

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK DAYANIMLI DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİK SACLARIN YÜKSEK
SICAKLIKTA ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Suat GÜLSUYU**

**Anabilim Dalı: MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Programı: KONSTRÜKSİYON**

OCAK 2004

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK DAYANIMLI DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİK SACLARIN YÜKSEK
SICAKLIKTA ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Suat GÜLSUYU
(503001203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2003
Tezin Savulduğu Tarih : 13 Ocak 2004

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Haydar LİVATYALI
Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Barlas Eryürek (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Ekrem Tüfekçi (İ.T.Ü.)

OCAK 2004

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana yardımcı olan ve yol gösteren hocam Yrd. Doç. Dr. Haydar LİVATYALI'ya ve değerli yardım ve katkılarından dolayı Mehmet TERZİAKIN'a ve SSAB TUNNPLAT'a teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmemde bana yardımcı olan hocam Yrd. Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ'e ve arkadaşım Araş. Gör. Canan Gamze GÜLERYÜZ'e minnettarım. Ayrıca bana her zaman destek olan sevgili aileme teşekkürler.

Ocak 2004

Suat GÜLSUYU

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOLLER	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1 GİRİŞ	1
1.1 Tez Çalışmasının Arka Planı	1
1.2 Tezin İçeriği	4
2 YARI-SICAK VE SICAK SAC ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİ	6
2.1 Yarı-sıcak ve Sıcak Sac Şekillendirmede Kullanılan Isıtma Teknikleri	6
2.2 Yarı-sıcak ve Sıcak Sac Şekillendirmede Isıtma İşlemi İçin Bir Yöntem Önerisi	8
2.2.1 Malzemelerin Elektriksel Davranışları	9
2.2.2 Metallerin İletkenliklerinin Kontrolü ve Sıcaklık Etkisi	9
2.3 Sıcaklık Kontrolü	11
2.4 Kaydırıcı Yağlar	11
3 ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ BELİRLEYEN UNSURLAR VE SICAKLIĞIN BU UNSURLARA ETKİSİ	15
3.1 Akma Eğrisi	16
3.2 Pekleşme Üsteli (n)	16
3.3 Birim Şekil Değişim Hızı Duyarlılık Üsteli (m)	17
3.4 Toplam Uzama, Üniform Uzama, Büzülme Sonrası Uzama ve Şekillendirme Sınır Diyagramı	19
3.5 Kristal Kafes Yapısı	22
3.6 Malzeme Bileşimi	23
3.7 Deformasyon Geçmişi	24
3.8 Kalıp Profil Yarıçapı ve Sınır Çekme Oranı (DR)	25
3.9 Baskı Plakası Kuvvetinin Etkisi	28
3.10 Sıcaklık Dağılımının Etkisi	29
3.11 Hasar Şekli	32
3.12 Konik Kap Değeri (CCV)	32
3.13 Sac Malzemenin Kalınlık Dağılımı	34
3.14 Geri Yaylanma	35
3.15 Tavşan Kulağı Oluşumu	36
3.16 Lüder Bantları (Stretcher Strain)	37
3.17 Çelik Üzerine Yapılmış Çalışmalar	38

4	AMAÇLAR VE YAKLAŞIM	41
4.1	Amaçlar	41
4.2	Yöntem	41
4.3	Proje Aşamaları	41
4.4	Deneylede Üzerinde Çalışılacak Olan Sac Malzemeler	42
4.4.1	Tek Eksenli Çekme Deneyi	44
4.4.1.1	İşlem Parametreleri	45
4.4.1.2	Deney Tasarımı	46
4.4.1.3	Yapılan Ölçümler	48
4.4.2	Sertlik Ölçümü	48
4.4.3	Mikroyapı Analizleri	49
5	DENEY SONUÇLARI	51
5.1	Tek Eksenli Çekme Deneyi Sonuçları	51
5.1.1	Akma ve Çekme Dayanımı	52
5.1.2	Pekleşme Üsteli (n)	55
5.1.3	Kopma Uzaması	58
5.1.4	Malzeme Dayanım Faktörü (K)	61
5.2	Yüksek Sıcaklıkta İşlemin Sertlik Üzerindeki Etkisi	62
5.3	Mikroyapı Analizleri	64
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
	KAYNAKLAR	73
	EKLER	76
	ÖZGEÇMİŞ	91

KISALTMALAR

AVC	: İleri Taşıt Kavramı
BŞD	: Birim Şekil Değişimi
BPK	: Baskı Plakası Kuvveti
CCV	: Konik Kap Değeri
DR	: Çekme Oranı
FLD	: Şekillendirme Sınır Diyagramı
HD	: Haddeleme Doğrultusu
HSLA	: Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli
LDR	: Sınır Çekme Oranı
LVDT	: Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü
PTFE	: Poli Tetra Flor Etilen (TEFLON™)
RT	: Oda Sıcaklığı
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu
SSD	: Sürekli Soğuma Dönüşüm
UHSLA	: Ultra Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli
ULSAB	: Ultra Hafif Otomobil Gövde Çelikleri

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1	Çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki elektrik dirençleri ve sıcaklık direnç katsayıları (Askeland, 1994)	10
Tablo 3.1	Değişik sıcaklıklarda gözlenen kayma sistemleri (Liu ve Chou,2000)	23
Tablo 4.1	Deneylerde kullanılacak olan sac malzemelerin % kimyasal içerikleri ...	43
Tablo 4.2	Deneylerde kullanılacak olan sac malzemelerin kalınlıkları, Avrupa standartlarındaki gösterimi ve hadde geçmişi	43
Tablo 4.3	İşlem parametrelerinin listesi.....	46
Tablo 4.4	Tek eksenli çekme deneyi ortogonal matrisi	47
Tablo 4.5	Docol 22 MnB için planlanan ek tek eksenli çekme deneyi matrisi.....	47
Tablo 4.6	Docol 22 MnB 5 için ek tek eksenli çekme deneyi matrisi	48
Tablo 4.7	Sertlik ölçüm ve mikroyapı analiz planı	50
Tablo 5.1	Docol 22 MnB 5 ve Docol 22 MnB malzemelerine ait akma-çekme mukavemeti, kopma uzaması, n ve K değerlerinin sıcaklık ile değişimi.....	51
Tablo 5.2	Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerine ait akma ve çekme mukavemeti, kopma uzaması, n ve K değerlerinin sıcaklık ile değişimi.....	52
Tablo 5.3	Docol 22 MNB 5'e ait mikroyapı görüntüleri (200x).....	66
Tablo 5.4	Domex 024 B'ye ait mikroyapı görüntüleri (200x)	67
Tablo 5.5	Domex 700 MC D'ye ait mikroyapı görüntüleri (200x).....	68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Magnezyum sac kaputlu 1952 Buick LeSabre (“Geleceğin Arabası”) (Krajewski, 2001).....	3
Şekil 1.2 1961 Chevrolet Corvette. Bu taşıt için prototip kaput, magnezyum sac kullanılarak yapılmıştır (GM Arşivi) (Krajewski, 2001).	3
Şekil 2.1 Yüksek sıcaklıklarda şekillendirmede işlem sırası (Doege ve Dröder, 2001)	6
Şekil 2.2 Derin çekme testi için şematik gösterim. Istampacı sıcaklığı soğutucu su ile sabit tutuluyor (Naka ve Yoshida, 1999)	7
Şekil 2.3 Sac numune ıstampası üzerine kurulmuş elektrikli ısıtıcılarla ısıtılmıştır (Naka vd., 2001).....	8
Şekil 2.4 Yarı-sıcak sac şekillendirmede kullanılabilecek bir kalıbın şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.5 Bir elektronun (a) hatasız bir kristal yapı ve (b) yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılan bir malzemenin kristal yapısı içerisinde hareketi (Askeland, 1994).....	10
Şekil 2.6 Sürtünme katsayısının sıcaklık ile değişimi (Sugamata, 1987)	12
Şekil 2.7 Farklı sıcaklıklarda ve iki tip yağlayıcı kullanılarak elde edilen sınır çekme oranları (a) 1100-O, (b) 2024-O, (c) 5083-O ve (d) 7075-O, (Sugamata vd., 1987)	13
Şekil 2.8 İki tip yağlayıcı kullanılarak elde edilen maksimum ıstampası (çekme) yükü (Sugamata, 1987)	14
Şekil 3.1 Sıcaklığa bağlı olarak 1 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımlı sacın çekme deneyi ile belirlenmiş akma eğrileri (Doege ve Dröder, 2001).....	16
Şekil 3.2 Çeşitli sıcaklık ve şekillendirme hızlarında Al alaşımları için tek eksenli çekme deneylerinden elde edilmiş pekleşme üsteli değerleri (Li ve Ghosh, 2003-A)	17
Şekil 3.3 Birim şekil değişim hızı duyarlılık üstelinin sıcaklık ile değişimi (Li ve Ghosh, 2003-A).....	18
Şekil 3.4 Al-6Mg alaşımı için birim şekil değişim hızı duyarlılık üstelinin, sıcaklık ve şekillendirme hızı ile değişimi (Li vd., 2003)	18
Şekil 3.5 Tipik BŞD hızlarında toplam çekme uzamasının sıcaklığa bağlı değişimi (Li ve Ghosh, 2003, B; Li vd., D)	19
Şekil 3.6 (a) Üniform ve büzülme sonrası BŞD’nin sıcaklık ve şekillendirme hızı ile değişimi (b) 5182-O alaşımı için toplam uzamanın sıcaklık ve şekillendirme hızı ile değişimi (Li ve Ghosh, 2003-A)	20
Şekil 3.7 Çeşitli BŞD hızları ve çeşitli sıcaklıklarda tek eksenli çekme deneyi ile belirlenen büzülme sonrası uzamanın toplam uzamaya oranı (Ghosh, 2003-A).....	20
Şekil 3.8 5083-O Al-Mg alaşımı için çeşitli sıcaklıklarda ve şekillendirme hızlarında elde edilmiş şekillendirme sınır diyagramı (Naka vd., 2001)	22

Şekil 3.9 (a) Toplam uzama miktarının, Mg katkısı ve sıcaklık ile değişimi (b) Mg katkısının ve başlangıç BŞD hızının toplam uzama üzerindeki etkisi (Li vd., 2003)	24
Şekil 3.10 Soğuk haddelenmiş ve tavlanmış 5083 alüminyum alaşımının sıcaklık değişimi ile (a) sınır bombe yüksekliği ve (b) BŞD hızı duyarlılık üstelinin değişimi (Li vd., 2003).....	25
Şekil 3.11 Derin çekmede şekillendirme sınırı (çekme oranı) (a) Oda sıcaklığında (b) 250 °C’de (Takuda vd., 2002).....	26
Şekil 3.12 Kalıp profil yarıçapı, r_d , 7.5 mm olan bir durumda; a) Oda sıcaklığında derin çekme sonrası parçanın şekli ($DR < 2.4$) ve b) 250 °C’de yarı-sıcak derin çekme durumunda işlem sonrası parça şekli ($DR = 2.68$) (Takuda vd., 2002)....	26
Şekil 3.13 Kalıp elemanlarının sıcaklığının değişimi ve iki ayrı pres çeşidi kullanılarak elde edilmiş maksimum çekme derinliği değişimlerinin karşılaştırılması (a) Kranklı pres (b) Hidrolik pres (Kim vd., 1996)	27
Şekil 3.14 İzotermal ısıtma (kalıp ve ıstampa sıcaklığı eşit) şartlarında elde edilmiş parça derinlikleri (Li ve Ghosh, A)	28
Şekil 3.15 Derin çekilmiş kapların değişik sıcaklıklarda ve bu sıcaklıklara karşılık gelen en iyi BPK’lerinde elde edilmiş kap yükseklikleri (Liu ve Chou, 2000) .	28
Şekil 3.16 Sıcaklık ve baskı plakası kuvvetinin değişimi ile derin çekilmiş kapların görüntüsündeki değişim (Liu ve Chou, 2000)	29
Şekil 3.17 İstampa ve kalıp sıcaklık dağılımının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisi (Li vd., 2003-D).....	30
Şekil 3.18 Yarı-sıcak derin çekme ($DR = 2.8$ ve $r_d = 7.5$ mm) a) Deney sonucunda oluşan hasar b) Simülasyon sonucunda tespit edilen hasar bölgesi ve sıcaklık dağılımı (Takuda vd., 2002).....	31
Şekil 3.19 Yüksek ıstampa hızında (10 mm/sn) yarı-sıcak derin çekme durumunda ortaya çıkan ağ yapısı ve sıcaklık dağılımı (Takuda vd., 2002).....	31
Şekil 3.20 $0,001 \text{ sn}^{-1}$ başlangıç BŞD hızında 450 ve 500 °C sıcaklıklarında hasara uğramış AZ31B-H24 magnezyum alaşımlı sacın SEM fotoğrafı (Krajewski, 2001)	32
Şekil 3.21 Konik kap değeri deneyinde kullanılan kalıp ve ıstampa (Chen ve Huang, 2003)	33
Şekil 3.22 Çeşitli sıcaklıklarda hasara uğramış konik kaplar (Chen ve Huang, 2003)	33
Şekil 3.23 Çeşitli sıcaklıklarda konik kap değeri (CCV) (Chen ve Huang, 2003) ...	34
Şekil 3.24 İki tip preste derin çekilmiş kapın kalınlık değişimi (a) Kranklı pres b) Hidrolik pres (Kim vd., 1996).....	34
Şekil 3.25 Geri yaylanma deneyinde kullanılan bükme kalıbı (Chen ve Huang, 2003)	35
Şekil 3.26 Sıcaklık ve geri yaylanma arasındaki ilişki (Chen ve Huang, 2003).....	36
Şekil 3.27 Değişik sıcaklıklarda, sac kalınlığının ve kalınlık doğrultusundaki BŞD miktarının hadde doğrultusu ile yapılan açı ile değişimi (Shipton ve Roberts, 1991)	37
Şekil 3.28 Tavşan kulağı oluşumunun sıcaklık ile değişimi (Shipton ve Roberts, 1991)	37
Şekil 3.29 Lüder bantlarının oluştuğu sıcaklık ve BŞD hızı şartları (Naka ve Yoshida, 1999)	38
Şekil 3.30 Çeşitli BŞD hızlarında basma deneyleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme ve gerçek BŞD eğrisi (Malzeme: Fe-5Ni) (ASM, 1997).....	39

Şekil 3.31 Çeşitli BŞD hızlarında basma deneyleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme ve gerçek BŞD eğrisi (Malzeme: ANSI 304 yoğruk paslanmaz çelik) (ASM, 1997)	39
Şekil 3.32 ULSAB-AVC kapsamında C sınıfı taşıt gövdesinde kullanılan çelikler (Davies, 2003)	40
Şekil 4.1 Docol ve Domex çelik sacların otomobil karoserlerinde yaygın olarak kullanıldığı parçalar (SSAB, 2000)	43
Şekil 4.2 Tek eksenli çekme deneyi deney numunesi	44
Şekil 4.3 Çekme deneyleri için kullanılan ısıtma ve sıcaklık kontrol tertibatının şematik gösterimi	45
Şekil 4.4 Yarı-sıcak/sıcak çekme deneylerinde kullanılan çekme cihazı ve sıcaklık kontrol cihazı	45
Şekil 5.1 Sıcaklığın ve birim şekil değiştirme hızının akma dayanımı üzerindeki etkisi	53
Şekil 5.2 Sıcaklığın ve birim şekil değiştirme hızının çekme dayanımı üzerindeki etkisi	53
Şekil 5.3 Sıcaklığın ve birim şekil değiştirme hızının akma ve çekme mukavemeti üzerindeki etkisi (Malzeme: Docol 22 MnB)	54
Şekil 5.4 Docol 22 MnB 5'e ait mühendislik gerilmesi-mühendislik BŞD eğrisi (Başlangıç BŞD hızı: $0,05 \text{ sn}^{-1}$)	54
Şekil 5.5 Docol 22 MnB 5'e ait gerçek gerilme-gerçek BŞD eğrisi (Başlangıç BŞD hızı: $0,05 \text{ sn}^{-1}$)	55
Şekil 5.6 Docol 22 MnB ve Docol 22 MNB 5 malzemesinin pekleşme üstelinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi	55
Şekil 5.7 Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerinin pekleşme üstellerinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi	57
Şekil 5.8 Domex 700 MC D sac malzemesinin birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık ile gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişim eğrisinin değişimi	57
Şekil 5.9 Pekleşme üstelinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi (Malzeme: Docol 22 MnB 5)	58
Şekil 5.10 Docol 22 MnB ve Docol 22 MnB 5 malzemelerinin kopma uzamalarını sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi	59
Şekil 5.11 Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerinin kopma uzaması değerlerinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi	59
Şekil 5.12 Docol 22 MnB 5 malzemesinin kopma uzaması değerinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi	60
Şekil 5.13 1000°C 'de tufal tabakası oluşumunun malzeme yüzeyine etkisi (100X)	60
Şekil 5.14 Çekme deneyi yapılmamış numune ve çeşitli sıcaklıklarda çekme deneyi yapılmış numuneler (Malzeme: Docol 22 MB 5 ve BŞD hızı $0,001 \text{ sn}^{-1}$)	61
Şekil 5.15 Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerinin malzeme dayanım faktörünün sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi	61
Şekil 5.16 Docol 22 MnB 5 malzemesinin malzeme dayanı faktörünün sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi	62
Şekil 5.17 Docol 22 MNB 5'e ait Vickers sertlik değişimi	63
Şekil 5.18 Domex 024 B' ye ait Vickers sertlik değişimi	63
Şekil 5.19 Domex 700 MC D' ye ait Vickers sertlik değişimi	64
Şekil 5.20 1020 çeliğine ait SSD diyagramı (Askeland, 1994)	65

SEMBOLLER

d_o	: Sac numune (taslak) çapı
d_p	: Istampı çapı
r_d	: Kalıp profil yarıçapı
K	: Malzeme dayanım faktörü
n	: Pekleşme üsteli
m	: BŞD hızı duyarlılık üsteli
σ	: Gerilme
ε	: Gerçek birim şekil değiştirme
$\dot{\varepsilon}$	: Birim şekil değiştirme hızı
ρ	: Öz direnç
ρ_r	: Oda sıcaklığındaki öz direnç
a	: Sıcaklık direnç katsayısı
ΔT	: Sıcaklık farkıdır
R^2	: Yakınsama değeri

YÜKSEK DAYANIMLI DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİK SACLARIN YÜKSEK SICAKLIKTAKİ ŞEKLİLENDİRİLMESİ

ÖZET

Hafif ve yüksek dayanımlı malzemelerin sanayide kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanımıyla taşıt ağırlıkları azaltılmakta, yakıt tüketimini ve egzoz emisyonları düşmektedir. Dolayısıyla birçok araştırmacı tarafından, alüminyum ve magnezyum alaşımları ve yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik saclar üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Fakat oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği düşük bu malzemeler işlendiğinde çeşitli türde hasar oluşumları gözlenmektedir. Dolayısıyla bu problemleri aşmak için şekillendirme işleminin yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Çeşitli sac metal malzemelere ait sıcak/yarı-sıcak sac şekillendirme işlemi ile ilgili güncel bilgiler literatürden derlenmiş ve özetlenmiştir. Sıcak ve soğuk haddelenmiş yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik sacların yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesi için yöntem geliştirilmesi ve işlemin yapılabilirliğinin tespiti konusunda deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Şekillendirme sıcaklığının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çekme deneyleri ve ardından gelen mikrosertlik ölçümleri ve mikroyapı gözlemleri ile soğuk ve sıcak haddelenmiş dört değişik ekstra yüksek dayanımlı çelik sacların gerek yüksek sıcaklıktaki, gerekse yüksek sıcaklıkta işlendikten sonra oda sıcaklığındaki malzeme özellikleri ortaya konmuştur. Test edilen alaşımlardan birinde 600°C’de şekillendirme ve 1000°C’de ısıtılma işleminden sonra uygulanan su verme işlemiyle dayanım değerlerindeki artış görülmüş ve bu nedenle yarı-sıcak şekillendirmeye çok uygun bulunmuştur.

FORMING OF HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL SHEETS AT ELEVATED TEMPERATURE

SUMMARY

Lightweight and high strength materials are used in larger quantities in the industry. Use of these materials especially in the automotive industry decreases vehicle weight, reduces fuel consumption and exhaust emissions. Thus, studies on use of aluminum and magnesium alloys and high strength low alloy steels are being performed by many researchers. However, these materials, when formed at room temperature, have low formability and these forming processes cause various failure modes. Therefore, a forming process at elevated temperature need be developed to overcome these problems.

State of the art on sheet forming at elevated temperature for various sheet metals were compiled and summarized. An experimental investigation to evaluate feasibility and limitations of hot and warm sheet forming process on extra high strength sheet steels was conducted. Effects of the forming temperature on mechanical properties of the materials were evaluated. Mechanical properties of selected four types of cold and hot rolled high strength sheet steels were determined for at room and elevated temperatures as well as properties after forming at elevated temperature by using tension test, micro-hardness measurements and microstructure observations. One of the tested alloys proved to be very suitable for warm forming at about 600°C and heat treatment at 1000 °C and improved strength.

1 GİRİŞ

1.1 Tez Çalışmasının Arka Planı

Derin çekme işlemi metal saclarının şekillendirilmesinde geniş endüstriyel uygulama alanına sahip bir yöntemdir. Ancak bu işlemde büyük miktarda şekil değişimi ortaya çıktığı için oda sıcaklığında bu işlemin gerçekleştirilmesi malzemelerin düşük sünekliği nedeniyle zorluklar içerir. Yüksek sıcaklık şartları malzemelerin akma dayanımlarını düşürüp, sünekliklerini arttırdığı için deformasyonu da kolaylaştırır. Kısaca, 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 belirlenmesi gerektiğidir. Dolayısıyla, derin çekmenin uygun bir yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilmesi sınır çekme oranını artırır, ürün yüzeylerinin daha kaliteli olmasını sağlar ve işlemin gerçekleşmesi için gerekli pres kuvvetlerini düşürür.

Hafif ve yüksek dayanımlı metallerin endüstride kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde taşıt ağırlığının azaltılması yakıt tüketimini ve egzoz emisyonunu düşürmektedir. Dolayısıyla birçok araştırmacı tarafından alüminyum ve magnezyum alaşımları ve HSLA/UHSLA çelikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak bu metallerden bazılarının oda sıcaklıklarındaki şekillendirilebilirlikleri oldukça düşüktür.

Otomobillerin ağırlıklarını azaltarak yakıt tüketimini azaltmak için, hafif malzemelerin kullanımına ilgi sürekli olarak artmaktadır. Bu açıdan 1.74 g/cm^3 'lük özgül ağırlığı ile magnezyum ve 2.70 g/cm^3 'lük özgül ağırlığı ile alüminyum ilgi çekici metaller olmuştur (**Doege ve Dröder, 2001**). Ancak, magnezyum ve alüminyum presleme işlemleri yaygın endüstriyel malzeme olan çelik saclara nazaran teknik zorluklar ve kısıtlamalar içermektedir (**Bolt vd., 2001**). Geliştirilen yeni kullanım alanları ve ağırlık avantajından dolayı magnezyum ve alüminyumun otomobillerde kullanımı 1980'den beri gittikçe artmaktadır (**Krajewski, 2001**).

Günümüzde, magnezyumun ve alüminyumun otomotiv sektöründe kullanımı kalıp döküm yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem çok karmaşık yapıları parçaların üretimine imkan verirken, gerekli mekanik özelliklerin elde edilebilmesine bazen imkan tanımamaktadır. Bu bağlamda yüksek mekanik kalitede, düşük tane boyutlu ve gözeneksiz parçaların üretimini mümkün kılan şekillendirme işlemi alternatif bir imalat yöntemi olarak ortaya çıkıyor. Bu yöntem, Ancak magnezyum alaşımlarının işlenmesi için kullanılması zorunlu olan üretim teknolojisi ve uygun parametrelerin bilinmemesi ve teknolojik tecrübe eksikliği nedeni ile kısıtlı durumdadır **(Doege ve Dröder, 2001)**.

Alüminyumun şekillendirilebilirliği, derin çekme çeliklerinin $2/3$ 'ü, elastisite modülü ise çeliğinkinin $1/3$ 'ü kadardır, dolayısıyla alüminyumda daha fazla kırılma ve geri yaylanma gerçekleşir. Şekillendirilebilirliği görece olarak daha yüksek 5000 serisi alaşımlarında, dinamik BŞD yaşlanma etkisiyle (ki bu da Lüder bantlarına neden olur) kullanılabilirliği düşer **(Bolt vd., 2001)**.

Otomobil gövdelerinin konstrüksiyonu magnezyum ve alüminyum sac metal bileşenlerin kullanımı için geniş bir potansiyel sunmaktadır. Genel olarak, otomobil gövdesi tamamen metal sac parçalardan oluşur ve yaklaşık olarak toplam araç kütlesinin %25'ini meydana getirir. Dolayısıyla, geleneksel metaller yerine magnezyumun ve alüminyum kullanımı kütlede önemli bir düşüşe imkan sağlayacaktır **(Doege ve Dröder, 2001)**.

Alüminyum ve magnezyumun şekillendirilebilirliğini iyi bir seviyeye yükseltmenin etkin bir yolu yarı-sıcak şekillendirme işlemi uygulamaktır. Yapılan çalışmalar, 5000 serisi alüminyumların derin çekilebilirliğinin yüksek sıcaklık şartlarında artmakta olduğunu göstermektedir. Örneğin, 5754 alüminyum alaşımının kap şeklinde çekilmesinde sınır çekme oranı yüksek sıcaklık uygulaması ile 1,9 dan 2,7 ye yükseltilebilmektedir (1,9; oda sıcaklığında, 2,7: kalıp 250 °C ye ısıtılıp ıstampa oda sıcaklığında tutulduğunda). Yüksek sıcaklıkta şekillendirmenin bir faydası da ürün yüzey kalitesinin artmasıdır (Lüder bantları oluşmaz) **(Bolt vd., 2001)**.

Magnezyum saclar otomobil uygulamalarında kullanılmazken, bu malzemeden bazı prototip sac parçalar üretildi. General Motors 1952'de Buick ve 1961'de de Chevy Corvette (Şekil 1.1 ve Şekil 1.2) marka otomobiller için magnezyum saclar kullanarak prototip kaput üretmiştir. İki prototip parçada başarılı olmasına rağmen

ikisi de üretimde kullanılmadı (**Krajewski, 2001**). Magnezyum ve alüminyum sac malzemelerinin ana üretim programları içinde olmamasının en etkili nedenleri yüksek malzeme maliyeti ve oda sıcaklığındaki düşük şekillendirilebilirlikleridir.



Şekil 1.1: Magnezyum sac kaputlu 1952 Buick LeSabre (“Geleceğin Arabası”) (Krajewski, 2001)



Şekil 1.2: 1961 Chevrolet Corvette. Bu taşıt için prototip kaput, magnezyum sac kullanılarak yapılmıştır (GM Arşivi) (Krajewski, 2001).

Alüminyum, magnezyum ve titanyum alaşımlı çelik sac levhaların yarı sıcak – sıcak şartlarda şekillendirilmesi konusunda literatürde oldukça çalışmaya rastlanmaktadır. Buna karşın çelik sac levhalar üzerine yapılan çalışmalar çok az sayıdadır. Çeliklerle ilgili yapılan çalışmalarda 304 paslanmaz çeliğinin kullanıldığı görülmüştür.

Yarı-sıcak ve sıcak sac şekillendirme yönteminin avantajları ;

- Oda sıcaklığında şekillendirilemeyen metallerin şekillenebilir hale gelmesi
- Bu sayede hafif ve yüksek mukavemetli ürünler elde edilmesinin mümkün hale gelmesi
- Pres kuvvetlerinin düşmesi
- Ürün yüzeyinde hata oluşma olasılığının en aza indirilmesi

1.2 Tezin İçeriği

Yarı-sıcak sac şekillendirmede, malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin maksimum olduğu sıcaklıkların belirlenmesi ve bu sıcaklıklarda derin çekme işleminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden bu işleme ait parametrelerin belirlenmesi, ilgili deneysel çalışmaların yapılması ve sürecin bilgisayar ortamında simüle edilmesi işlemin endüstriyel bir hal alabilmesi için öncelikli olarak gerçekleştirilmesi gereken aşamalardır.

Bu çalışmanın amacı, literatürde daha önce bu konuda yapılan çalışmaları da referans olarak işlemden etkin parametreleri belirlemek ve deneysel çalışma ile işlemin etkinliğini ve sınırlarını incelemektir. Bu deneylerden 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.

- Sıcaklık,
- Sıcaklık gradyeni,
- Birim şekil değıştirme hızı ($\dot{\epsilon}$),
- Birim şekil değıştirme hızı duyarlılık üsteli (m),
- Malzeme geçmişı.

Yukarıda belirtilen temel işlem parametreleri ve bunlara ek olarak, özellikle sac malzemelerin işlenmesinde sac üretim yöntemine, geometriye, takım geometrisi ve özelliklerine bağı pek çok etken ürün özelliklerinin, işlemden önce öngörülmesini zorlaştırır. İleriki bölümlerde, sac şekillendirme işlemini belirleyen unsurlar ve şekillendirilebilirliğin tespitinde kullanılan deneyler ve sonuçları hakkında bilgiler bulunulacaktır.

