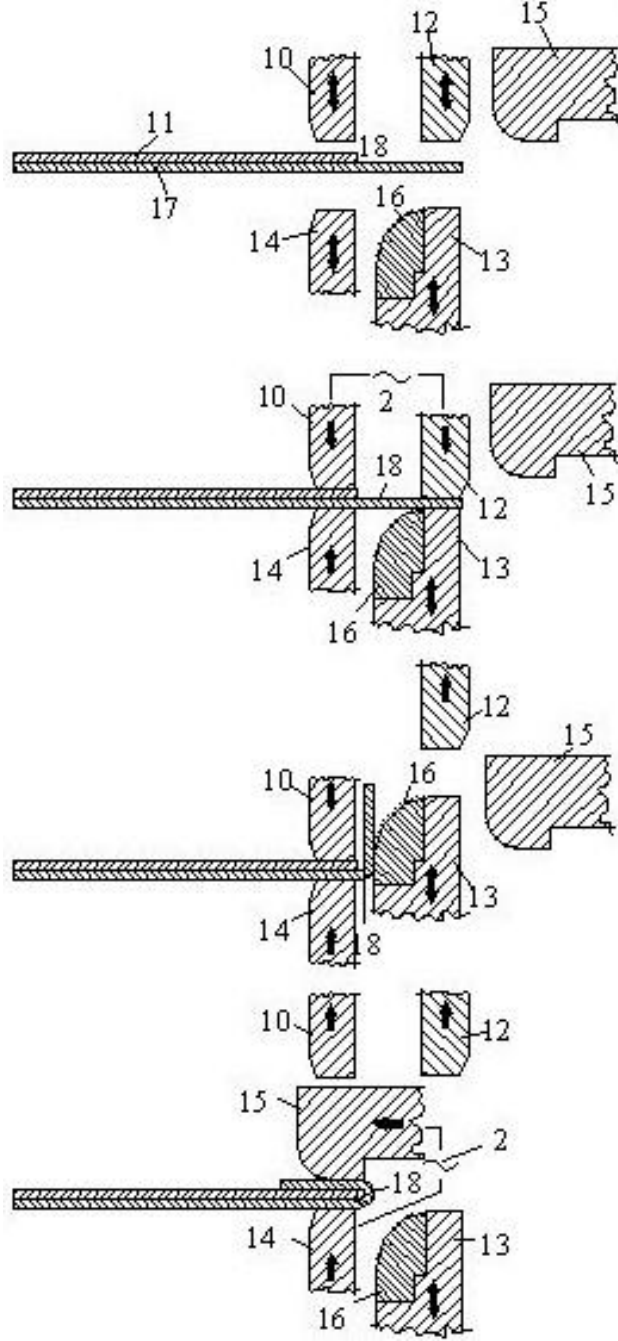
Hidrolik germe ile sac şekillendirmede elektrik akımı ile ısıtma. (18: Elektrodlar, 19: Sac, 20: , 21: Kalıp, 22: Sistem Kapatma Düzeneği, 23: Kum/Yağlayıcı Karışımı, 24: Hidrolik Pistonlar)



Stamping işleminde elektrik akımı ile ısıtma. (2: Elektrik Akımı, 3: Konkav Yüzeyler, 5: Üst Kalıp, 7: Öpüşme Yüzeyleri, 8: Yuvarlatılmış Köşeler, 9: İşlem esnasında sac)



Germe işleminin şematik görünümü



Yüksek mukavemetli ince sacların kıvrılması (2: Akım, 10: Elektrod, 11: Kıvrırma Plakası, 12: Elektrod, 13: Elektrod, 14: Elektrod, 15: Kıvrırma Kafası, 16: Kıvrırma Kafası, 17: Sac, 18: Kıvrırma Çizgisi)
[Terziakın, 2002].

Ek 2. Malzemelere ait özellikler: Çalışmada adı geçen malzemelere ait özellik tabloları [<http://www.matweb.com>].