Bölüm 2’de yarı-sıcak yada sıcak sac şekillendirme işlemlerinde kullanılan ısıtma yöntemleri ve bunların birbirlerine karşı avantajları ve dezavantajları üzerinde durulmuş. Ayrıca sıcaklık kontrolü nasıl yapıldığından, sıcak ve yarı-sıcak sac şekillendirmede kullanılan bazı kaydırıcı yağlardan söz edilmiştir.

Bölüm 3’te malzemelerin şekillendirilebilirliğini belirleyen unsurlar ve sıcaklığın bu unsurlar üzerindeki etkileri incelenmiştir ayrıca literatürde şekillendirilebilirliğin değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler ve sonuçları özetlenmiştir.

Bölüm 4’te tez amaçları ve benimsenen yaklaşımdan söz edilmiştir. Proje aşamaları, ısıtma ve soğutmanın mekanik özellikler üzerindeki etkisinin nasıl tespit edildiği ve çekme deneylerinin yüksek sıcaklıkta nasıl yapıldığı hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 5’te deneysel çalışma sonuçları ortaya konulmuştur. Sıcaklığın ve birim şekil değiştirme hızının malzeme akma ve çekme dayanımı, kopma uzaması ve pekleşme üsteli gibi malzeme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bölüm 6’da gerek literatür gerek deneysel çalışmalar sonucunda; sıcak / yarı-sıcak sac şekillendirme işleminin hangi şartlarda ne derecede uygun bir imalat yöntemi olduğu konusunda varılan sonuçlar ve öneriler belirtilmiştir.

2 YARI-SICAK VE SICAK SAC ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİ

2.1 Yarı-sıcak ve Sıcak Sac Şekillendirmede Kullanılan Isıtma Teknikleri

Oda sıcaklığında yapılan geleneksel sac metal şekillendirme işlemi ile yarı-sıcak sac şekillendirme işlemi karşılaştırıldığında, sacların şekillendirilmesinde kullanılan ısıtma işlemi şekillendirme işlemine ek bir işlem halini almaktadır. Isıtma işlemi için iki alternatif yöntem mevcuttur. Bunlardan birinde, sac fırında ısıtılarak pres makinesine taşınır, diğerinde ise ısıtma işlemi derin çekme takımının (şekillendirme kalıbı) içinde ısı iletimi ile gerçekleştirilir (Şekil 2.1).

Dış ortamda ısıtmanın avantajı homojen sac sıcaklığını sağlaması, dezavantajı ise fırından kalıba taşınması sırasında gerçekleşen süratli ısı kaybıdır. Endüstriyel işlemler için, yalıtılmış taşıyıcılar içeren otomatik taşıma sistemleri uygulanabilir.

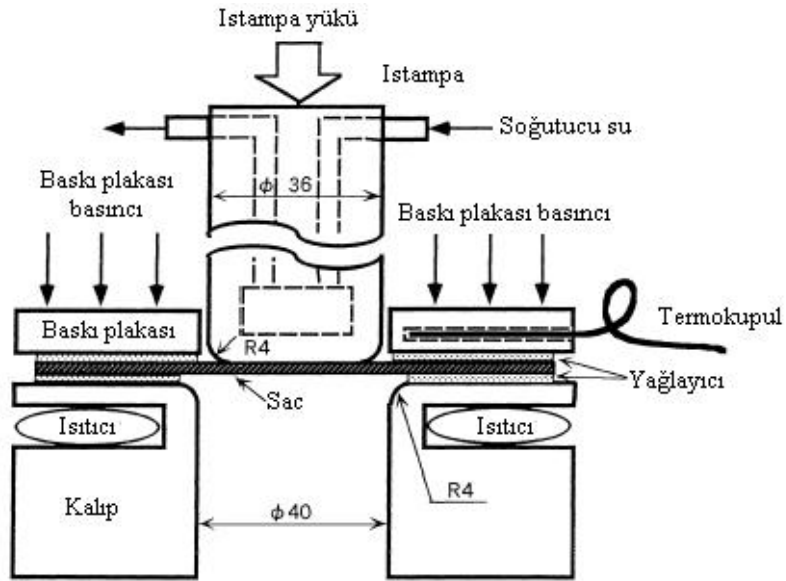


Şekil 2.1 Yüksek sıcaklıklarda şekillendirmede işlem sırası (Doege ve Dröder, 2001)

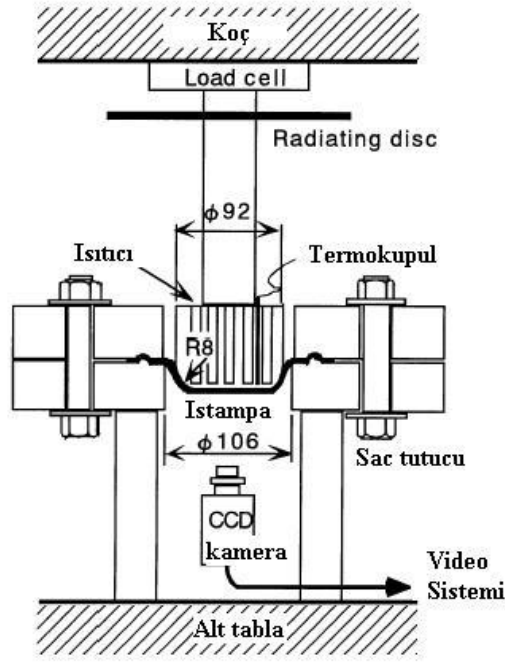
Takım içinde ısıtmada sac, sac tutucu ile kalıp arasında kısa bir süre için sıkıştırılmalıdır. Yapılan incelemeler, (magnezyum alaşımlı) sac levhaların yüksek ısı iletim katsayısı ve düşük ısı kapasitesi sayesinde birkaç saniyelik sıkıştırmanın 200°C civarındaki ve daha yüksek sıcaklıklara ulaşılması için yeterli olduğunu

göstermiştir. Takım içinde ısıtmanın başka bir avantajı ise sac üzerinde istenilen sıcaklık dağılımının oluşturulmasına imkan vermesidir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre ıstampa; kalıp ve tutucudan (pot çemberinden) daha düşük sıcaklıkta olduğu takdirde magnezyum alaşımının sınır çekme oranı daha fazla arttırılabilmektedir. Sabit sıcaklık şartlarının garanti edilebilmesi için, ıstampada ilave soğutma ekipmanları gerekebilir (Şekil 2.2). Benzer sonuçlar, alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda derin çekilmesinde de ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.3'te sac, kalıp üzerine yerleştirilmiş elektrikli ısıtıcılar ile ısıtılmaktadır (Naka vd., 2001).

Diğer bir yöntem ise, sacın önceki yöntemlere nazaran daha yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak daha önceden ısıtılmamış kalıp içinde şekillendirilmesidir. Fakat bu yöntemde hızlı ısı kaybından dolayı belli ve kesin bir sıcaklık garanti edilemez. Şekillendirme sıcaklığın belli bir sıcaklık aralığında tutulması gereklidir, bu nedenle kalıpta sıcaklık kontrolü içermeyen yöntemler tavsiye edilmemektedir (Doerge ve Dröder, 2001).



Şekil 2.2 Derin çekme testi için şematik gösterim. İstampa sıcaklığı soğutucu su ile sabit tutuluyor (Naka ve Yoshida, 1999)



Şekil 2.3 Sac numune ıstampa üzerin kurulmuş elektrikli ısıtıcılarla ısıtılmıştır (Naka vd., 2001)

2.2 Yarı-sıcak ve Sıcak Sac Şekillendirmede Isıtma İşlemi İçin Bir Yöntem Önerisi

Yüksek dayanımlı metallerin şekillendirilmesi için iş parçasının elektrik akımı uygulanarak ani olarak ısıtılması ile ilgili olarak gerçekleştirilmiş bir patent çalışmasına ait şematik bir gösterim Şekil 2.4'te verilmiştir (Terziakın, 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, termokupul yada kızıl ötesi sıcaklık ölçüm cihazları ile ölçülebilir. Direnç ile malzemenin sıcaklığı arasında lineer bir ilişki mevcuttur. Elektrik akımı ile ısıtma yöntemi değişik sac şekillendirme işlemlerine uygulanabilir.

1. Preste şekillendirme (stamping); derin çekme, sıvama vb.
2. Bükme
3. Kesme; Çevre kesme, delme vb.

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

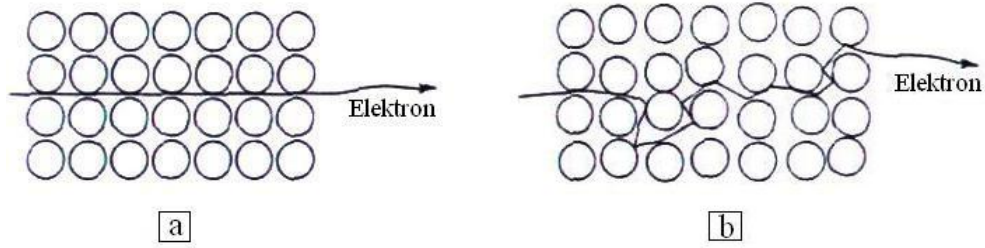
Elektriksel davranışın, malzeme yapısından, malzemenin işlenişinden ve malzemenin maruz kaldığı çevreden etkilendiği bilinmektedir. Malzemelerin elektrik iletkenliğinin, malzemede yük taşıyıcı sayısının kontrolü ile veya hareketliliğin kontrolü ile ve yük taşıyıcılarının kolay hareketi ile kontrol edilebileceği biliniyor. Elektronlar, iletkenlerde (metallerdeki gibi) yarıiletkenlerde ve yalıtkanlarda yük taşıyıcılarıdır. Hareketlilik atomik bağa, kafes düzensizliklerine, mikroyapıya ve iyonik bileşiklerde difüzyon hızına bağlıdır (**Askeland, 1994**).

Hatasız saf bir metalin iletkenliği atomların elektronik yapısı ile belirlenir. Ancak taşıyıcıların hareketliliğini belirlemede, iletkenlik önemli ölçüde etkilenebilir. Hareketlilik sürüklenme hızı ile orantılıdır. Sürüklenme hızı; elektron, kafesteki hatalarla çarpışırsa düşüktür. Ortalama serbest yol çarpışmalar arasındaki ortalama mesafedir, uzun bir ortalama yol yüksek hareketliklere ve yüksek iletkenliklere izin verir.

Bir metal hata içermiyorsa ve mutlak sıfır derecede kullanılıyorsa ortalama serbest yol arası sınırsızdır ve öz direnç sıfırdır. Buna karşın metaller hatasız değildir ve mutlak sıfırda kullanılmaz.

Metalin sıcaklığı yükseldiğinde, ısı enerjisi atomun titreşmesine neden olur (Şekil 2.5). Herhangi bir anda atom denge halinde olmayabilir ve bu nedenle elektronlarla etkileşir ve elektronları dağıtır. Ortalama serbest yol ve elektronların hareketliliğini azaltır ve öz direnç (ρ) artar. Sıcaklıkla öz dirençteki değişim, aşağıdaki eşitlikle tahmin edilebilir. Aşağıdaki denklemde, oda sıcaklığındaki öz direnç ve sıcaklık direnç katsayısı sırasıyla " ρ_r " ve " a " ile gösterilmiştir. ΔT Sıcaklık farkıdır. Sıcaklık ve direnç arasındaki ilişki geniş bir aralıkta lineerdir. Tablo 2.1'de çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki dirençleri ve sıcaklık direnç katsayıları verilmiştir (Askeland, 1994).

$$\rho = \rho_r (1 + a \cdot \Delta T)$$



Şekil 2.5 Bir elektronun (a) hatasız bir kristal yapısı ve (b) yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılan bir malzemenin kristal yapısı içerisinde hareketi (Askeland, 1994)

Tablo 2.1 Çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki elektrik dirençleri ve sıcaklık direnç katsayıları (Askeland, 1994)

Malzeme	Oda sıcaklığı direnci ($\times 10^{-6}$ ohm.cm)	Sıcaklık Direnç Katsayısı (ohm.cm / $^{\circ}\text{C}$)
Be	4,0	0,0250
Mg	4,45	0,0165
Ca	3,91	0,0042
Al	2,65	0,0043
Cr	12,90	0,0030
Fe	9,71	0,0065
Co	6,24	0,0060
Ni	6,84	0,0069
Cu	1,67	0,0068
Ag	1,59	0,0041
Au	2,35	0,0040

2.3 Sıcaklık Kontrolü

Yarı-sıcak ve sıcak sac şekillendirme konusunda, önceden yapılmış çalışmalarda sıcaklık ölçümünün termokupullar ile gerçekleştirildiği görülmektedir. Eğer sac malzeme fırın içinde ısıtılıyorsa fırın sıcaklığı kontrol altında tutulur; bu yöntemde malzeme üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı oluşur, fakat şekillendirme kalıbına taşıma sırasında sac malzemenin sıcaklığında bir miktar düşüş görülür (Şekil 2.1). Şekil 2.2’de ısıtma işlemi kalıp içine yerleştirmiş ısıtıcılarla yapılırken sıcaklık ölçümü baskı plakası içine yerleştirilmiş termokupul ile gerçekleştirilir. Buna karşılık Şekil 2.3’te sac malzemenin ısıtılması işlemi yapan ısıtıcı da termokupul da ıstampa üzerine yerleştirilmiştir.

Şekillendirme işlemi sırasında bir sıcaklık gradyeni oluşturulması istenildiyse sacın ya da şekillendirme takımının farklı bölgeleri üzerinde (kalıp, ıstampa, pot çemberi gibi) farklı termokupullar kullanılarak farklı bölgelerdeki sıcaklıklar kontrol edilerek işlem gerçekleştirilir.

Sıcaklık kontrolünün daha hassas bir şekilde yapılması istendiği takdirde sac malzemenin veya şekillendirme kalıp elemanlarının üzerinde birden fazla termokupul kullanılabilir. Böylece sıcaklık ölçümü daha güvenilir olarak gerçekleştirilir.

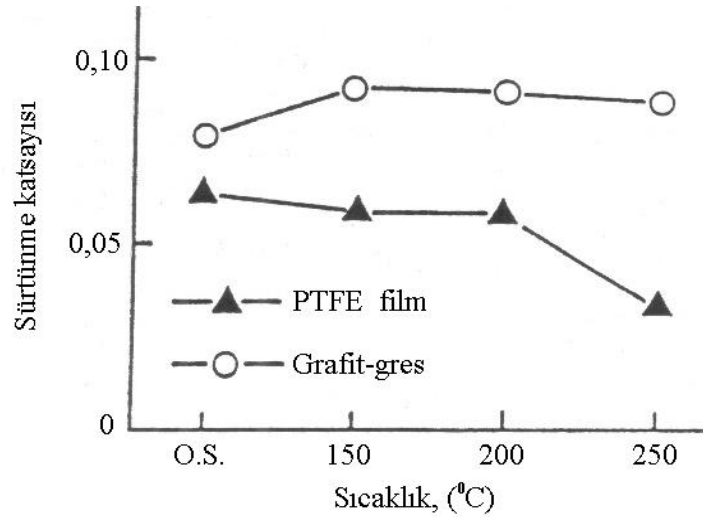
Bölüm 2.2’de sözü edilen elektrik akımı ile süratli ısıtma yönteminde malzeme sıcaklığının kontrolü kızıl ötesi (temassız) sıcaklık ölçüm cihazları ile gerçekleştirilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken ısıtma işleminin diğer yöntemlere göre çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Dolayısıyla bu hızlı sıcaklık değişimine cevap verecek bir sıcaklık kontrolünün seçilmesi gerekir. Gerekli olduğu takdirde malzeme üzerinden geçen akım şiddetinin kapalı devre kontrolü yoluna gidilebilir. Sıcaklık ölçümü kızıl ötesi cihazlarıyla yapıldığı zaman emissivite değerinin doğru tespit edilmesi gerekmektedir.

2.4 Kaydırıcı Yağlar

Sugamata vd., 20-250°C sıcaklık aralığında 4 farklı alüminyum alaşımı sac malzemenin üniform sıcaklık şartları altında iki farklı yağlayıcı kullanılarak sınır çekme oranı tespit etmişlerdir (1987). Bu çalışmada önce yağlayıcıların sürtünme katsayıları yapılan deneylerle belirlenmiştir.

Grafit-gres (ağırlıkça %10, 0,5 µm taneli grafit silikon yağ içinde) ve PTFE film (0,1 mm) tipi iki yağlayıcı kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklardaki derin çekme işlemlerinde sac ile şekillendirme takımları arasındaki sürtünme katsayısının şekillendirme sıcaklığıyla değiştiği saptanmıştır. Deneylerde görülen, sürtünme katsayılarındaki değişim sınır çekme oranını doğrudan etkimektedir.

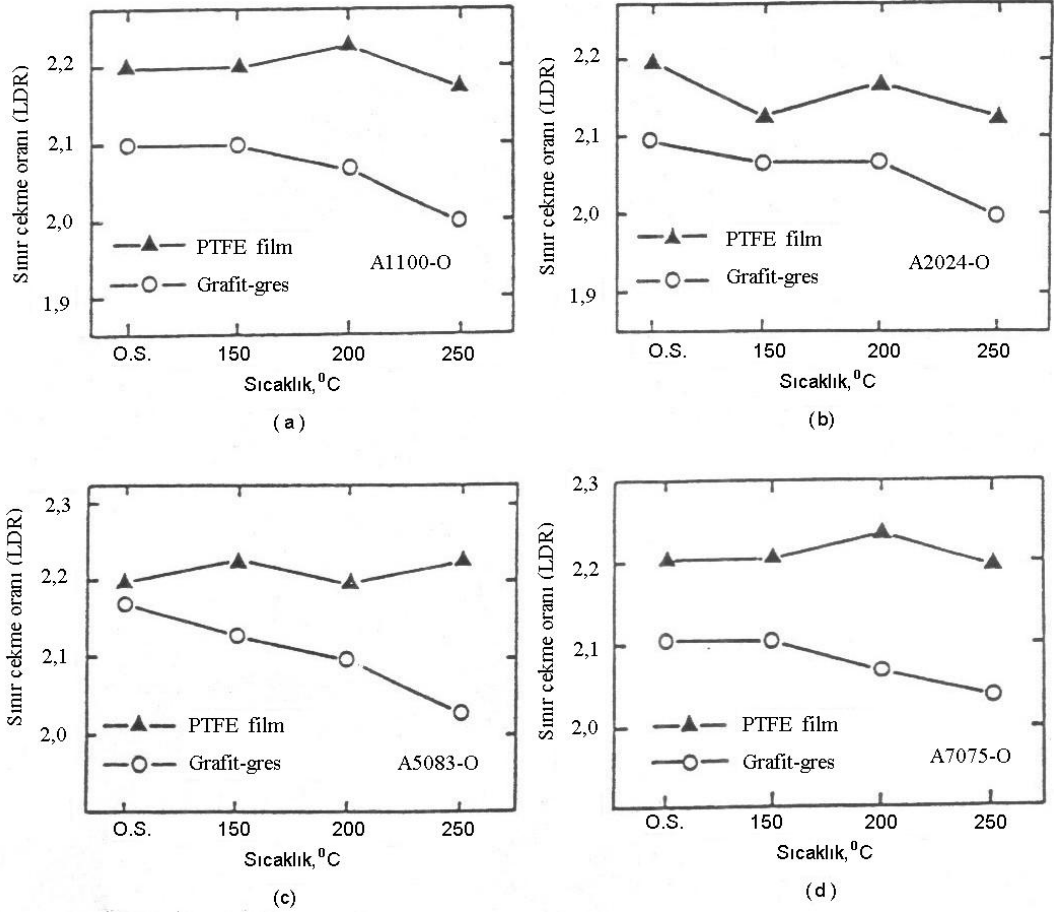
Sıcaklıkla sürtünme katsayısının değişimini tespit için yapılan deneylerde 2024 alüminyum alaşımı bloğu, çelik bloğun üzerinde 100 mm/dak hızla kaydırılmıştır (Sugamata vd., 1987). Deney öncesinde her iki blokta deney sıcaklığına ısıtılmış ve aynı yağlama tipi uygulanmıştır. Kontak bölgesindeki normal gerilme 1,25 MPa olarak tutulmuş ve sürtünme kuvveti yük hücreleriyle ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Tüm sıcaklıklarda PTFE film tabakası ile elde edilen sürtünme katsayılarıyla, grafit-gres yağlama tipinden elde edilen sürtünme katsayılarıyla karşılaştırıldığında PTFE film tabakasının daha düşük sürtünme katsayısı değerleri verdiği görülmüştür. Grafit-gres yağlayıcının sürtünme katsayısı 20 °C’den 150 °C’ye yalnız az miktarda artmakta ve 250 °C’ye kadar neredeyse hiç değişmemektedir. PTFE film tipi yağlayıcıda ise sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısı azalmaktadır. PTFE film tipi yağlayıcının grafit-gres tipine göre genelde üstün olduğu görülmektedir.



Şekil 2.6 Sürtünme katsayısının sıcaklık ile değişimi (Sugamata, 1987)

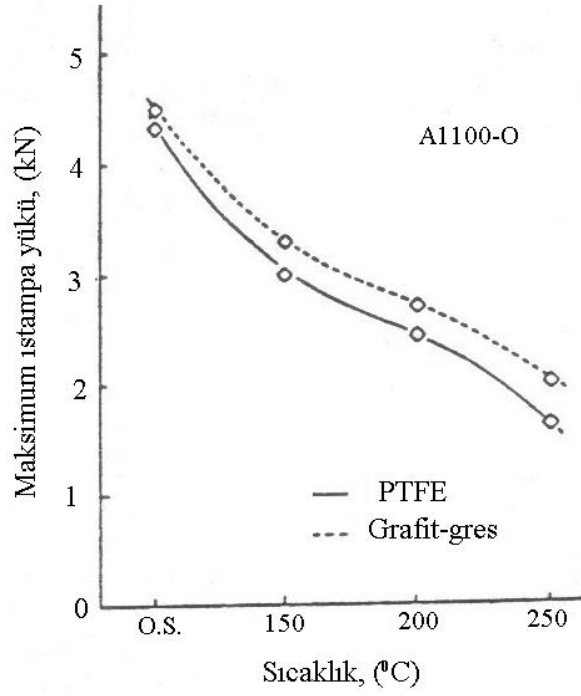
Aynı malzeme için farklı yağlama tiplerinde farklı sınır çekme oranları elde edilmiştir. Tüm deney sıcaklıklarında PTFE film tipi yağlama grafit-gres tipi yağlamaya göre daha büyük sınır çekme oranları vermiştir (Şekil 2.7). Sınır çekme oranı değerleri artan şekillendirme sıcaklığıyla grafit-gres yağlama tipinde azalmakta

fakat PTFE tipi yağlamada ise nerede ise sabit kalmaktadır. Bu durum, tüm malzemelerde sınır çekme oranı değişmesine rağmen çok az miktarda değişmektedir.



Şekil 2.7 Farklı sıcaklıklarda ve iki tip yağlayıcı kullanılarak elde edilen sınır çekme oranları (a) 1100-O, (b) 2024-O, (c) 5083-O ve (d) 7075-O, (Sugamata vd., 1987)

Azami ıstampa (çekme) yükü Şekil 2.8’de gösterilmektedir. En yüksek ıstampa yükleri grafit-gres yağlama tipinde görülmektedir. 20°C, oda sıcaklığındaki farklı yağlama tiplerinde yapılan deneylerde pres yükünde çok küçük farklar oluşmuştur fakat artan sıcaklıkla bu farkların büyüdüğü görülmüştür. Düşük sınır çekme oranı değerleri grafit-gres yağlama tipiyle bütün deney sıcaklıklarındaki yüksek sürtünme kuvvetlerinden dolayı elde edilmiştir. (Sugamata, 1987).



Şekil 2.8 İki tip yağlayıcı kullanılarak elde edilen maksimum ıstampa (çekme) yükü (Sugamata, 1987)

Yüksek sıcaklıklarda, alüminyum ve magnezyum alaşımlı sacların şekillendirilmesi üzerine yapılan bazı deneysel çalışmalarda ise spreyci boron nitrit tozu kullanıldığı görülmüş ve yağlayıcının yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi için sac malzeme üzerine uygulamadan sonra bir kurutma işleminden geçmiş olduğu belirtilmiştir. Grafit gibi yüzeysel kusurlara yol açmaz ve suyla yıkanarak kolaylıkla yüzeyden ayrılabilir (Li ve Ghosh, 2003-C).

Daha yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere yaptığımız bir araştırmaya göre Molykote ticari adlı yağlayıcı grubunda -20 ila 1150°C sıcaklık aralığında kullanılmak üzere geliştirilmiş iki tip yağlayıcı tespit edilmiştir. Özellikle sıcak şekillendirmede kullanılan bu yağlardan biri HTF kodlu mineral yağ içerisinde katı yağlayıcı çözelti ve diğeri ise HTP katı yağlayıcı pastadır.

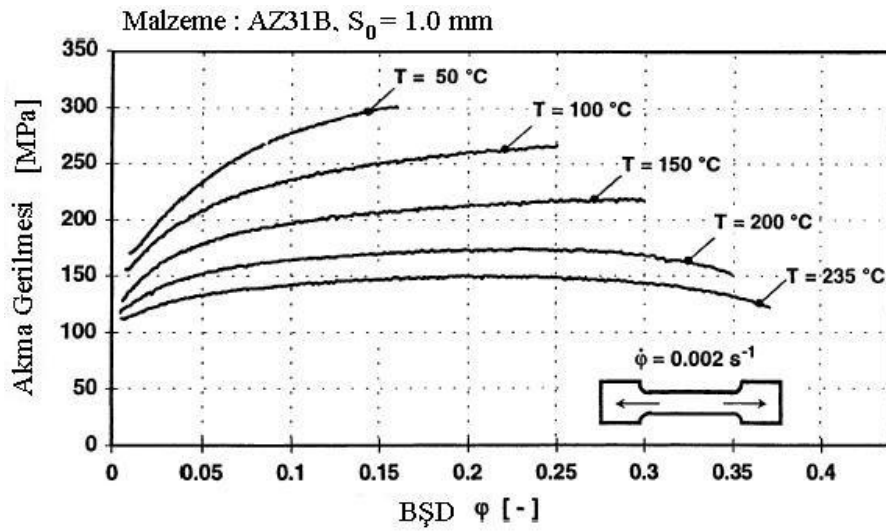
3 ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ BELİRLEYEN UNSURLAR VE SICAKLIĞIN BU UNSURLARA ETKİSİ

İmalat açısından sacların en önemli malzeme özellikleri dayanımları ve şekillendirilebilirlikleri olmakla birlikte, genelde daha çok şekillendirilebilirlikleri üzerinde durulur. Normal koşullar söz konusu olduğunda, sacların şekillendirilebilirliklerinin belirlenmesinde tek yönlü çekme deneyi etkin bir şekilde kullanılabilir. Ancak yarı-sıcak ve sıcak şekillendirmede işlemi modelleyebilecek tarz deneylerin yapılması daha uygun bir yöntem olacaktır. Her durumda, sonuçlar malzemedan 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, üniform uzama miktarı, plastik deformasyon oranı, yöne bağlı anizotropi, pekleşme üsteli, şekillendirme hızı, kimyasal bileşim, soğuk/sıcak haddeleme, termo-mekanik geçmiş şeklinde sıralanabilir. Yüksek sıcaklıklarda yukarıda verilenlere ek olarak; birim şekil değişim hızı duyarlılık üsteli önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar (**Marciniak ve Duncan, 1992**).

Bu bölümde, şekillendirilebilirliği belirleyen unsurlar ve sıcaklığın bu unsurlar üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenecektir. Bu unsurlar arasında akma mukavemeti, pekleşme üsteli (n) birim şekil değişim hızı duyarlılık üsteli (m , strain rate sensitivity index), toplam uzama, üniform uzama ve büzülme sonrası uzama, kristal kafes yapısı, malzeme bileşimi, hasar şekli, deformasyon geçmişi, kalıp profil yarıçapı ve sınır çekme oranı (LDR), ıstampanın yer değişimi (hareketi) ve parça derinliği, sac malzemenin kalınlık dağılımı, tavşan kulağı oluşumu, baskı plakası kuvveti, Lüder bantları ve sıcaklık dağılımının etkisi gibi malzeme, süreç, işlem, kalıp ve çevre parametreleri ele alınacaktır.

3.1 Akma Eğrisi

Şekil 3.1, gerçekleştirilmiş tek eksenli çekme deneyleri sonucu, AZ31B alaşımı magnezyum sacın değişik sıcaklıklardaki akma eğrilerini göstermektedir. Gerilme ve BŞD'lerinin işlem sıcaklığına büyük oranda bağlı olduğu açıktır. Sabit BŞD hızında, akma eğrisinin artan sıcaklıkla aşağı yönde kaydığı (yani gerilme değerlerinin azaldığını) ve buna karşı toplam uzama miktarının da arttığı görülmektedir. 200°C üzerindeki sıcaklıklarda akma gerilmesinin düşmesi sıcaklığa bağlı gevşemeden kaynaklanır (Doege ve Dröder, 2001; Doege ve Kurz, 2001).

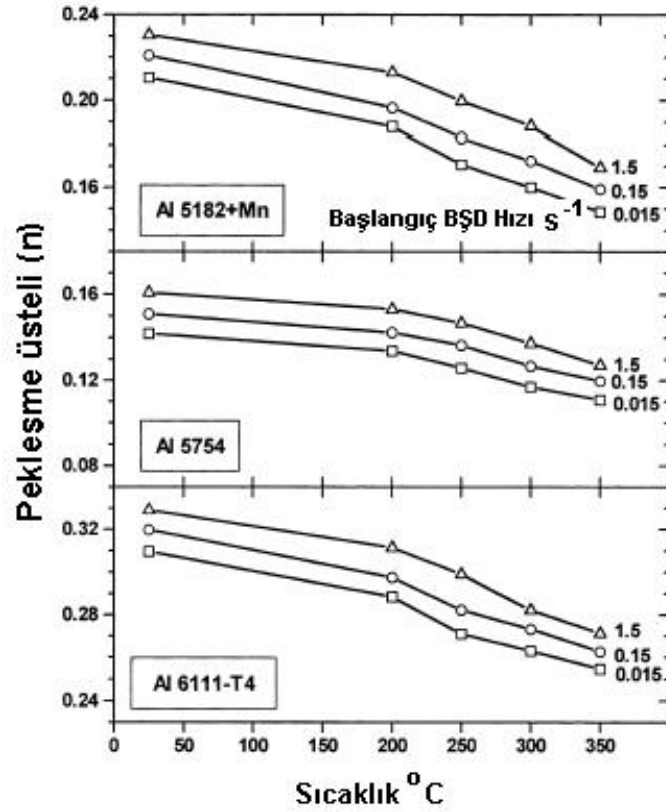


Şekil 3.1 Sıcaklığa bağlı olarak 1 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımlı sacın çekme deneyi ile belirlenmiş akma eğrileri (Doege ve Dröder, 2001)

3.2 Pekleşme Üsteli (n)

Şekil 3.2, n değerlerini sıcaklığın ve çeşitli şekillendirme hızlarının fonksiyonu olarak göstermektedir. Sabit şekillendirme hızı için sıcaklık artarken pekleşme üstelinin (n) azaldığını ve sabit sıcaklık için arttan şekillendirme hızı için pekleşme üsteli (n) arttığı görülmektedir. Burada n değerlerini karşılaştırsak yaşlandırılarak sertleşebilen 6111-T4 alüminyum alaşımının diğer pekleşerek sertleşen iki 5000 serisi alüminyumlara göre daha yüksek pekleşebilme kapasitesine sahip olduğu görülür (Li and Ghosh, 2003-A).

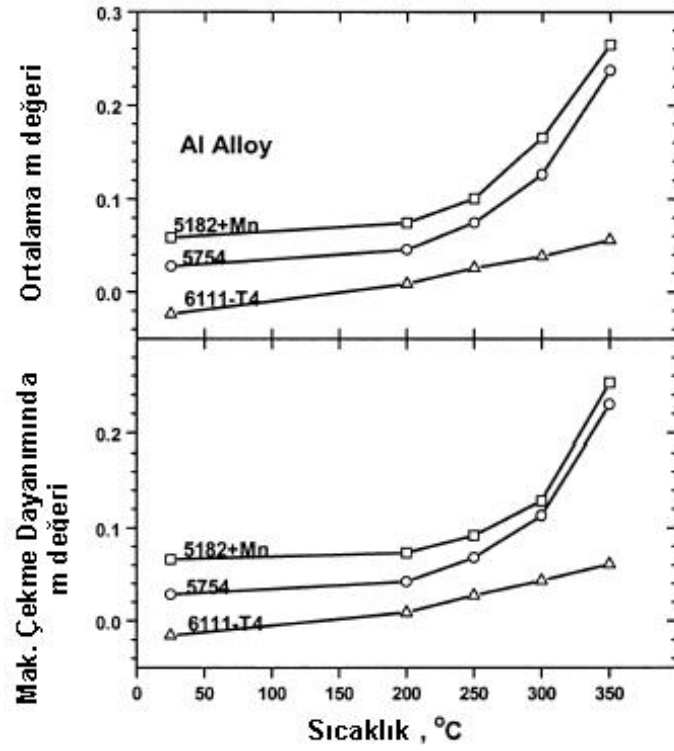
Şekil 3.2'deki n değerlerinin tespiti için iki eksenli de logaritmik ölçek olan gerçek gerilme – gerçek BŞD değerleri kullanılmıştır. Bu analiz, gerilme – BŞD – BŞD hızı ilişkisini içeren “ $\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$ ” modeli göz önünde bulundurularak yapılmıştır.



Şekil 3.2 Çeşitli sıcaklık ve şekillendirme hızlarında Al alaşımları için tek eksenli çekme deneylerinden elde edilmiş pekleşme üsteli değerleri (Li ve Ghosh, 2003-A)

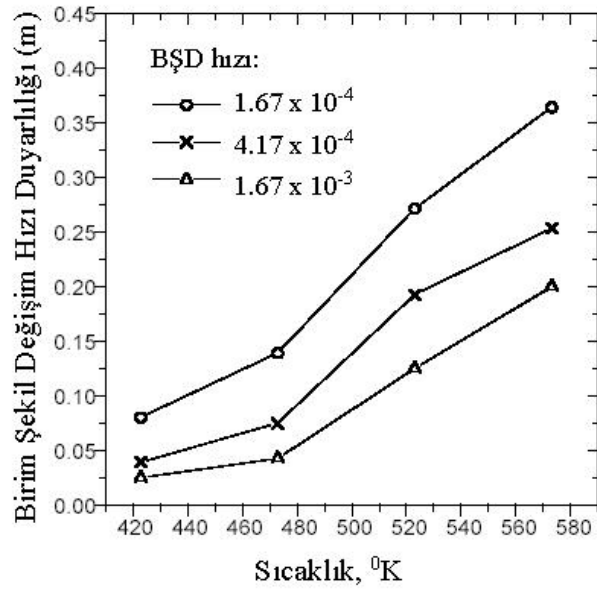
3.3 Birim Şekil Değişim Hızı Duyarlılık Üsteli (m)

Deformasyon hızı duyarlılık üsteli (m) sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Özellikle 5xxx Al alaşımları için 200 °C sıcaklıkta m'in artışı önemli bir değer almaktadır. Birim şekil değişimi seviyesiyle m'in değişimi ve sıcaklığın değişimiyle m'in değişimini mukayese edersek birim şekil değişimi ile m'in değişiminin o kadar büyük olmadığını görürüz. Sıcaklığın etkisini gösterebilmek için Şekil 3.3'de çeşitli sıcaklıklara karşılık değişik birim şekil değiştirme miktarlarına karşılık gelen m değerlerinin ortalaması gösterilmiştir. Maksimum çekme dayanımı noktası üniform şekil değişiminden lokal şekil değişimine geçişi temsil ettiği için, bu noktada akma gerilmelerinin birim şekil değişim hızına nasıl tepki gösterdiğini bilmek önemlidir. Şekil 3.3'de ortalama m değerleri ile birlikte maksimum çekme dayanımı sırasındaki m değerleri de gösterilmektedir (Li and Ghosh, 2003-A).



Şekil 3.3 Birim şekil değişim hızı duyarlılık üstelinin sıcaklık ile değişimi (Li ve Ghosh, 2003-A)

Şekillendirme hızı duyarlılık üstelinin artması yüksek sıcaklıklarda şekillendirilebilirliği arttıran etkin bir faktördür. Şekil 3.4, sıcaklığın yükselmesiyle şekillendirme hızı duyarlılık üstelinin arttığını, fakat yüksek sıcaklıklarda şekillendirme hızının arttırılmasıyla azaldığını göstermektedir (Li vd., 2003).

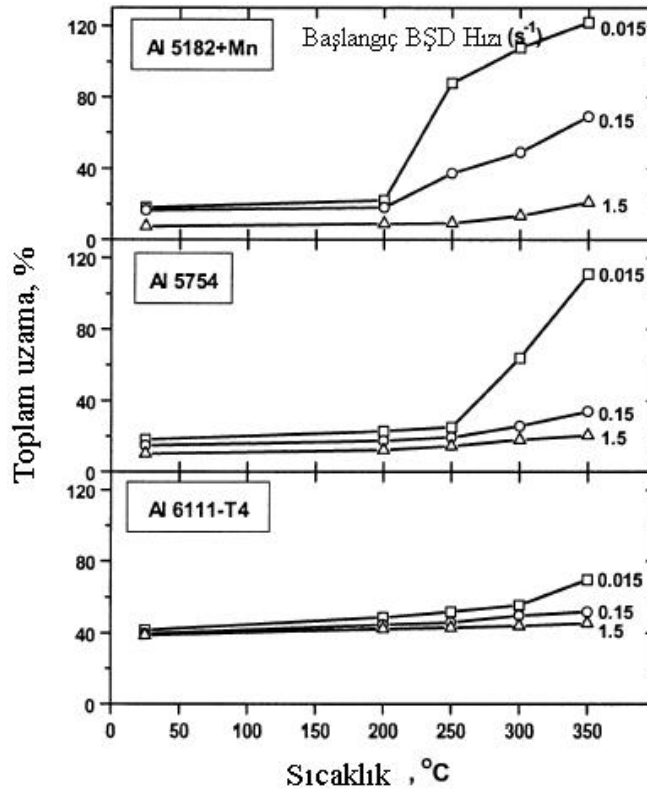


Şekil 3.4 Al-6Mg alaşımı için birim şekil değişim hızı duyarlılık üstelinin, sıcaklık ve şekillendirme hızı ile değişimi (Li vd., 2003)

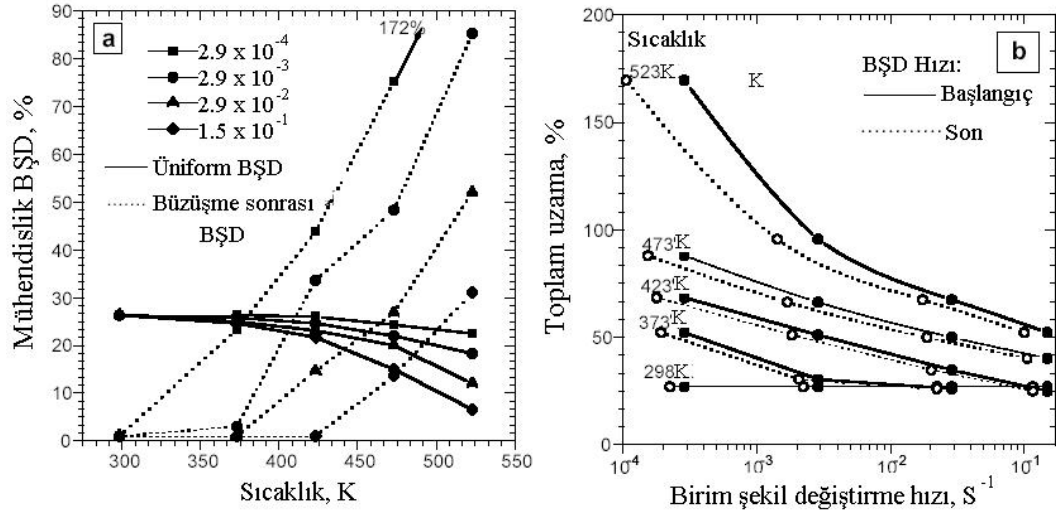
3.4 Toplam Uzama, Üniform Uzama, Büzülme Sonrası Uzama ve Şekillendirme Sınır Diyagramı

Şekil 3.5, üç değişik alüminyum alaşımı için çeşitli test sıcaklıkları ve değişik birim şekil değiştirme hızları için toplam uzama miktarının nasıl değiştiğini göstermektedir. Toplam uzama genellikle sıcaklığın artırılması ile artmakta fakat deformasyon hızının artırılması ile azalmaktadır. Burada toplam uzamanın 250°C’ta önemli miktarda artmış olduğunu görmekteyiz. Şekil 3.5’da pekleşme özelliği olan Al 5182+Mn ve Al 5754 alaşımının, çökelti sertleşme özelliği olan Al 6111-T4’ye göre sıcaktan daha fazla etkilendiğini görmekteyiz (Li and Ghosh, 2003-A).

Şekil 3.6a’da açık olarak sıcaklığın artmasıyla büzülme (boyun verme) sonrası şekil değişiminin artmakta, ancak üniform şekil değişiminin azalmakta olduğu ve şekillendirme hızının azalmasıyla artmakta olduğu gösterilmektedir. 373 K ve daha yüksek sıcaklıklarda, büzülme sonrası şekildeğişiminin daha baskın olmasıyla çeşitli hızlarda toplam uzama miktarında artış görülmüştür. Sıcaklığın artması ve şekillendirilme hızının azalmasıyla toplam uzamanın artması şeklinde bir kanı vardır fakat buna karşılık sıcaklığın artmasıyla üniform uzama azalmaktadır.

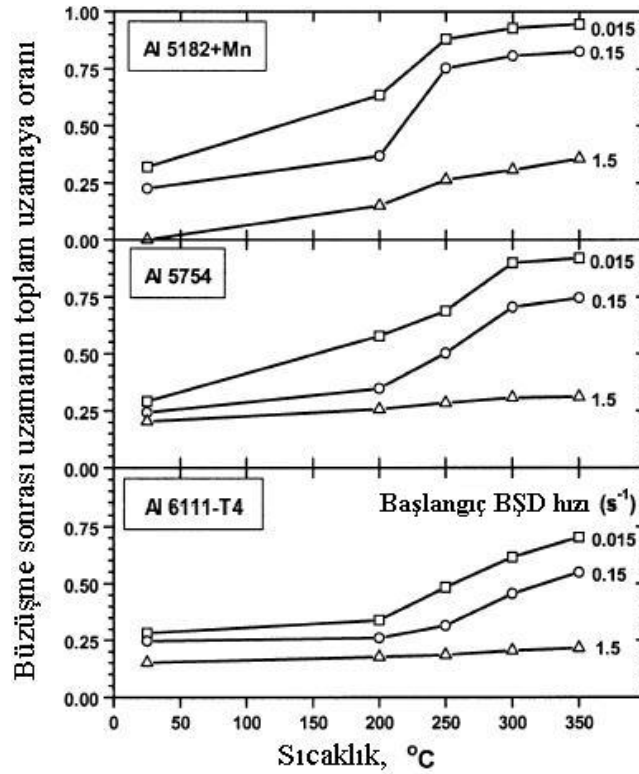


Şekil 3.5 Tipik BŞD hızlarında toplam çekme uzamasının sıcaklığa bağlı değişimi (Li ve Ghosh, 2003, B; Li vd., D)



Şekil 3.6 (a) Üniform ve büzülme sonrası BŞD'nin sıcaklık ve şekillendirme hızı ile değişimi (b) 5182-O alaşımı için toplam uzamanın sıcaklık ve şekillendirme hızı ile değişimi (Li ve Ghosh, 2003-A)

Büzülme sonrası uzamanın toplam uzama içindeki yerini belirtmek için maksimum çekme dayanımı değerinden sonra gerçekleşen bu üniform olmayan uzama miktarının toplam uzamaya oranı hesaplanmıştır ve Şekil 3.7'de bu oranın sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir. İncelen üç alüminyum alaşımı içinde bu oranın artan sıcaklık ile arttığı fakat arttan birim şekil değiştirme hızı ile azaldığı görülmüştür.

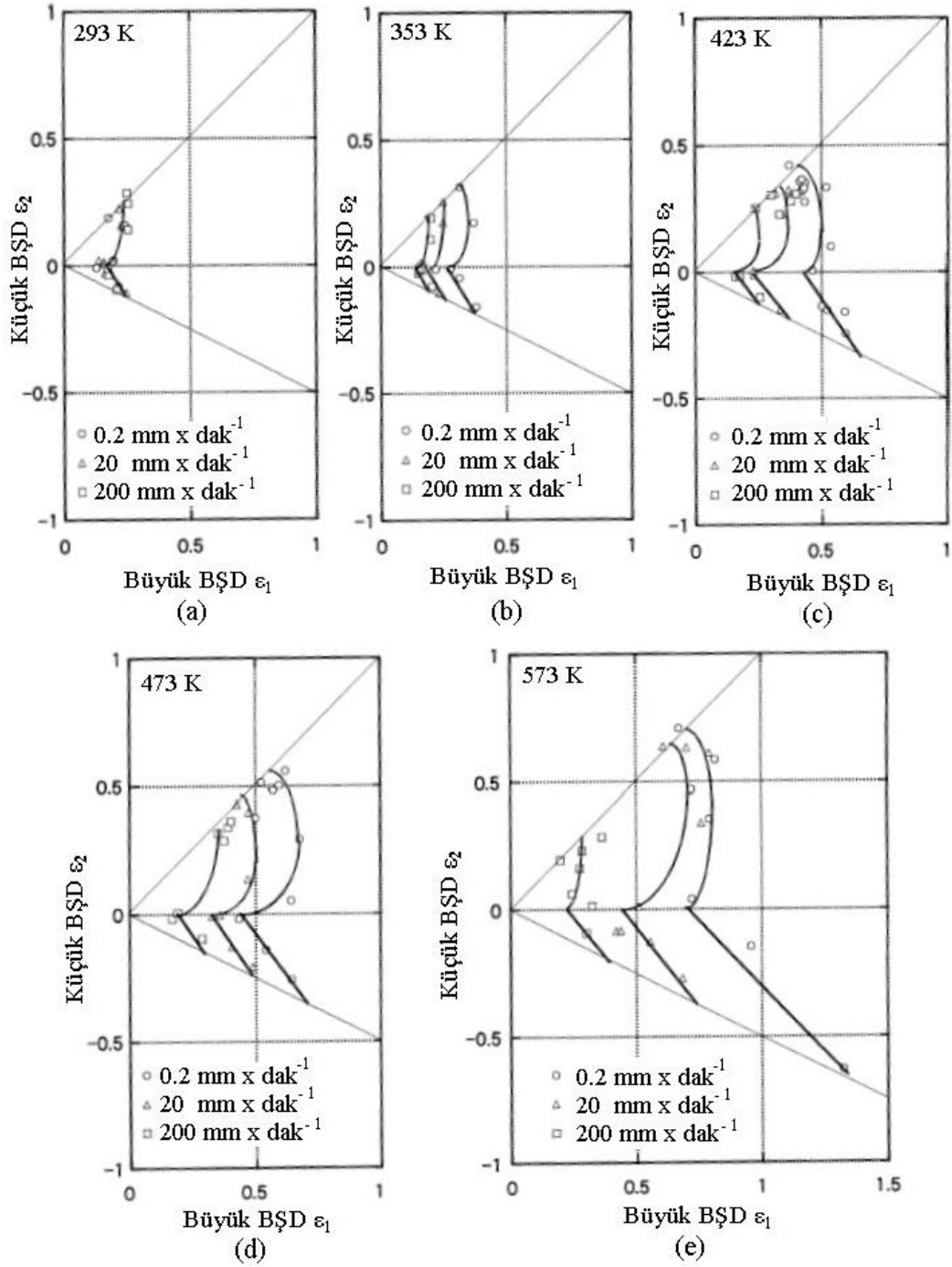


Şekil 3.7 Çeşitli BŞD hızları ve çeşitli sıcaklıklarda tek eksenli çekme deneyi ile belirlenen büzülme sonrası uzamanın toplam uzamaya oranı (Ghosh, 2003-A)

Sacın hasara uğramadan önceki yerel yüzey birim şekil değişim kombinasyonları yada şekillendirme sınırı şekillendirilebilirliğin diğer bir ölçüsüdür. Bu açıdan kullanılan şekillendirme sınır diyagramları (FLD), şekillendirme işlemi öncesinde sac malzeme üzerine “genellikle elektrokimyasal olarak” işlenen gridlerin ölçümü ile elde edilen asal gerilmeler doğrultusunda tanımlanır. Şekillendirme sınır diyagramları birim şekil değişimi miktarına göre birim şekil değişimi alanını boyun verme ve kırılmanın olduğu yada olmadığı şeklinde parçalara (bölümlere) ayırır (**Li ve Ghosh, 2003-B**).

Şekil 3.8(a-e) üç değişik ıstampa hızı (0,20, 20, 200 mm/dak) için 293, 353, 423, 473, 573 K sıcaklıklarında elde edilmiş şekillendirme sınır diyagramlarını (FLD) göstermektedir. En yüksek ıstampa hızı olan 200 mm/dak’ta şekillendirme sınır diyagramları (FLD) tüm sıcaklıklar için oda sıcaklığındaki sonuçlara benzerlik (yakınlık) göstermektedir. İstampa hızının şekillendirme sınır diyagramı üzerindeki etkisi sıcaklığın artması ile çok daha fazla artmaktadır.

573 K’de ve düşük şekillendirme hızında şekillendirilebilirlikteki artışın nedeni malzemenin yüksek birim şekil değiştirme hızı üstelidir, fakat 473 K’nin altındaki sıcaklıklarda, şekillendirilebilirlik kuvvetli bir biçimde pekleşme üstelinden etkilenmektedir (**Naka vd., 2001**).



Şekil 3.8 5083-O Al-Mg alaşımı için çeşitli sıcaklıklarda ve şekillendirme hızlarında elde edilmiş şekillendirme sınır diyagramı (Naka vd., 2001)

3.5 Kristal Kafes Yapısı

Magnezyum ve titanyum sacların oda sıcaklığında alüminyum ve çeliğe nazaran düşük şekillendirilebilirliğinin nedeni deformasyon için gerekli olan kayma sistemi sayısını azaltan hegzagonal kristal kafes yapısı ve düşük ikizlenme mekanizmasına sahip olmasıdır. Sıcaklığın artırılması aktif kayma sistemi sayısını arttırdığından

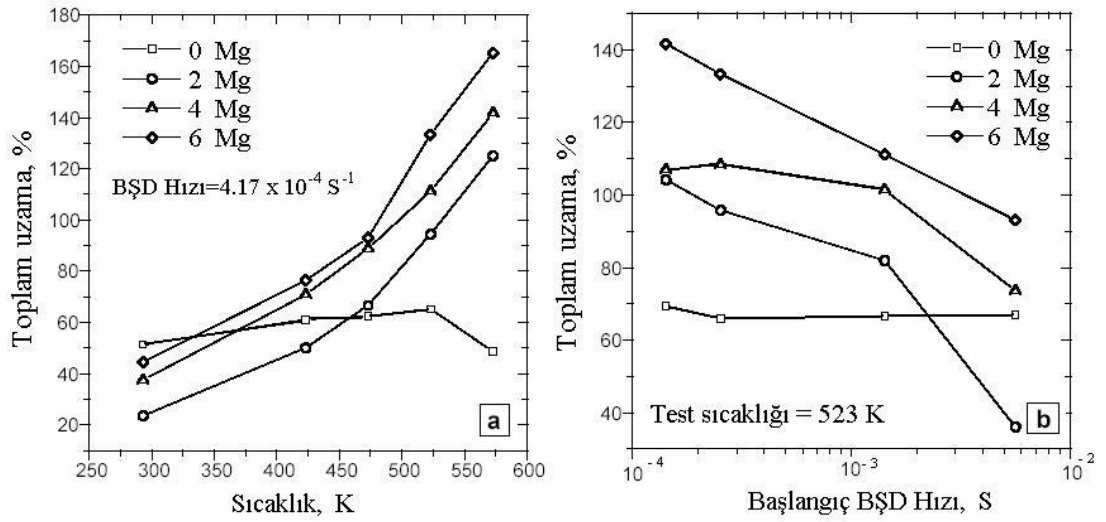
plastik şekillendirilebilme kabiliyetinde etkin bir artış sağlanır (Tablo 3.1). Dikkate değer bir seviyede şekillendirilebilme artışı sağlamak için sıcaklığın arttırılması gerekmektedir. Magnezyum alaşımlarında ideal şekillendirme sıcaklığı, alaşımlama elementlerine ve miktarına bağlı olarak, 200-225°C arasındadır. Sıcaklığın bu etkisi, hegzagonal yapılarda piramit kayma düzlemlerinin ısıyla aktivasyonu ile açıklanır (Doege ve Dröder, 2001; Liu ve Chou, 2000).

Tablo 3.1 Değişik sıcaklıklarda gözlenen kayma sistemleri (Liu ve Chou,2000)

RT	200°C	400°C
$\{01\bar{1}0\}$	$(01\bar{1}0)[0001]$	
$\{01\bar{1}1\}$	$(1\bar{1}01)[01\bar{1}1]$	$(01\bar{1}1)[1\bar{2}1\bar{3}]$
	$(01\bar{1}1)[01\bar{1}2]$	$(01\bar{1}1)[01\bar{1}2]$
		$(1\bar{1}01)[1\bar{2}1\bar{3}]$
$\{01\bar{1}2\}$		$(01\bar{1}2)[01\bar{1}1]$
$\{11\bar{2}0\}$	$(11\bar{2}0)[0001]$	$(21\bar{1}0)[0001]$
		$(1\bar{2}10)[0001]$
		$(21\bar{1}0)[01\bar{1}1]$
$\{11\bar{2}1\}$	$(11\bar{2}1)[1\bar{2}1\bar{3}]$	
$\{11\bar{2}2\}$	$(1\bar{2}12)[1\bar{2}1\bar{3}]$	

3.6 Malzeme Bileşimi

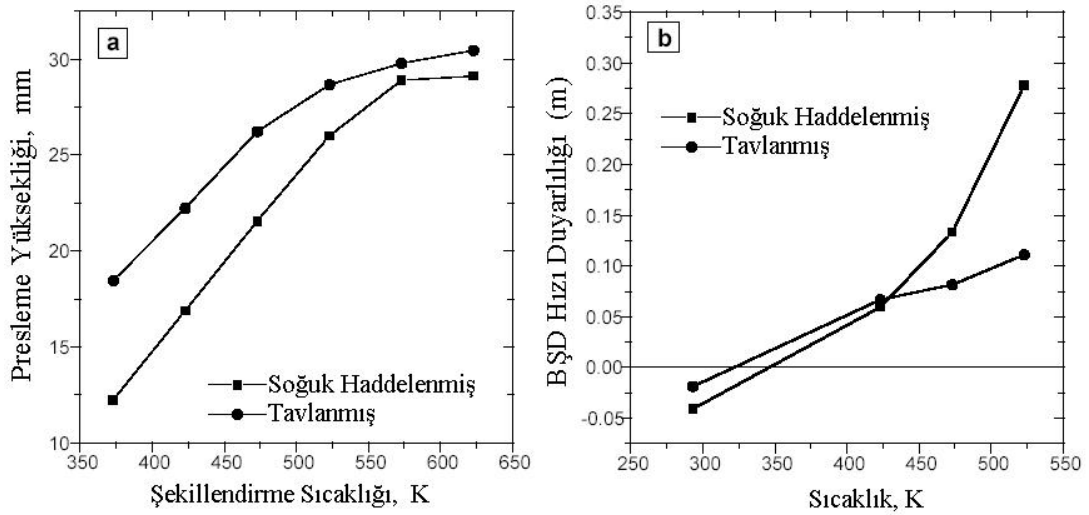
Bir alaşımın kimyasal bileşimi onun termodinamik karakterini belirler (faz dönüşümleri, kristal yapısı gibi). Ayrıca alaşımların kimyasal bileşimleri, malzemenin çökelme sertleşmesine ya da sadece pekleşmeye tabi olabileceğini belirler ki bu iki kategori yarı-sıcak şekillendirmeye karşı farklı cevaplar gösterir. Şekil 3.9’de Al-Mg alaşımları için elde edilen tipik sonuçlar gösterilmektedir (Li vd., 2003).



Şekil 3.9 (a) Toplam uzama miktarının, Mg katkısı ve sıcaklık ile değişimi (b) Mg katkısının ve başlangıç BŞD hızının toplam uzama üzerindeki etkisi (Li vd., 2003)

3.7 Deformasyon Geçmişi

Çoğu durumda; önceden gerçekleştirilmiş soğuk şekillendirme işlemleri, alüminyum alaşımlarının yarı-sıcak şekillendirilebilirliği azaltmaktadır (Li vd., 2003). Gerçekleştirilen deneylerde, çekme deneyinden önce soğuk haddelenmiş alüminyum alaşımlı saclarının 523 K gibi yarı-sıcak şekillendirme sıcaklıklarına kadar uzama miktarlarının azaldığını buna karşın daha yüksek sıcaklıklarda az miktarda arttığını göstermişlerdir. 5083 alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirlikleri üzerine yapılan çalışmalarında, soğuk haddelenmiş alaşımların yüksek sıcaklıklarda birim şekil değişim hızı duyarlılık üstelini arttırmasına rağmen soğuk haddelenmiş alaşımların sınır bombe yükseklikleri (limiting dome height) bu alaşımların 623 K'de tavllanmış olanlarından daha düşük değerler vermektedir (Şekil 3.10 a).