- **Aluminyum 1050-H14**

Bileşen	al	cu	fe	mg	mn	si	ti	v	zn
% Ağırlık	Min 99.5	Max 0.05	Max 0.4	Max 0.05	Max 0.05	Max 0.25	Max 0.03	Max 0.05	Max 0.05

Fiziksel Özellikler	Metrik	İngiliz	Açıklama
Yoğunluk	2.705 g/cc	0.0977 lb/in ³	
Mekanik Özellikler			
Sertlik, Brinell	30	30	500 kg yük, 10 mm bilya ile ölçülen
Çekme Dayanımı, Max	110 MPa	16000 psi	
Çekme Dayanımı, Akma	103 MPa	14900 psi	
Kopma Uzaması	10 %	10 %	
Elastisite Modülü	69 GPa	10000 ksi	Çekmede
Poisson Oranı	0.33	0.33	
Kayma Modülü	26 GPa	3770 ksi	
Kesme Dayanımı	69 MPa	10000 psi	
Basma Modülü	70.4 GPa	10200 ksi	
Elektriksel Özellikler			
Elektriksel Direnç	2.9e-006 ohm-cm	2.9e-006 ohm-cm	
Termal Özellikler			
Ergime Isısı	390 J/g	168 BTU/lb	
CTE, lineer 20 °C	23.6 µm/m-°C	13.1 µin/in-°F	20-100°C
CTE, lineer 250 °C	25.5 µm/m-°C	14.2 µin/in-°F	20-300°C
Isı Kapasitesi	0.9 J/g-°C	0.215 BTU/lb-°F	
Isıl İletkenlik	227 W/m-K	1580 BTU-in/hr-ft ² -°F	
Erime Sıcaklığı	646 - 657 °C	1190 - 1210 °F	
Solidüs	646 °C	1190 °F	
Likidüs	657 °C	1210 °F	

- **Magnezyum AZ31B-H26, Sıcak Haddelenmiş Sac**

Bileşen	al	ca	cu	fe	mg	mn	ni	si	zn
% Ağırlık	2.5 - 3.5	Max 0.04	Max 0.05	Max 0.005	97	Mim 0.2	Max 0.005	Max 0.1	0.6 - 1.4

Fiziksel Özellikler	Metrik	İngiliz	Açıklama
Yoğunluk	1.77 g/cc	0.0639 lb/in ³	
Mekanik Özellikler			
Çekme Dayanımı, Max	275 MPa	39900 psi	
Çekme Dayanımı, Akma	190 MPa	27600 psi	
Kopma Uzaması	10 %	10 %	İn 50 mm
Elastisite Modülü	45 GPa	6530 ksi	Çekmede
Poisson Oranı	0.35	0.35	
Kayma Modülü	17 GPa	2470 ksi	
Kesme Dayanımı	190 MPa	27600 psi	
İşlenebilirlik	100 %	100 %	Görelî, 100=En iyi
Basma Dayanımı	130 MPa	18900 psi	
Elektriksel Özellikler			
Elektriksel Direnç	9.2e-006 ohm-cm	9.2e-006 ohm-cm	
Termal Özellikler			
Ergime Isısı	340 J/g	146 BTU/lb	
CTE, lineer 20 °C	26 µm/m-°C	14.4 µin/in-°F	0-100°C
CTE, lineer 250 °C	27 µm/m-°C	15 µin/in-°F	20-200°C
Isı Kapasitesi	1 J/g-°C	0.2 BTU/lb-°F	
Isıl İletkenlik	96 W/m-K	666 BTU-in/hr-ft ² -°F	
Erime Sıcaklığı	605 - 630 °C	1120 - 1170 °F	
Solidüs	605 °C	1120 °F	
Likidüs	630 °C	1170 °F	
Sıcak Çalışma Aralığı	230 - 425 °C	446 - 797 °F	