Şekil 3.10 Soğuk haddelenmiş ve tavllanmış 5083 alüminyum alaşımının sıcaklık değişimi ile (a) sınır bombe yüksekliği ve (b) B&S hızı duyarlılık üstelinin değişimi (Li vd., 2003)

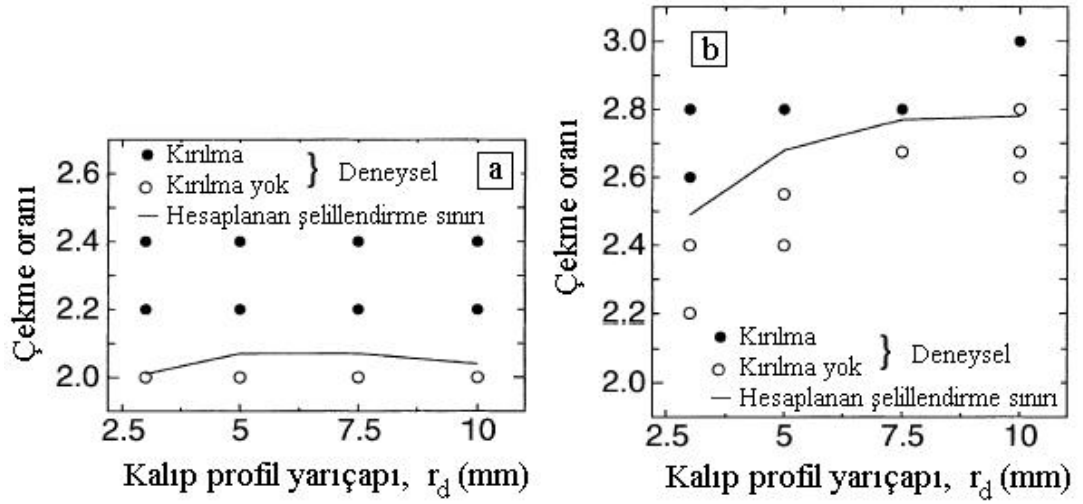
3.8 Kalıp Profil Yarıçapı ve Sınır Çekme Oranı (DR)

Eksenel simetrik (silindirik) kap derin çekme işleminde sınır çekme oranı (LDR: limiting draw ratio) aşağıdaki formül ile tanımlanmaktadır:

$$LDR = d_o / d_p$$

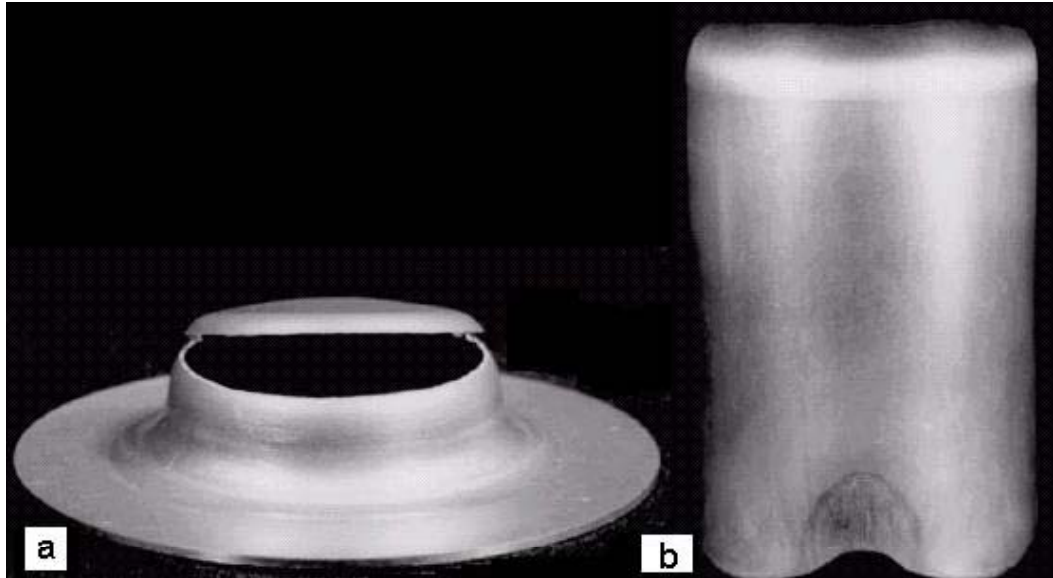
Sayısal ve deneysel sonuçlar göstermektedir ki yarı-sıcak derin çekmede sınır çekme oranı kalıp profil (burun) yarıçapıyla artmaktadır.

Şekil 3.11’de sırasıyla (a) oda sıcaklığında ve (b) 250°C’de derin çekmeler için, kalıp profil yarıçaplarının şekillendirilebilme sınırlarına etkisini 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. Sürekli çizgi ise sonlu elemanlar analizi sonucunda belirlenen sınır çekme oranlarını belirtmektedir. Oda sıcaklığında çekme durumunda, şekillendirilebilme sınırı ıstampa köşelerindeki hasara bağlıdır ve çekme oranı sınırı, neredeyse kalıp profil yarıçapından bağımsız olarak, 2.1 gibi düşük bir değerdedir. yarı-sıcak 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.



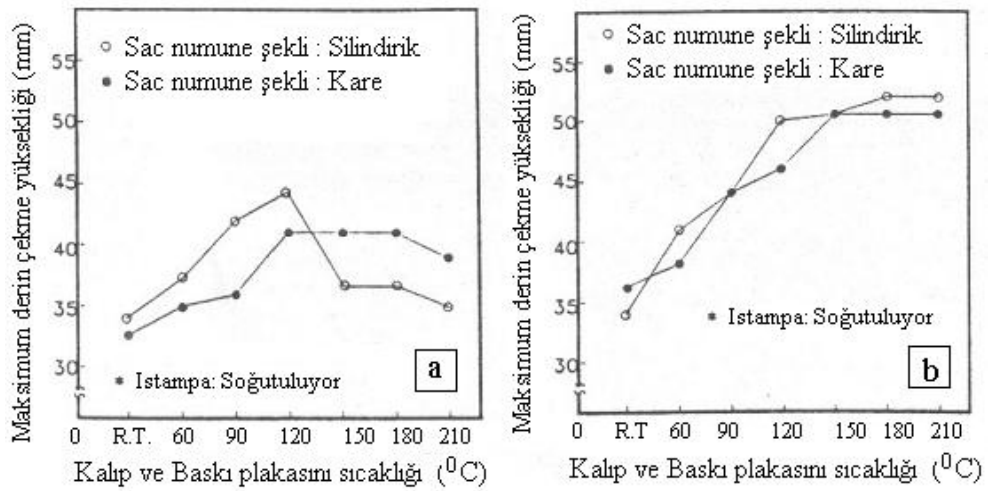
Şekil 3.11 Derin çekmede şekillendirme sınırı (çekme oranı) (a) Oda sıcaklığında (b) 250 °C’de (Takuda vd., 2002)

Şekil 3.12a, kalıp profil yarıçapı, r_d , 7.5 mm olan bir durumda oda sıcaklığında derin çekme sonrası parçanın şeklini göstermektedir. Resimden görüldüğü üzere hasar ıstampa köşelerinin çevresindeki bölgelerde meydana gelmektedir. Oda sıcaklığında derin çekme için çekme oranı limiti 2.4’ten daha düşüktür. Şekil 3.12b, 250°C’de yarı-sıcak 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 (Takuda vd., 2002).



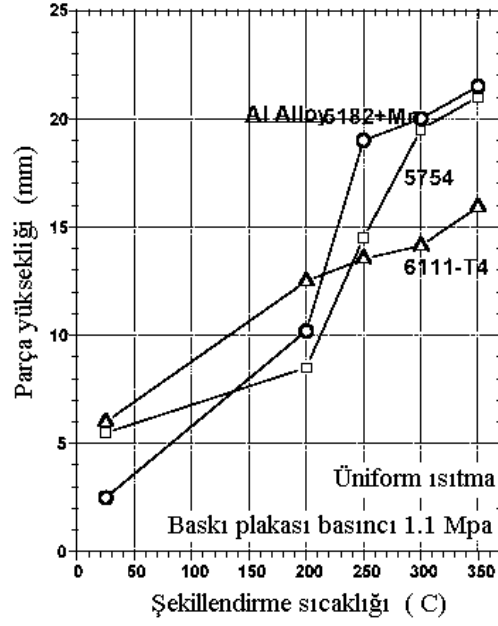
Şekil 3.12 Kalıp profil yarıçapı, r_d , 7.5 mm olan bir durumda; a) Oda sıcaklığında derin çekme sonrası parçanın şekli ($DR < 2.4$) ve b) 250 °C’de yarı-sıcak derin çekme durumunda işlem sonrası parça şekli ($DR = 2.68$) (Takuda vd., 2002)

Şekil 3.13a’da maksimum çekme yüksekliği kranklı preslerde 120°C civarında gerçekleşmekte ve daha yüksek sıcaklıklarda ise azalmaktadır, ancak Şekil 3.13 b’ de hidrolik presler için böyle bir eğilim (azalma) görülmemektedir. Bu şekillerden, yarı-sıcak derin çekme ile elde edilen yüksekliğin kranklı preslerde 45 mm ($H/r_d = 9$ boyutsuz yükseklik olarak ifade edilirse) iken hidrolik preslerde 53 mm ($H/r_d = 10,6$) olduğu görülebilir fakat bu değer oda sıcaklığında ise ancak $H/r_d = 6,2$ seviyesinde kalmaktadır. Burada r_d , derin çekme işleminde kullanılan kalıbın köşe ve kenar yarıçapıdır ve test için kullanılan malzeme ANSI 304 paslanmaz çeliğidir (Kim vd., 1996).



Şekil 3.13 Kalıp elemanlarının sıcaklığının değişimi ve iki ayrı pres çeşidi kullanılarak elde edilmiş maksimum çekme derinliği değişimlerinin karşılaştırılması
(a) Kranklı pres (b) Hidrolik pres (Kim vd., 1996)

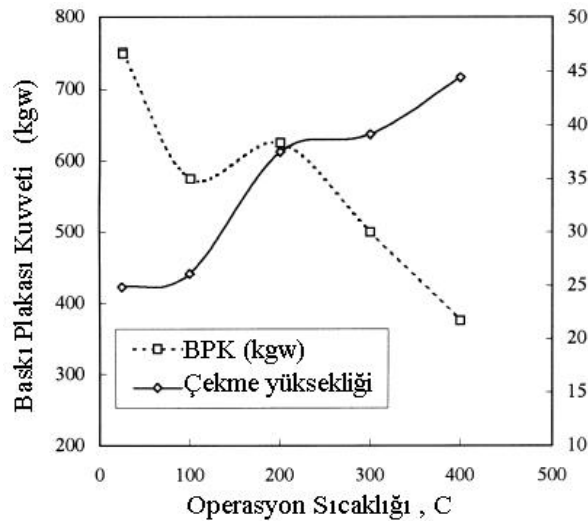
Şekillendirilebilirliğin önemli bir ölçüsü maksimum yükte ıstampanın hareketi (maksimum parça derinliği)dir. Şekil 3.14’de üç alüminyum alaşımının sıcaklığın değişimi ile şekillendirilen parça derinliğindeki değişim gösterilmektedir. Şekilde gösterilen sonuçlar, ıstampa ve kalıbın aynı sıcaklığa ısıtıldığı izotermal sıcaklık şartlarında elde edilmiştir (Li ve Ghosh, 2003-B).



Şekil 3.14 İzotermal ısıtma (kalıp ve ıstampanın sıcaklığı eşit) şartlarında elde edilmiş parça derinlikleri (Li ve Ghosh, A)

3.9 Baskı Plakası Kuvvetinin Etkisi

Uygun baskı plakası kuvveti sınır çekme oranına ulaşmaya yardımcı olur ve sıcaklığın artmasıyla gerekli kuvvet azalır. Şekil 3.15’de çeşitli işlem sıcaklıkları için en iyi baskı plakası kuvvetini göstermektedir. Sıcaklığın artması ile pekleşme azalır ve büyük baskı plakası kuvvetleri kabın kırılma süresini öne alır. Sınır çekme yüksekliğine ulaşmak ve kırışmayı engellemek için düşük sıcaklıklarda baskı plakası basıncının arttırılması gerekmektedir (Liu ve Chou, 2000).



Şekil 3.15 Derin çekilmiş kapların değişik sıcaklıklarda ve bu sıcaklıklara karşılık gelen en iyi BPK’lerinde elde edilmiş kap yükseklikleri (Liu ve Chou, 2000)

25°C			
	500kgw	650kgw	750kgw
100°C			
	500kgw	575kgw	750kgw
200°C			
	500kgw	575kgw	625kgw
300°C			
	1000kgw(A)	250kgw	500kgw
400°C			
	250kgw	375kgw	375kgw

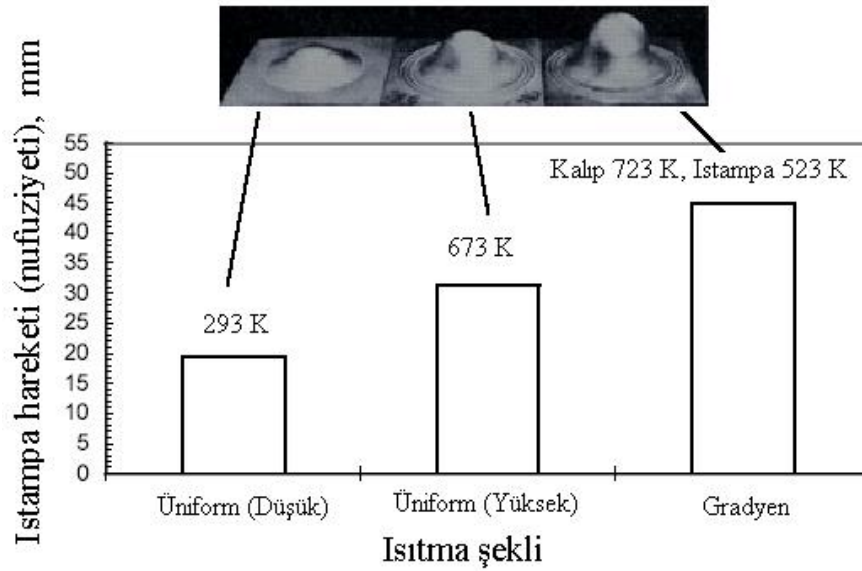
Şekil 3.16 Sıcaklık ve baskı plakası kuvvetinin değişimi ile derin çekilmiş kapların görüntüsündeki değişim (Liu ve Chou, 2000)

3.10 Sıcaklık Dağılımının Etkisi

Pratikte yarı-sıcak sac şekillendirme işlemlerinde, kalıp ve ıstampanın birlikte ısıtılması ya da sıcaklıklarının aynı seviyede tutulması pek yaygın değildir. Aksine, kalıp ve ıstampa farklı şekillerde (farklı sıcaklıklara) ısıtır ve böylece sıcaklık değişimi sayesinde, şekillendirilen parça üzerindeki birim şekil değişimi dağılımı kontrol edilebilir. İlk (eski) araştırmacılar, soğuk kalıp ve sıcak sacın kullanıldığı şekillendirme işlemlerinde kalıbın sac malzemedен ısı çekebileceğini ve şekillendirilebilirliğin azalabileceğini dikkate almışlardır ; fakat diğer araştırmacılar çökelti sertleştirme alaşımlarıyla gerçekleştirdikleri deneylerde soğuk kalıp ve yarı-sıcak (ılık) sac kullanarak da başarılı parçalarda üretmişlerdir (**Li vd.,2003-D**). Isı yalıtımını sağlamak için özel yağlayıcılar kullanılmışlardır. Prensip olarak, sac malzemenin üzerinde gerilme gradyeni oluşur, buna karşılık ta üniform şekillendirme gerçekleştirmek için ısıl gradyen kullanılmalıdır. Birçok araştırmacı, sıcak sac ve sac tutucuları ve oda sıcaklığında ıstampa ile gerçekleştirdikleri derin çekme

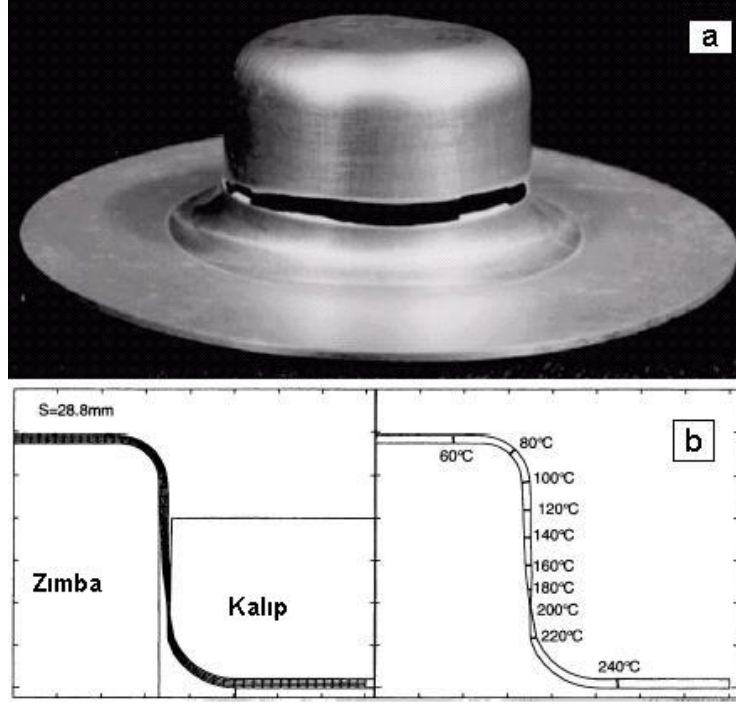
deneylerinde, şekillendirilen parça yüksekliğinde artma görmüşlerdir. Bu çalışmalar sonucunda sıcaklık gradyeninin, şekillendirilen parçanın cidar (yan) bölgesinin çabucak soğumasına yol açarak yük taşıma kapasitesinin artmasıyla daha yüksek derin çekme ürünlerinin elde edilmesine olanak sağladığı görülmüştür.

Düzgün sıcaklık dağılımı durumlarında derin çekme oranında önemli bir artış gözlenmemektedir. Ancak artan sıcaklık silindir yüksekliğini yani ıstampa strokunu artırır. Derin çekme oranının artırılabilmesi için kalıp veya ıstampa ile soğutma yapılmalıdır, yani sıcaklık gradyeni oluşturulmalıdır. Şekil 3.17’de ıstampa ve kalıp üzerindeki sıcaklık farklılığının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisi gösteriliyor ve deneyde A-4,4Cu-0,88Si-0,8Mn-0,4Mg alaşımlı sac malzeme, 50 mm çapında yarı küresel ıstampa üzerinde 0,083 mm/sn hızla gerilerek şekillendirilmiştir ve yağlayıcı olarak grafit kullanmıştır.



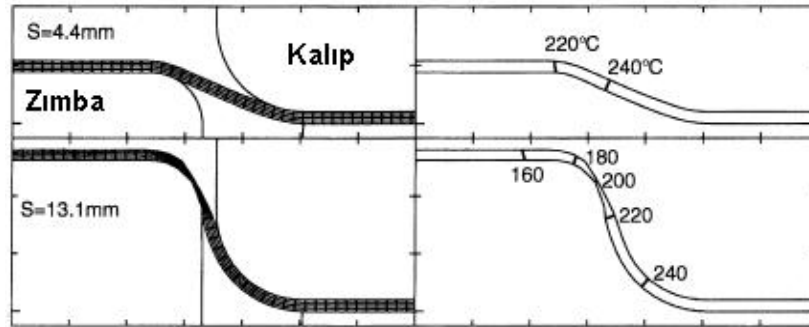
Şekil 3.17 Istampa ve kalıp sıcaklık dağılımının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisi (Li vd., 2003-D)

Şekil 3.18a, çekme oranının 2.8 olduğu durumda yarı-sıcak 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 3.18b’de gösterilen sonlu elemanlar analizi de aynı bölgede hasar oluşumunu öngörmektedir (Takuda vd., 2002).



Şekil 3.18 Yarı-sıcak derin çekme ($DR=2.8$ ve $r_d=7.5$ mm) a) Deney sonucunda oluşan hasar b) Simülasyon sonucunda tespit edilen hasar bölgesi ve sıcaklık dağılımı (Takuda vd., 2002)

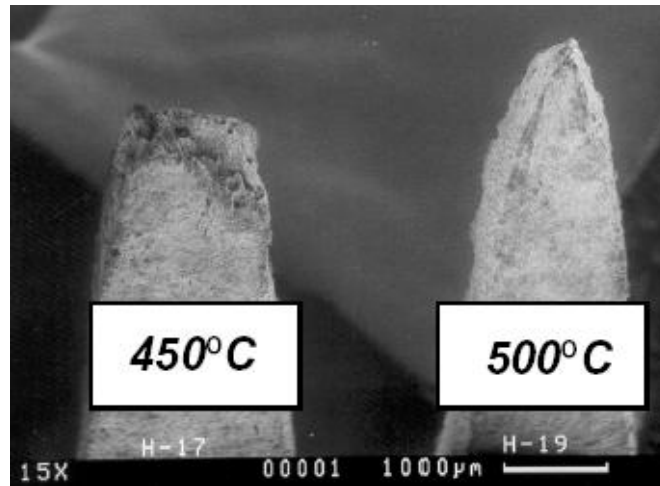
Elde edilen analitik ve deneysel sonuçlar göstermektedir ki, daha yüksek derin çekme oranı elde etmek için, sıcaklık gradyenleri uygulanarak sacda uygun –yeterli - seviyede bir akma gerilmesi dağılımı (değişimi) elde edilmelidir. Bu nedenle, ıstampa köşesindeki sac gerektiği ölçüde soğutulmalıdır. Istampası hızı çok yüksek tutulduğunda bu imkansız hale gelmektedir. Şekil 3.19, Şekil 3.18b ile aynı şartlarda yapılmış bir deneyin sonuçları gösterilmektedir, ancak ilk durumda 2.5 mm/sn olan ıstampa hızı 10 mm/sn'ye yükseltilmiştir. Bu durumda ıstampa köşelerindeki sac sıcaklığı hala yüksektir ve neticede boyun verme meydana gelir (Takuda vd., 2002).



Şekil 3.19 Yüksek ıstampa hızında (10 mm/sn) yarı-sıcak derin çekme durumunda ortaya çıkan ağ yapısı ve sıcaklık dağılımı (Takuda vd., 2002)

3.11 Hasar Şekli

Malzeme davranışları sıcaklıktan etkilenecek sonuç hasar üzerinde etkin rol oynar. Örneğin, 450°C’de ve 0,001 sn⁻¹ deformasyon hızında test edilen AZ31B-H24 çabucak hasara uğramaktadır. Malzeme hasara uğramaya bir başladığında, yük hızla sıfıra iner. Fakat 500°C’de ve 0,001 sn⁻¹ deformasyon hızında nihai kırılma daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu yavaş hasar oluşumu bize AZ31B-H24 malzemesinin yüksek sıcaklıklarda yük taşıma kapasitesinin sürdürdüğünü gösterir. Şekil 3.20 sıcaklık arttırıldığında kırılma yüzeyindeki oluşan hasar davranışı değişimini göstermektedir (Krajewski, 2001). AZ31B-H24 sac malzeme örneği yüksek sıcaklıklarda test edildiğinde boyun verme şeklinde hasara uğrarken, daha düşük sıcaklıklarda etkin hasar mekanizması boşluklar olmaktadır. Kırılma davranışı ile çekme uzaması arasındaki ilişki optimum sünekliğin, boşluk hasar mekanizması ile boyun verme hasar mekanizması arasındaki geçiş esnasında oluştuğunu gösteriyor.

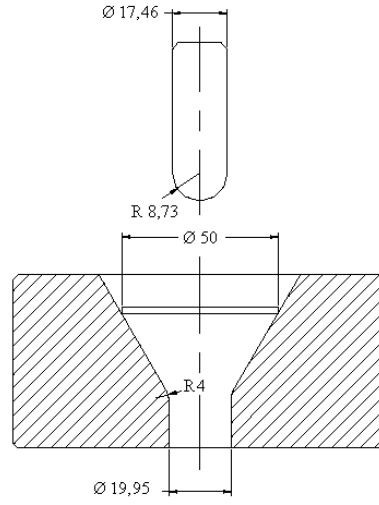


Şekil 3.20 0,001 sn⁻¹ başlangıç BŞD hızında 450 ve 500 °C sıcaklıklarında hasara uğramış AZ31B-H24 magnezyum alaşımlı sacın SEM fotoğrafı (Krajewski, 2001)

3.12 Konik Kap Değeri (CCV)

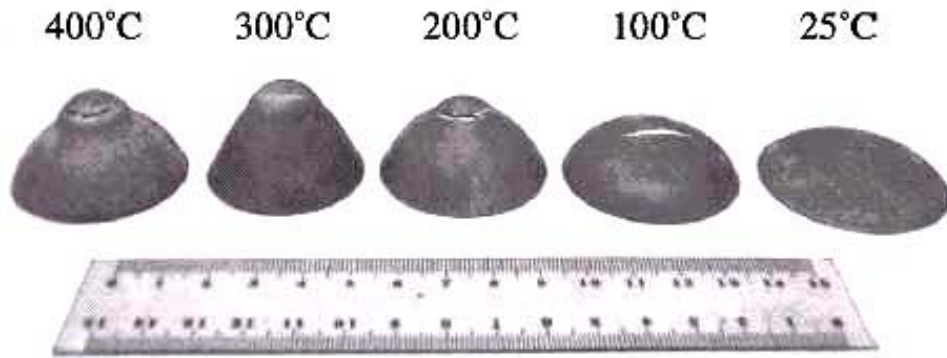
Konik kap değeri testinde, belirli ölçüye sahip dairesel kesitli sac malzeme merkezinde konik boşluğu bulunan kalıbın üst yüzeyine konur (Şekil 3.21). Sonra yarı-küresel ıstampa sac malzemedeki kırılma gerçekleşene kadar kalıp içerisine doğru ilerletilir. Hasara uğramış konik kabın çapı ölçülür ve bu değer konik kap değerini alır. Belirli çaplar için küçük konik kap değerleri daha derin çekme derinlikleri anlamına gelir yani daha iyi şekillendirilebilirliğe neden olur. Şekil 3.21’de kalıp

gösterilmektedir; burada herhangi bir sac tutucu kullanılmamaktadır ve test esnasında derin çekme işlemi serbesttir böylece baskı plakası basıncının etkisi ihmal edilmiştir.

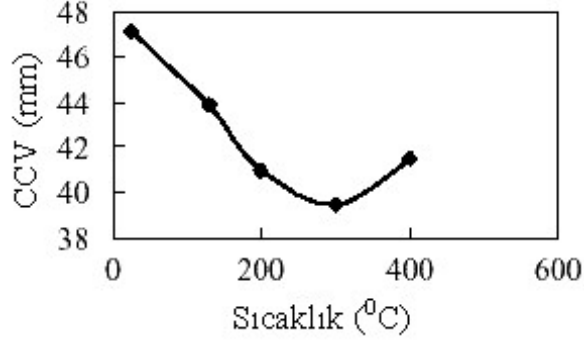


Şekil 3.21 Konik kap değeri deneyinde kullanılan kalıp ve ıstampa (Chen ve Huang, 2003)

Çeşitli sıcaklıklarda elde edilmiş konik kaplar Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Sıcaklığın arttırılması ile çekme derinliğinin arttığı görülmektedir fakat maksimum derin çekme derinliği 400°C yerine 300°C’ta gerçekleşmektedir (Şekil 3.22). Bu durum Şekil 3.23’de gösterilen CCV değerleriyle kolaylıkla görülebilir. Şekil 3.23’de görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla CCV değeri 300°C’ta 39 mm gibi bir minimum değere ulaşmaktadır. Sıcaklığın 400°C’ta çıkmasıyla bu değerde ters bir şekilde artarak 41,5 mm’ ye ulaşır. Bu ters artış bize AZ31 magnezyum alaşımı sac malzemelerin yüksek sıcaklık şekillendirilebilirliği konusunda optimum sıcaklık değeri gibi önemli bir bilgi verir.



Şekil 3.22 Çeşitli sıcaklıklarda hasara uğramış konik kaplar (Chen ve Huang, 2003)

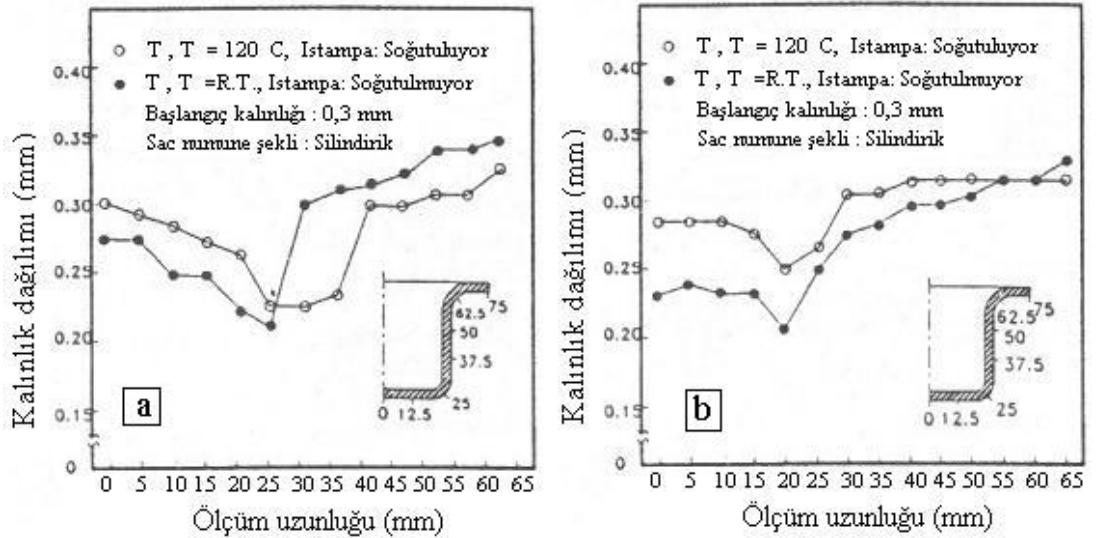


Şekil 3.23 Çeşitli sıcaklıklarda konik kap değeri (CCV) (Chen ve Huang, 2003)

AZ31 magnezyum alaşımı sac malzemenin 400°C'daki şekillendirebilirliğinin 300°C'ta göre daha kötü olmasının nedeni olarak düşük pekleşme üsteli değeri olduğu düşünülüyor. Akma dayanımının oldukça düşük olmasına rağmen, düşük pekleşme üsteli değeri ve ıstampanın ucunun neden olduğu lokal birim şekil değişimlerinden dolayı sac malzeme hasara uğrar (Chen ve Huang, 2003).

3.13 Sac Malzemenin Kalınlık Dağılımı

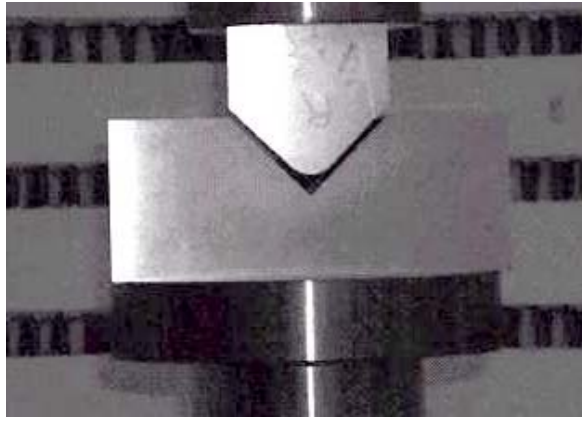
Kare şeklindeki kabın şekillendirilmesi sırasında köşegen üzerinde elde edilmiş kalınlık değişimi kranklı ve hidrolik pres için sırasıyla Şekil 3.24 a ve b'de gösterilmiştir. Kalınlık değişimi hidrolik preslerde ve yarı-sıcak şekillendirme şartlarında, kranklı preslere ve oda şartlarına göre daha üniform olduğu görülmektedir (Kim vd., 1996).



Şekil 3.24 İki tip preste derin çekilmiş kapın kalınlık değişimi (a) Kranklı pres b) Hidrolik pres (Kim vd., 1996)

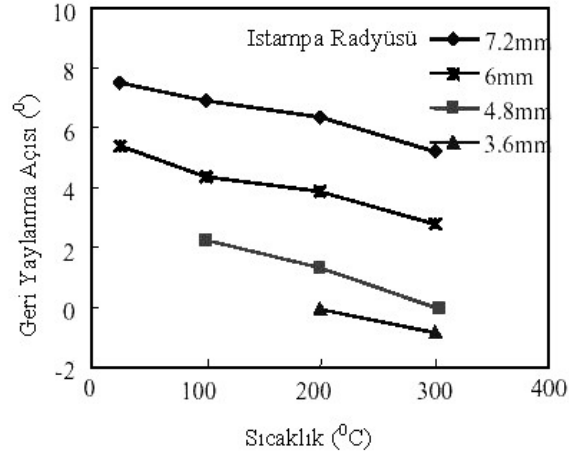
3.14 Geri Yaylanma

Geri yaylanma (esneme) olayının incelenmesi için AZ31 magnezyum alaşımı kullanılarak oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda V bükme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde fırın içinde kullanılan 90°'lik bir bükme açısına sahip V-bükme kalıbı Şekil 3.25'de gösterilmektedir. Istamp (burun) yarıçapının geri yaylanma üzerindeki etkisini araştırabilmek için 0,3-7,2 mm'lik (0,6 mm radyüs ölçüsü artırımı ile) radyüse sahip ıstampa kullanılmıştır.



Şekil 3.25 Geri yaylanma deneyinde kullanılan bükme kalıbı (Chen ve Huang, 2003)

Şekil 3.26, çeşitli ıstampa yarıçapları için sıcaklık ve geri yaylanma arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Istampa yarıçapına bakılmaksızın şekillendirme sıcaklığı arttıkça geri yaylanmanın azaldığı görülmektedir. Bu da bize AZ31 magnezyum alaşımlı sac metallerin yüksek sıcaklıklarda yalnız şekillendirilebilirliklerinin yüksek olduğunu değil, geri yaylanmalarının da daha düşük olduğunu göstermektedir. Geri yaylanmanın hem elastisite modülünden hem de akma dayanımında etkilendiği iyi bilinilir. Sıcaklık değişimi ile elastisite modülünün fazla değişmemesi ve sıcaklık atışı ile AZ31 sac malzemenin akma mukavemetinin düşmesinden dolayı; yüksek sıcaklıklarda geri yaylanmadaki azalma akma mukavemetindeki azalmadan kaynaklanır (Chen ve Huang, 2003).



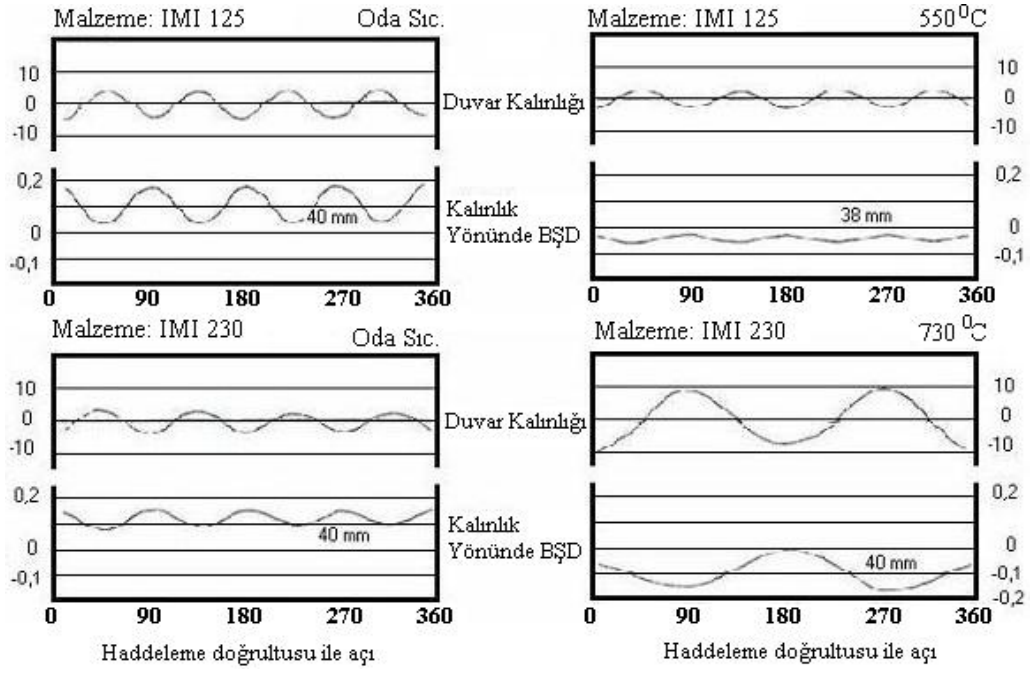
Şekil 3.26 Sıcaklık ve geri yaylanma arasındaki ilişki (Chen ve Huang, 2003)

3.15 Tavşan Kulağı Oluşumu

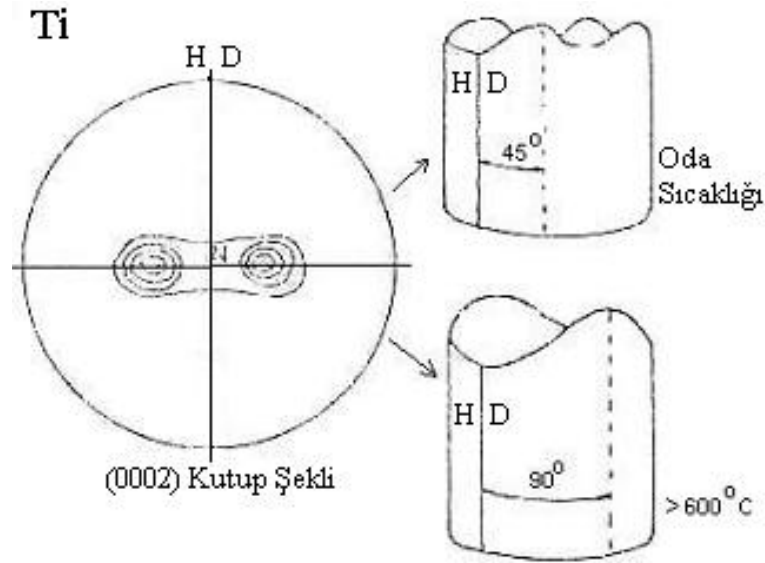
Silindirik derin çekmenin bir özelliği, -kupanın yan yüzeyinde- tavşan kulağı denilen dalgalanmaların oluşmasıdır. Buna sebep sacın düzlemsel anizotropisidir. Sonuç ise, işlem sonrası duvar kalınlığının değişken olmasıdır. Dolayısıyla daha önce de sözü edildiği üzere, sac anizotropisi derin çekme oranını düşürür. Ancak ısıtma işlemi bu durumu azaltıcı yönde bir etkiye sahiptir.

Shipton ve Roberts titanyum sacların sıcak derin çekilebilirliği üzerinde çalışmıştır (1991). Bu çalışmalardan, oda sıcaklığı şartlarında, derin çekilen kabın tabanından 40 mm yükseklikteki hat üzerinde HD ile 45° açı yapan kısımlarda kalınlığın görece az olduğu (tavşan kulağı oluştuğunu) gözlemleniyor. Malzemenin anizotropik yapısından dolayı bu bölgelerde deformasyon daha fazla gerçekleştiği için bu kısımlarda aşırı incelme görülüyor, dolayısıyla kusurlu ürün ortaya çıkıyor. BŞD, HD ile yapılan açıyla bağlantılı olarak sinüzoidal bir eğri oluşturuyor. Oda sıcaklığında BŞD, hadde doğrultusunda ve hadde doğrultusuna dik doğrultuda maksimum değerlere ulaşıyor.

550°C'a 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 (Shipton ve Roberts, 1991).



Şekil 3.27 Değişik sıcaklıklarda, sac kalınlığının ve kalınlık doğrultusundaki BŞD miktarının hadde doğrultusu ile yapılan açı ile değişimi (Shipton ve Roberts, 1991)

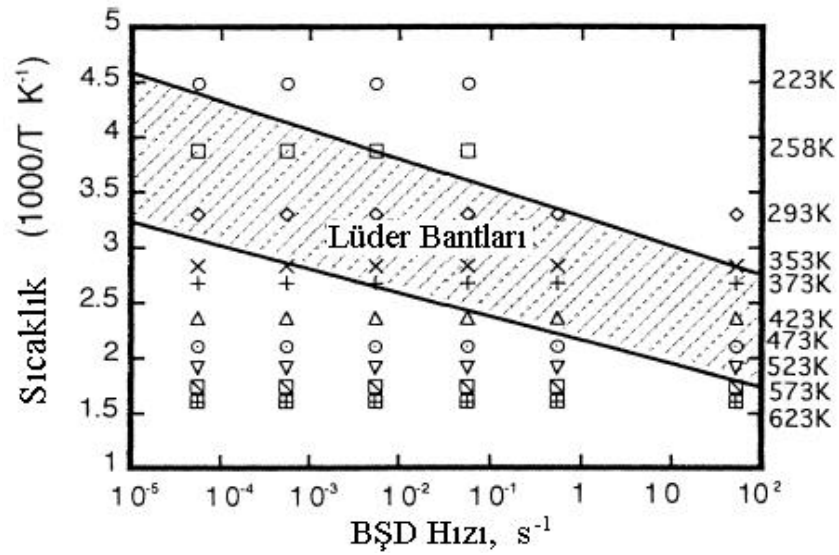


Şekil 3.28 Tavşan kulağı oluşumunun sıcaklık ile değişimi (Shipton ve Roberts, 1991)

3.16 Lüder Bantları

Ürün (özellikle taşıt aracı dış panelleri) kalitesinde azalmalara, lokal birim şekil değişimlerine ve kırılmalara neden olduğu için Lüder bantlarının oluşumu istenmemektedir. Dolayısıyla Lüder bantlarının hangi şartlarda (birim şekil değişimi hızı ve sıcaklık) oluştuğunun bilmek önemlidir. Naka ve Yoshida alüminyum ve

magnezyum alaşımlarının yarı-sıcak şekillendirilmesi konusunda yaptıkları araştırmalar ve çalışmalar sonucunda, Lüder bantlarının hangi sıcaklık ve birim şekil değişim hızı şartlarında oluştuğu gölgeli (taralı) bölge ile gösterilmektedir (Şekil 3.29). Yeterince yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon hızlarında Mg çökeltisi dinamik deformasyon yaşlanmasına (dynamic strain aging) muhtemel olarak neden olacak dislokasyon hareketini yenilerek durdurur. Diğer taraftan yüksek deformasyon hızlarında dislokasyonlar öyle hızlı hareket ederler ki atomlar, onların hareketini durduramaz. Bu da Lüder bantlarının neden belli sıcaklık ve birim şekil değişim şartlarında görüldüğünün nedeni olarak açıklanmıştır (Naka ve Yoshida, 1999).



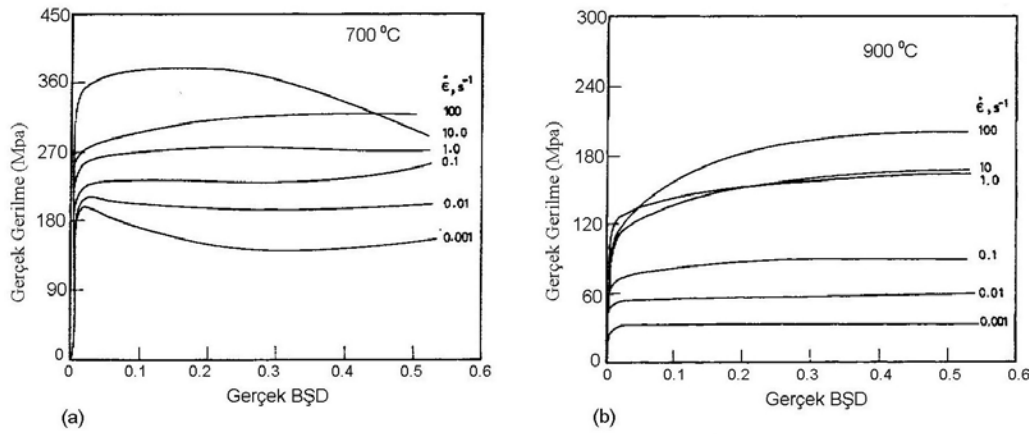
Şekil 3.29 Lüder bantlarının oluştuğu sıcaklık ve BŞD hızı şartları (Naka ve Yoshida, 1999)

3.17 Çelik Üzerine Yapılmış Çalışmalar

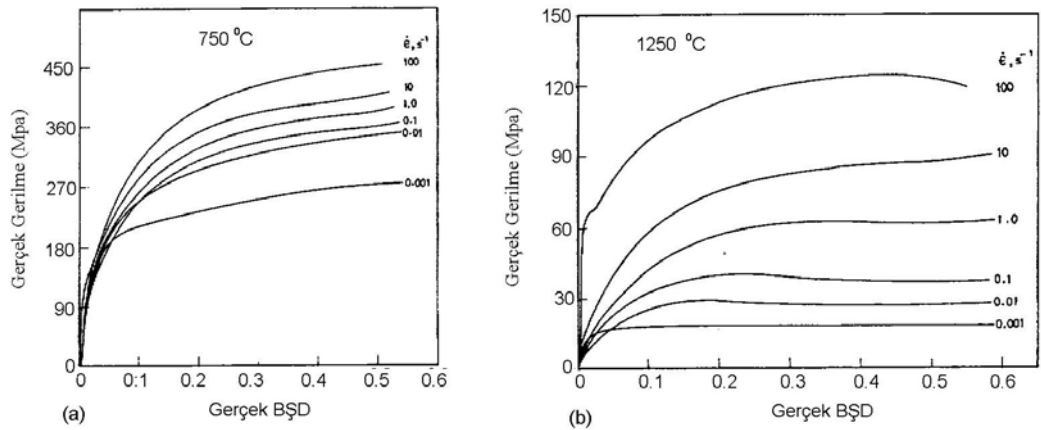
Bölüm 3’de görüldüğü gibi Yüksek sıcaklıkta sac şekillendirme işlemi üzerine çalışılan malzemeler çoğunlukla alüminyum ve magnezyum alaşımları ve az sayıda da titanyum alaşımı üzerine gerçekleştirilmiştir. Çelikler üzerine yapılan çalışmaların sayısı nerede ise yok denilecek kadar azdır. Bölüm 3.8 ve 3.13’de ANSI 304 paslanmaz çeliklerinin kullanıldığı bir çalışmadan söz edilmiştir (Kim vd., 1996). Mevcut ürünlerde kullanılan çelik sacların şekillendirilebilirliğinin yeterli olması, yüksek dayanımlı sacların kısıtlı kullanımı ve çelik malzemelerde sıcak/yarı-sıcak işleme sıcaklıklarının alüminyum ve magnezyum alaşımlarına kıyasla yüksek

oluşundan kaynaklanan teknik zorluklar nedeniyle çelik sacların yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesi yakın zamana kadar cazip görülmemiştir.

Yarı-sıcak ve sıcak şartlarda çeliklerin şekillendirilmesi üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalar genellikle kütle şekillendirme (özellikle dövme) işlemlerine yöneliktir. Bu çalışmalarda genellikle çekme testleri yerine basma testleri kullanılmıştır (ASM, 1997). Şekil 3.30'da Fe-5Ni'le ait 700 ve 900°C'de ve Şekil 3.31'de ANSI 304 yoğruk paslanmaz çeliğine ait 750 ve 1250°C'de çeşitli BŞD hızlarında gerçekleştirilmiş basma deneyi sonuçları gösterilmektedir. Her iki şekilde de görüldüğü gibi akma eğrisi artan sıcaklıkla aşağıya doğru kaymaktadır (gerilme değeri azalmaktadır) fakat artan birim şekil değiştirme hızı ile yukarı doğru artmaktadır (gerilme değeri artmaktadır).

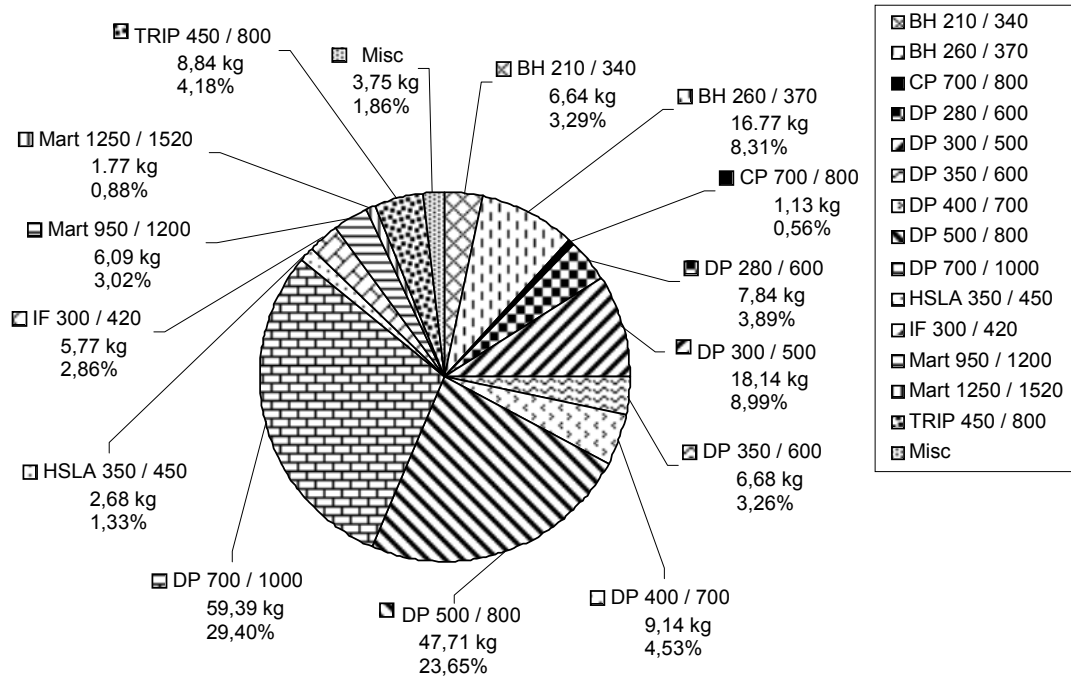


Şekil 3.30 Çeşitli BŞD hızlarında basma deneyleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme ve gerçek BŞD eğrisi (Malzeme: Fe-5Ni) (ASM, 1997)



Şekil 3.31 Çeşitli BŞD hızlarında basma deneyleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme ve gerçek BŞD eğrisi (Malzeme: ANSI 304 yoğruk paslanmaz çelik) (ASM, 1997)

ULSAB adlı Amerikan konsorsiyumu otomobil gövdelerinde ağırlığı çok hafif çelik malzemelerin kullanılabilmesi konusunda bir çok çalışma yapmaktadır. ULSAB, çok sayıda çelik malzemenin bir arada kullanıldığı ileri taşıt kavramını (AVC) geliştirmiştir ve bu çeliklerin taşıtlarda kullanımını ve kullanılabilirliğini artırmak için birçok çelik ve otomobil üreticisi ile çalışmalarını sürdürmektedir. Geliştirilen bu çelik saclar oda sıcaklığında şekillendirilmektedir. Şekil 3.32’de ULSAB-AVC kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda C sınıfı bir taşıt gövdesinde kullanılan çelikler, ağırlıkları ve kullanım oranları gösterilmektedir. Dayanımı yüksek malzemeler, taşıtlarda daha çok darbe dayanımının önem kazandığı yapısal elemanlarda ve ön ve arka tamponlarda kullanılmaktadır.



Şekil 3.32 ULSAB-AVC kapsamında C sınıfı taşıt gövdesinde kullanılan çelikler (Davies, 2003)

Isıl işlem görebilen çelik sacların çoğu faz dönüşüm karakteristiğini geciktiren bor içermektedir ve eser miktarda borla yapılan alaşımlama ısıtılma işlem sonucu kararlı martenzitik yapı oluşturulabilmektedir. Örneğin Usinor adlı çelik üreticisinin Usibor 1500 adlı çelik sac malzemesi sıcak şekillendirme ve ardından su verme işleminde kullanılır böylece şekillendirme işlemi sırasında parça şekli hassas bir şekilde kontrol edilir (Davies, 2003).

4 AMAÇLAR VE YAKLAŞIM

4.1 Amaçlar

Bu çalışmanın hedefi ekstra yüksek mukavemetli çelik saclarda sıcak ve yarı-sıcak sac şekillendirme işleminin fizibilitesini incelemek, sınırlarını belirlemek ve geliştirmektir.

Temel amaç;

- Belirlenmiş çelik sac levhaların sıcak ve yarı-sıcak şartlar altında şekillendirilmesi ve sıcaklığın malzemenin mekanik davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesidir.

İkincil amaç ise:

- Endüstride uygulanabilir sac ısıtma tekniklerinin incelenmesidir.

4.2 Yöntem

Malzemenin şekillendirilebilirliğini tek eksenli çekme deneyleri gerçekleştirerek; gerilme-birim şekil değişimi eğrisi, maksimum uzama ve ayrıca bu gerilme birim şekil değişimi eğrileri ve $\sigma = K\varepsilon^n$ modeli göz önünde bulundurularak pekleşme üsteli (n) ve dayanım faktörü (K) gibi malzeme özellikleri üzerindeki etkileri incelenecek ve değişik sıcaklıklarda gerçekleştirilen çekme deneyleri sonunda elde edilen sertlik değişimleri işlem görmemiş malzemenin özellikleri ile karşılaştırılacak ve değerlendirilecektir.

4.3 Proje Aşamaları

- Sac malzemelerinin belirlenmesi, ön deneylerin yapılması ve sac malzemelerinin temini.
- İlgili şekillendirme geometrilerinin ve parametrelerinin (sıcaklık, ıstampa (çekme) hızı gibi) belirlenmesi.
- Deney düzeneğinin tasarımı, kurulması, işlem parametrelerinin kontrolünün sağlanması ve deney tasarımının tamamlanması.

- Deneylerin gerçekleştirilmesi.
- Sonuçların raporlanması ve sunumu.

4.4 Deneylerde Üzerinde Çalışılacak Olan Sac Malzemeler

Otomotiv sektöründe özellikle yüksek dayanımlı çelik sacların kullanılmasıyla elde edilebilecek hafifletme avantajın ardından da bir çok avantajı yanında getirir. Bunlardan, düşük yakıt tüketimi, düşük egzoz emisyonu ve yüksek darbe dayanımı gibi avantajlar ilk akla gelenlerdir. Yüksek dayanımlı çelikler düşük şekillendirilebilirlikleri nedeniyle üretim esnasında bir takım zorluklarda ortaya çıkarmaktadır. Eğer bu malzemeler oda sıcaklığında şekillendirilmek istenirse ürün üzerinde küçük miktarda BŞD'den sonra hasar oluşmaktadır.

Deneylerde kullanacağımız çelik sac malzemelerimizi temin ettiğimiz üretici firma SSAB Tunplat, sıcak haddelenerek üretilen sac malzemeleri için “Domex”, soğuk haddelenip daha sonradan tavlanan ve ardından son mekanik özelliklerinin kazandırılması için kabuk (ince) paso haddelenen (skin-pass rolling) ürünleri için “Docol” ticari markasını kullanmaktadır. Burada ticari marka ve rakamlardan sonra kullanılan B kısaltması malzemelerin bor alaşımlı çelik olduğunu göstermektedir. Docol borlu çelikler yüksek dayanımlarına rağmen şekillendirilebilirlikleri iyidir; oda sıcaklığında şekillendirilmeye bir ölçüye kadar uygundur ve sertleştirilebilirler. Domex çelik sac malzemeleri de yüksek mukavemetlerine nazaran oda sıcaklığında iyi bir şekillendirilebilirliğe sahiptir, fakat artan dayanım değerleriyle bir miktar düşmektedir (SSAB, 2003-A-B).