- **Magnezyum M1A Sheet, Sıcak Haddelenmiş**

Bileşen	ca	cu	mg	mn	si	ni
% Ağırlık	Max 0.3	Max 0.05	99	Min 1.2	Max 0.1	Max 0.01

Fiziksel Özellikler	Metrik	İngiliz	Açıklama
Yoğunluk	1.77 g/cc	0.0639 lb/in ³	
Mekanik Özellikler			
Sertlik, Brinell	54	54	500 kg yük, 10 mm bilya
Sertlik, Knoop	69	69	
Çekme Dayanımı, Max	240 MPa	34800 psi	
Çekme Dayanımı, Akma	180 MPa	26100 psi	0.2 %
Kopma Uzaması	7 %	7 %	50 mm
Elastisite Modülü	45 GPa	6530 ksi	Çekmede
Basma Dayanımı	125 MPa	18100 psi	0.2 %
Poisson Oranı	0.35	0.35	
Kayma Modülü	17 GPa	2470 ksi	
Kesme Dayanımı	115 MPa	16700 psi	
Elektriksel Özellikler			
Elektriksel Direnç	5e-006 ohm-cm	5e-006 ohm-cm	
Termal Özellikler			
Ergime Isısı	370 J/g	159 BTU/lb	
CTE, lineer 20 °C	26 µm/m-°C	14.4 µin/in-°F	0-100°C
CTE, lineer 250 °C	27 µm/m-°C	15 µin/in-°F	20-200°C
Isı Kapasitesi	1 J/g-°C	0.2 BTU/lb-°F	
Isıl İletkenlik	96 W/m-K	666 BTU-in/hr-ft ² -°F	
Erime Sıcaklığı	648 - 649 °C	1200 - 1200 °F	
Solidüs	648 °C	1200 °F	
Likidüs	649 °C	1200 °F	

- Titanyum IMI 230 (Ti-2.5Cu)

Bileşen	cu	ti
% Ağırlık	2.5	97.5

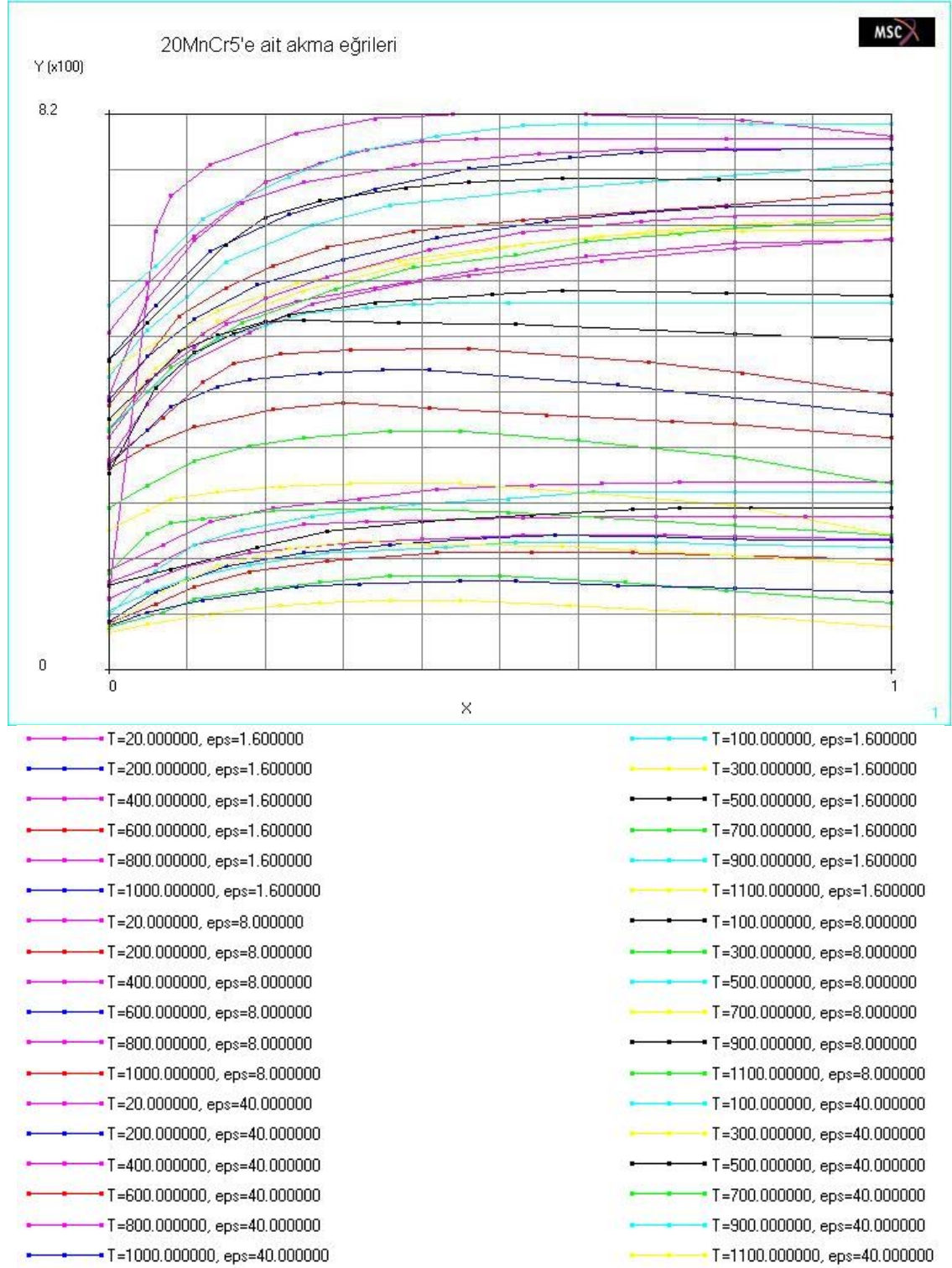
Fiziksel Özellikler	Metrik	İngiliz	Açıklama
Yoğunluk	4.56 g/cc	0.165 lb/in ³	
Mekanik Özellikler			
Çekme Dayanımı, Max	620 MPa	89900 psi	
Çekme Dayanımı, Akma	480 MPa	69600 psi	
Kopma Uzaması	24 %	24 %	
Elastisite Modülü	105 GPa	15200 ksi	
Poisson Oranı	0.31	0.31	
Kayma Modülü	45 GPa	6530 ksi	
Yorulma Dayanımı	280 MPa	40600 psi	10,000,000 çevrim
Elektriksel Özellikler			
Elektriksel Direnç	6.5e-005 ohm-cm	6.5e-005 ohm-cm	
Termal Özellikler			
CTE, lineer 20 °C	9.02 µm/m-°C	14.4 µin/in-°F	20-100°C
CTE, lineer 250 °C	9.1 µm/m-°C	14.4 µin/in-°F	20-300°C
CTE, lineer 500 °C	9.46 µm/m-°C	15 µin/in-°F	20-600°C
Isı Kapasitesi	0.525 J/g-°C	0.125 BTU/lb-°F	
Isıl İletkenlik	13 W/m-K	90.2 BTU-in/hr-ft ² -°F	
Beta Geçiş Sıcaklığı	895 °C	1640 °F	