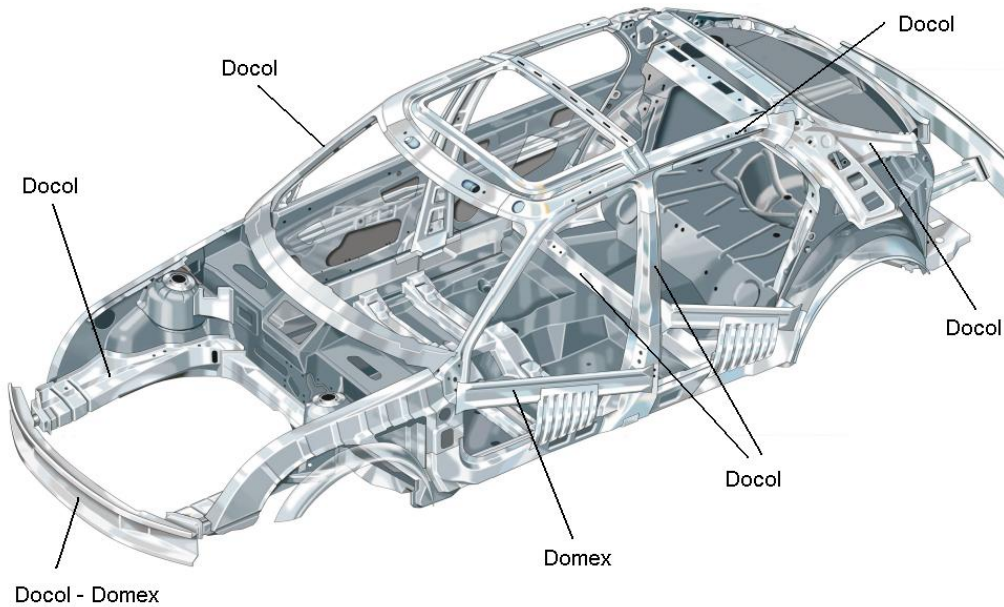
Aşağıda, Tablo 4.1’de deneysel çalışmalarda kullanacağımız çelik sac malzemeleri oluşturan alaşım elementlerinin ağırlıkça % miktarları verilmiştir. Şekil 4.1’de Docol ve Domex çelik sacların yaygın olarak kullanıldığı otomobil parçaları gösterilmektedir. Tablo 4.2’de deneylerde kullanılacak olan sac malzemelerin kalınlıkları, Avrupa standartlarındaki gösterimi ve hadde geçmişi gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Deneylerde kullanılacak olan sac malzemelerin % kimyasal içerikleri

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Nb	V	Ti	B
Docol 22 MnB	0.23	0.28	1.22	0.014	0.006	0.2	0.04		0.058	0.001		0.04	0.0031
Docol 22 MnB 5	0.23	0.28	1.15	0.011	0.002	0.22	0.05		0.038	0.002		0.04	0.003
Domex 700 MC D	0.074	0.25	1.7	0.012	0.001	0.04	0.05	0.11	0.047	0.064		0.13	0.0002
Domex 024 B	0.22	0.28	1.21	0.015	0.005	0.19	0.04		0.049	0	0.016	0.032	0.0029

Tablo 4.2 Deneylerde kullanılacak olan sac malzemelerin kalınlıkları, Avrupa standartlarındaki gösterimi ve hadde geçmişi

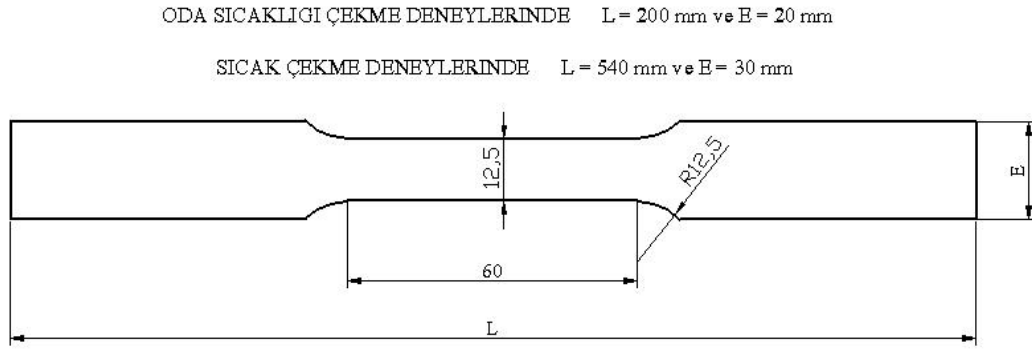
Malzeme	Kalınlık (mm)	Avrupa Standardı	Haddeleme Şekli
Docol 22 MnB	1,4	EN 10083-3	Soğuk Haddelenmiş + Tavlanmış + Kabuk Paso Haddelenmiş
Docol 22 MnB 5	1	EN 10083-3	Soğuk Haddelenmiş + Tavlanmış + Kabuk Paso Haddelenmiş
Domex 700 MC D	2	EN 10149-2	Sıcak Haddelenmiş
Domex 024 B	1,8	---	Sıcak Haddelenmiş



Şekil 4.1 Docol ve Domex çelik sacların otomobil karoserlerinde yaygın olarak kullanıldığı parçalar (SSAB, 2000)

4.4.1 Tek Eksenli Çekme Deneyi

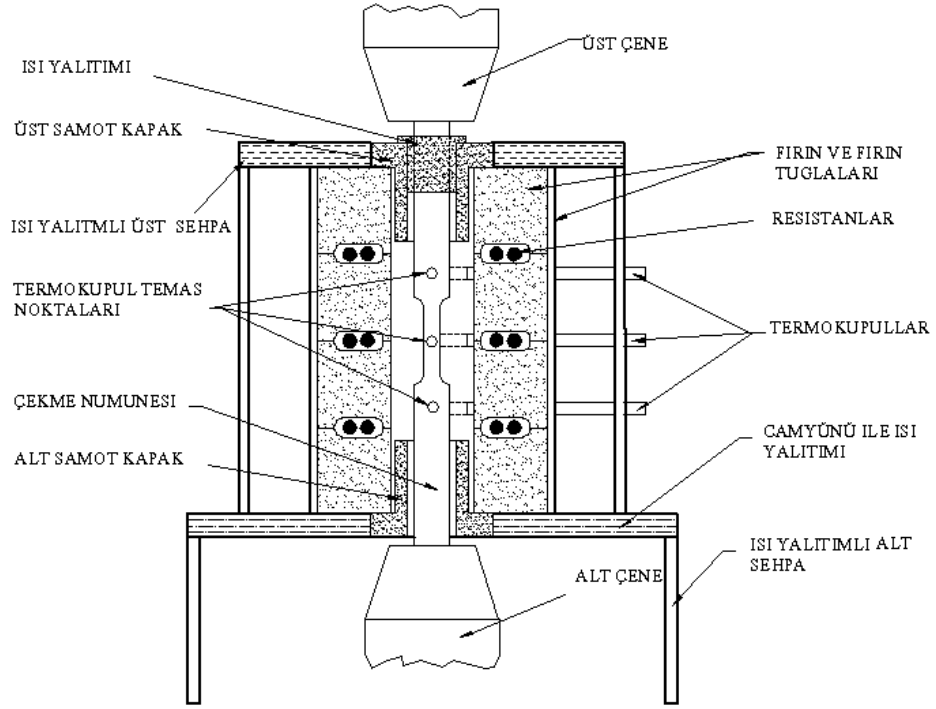
Çekme deneylerinde kullanılan numunelerin resmi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Deney numuneleri önce en büyük boyutları olan 200 ve 540 mm uzunluk ölçüsü haddeleme yönüne paralel olacak şekilde belirtilen boylarda kesilmiş ve daha sonra boyu 200 mm olan numunemizin genişlik ölçüsü 20mm ve boyu 540 mm olan numunemizin genişliği 30 mm olacak şekilde sac malzemelerimiz giyotin makasta kesilmiştir. Ardından ölçü boyu kısmı dikey freze tezgahında çapı 25 mm olan parmak freze çakısı kullanılarak işlenmiştir. Çekme deneylerinde toplam 84 adet çekme numunesi kullanılmıştır. Ayrıca bir malzeme için 800 ve 1000°C de toplam 12 tane daha çekme numunesi kullanılarak ek deneyler yapılmıştır.



Şekil 4.2 Tek eksenli çekme deneyi deney numunesi

Oda sıcaklığındaki tek eksenli çekme deneyleri 60 ton kapasiteli servo-hidrolik DARTEC çekme cihazı ve diğer sıcaklıklardaki çekme deneyleri de yine hidrolik servo kontrollü 10 tonluk DARTEC çekme (ve yorulma) cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık kontrolü malzeme üzerinde üç ayrı noktadan, üç adet termokupul ve bir adet kontrol ünitesinin kullanılması ile sağlanmıştır.

Silindir şeklindeki fırın ve sıcaklık kontrol ünitesinin kullanımı ile istenilen sıcaklıkta çekme deneyleri gerçekleştirildi (Şekil 4.3). Deneyler, işlem parametrelerinde belirtilen sıcaklık değerlerine $\pm 2-3^{\circ}\text{C}$ 'lik tolerans değerinde yakınlık sağlandığında gerçekleştirildi. İstenilen sıcaklık değerine ve sıcaklığın kararlı bir duruma ulaşması için önceden ısıtılmış olan fırın içine sac numunesi konulduktan sonra yaklaşık olarak 10-15 dakika kadar beklendi ve deneyler gerçekleştirildi. Aşağıda yarı-sıcak/sıcak çekme deneylerinde kullanılan çekme cihazı ve kontrol ünitesinin fotoğrafı Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Çekme deneyleri için kullanılan ısıtma ve sıcaklık kontrol tertibatının şematik gösterimi



Şekil 4.4 Yarı-sıcak/sıcak çekme deneylerinde kullanılan çekme cihazı ve sıcaklık kontrol cihazı

4.4.1.1 İşlem Parametreleri

Çekme deneylerindeki işlem parametreleri Tablo 4.3’de verilmiştir. Burada çekme hızı; makina üzerindeki LVDT (Doğrusal değişken türevsel dönüştürücü) yardımıyla tüm çekme testleri sırasında sabit olarak kontrol edilmektedir fakat buna karşılık başlangıç birim şekil değiştirme hızı olan $0,05$ ve $0,001 \text{ sn}^{-1}$ çekme işleme sırasında uzayan sac numunesi nedeniyle gittikçe azalmaktadır.

Başlangıç birim şekil değişim hızları, sac numunemizin ölçü boyu (gage length) düşünülerek tespit edilmiştir. Ölçü boyunun üniform genişliğe sahip olduğu boy Şekil 4.2’te de gösterildiği gibi 60 mm’dir. Fakat buna karşın fikir vermesi açısından son birim şekil değiştirme hızı, hasara uğrayan numunenin kopma boyu ile kopma uzaması tespitinde kullanılacak olan 50 mm’lik referans ölçü boyu arasındaki uzunluk farkının 60 mm’lik ölçü boyu (gage length) üzerine eklenmesiyle yaklaşık olarak tespit edilmiştir. Bu değerler bir tablo halinde EK 1’ de verilmiştir.

Tablo 4.3 İşlem parametrelerinin listesi

Malzeme	Docol 22 MnB 5, Docol 22 MnB, Domex 024 B ve Domex 700 MC D
Sıcaklık (°C)	ODA, 400, 500, 600, 800 ve 1000
Başlangıç BŞD hızı (sn⁻¹)	0,05 ve 0,001 (sırasıyla 3 ve 0,06 mm/sn çekme hızı)
	Not: Tüm şartlar için deney tekrarı 3’tür.

4.4.1.2 Deney Tasarımı

Tüm parametrelerin kombinasyonundan oluşacak deney şartların sayısı çok fazla olacağı için deney sayısının azaltılması yoluna gidilmiştir. Dolayısıyla çok yakın kimyasal özellikler gösteren malzemelerimizden olan Docol 22 MnB ve Docol 22 MnB 5 için yapılacak deneylerde optimizasyona gidilmiştir; Docol 22 MnB için çekme deneylerinin yalnızca oda sıcaklığı ve 600°C’de yapılmasına fakat diğer taraftan da bir malzememizin yüksek sıcaklıklarda davranışlarının nasıl olacağını tespit etmek içinde Docol 22 MnB 5 seçilmiş ve 800 ile 1000°C’de ek çekmelerinin yapılması planlanmıştır. Deney tasarımı, 3 değişik malzeme, 4 değişik sıcaklık ve 2 değişik başlangıç birim şekil değiştirme hızı (yada 2 değişik çekme hızı) parametreleri düşünülerek, tüm şartları temsil eden bir ortogonal matris oluşturulmuştur(Tablo 4.4). Burada görünen tüm şartlar için deney tekrarı sayısı 3’tür.

Tablo 4.4 Tek eksenli çekme deneyi ortogonal matrisi

MALZEME	SICAKLIK (°C)	BŞD HIZI (sn ⁻¹)
Docol 22 MnB 5	ODA	0.001
Docol 22 MnB 5	ODA	0.05
Docol 22 MnB 5	400	0.001
Docol 22 MnB 5	400	0.05
Docol 22 MnB 5	500	0.001
Docol 22 MnB 5	500	0.05
Docol 22 MnB 5	600	0.001
Docol 22 MnB 5	600	0.05
Domex 024 B	ODA	0.001
Domex 024 B	ODA	0.05
Domex 024 B	400	0.001
Domex 024 B	400	0.05
Domex 024 B	500	0.001
Domex 024 B	500	0.05
Domex 024 B	600	0.001
Domex 024 B	600	0.05
Domex 700 MC D	ODA	0.001
Domex 700 MC D	ODA	0.05
Domex 700 MC D	400	0.001
Domex 700 MC D	400	0.05
Domex 700 MC D	500	0.001
Domex 700 MC D	500	0.05
Domex 700 MC D	600	0.001
Domex 700 MC D	600	0.05

Docol 22 MnB için yalnızca oda sıcaklığında ve diğer malzemelerde için maksimum kopma uzaması veren 600 °C’de 0,001 ve 0,05 sn⁻¹ başlangıç BŞD hızlarında çekme deneylerinin yapılmasına karar verilmiştir (Tablo 4.5).

Tablo 4.5 Docol 22 MnB için planlanan ek tek eksenli çekme deneyi matrisi

MALZEME	SICAKLIK (°C)	BŞD HIZI (sn ⁻¹)
Docol 22 MnB	ODA	0.001
Docol 22 MnB	ODA	0.05
Docol 22 MnB	600	0.001
Docol 22 MnB	600	0.05

Docol 22 MnB 5 malzemesi için 800 ve 1000 °C’de 0,001 ve 0,05 sn⁻¹ başlangıç BŞD hızları için ek bir deney matrisi oluşturulmuştur (Tablo 4.6).

Tablo 4.6 Docol 22 MnB 5 için ek tek eksenli çekme deneyi matrisi

MALZEME	SICAKLIK (° C)	BŞD HIZI (sn ⁻¹)
Docol 22 MnB 5	800	0.001
Docol 22 MnB 5	800	0.05
Docol 22 MnB 5	1000	0.001
Docol 22 MnB 5	1000	0.05

4.4.1.3 Yapılan Ölçümler

10 tonluk Dartec çekme cihazında gerçekleştirilen tek eksenli çekme deneyi öncesinde tüm deney numunelerinin boyutları kumpasla ölçülmüştür ve kopma uzaması miktarını belirleyebilmek için ölçü boyu üzerinde 50 mm’lik referans ölçü boyu işaretlenmiştir.

Sıcaklık ve çekme hızı (veya başlangıç BŞD hızı) gibi deney parametrelerinin kontrolü ile istenilen deney şartlarına ulaşıncaya çekme deneyleri gerçekleştirildi. Deney sırasında yapılan ölçümler ise malzemenin uzama miktarı (çekme kafasının stroğu) ve buna karşılık gelen kuvvet miktarıdır.

Deney öncesinde gerçekleştirilen ve geometrik bilgileri veren ölçümler ve daha sonrasında deney esnasında yapılan kuvvet ve uzama ölçümleri sayesinde malzemenin çeşitli sıcaklıklardaki gerçek gerilme ve gerçek BŞD eğrilerini elde ederiz. Böylece malzemenin akma, çekme dayanımı ve pekleşme üsteli gibi değerlerini tespit edebiliriz.

Deney sonrasında yapılan ölçümler kopma uzamasının tespitine yöneliktir. Çekme deneyi öncesinde işaretlenen 50 mm’lik referans ölçü değerinin deney sonunda hasara uğrayan numune üzerinde ne kadar uzadığını tespit ettik. Bu uzama miktarının ilk boyaya göre oranı bize % kopma uzaması değerini verir.

4.4.2 Sertlik Ölçümü

Sertlik ölçümü mikro-Vickers sertlik ölçme cihazında Vickers sistemine göre yapılmıştır. Uygulanan yük 0,5 kgf olup yük malzeme üzerine 15 saniye etkimıştır ve cihaz tüm ölçüm değerlerini yapılan kalibrasyondan sonra ölçülen piramit şeklindeki

izin köşegen uzunluklarının boyutuna göre otomatik olarak sertlik değerleri okunmuştur. Tüm numuneler üzerinden hata payını azaltmak amacıyla en az üç noktadan alınan değerlerin ortalaması deney sonuçlarında kullanılmıştır.

Sertlik ölçümü yapılacak olan sac numuneler önce her hangi bir işleme tabi tutulmamış sac malzemeler üzerinden kesilmiş ve 0,05 ve 0,001 sn⁻¹ BŞD hızları ile oda sıcaklığı ve diğer sıcaklıklarda çekilen ve hasara uğratılmış diğer numuneler ise sac numunelerin kopma bölgesi yakınından kesilerek alınmıştır. Daha sonra bu numuneler polyester içine gömülerek, polyesterin bir süre katılaşması beklenmiş ve ardından polyester içine gömülü sac numunelerin yüzeyleri zımparalanmış ve ardından parlatılmıştır. En son olarak mikro-Vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Malzemelerimizin önce hiçbir deformasyonu uğramamış (üreticiden geldiği gibi) ham hallerinin sertlikleri ölçülecektir. Ayrıca gerek oda sıcaklığında olsun gerek yüksek sıcaklıklarda olsun değişik iki BŞD hızında tek eksenli çekme deneyine tabi tutulan malzemelerimizin işlem sonundaki sertlikleri tespit edilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta tüm malzememizin ısıtıldıkları 600 ve 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklardan sonra havada soğumaya bırakılmasıdır. Tablo 4.7’te X ile dolu hücrelere ait sertlik ölçümleri ve mikroyapı gözlemleri yapılacaktır.

4.4.3 Mikroyapı Analizleri

Malzemelerimizin önce hiçbir deformasyona uğramamış (üreticiden geldiği gibi) ham hallerinin mikroyapıları tespit edilecektir. Ayrıca gerek oda sıcaklığında olsun gerek yüksek sıcaklıklarda olsun değişik iki BŞD hızında tek eksenli çekme deneyine tabi tutulan malzemelerimizin işlem sonundaki mikroyapıları tespit edilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta tüm malzememizin ısıtıldıkları 600 ve 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklardan sonra havada soğumaya bırakılmasıdır. Tablo 4.7’te X ile dolu hücrelere ait sertlik ölçümleri ve mikroyapı gözlemleri yapılacaktır.

Mikro Vickers sertlik ölçümleri için hazırlanan numuneler mikroyapı analizlerinde kullanılmıştır.

Tablo 4.7 Sertlik ölçüm ve mikroyapı analiz planı

Malzemeler	İşlem Durumu	BŞD Hızı (sn ⁻¹)	Oda Sıcaklığı	600 (°C)	1000 (°C)
Docol 22 MnB 5	Isıtma Soğutma Yapılmış Numune		X	X	X
	Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.001	X	X	X
		0.05	X	X	X
Domex 024 B	Isıtma Soğutma Yapılmış Numune		X	X	
	Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.001	X	X	
		0.05	X	X	
Domex 700 MC D	Isıtma Soğutma Yapılmış Numune		X	X	
	Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.001	X	X	
		0.05	X	X	

5 DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde üzerinde çalışılan tüm malzemeler için değişik deney şartlarında yapılan tek eksenli çekme deneylerinin ve diğer ölçüm ve gözlemlerin sonuçları verilecektir. Farklı deney şartlarında malzemenin akma ve çekme dayanımlarındaki değişim daha sonra pekleşme üsteli, kopma uzaması ve malzeme dayanım faktöründeki (K) değişim incelenecektir. Sıcaklığın malzemenin sertliği ve mikroyapı üzerindeki etkileri incelenecektir.

5.1 Tek Eksenli Çekme Deneyi Sonuçları

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de sırasıyla Docol ve Domex malzemelerine ait akma ve çekme mukavemeti, kopma uzaması, n ve K değerlerinin sıcaklık ile değişimi verilmiştir. Bu tablolarda verilen değerler ortalama değerlerdir.

Tablo 5.1 Docol 22 MnB 5 ve Docol 22 MnB malzemelerine ait akma-çekme mukavemeti, kopma uzaması, n ve K değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Malzemeler		BŞD Hızı (s ⁻¹)	Sıcaklık (°C)					
			ODA	400	500	600	800	1000
Docol 22 MnB 5	Akma Mukavemeti (MPa)	0,05	382,00	273,30	223,30	175,30	102,70	42,00
		0,001	349,30	233,30	191,70	140,00	74,30	27,00
	Çekme Mukavemeti (MPa)	0,05	641,70	585,70	442,00	298,00	175,00	67,30
		0,001	633,00	542,00	378,00	223,30	102,30	37,30
	Kopma Uzaması (%)	0,05	26,04	29,57	38,00	45,57	54,57	32,58
		0,001	28,83	32,23	47,03	83,97	72,13	37,37
	Pekleşme Üsteli (n)	0,05	0,289	0,238	0,155	0,127	0,191	0,268
		0,001	0,285	0,204	0,155	0,117	0,103	0,111
	Mukavemet Faktörü (K) (MPa)	0,05	993,81	838,37	546,60	349,20	214,98	96,90
		0,001	936,07	719,17	445,58	242,21	112,83	43,17
Docol 22 MnB	Akma Mukavemeti (MPa)	0,05	369,30				184,00	
		0,001	360,00				148,30	
	Çekme Mukavemeti (MPa)	0,05	661,70				297,70	
		0,001	655,00				216,70	
	Kopma Uzaması (%)	0,05	27,90				56,05	
		0,001	29,83				85,47	
	Pekleşme Üsteli (n)	0,05	0,279				0,124	
		0,001	0,276				0,109	
	Mukavemet Faktörü (K) (MPa)	0,05	975,71				344,14	
		0,001	952,68				233,25	

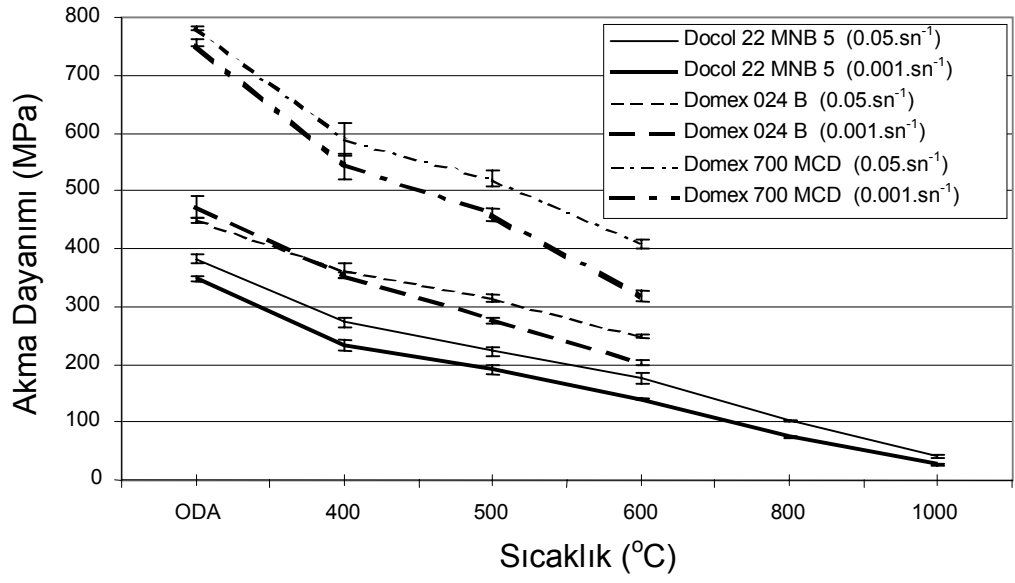
Tablo 5.2 Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerine ait akma ve çekme mukavemeti, kopma uzaması, n ve K değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Malzemeler		BŞD Hızı (s ⁻¹)	Sıcaklık (°C)			
			ODA	400	500	600
Domex 024 B	Akma Mukavemeti (MPa)	0,05	449,30	361,70	315,00	248,30
		0,001	471,00	353,30	276,00	203,00
	Çekme Mukavemeti (MPa)	0,05	767,00	647,00	489,70	329,70
		0,001	782,30	591,70	414,70	244,30
	Kopma Uzaması (%)	0,05	23,73	31,31	35,81	45,40
		0,001	23,30	33,23	44,21	69,71
	Pekleşme Üsteli	0,05	0,249	0,177	0,111	0,077
		0,001	0,238	0,180	0,107	0,046
	Mukavemet Faktörü (MPa)	0,05	1130,07	841,23	575,05	370,28
		0,001	1140,87	783,10	467,63	254,63
Domex 700 MC D	Akma Mukavemeti (MPa)	0,05	781,70	588,30	520,70	408,70
		0,001	752,30	546,00	461,00	316,70
	Çekme Mukavemeti (MPa)	0,05	968,70	773,70	616,00	453,30
		0,001	943,00	722,30	533,70	332,00
	Kopma Uzaması (%)	0,05	18,87	18,35	19,76	25,45
		0,001	19,50	20,20	30,17	53,09
	Pekleşme Üsteli	0,05	0,155	0,117	0,069	0,033
		0,001	0,162	0,109	0,045	X
	Mukavemet Faktörü (MPa)	0,05	1263,33	971,80	709,62	487,98
		0,001	1247,30	887,96	572,47	X

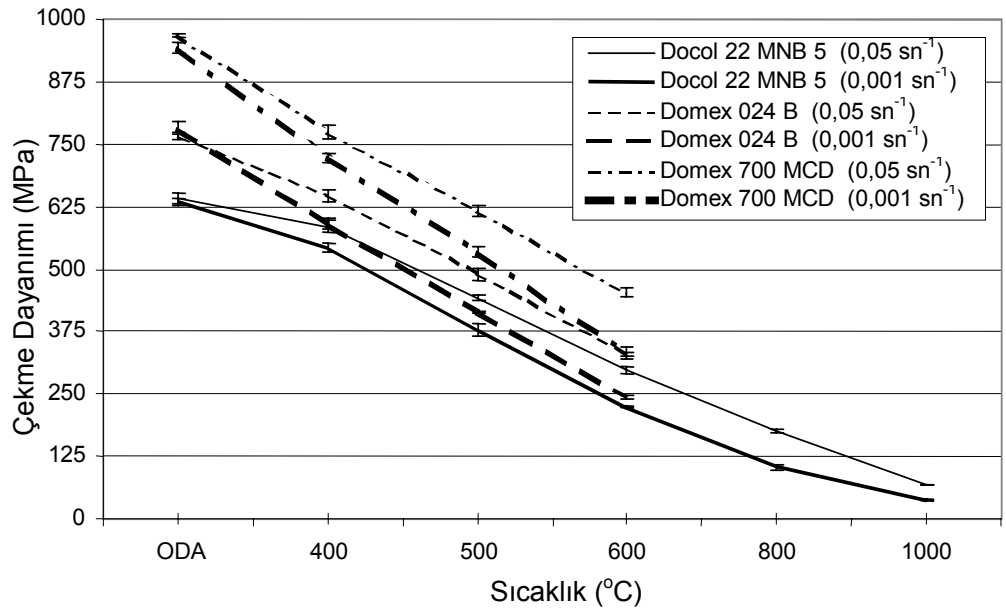
5.1.1 Akma ve Çekme Dayanımı

Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’ de değişik sıcaklıklarda yapılan çekme deneylerinin sonuçları gösterilmektedir. Burada tüm parametre şartları için gerçekleştirilen üçer deneyin ortalaması ve standart sapması hata çubukları şeklinde gösterilmektedir. Görüldüğü gibi deneylerde kullanılan tüm malzemelerin akma ve çekme dayanımı artan sıcaklık ile azalmakta fakat buna karşılık artan birim şekil değiştirme (veya çekme) hızı ile artmaktadır.

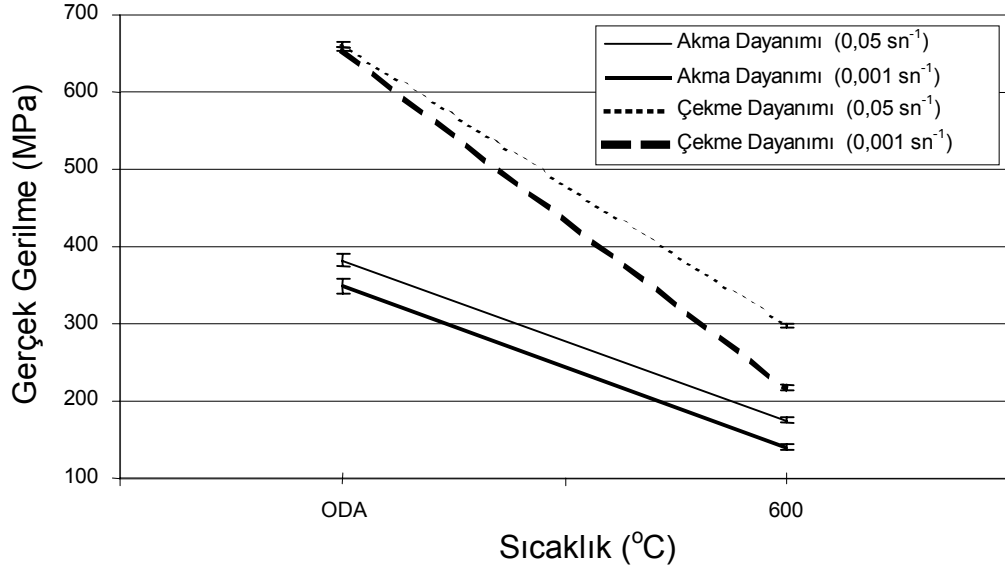
Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde farklı şekil değiştirme hızlarının etkisi çok fazla değilken artan sıcaklık ile bu etki çok daha belirgin bir hal almaktadır. Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerinde belirtilen bu etki giderek artmakta, fakat Docol 22 MnB 5’te ise neredeyse tüm sıcaklıklar için belli bir bant genişliğine sahip bir biçimde sabit kalmaktadır. Şekil 5.3’de Docol 22 MnB malzemesi için elde edilen sonuçlar görülmektedir. Sonuçlar Docol 22 MnB 5 ile çok yakın benzerlik taşımaktadır. Deneylerde kullanılan malzemelere ait tüm deney tekrarlarını içeren akma ve çekme mukavemeti değerleri tablo halinde EK 2-5’de ve gerçek gerilme – gerçek BŞD eğrileri EK 11-14 verilmiştir.