- 20MnCr5 (AISI 5120)

Bileşen	c	cr	fe	mn	p	s	si
% Ağırlık	2.5	0.8	8	0.8	Max 0.035	Max 0.04	0.23

Fiziksel Özellikler	Metrik	İngiliz	Açıklama
Yoğunluk	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³	
Mekanik Özellikler			
Sertlik, Brinell	293	293	
Sertlik, Knoop	319	319	
Sertlik, Rockwell B	99	99	
Sertlik, Rockwell C	31	31	
Sertlik, Vickers	309	309	
Çekme Dayanımı, Max	979 MPa	142000 psi	
Çekme Dayanımı, Akma	786 MPa	114000 psi	
Kopma Uzaması	16 %	16 %	
Elastisite Modülü	205 GPa	29700 ksi	
Kayma Modülü	140 GPa	20300 ksi	
İşlenebilirlik	70 %	70 %	
Elektriksel Özellikler			
Elektriksel Direnç	2.2e-005 ohm-cm	2.2e-005 ohm-cm	
Termal Özellikler			
Isı Kapasitesi	0.475 J/g-°C	0.114 BTU/lb-°F	
Isıl İletkenlik	46.6 W/m-K	323 BTU-in/hr-ft ² -°F	

Ek 3. Akma Eğrileri: IMI 230 ve 20MnCr5 malzemelerine ait değişik sıcaklık ve BŞD hızlarında ortaya çıkan akma eğrileri [MSC Superform 2002 FlowStress Veritabanı].