Şekil 5.1 Sıcaklığın ve birim şekil değiştirme hızının akma dayanımı üzerindeki etkisi

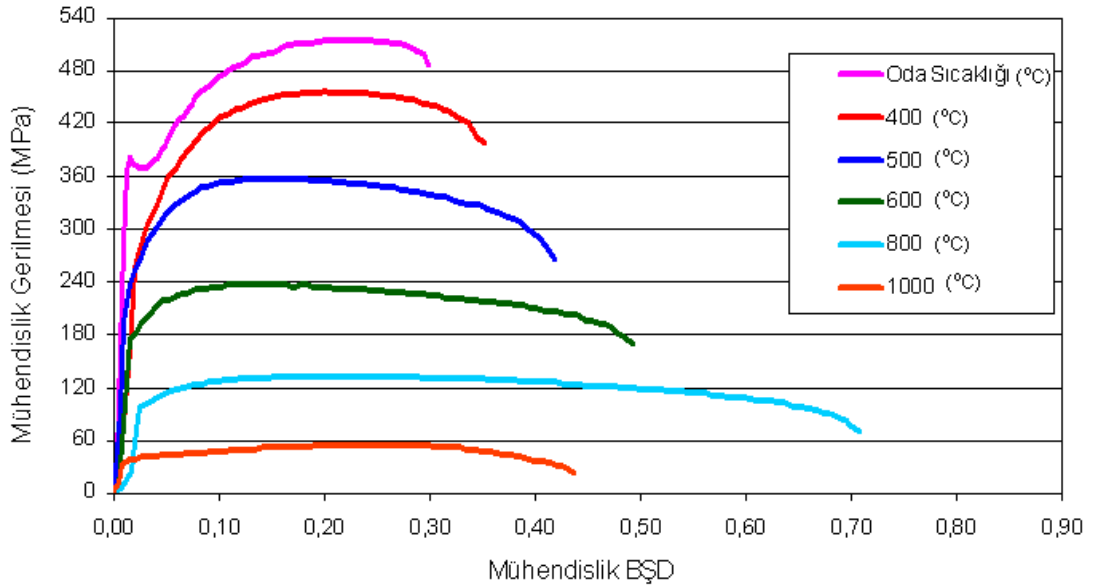


Şekil 5.2 Sıcaklığın ve birim şekil değiştirme hızının çekme dayanımı üzerindeki etkisi

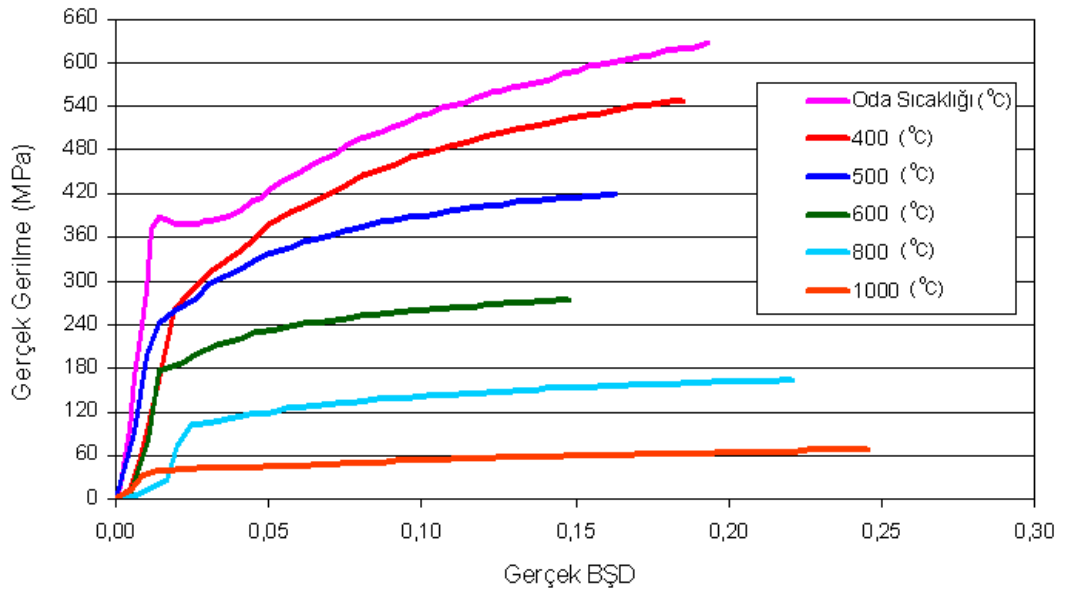


Şekil 5.3 Sıcaklığın ve birim şekil değiştirme hızının akma ve çekme mukavemeti üzerindeki etkisi (Malzeme: Docol 22 MnB)

Docol 22 MnB 5 malzemesine ait mühendislik akma gerilmesi – mühendislik BŞD ve gerçek akma gerilmesi – gerçek BŞD eğrileri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de verilmiştir. Bu iki şekilde de akma gerilmesi değerinin artan sıcaklıkla giderek azalmakta olduğu görülüyor Artan sıcaklıkla kopma uzaması değerinin arttığını görüyor ancak 1000 °C’de kopma uzamasında tekrar bir azalma görülüyor.



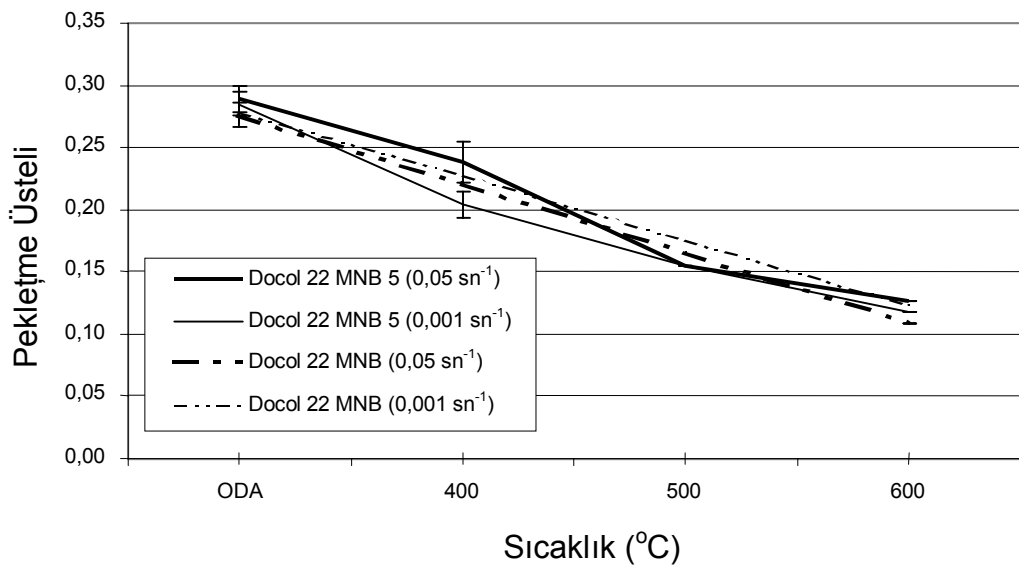
Şekil 5.4 Docol 22 MnB 5’e ait mühendislik gerilmesi-mühendislik BŞD eğrisi (Başlangıç BŞD hızı: 0,05 sn⁻¹)



Şekil 5.5 Docol 22 MnB 5'e ait gerçek gerilme-gerçek BŞD eğrisi (Başlangıç BŞD hızı: 0,05 sn⁻¹)

5.1.2 Pekleşme Üsteli (n)

Deney malzemelerimize ait pekleşme üstelinin sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızı ile değişimi Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Bu iki şekilden de görüldüğü gibi malzemelerimize ait pekleşme üsteli artan sıcaklıkla azalmaktadır fakat birim şekil değiştirme hızının pekleşme üsteli üzerinde herhangi bir etkiye sahip olduğu söylenemez. EK 6-10'da tüm deney şartlarında elde edilmiş “n”, “K” ve kopma uzaması değerleri verilmiştir.



Şekil 5.6 Docol 22 MnB ve Docol 22 MNB 5 malzemesinin pekleşme üstelinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi

Şekil 5.7’de Domex 024 B malzemesi için oda sıcaklığından 500°C’ye kadar pekleşme üsteli değerinin iki farklı birim şekil değiştirme hızı içinde aynı değere sahip olduğu görülmektedir. Yine Şekil 5.7’de Domex 700 MC D malzemesinin pekleşme üsteli değerinin azalan birim şekil değiştirme hızıyla bir hayli azaldığı görülmektedir ayrıca Domex 700 MC D malzemesi üzerinde 600°C’de yapılan deneylerde herhangi bir pekleşme üsteli değeri saptanamamıştır. Domex 700 MC D için pekleşme üsteli (n) 500 ve 600°C’te çok ciddi miktarda azaldığı görülmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta malzeme dayanım faktörü (K) ve pekleşme üstelinin (n) tespitinde;

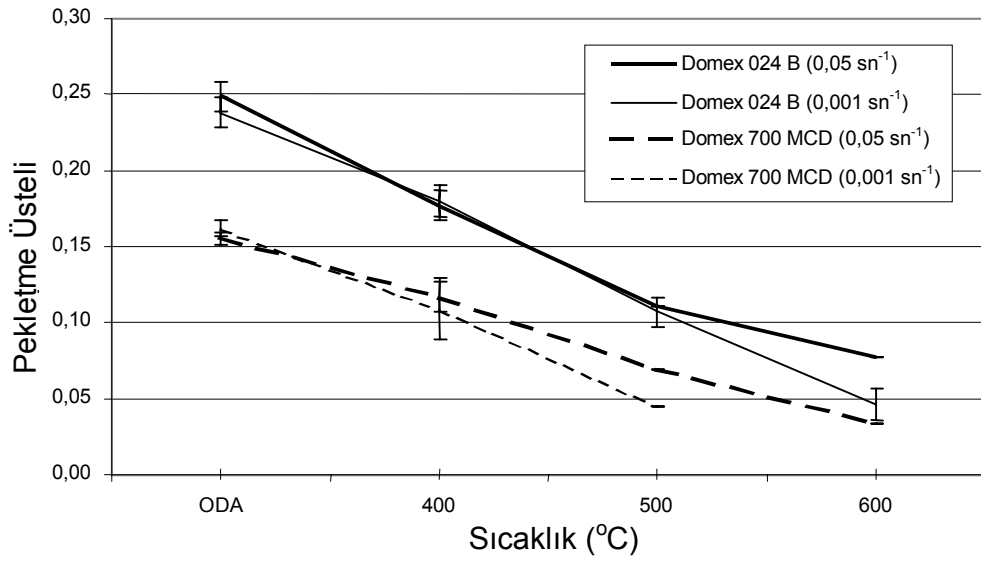
$$\sigma = K \varepsilon^n$$

kullanılan modeldir. Bu modelde birim şekil değiştirme hızı duyarlılık üsteli (m) etkisi göz ardı edilmiştir. Halbuki arttan sıcaklıkla birim şekil değiştirme üsteli giderek önem kazanmaktadır. Dolayısıyla birim şekil değiştirme hızı duyarlılık üstelini de içinde bulunduran;

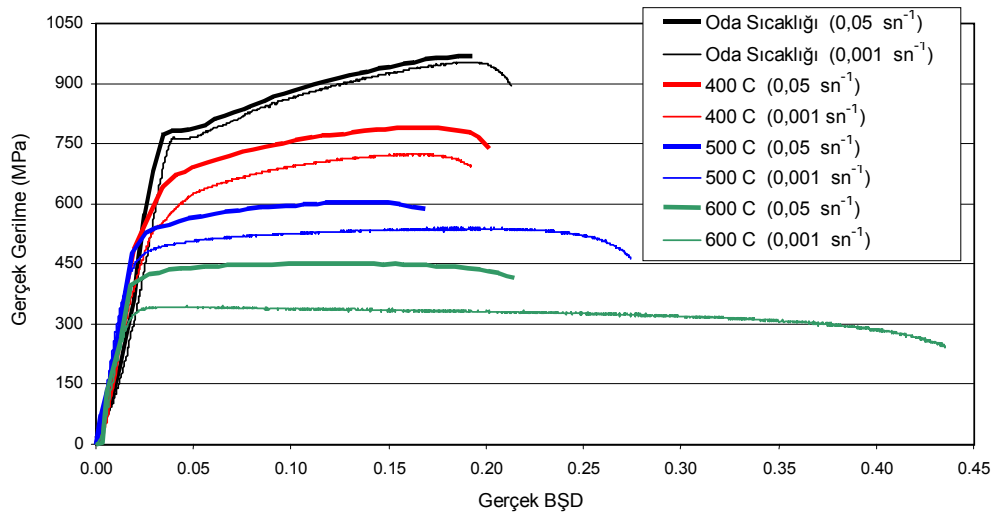
$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$$

şeklindeki bir model olmalıdır.

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi Domex 700 MC D sac malzemesi için gerçekleştirilen çekme deneylerinde 500°C’de küçük olan birim şekil değişim hızında ve 600°C’de büyük olan birim şekil değiştirme hızında adeta hiç pekleşme görülmemektedir. 600°C’de yavaş olan birim şekil değiştirme hızında ise tamamen birim şekil değişimiyle yumuşama görülmektedir.

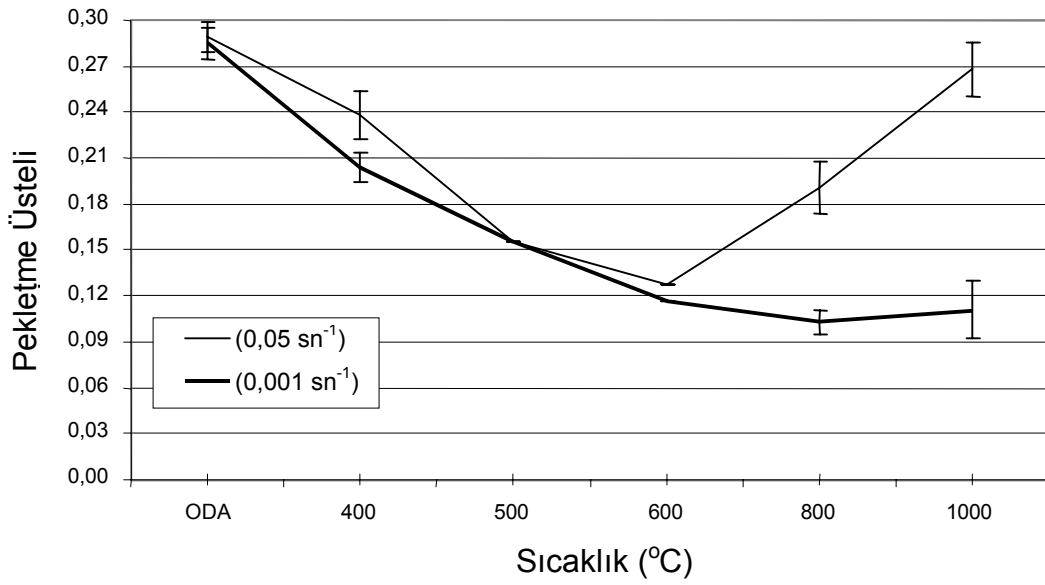


Şekil 5.7 Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerinin pekleşme üstellerinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi



Şekil 5.8 Domex 700 MC D sac malzemesinin birim şekil değiştirme hızı ve sıcaklık ile gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişim eğrisinin değişimi

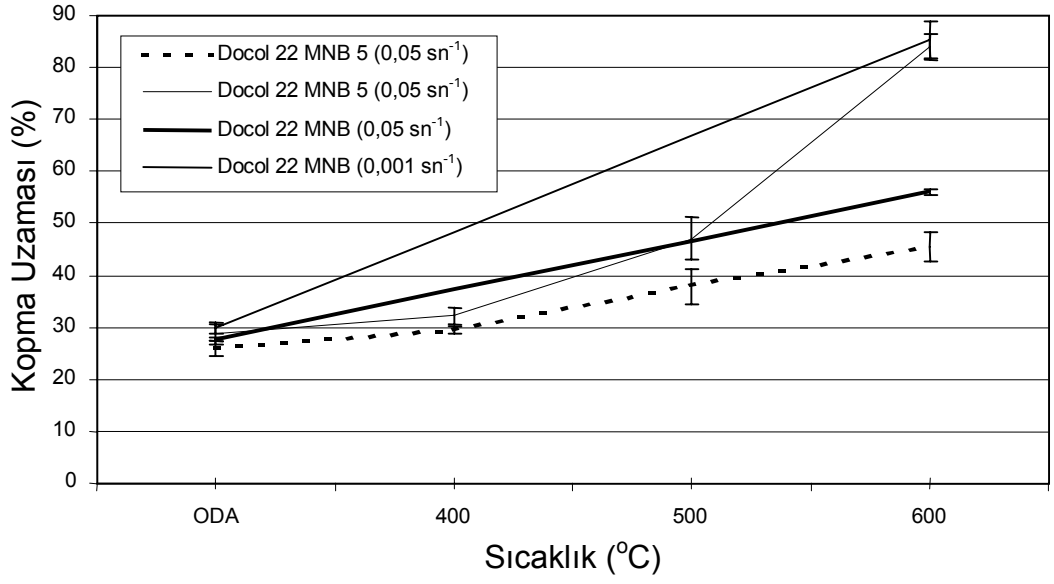
Şekil 5.9 Docol 22 MnB 5 ait pekleşme üstelinin değişimi gösterilmektedir. 600°C'ye kadar tedrici olarak azalan pekleşme üsteli 600°C'den sonra tekrar artmaktadır. Fakat bu grafiğin bu şekilde yorumlanması hatalı olur. Unutulmamalıdır ki pekleşme üsteli tespiti için kullandığımız model birim şekil değiştirme hızı duyarlılık üsteli ile ilgili bir ifade içermemektedir. Artan sıcaklık karşısında pekleşme üsteli (n) değerini yitirirken birim şekil değiştirme hızına olan duyarlılık üsteli önem kazanmaktadır. Yani 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda pekleşme üstelindeki değişim yanıltıcı değerler vermekte ve bu sıcaklığın üzerinde pekleşme üstelinden fazla söz etmemek gerekmektedir.



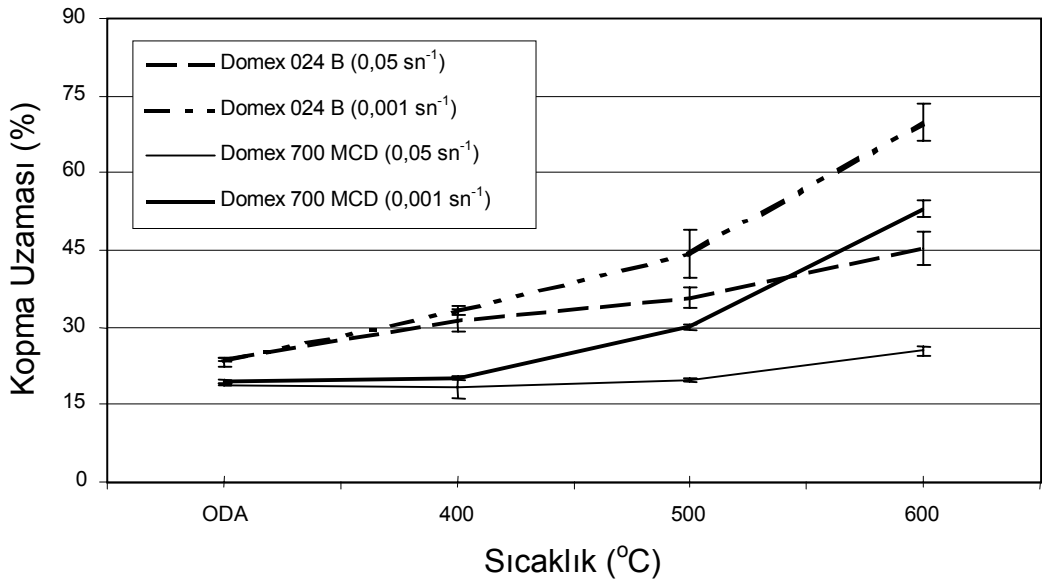
Şekil 5.9 Pekleşme üstelinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi (Malzeme: Docol 22 MnB 5)

5.1.3 Kopma Uzaması

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de sırasıyla Docol ve Domex sac malzemelerine ait kopma uzamasının sıcaklık ve birim şekil değişim hızı ile değişimi gösterilmektedir. Bu grafiklerden gözlenen, söz konusu çelik alaşımlarında malzemenin kopma uzaması miktarının sıcaklığın artmasıyla giderek arttığıdır. Çekme hızı (şekil değiştirme hızı) arttıkça bu kopma uzaması değeri bir miktar düşmektedir. Docol 22 MnB için deneyler yalnız oda sıcaklığı ve 600 °C’de yapılmıştır dolayısıyla ara değerler göz ardı edilmiştir. EK 6-10’da tüm deney şartlarında “n”, “K” ve kopma uzaması değerleri verilmiştir.

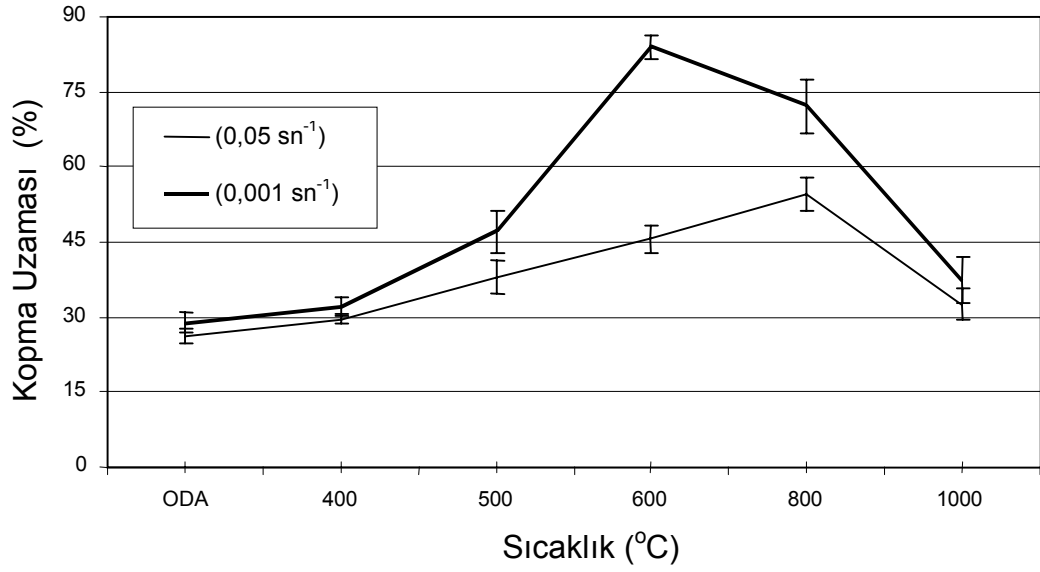


Şekil 5.10 Docol 22 MnB ve Docol 22 MnB 5 malzemelerinin kopma uzamalarını sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi



Şekil 5.11 Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerinin kopma uzaması değerlerinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi

Şekil 5.12’de gözlenen, Docol 22 MnB 5 çelik alaşımında malzemenin kopma uzaması değerinin 600 °C yakınlarında bir sıcaklık değerine kadar artmakta ve daha yüksek sıcaklıklarda ise tedricen azalmakta olduğunu göstermektedir. Çekme hızı (şekil değiştirme hızı) arttıkça bu sıcaklık değeri biraz yükselmektedir, ama deneyler sadece iki değişik hızda yapıldıkları için bu değişimin doğası hakkında bu deneyler ışığında fazla bir şey söylemek mümkün değildir.



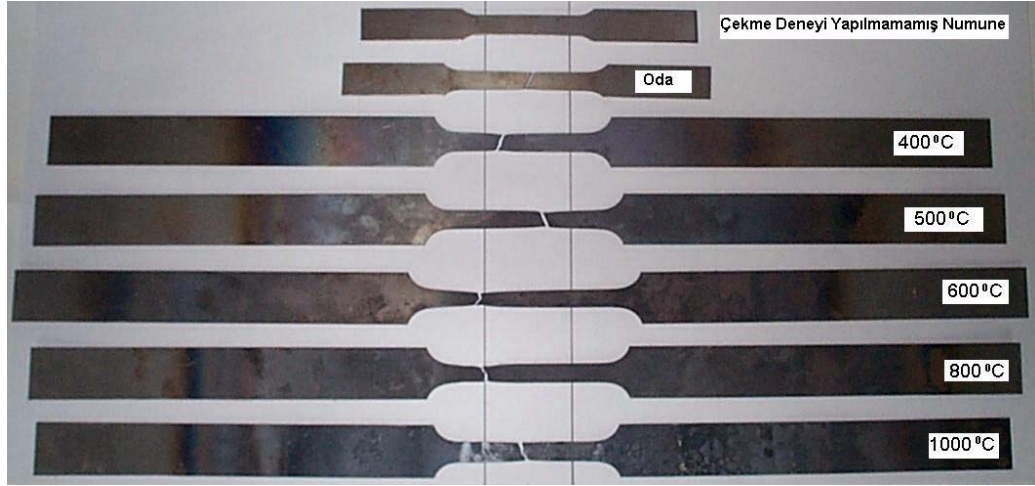
Şekil 5.12 Docol 22 MnB 5 malzemesinin kopma uzaması değerinin sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi

600 °C'nin üzerinde yapılan deneylerde sac malzemenin üzerinde tufal oluşumu gözlenmiş arttan sıcaklıkla tufal miktarının da arttığı görülmektedir. Tufal tabakası sac malzeme üzerinde yüzeysel kusurlara neden olmaktadır ve bu kusurlar giderek malzeme hacmine nüfuz etmektedir buda hızla hasar oluşumuna neden olmaktadır. Aşağıda, Şekil 5.13'de 1000 °C'de 0,001 sn⁻¹ birim şekil değiştirme hızıyla çekilen Docol 22 MnB 5 malzemesi üzerinde tufalın neden olduğu yüzey kusurları gösterilmektedir.



Şekil 5.13 1000 °C'de tufal tabakası oluşumunun malzeme yüzeyine etkisi (100X)

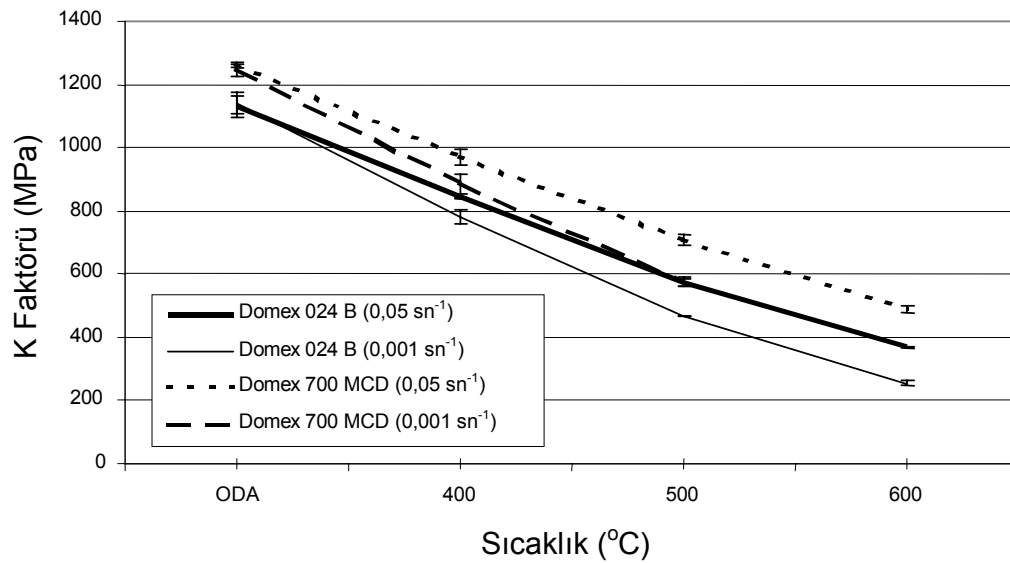
Şekil 5.14’de Docol 22 MnB 5 sac malzemesinden, oda sıcaklığında çekilmek üzere hazırlanmış bir numune ve değişik sıcaklıklarda $0,001 \text{ sn}^{-1}$ birim şekil değiştirme hızıyla çekme deneyi yapılmış numuneler gösterilmektedir. Fotoğrafta görünen iki çizgi arası 50 mm’yi göstermektedir.



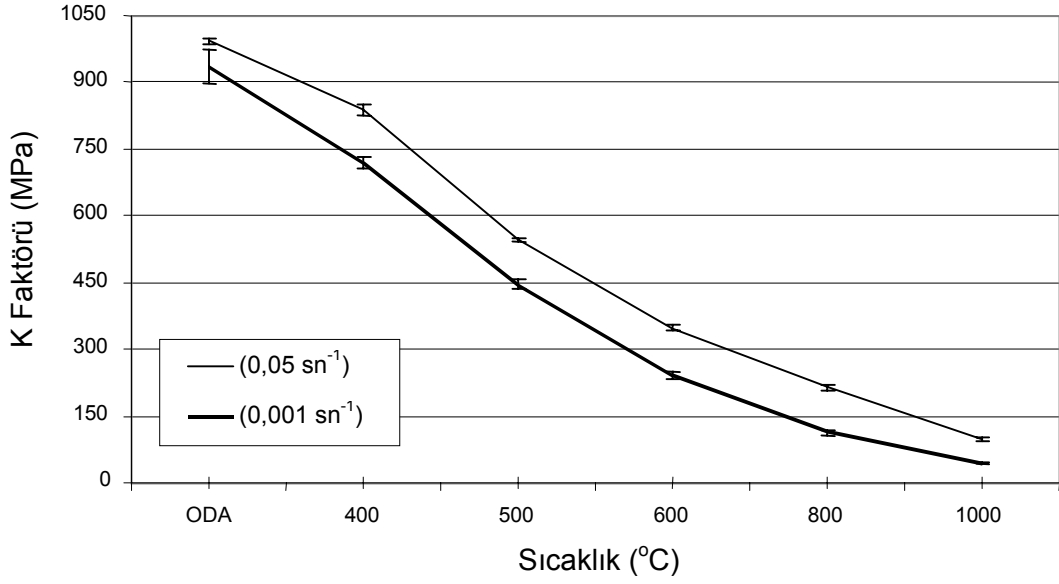
Şekil 5.14 Çekme deneyi yapılmamış numune ve çeşitli sıcaklıklarda çekme deneyi yapılmış numuneler (Malzeme: Docol 22 MB 5 ve BŞD hızı $0,001 \text{ sn}^{-1}$)

5.1.4 Malzeme Dayanım Faktörü (K)

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’te açıkça görüldüğü gibi malzeme dayanım faktörünün (K) değeri artan sıcaklıkla azalmakta ve yüksek olan birim şekil değiştirme hızı içinde daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. EK 6-10’da tüm deney şartlarında elde edilmiş “n”, “K” ve kopma uzaması değerleri verilmiştir.