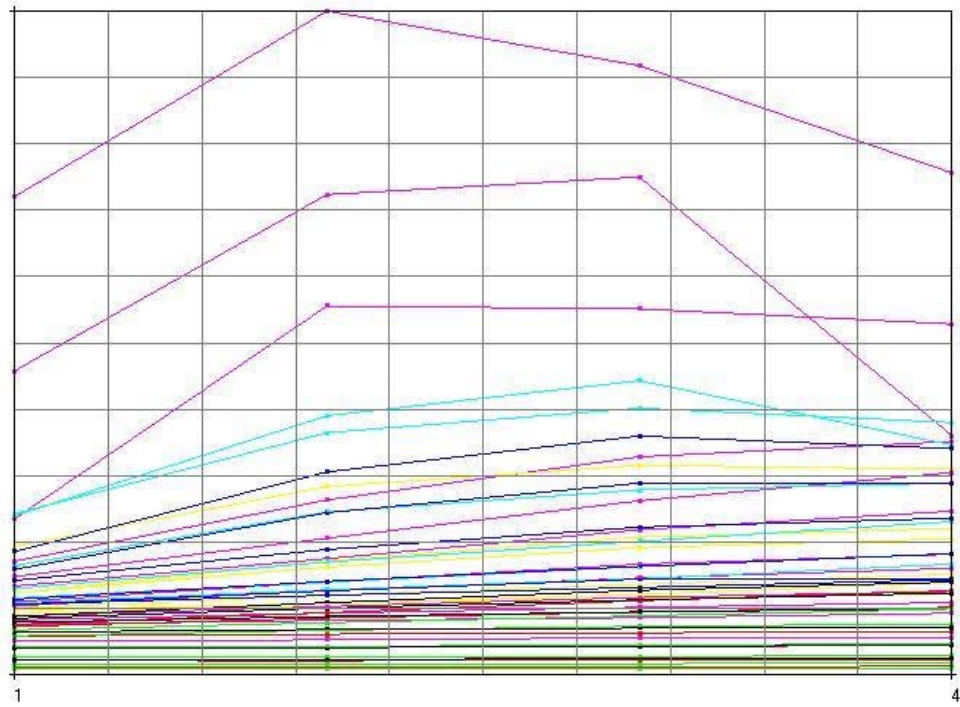
(IMI 230 - ASM_TITA_71) ait akma eğrileri



Y (x1000)

1.6

0



X (x1)

1

— T=300.000000, eps=0.001000
— T=450.000000, eps=0.001000
— T=600.000000, eps=0.001000
— T=800.000000, eps=0.001000
— T=300.000000, eps=0.010000
— T=450.000000, eps=0.010000
— T=600.000000, eps=0.010000
— T=800.000000, eps=0.010000
— T=300.000000, eps=0.100000
— T=450.000000, eps=0.100000
— T=600.000000, eps=0.100000
— T=800.000000, eps=0.100000
— T=300.000000, eps=1.000000
— T=450.000000, eps=1.000000
— T=600.000000, eps=1.000000
— T=800.000000, eps=1.000000
— T=300.000000, eps=10.000000
— T=450.000000, eps=10.000000
— T=600.000000, eps=10.000000
— T=800.000000, eps=10.000000
— T=300.000000, eps=100.000000
— T=450.000000, eps=100.000000
— T=600.000000, eps=100.000000
— T=800.000000, eps=100.000000

— T=400.000000, eps=0.001000
— T=500.000000, eps=0.001000
— T=700.000000, eps=0.001000
— T=850.000000, eps=0.001000
— T=400.000000, eps=0.010000
— T=500.000000, eps=0.010000
— T=700.000000, eps=0.010000
— T=850.000000, eps=0.010000
— T=400.000000, eps=0.100000
— T=500.000000, eps=0.100000
— T=700.000000, eps=0.100000
— T=850.000000, eps=0.100000
— T=400.000000, eps=1.000000
— T=500.000000, eps=1.000000
— T=700.000000, eps=1.000000
— T=850.000000, eps=1.000000
— T=400.000000, eps=10.000000
— T=500.000000, eps=10.000000
— T=700.000000, eps=10.000000
— T=850.000000, eps=10.000000
— T=400.000000, eps=100.000000
— T=500.000000, eps=100.000000
— T=700.000000, eps=100.000000
— T=850.000000, eps=100.000000

ÖZGEÇMİŞ

M. Emin ERDİN 21 Mart 1978’de Çorum’da doğdu. 1996 yılında Çorum Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2000 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesinden mezun olan M. Emin ERDİN aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde Makina Mühendisliği İmalat Programında yüksek lisans eğitimine başladı. Şu anda Gazi Üniversitesi Çorum Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.