Şekil 5.15 Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerinin malzeme dayanım faktörünün sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi

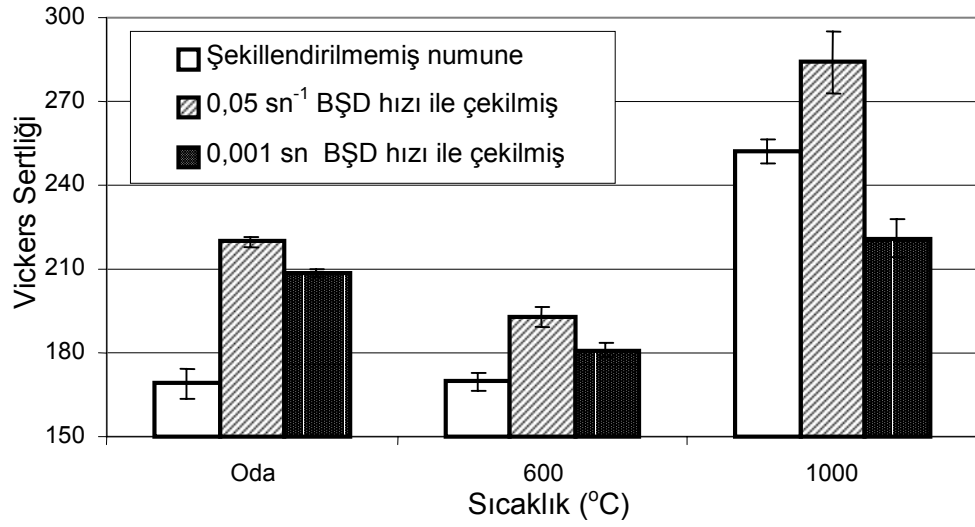


Şekil 5.16 Docol 22 MnB 5 malzemesinin malzeme dayanı faktörünün sıcaklık ve BŞD hızı ile değişimi

5.2 Yüksek Sıcaklıkta İşlemin Sertlik Üzerindeki Etkisi

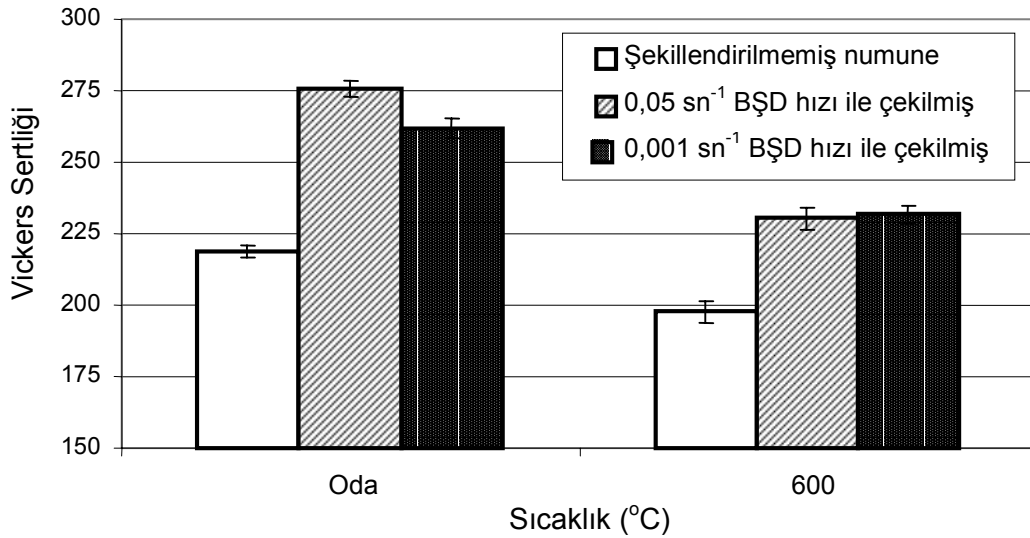
Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da sırasıyla Docol 22 MnB 5, Domex 024 B ve Domex 700 MC D malzemelerin oda sıcaklığında hiç işlem görmemiş (üretici firmadan geldiği gibi), 600 ve 1000 °C’ye ısıtılmış ve havada soğumaya bırakılmış ayrıca 600 ve 1000 °C’de 0,05 ve 0,001 sn⁻¹ BŞD hızıyla çekildikten sonra havada soğumaya bırakılmış durumlarının sertliklerini göstermektedir. 1000 °C’deki deneyler yalnızca Docol 22 MnB için yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri tablo halinde EK 15’te verilmiştir.

Şekil 5.17’te oda sıcaklığındaki sertlik değerlerinin ile 600 °C’deki sertlik değerleri karşılaştırıldığında çok büyük farkların olmadığı görülmektedir ancak oda sıcaklığında çekme deneyini tabi tutulan malzemelerde bir miktar sertlik artışı vardır bunun pekleşmeden kaynaklanmaktadır. Oda sıcaklığındaki sertlik değerleri ile sıcaklığı 1000 °C’ye çıkarılan ve havada soğumaya bırakılan ve bu yüksek sıcaklıkta çekme deneyi yapıldıktan sonra havada soğumaya bırakılan numunelerin sertlikleri ile yapılan karşılaştırmada ise sertlikte bir miktar artış görülmektedir bu artışın nedeni mikroyapıdaki değişimdir. Buradaki sertlik değerlerinin hata çubuklarını da göz önüne aldığımız taktirde büyük bir aralıkta değiştiğini görüyoruz. Mikroyapı ile ilgili çalışmanın sonuçları Bölüm 5.3’de gösterilecektir.

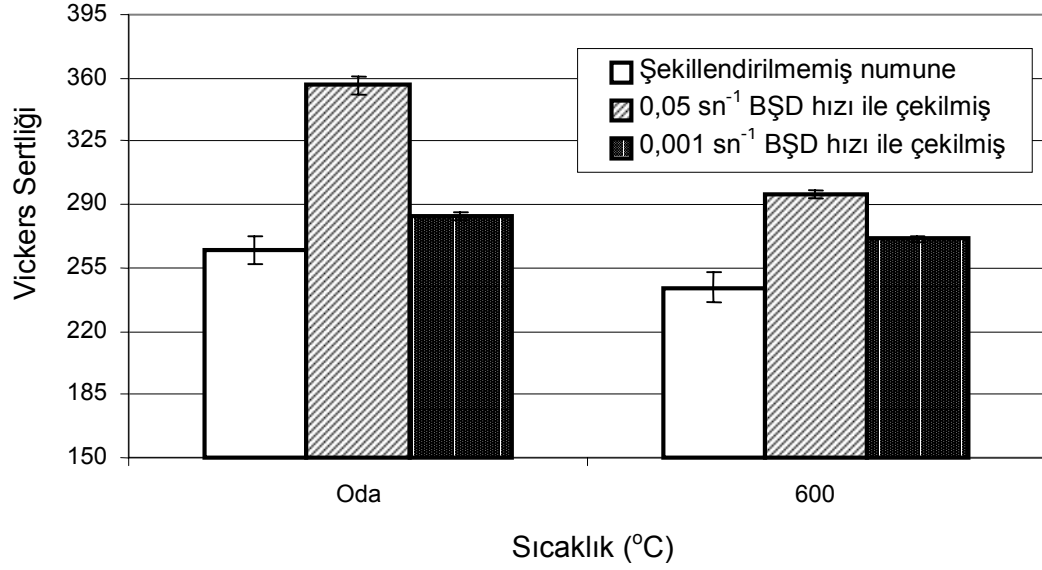


Şekil 5.17 Docol 22 MNB 5'e ait Vickers sertlik değişimi

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da görüldüğü gibi oda sıcaklığı ve 600 °C'deki deneyler sonucunda elde edilen numune sertliklerinin çok büyük değişime uğramadığı görülüyor. Oda sıcaklığında yapılan çekme deneylerinin sonucunda sertlikte bir miktar artış görülmüştür. Bu farklılık 600 °C'de daha düşüktür.



Şekil 5.18 Domex 024 B' ye ait Vickers sertlik değişimi

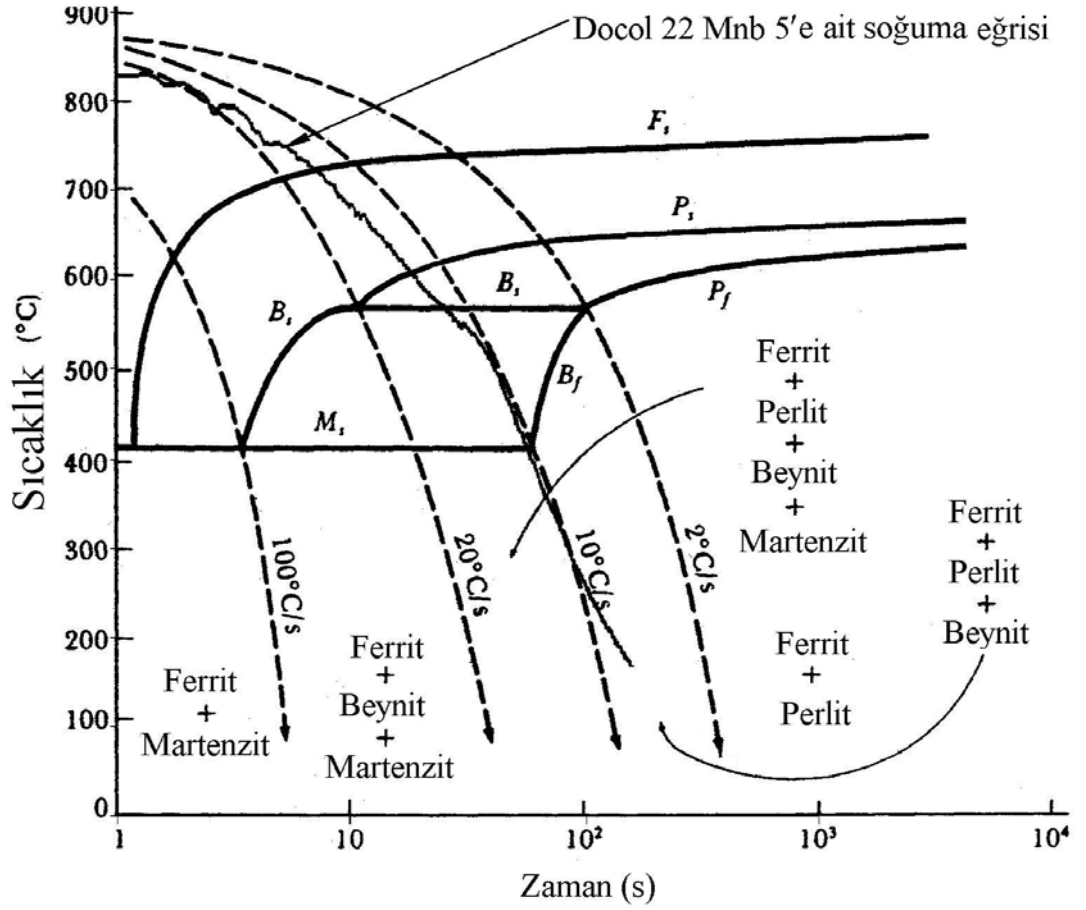


Şekil 5.19 Domex 700 MC D' ye ait Vickers sertlik değişimi

5.3 Mikroyapı Analizleri

Docol 22 MnB 5 sacın 850 °C'den havada soğumaya bırakılmış durumunu gösteren sürekli soğuma eğrisi Şekil 5.20'de ok işareti ile belirtilmiştir. Şekil 5.20'de gösterilen SSD (Sürekli soğuma dönüşüm) eğrisi, karbon miktarı Docol 22 MnB 5'e çok yakın olan 1020 çeliğine aittir. Docol 22 MnB 5 malzemesine ait alaşım elementleri göz ardı edilmiştir, ayrıca Docol 22 MnB 5 malzemesinin alaşım elementi olan borun kritik soğuma hızını düşürmekte olduğu bilinmektedir. Bu eğrinin kullanılmasının nedeni sıcaklığı 1000 °C'ye yükseltilecek Docol 22 MnB 5 malzemesinin mikroyapısında meydana gelebilecek değişiklikleri saptamaktır.

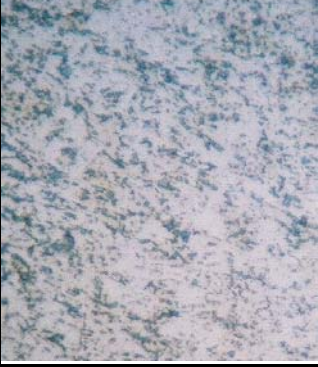
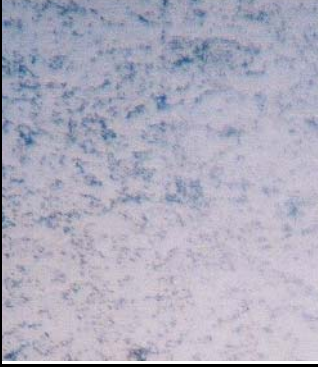
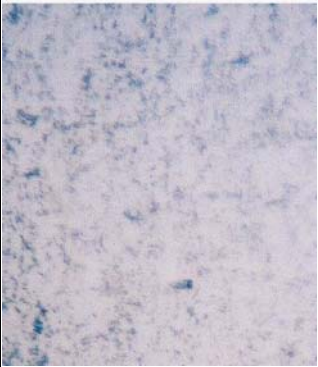
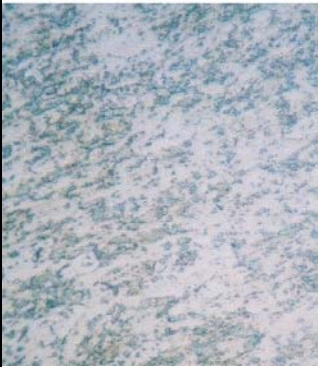
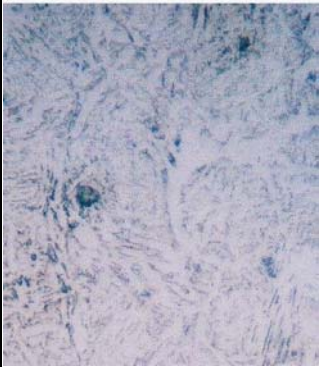
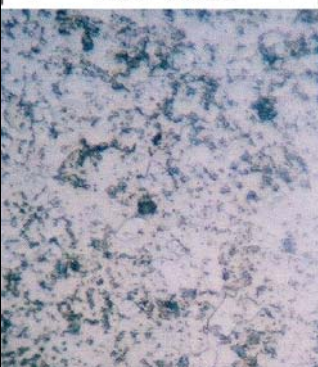
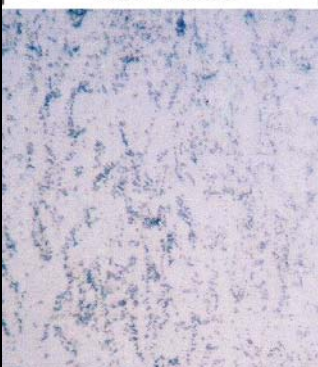
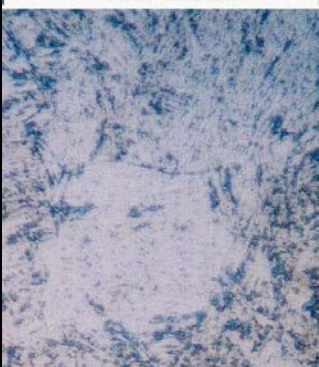
Tablo 5.3'te Docol 22 MnB 5 malzemesinin mikroyapı analizlerine ait resimler verilmiştir. Burada, oda sıcaklığında ve şekillendirilmemiş numunenin mikroyapısı malzemenin orijinal halini (üreticiden geldiği gibi) gösterilmiştir. Bunun yanı sıra malzemenin oda sıcaklığı, 600 ve 1000 °C'de iki farklı BŞD hızında çekme deneyine tabii tutulan ve ardından havada soğumaya bırakılan numunelerinin ve ayrıca sıcaklığı 600 ve 1000 °C'ye çıkarılıp oda sıcaklığına havada soğumaya bırakılan numunelerinin mikroyapı görüntüleri mevcuttur.



Şekil 5.20 1020 çeliğine ait SSD diyagramı (Askeland, 1994)

Oda sıcaklığında ve şekillendirilmemiş malzemenin (Docol 22 MnB 5) mikro yapısı ferrit matris içinde ince dağılmış karbürlerden oluşmaktadır. Oda sıcaklığında çekme deneyine tabii tutulan malzemelerde ve sıcaklığı 600 °C'ye çıkarılan ve ardından havada soğumaya bırakılan yada bu sıcaklıkta çekme deneyi yapıldıktan sonra oda sıcaklığına havada soğumaya bırakılan numunelerinin mikroyapı görüntüleri de malzemenin orijinal haline benzerlik göstererek ferrit içinde ince dağılmış karbürler içermektedir. Mikroyapıdaki bu durum sertlik değerlerine de aynı şekilde yansımıştır. Fakat sıcaklığın 1000 °C'ye çıkarılıp havada soğumaya bırakıldığı ve 1000 °C'de çekme deneyine tabi tutulup ardından havada soğumaya bırakılan numunelerin mikroyapıları oda sıcaklığı ve 600 °C'den farklılık göstermektedir. 1000 °C'ye çıkılan deneylerin sonucunda elde edilen yapının ferrit, beynit ve martenzitten oluştuğu gözlenmiştir. Bu yapının oluşmasında bor katkısının etkisi olduğu düşünülmektedir. Mikroyapıdaki bu değişim sertlikte artışa neden olmaktadır.

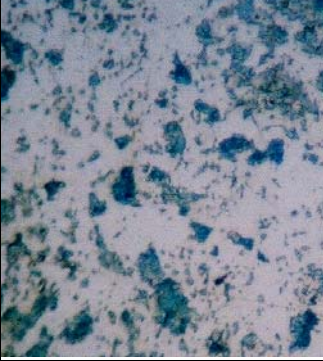
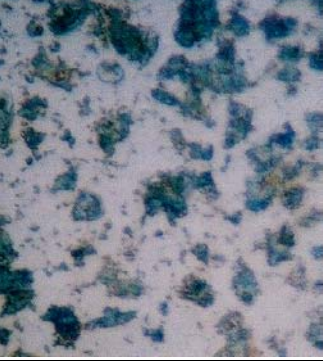
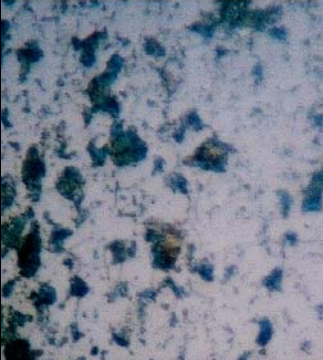
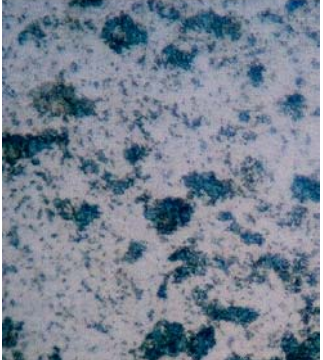
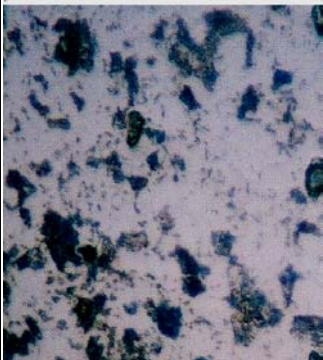
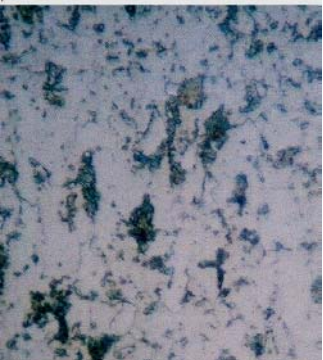
Tablo 5.3 Docol 22 MNB 5'e ait mikroyapı görüntüleri (200x)

Sıcaklık	Oda Sıcaklığı	600 (°C)	1000 (°C)
Şekillendirilmemiş Numune	← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 
Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.001 sn ⁻¹ ← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 
	0.05 sn ⁻¹ ← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 

Tablo 5.4'te Domex 24 B malzemesinin mikroyapı analizlerine ait resimler verilmiştir. Burada, oda sıcaklığında ve şekillendirilmemiş numunenin mikroyapısı malzemenin orijinal halini (üreticiden geldiği gibi) gösterilmiştir. Bunun yanı sıra malzemenin oda sıcaklığı ve 600 °C'de iki farklı BŞD hızında çekme deneyine tabii tutulan ve ardından havada soğumaya bırakılan numunelerinin ve ayrıca sıcaklığı 600 °C'ye çıkarılıp oda sıcaklığına havada soğumaya bırakılan numunelerinin mikroyapı görüntüleri mevcuttur. Mikroyapı görüntülerinin tamamı çok büyük

benzerlikler göstererek ferrit matris içinde dağılan karbürlerden oluşmaktadır. Mikroyapılardaki bu benzerlikler nedeniyle sertlik değerlerinde büyük değişimler gözlenmemiştir.

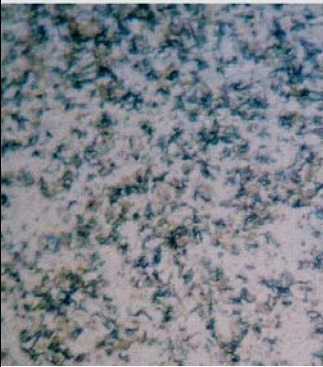
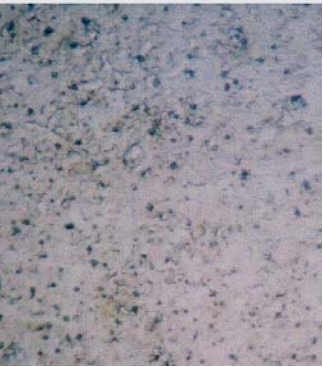
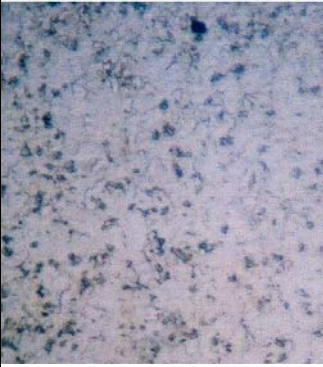
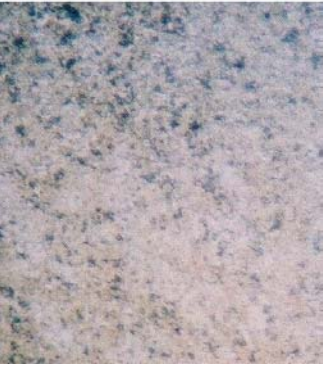
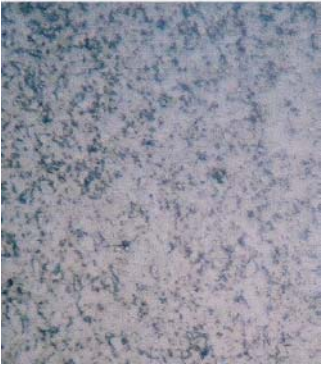
Tablo 5.4 Domex 024 B'ye ait mikroyapı görüntüleri (200x)

Sıcaklık	Oda Sıcaklığı	600 (°C)
Şekillendirilmemiş Numune	← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 
Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.001 sn ⁻¹ ← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 
	0.05 sn ⁻¹ ← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 

Tablo 5.5'te Domex 700 MC D malzemesinin mikroyapı analizlerine ait resimler verilmiştir. Burada, oda sıcaklığında ve şekillendirilmemiş numunenin mikroyapısı malzemenin orijinal halini (üreticiden geldiği gibi) göstermektedir. Bunun yanı sıra malzemenin oda sıcaklığı ve 600 °C'de iki farklı BŞD hızında çekme deneyine tabii

tutulan ve ardından havada soğumaya bırakılan numunelerinin ve ayrıca sıcaklığı 600 °C'ye çıkarılıp oda sıcaklığına havada soğumaya bırakılan numunelerinin mikroyapı görüntüleri mevcuttur. Mikroyapı görüntülerinin tamamı çok büyük benzerlikler göstererek ferrit matris içinde dağılan çok ince karbürlerden oluşmaktadır. Mikroyapılardaki bu benzerlikler nedeniyle sertlik değerlerinde büyük değişimler gözlenmemiştir.

Tablo 5.5 Domex 700 MC D'ye ait mikroyapı görüntüleri (200x)

Sıcaklık		Oda Sıcaklığı	600 (°C)
Şekillendirilmemiş Numune		← 0.1 mm →	← 0.1 mm →
			
Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.001 sn ⁻¹	← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 
	0.05 sn ⁻¹	← 0.1 mm → 	← 0.1 mm → 

6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek mukavemetli sac malzemelerin sünekliği oda sıcaklığında düşük olduğu için şekillendirilmeleri bir takım zorluklar içermekte, bu yüzden de günümüzde sanayide yaygın bir şekilde kullanılamamaktadırlar. Yüksek mukavemetli (ve alüminyum/magnezyum alaşımlarında düşük yoğunluklu) sacların şekillendirilmesi işlemi özellikle otomotiv sektöründe üzerinde durulması gereken bir konudur. Oda sıcaklığında kısıtlı olan malzeme şekillendirebilirliği, yarı-sıcak veya sıcak şekillendirme şartlarında genişletilerek bu malzemelerin kullanımında artış sağlanması ve böylece taşıt araçlarında belirgin ağırlık düşüşü yanında iyileştirilmiş çarpma dayanımı sağlamak mümkün olabilecektir.

Literatür araştırması sonucunda, sıcak/yarı-sıcak sac şekillendirme işleminin uygulanabilmesi için ortaya konan ısıtma teknikleri ve bunların birbirlerine göre iyi ve kötü yanları, sıcaklık kontrolü ve kaydırıcı yağlar ile ilgili veriler tez kapsamında incelenmiştir. Sıcak/yarı-sıcak sac şekillendirme işlemi ile ilgili olarak daha önce hazırlanmış - analitik ve deneysel veriler içeren - makaleler derlenerek sonuçları gözden geçirilmiş ve özetlenmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmaların amacı, kapsamı, deney planı ve deney tertibatı hakkında bilgiler sunulduktan sonra, deneysel çalışmaların sonuçları sergilenmiş ve değerlendirilmiştir.

Literatür taraması ve yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Sac malzemelerin ısıtılmasında kullanılan yöntemler incelendiğinde, dış ortamda (fırında) ısıtmanın avantajı homojen sac sıcaklığını sağlamasıdır. Dezavantajı ise fırından kalıba taşınması sırasında gerçekleşen sıcaklık kaybıdır. Kalıp içinde ısıtmanın avantajı ise sac üzerinde istenilen sıcaklık dağılımının oluşturulmasına imkan vermesidir.
- Derin çekme ile sacların şekillendirilmesinde ısıtma işlemi uygulanırken sıcaklık gradyeni oluşturulması çoğu uygulamada şekillendirilebilirliği olumlu yönde etkilemektedir. Bazı durumlarda ısıtma işlemi anlamlı bir derin

çekme oranı artışı sağlayamazken sıcaklık gradyeni uygulanması derin çekme oranını önemli ölçüde arttırabilmektedir. Genelde sıcaklık gradyeni oluşturmak için kalıp ve sac ısıtılırken, ıstampa oda sıcaklığında tutulur.

- 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 daha pürüzsüz ve homojen yüzeyler elde edilmesini mümkün hale getirebilmektedir.
- Yüksek sıcaklıklarda şekillendirilebilirliğin arttırılabilmesi için malzeme özelliklerine bağlı olarak belli bir sıcaklık seviyesine çıkmak gerekir. İdeal sıcaklıklar malzemedan malzemeye değışiklik göstermektedir. Dolayısıyla bu işlem öncesinde belirli araştırma faaliyetleri yapılarak malzeme için en uygun şekillendirme sıcaklıklarının tespit edilmesi gerekmektedir.
- Bir sac malzemenin en iyi şekillendirilebilme şartlarının tespiti için en uygun yöntem deneysel çalışmalarla elde edilmiş malzeme verilerinin kullanılması ve bu verilerin kullanıldığı bilgisayar programlarında işlemi modelleyerek değışik sıcaklıkların kullanıldığı analizlerin gerçekleştirilmesidir.
- Elde edilen sınır çekme oranları üzerinde kaydırıcı yağın etkisinin büyük olduğu görölmüşür. Genelde, yağların sürtünme katsayısı sıcaklık artkça artmaktadır, buda sınır çekme oranını düşürmektedir. Bu nedenle prosese ve sıcaklığa uygun kaydırıcı yağ seçimi yapılmalıdır. A1100-O ve A7075-O alüminyum alaşımlarının kullanıldığı çalışmada 200 °C’de yapılan deneylerde grafit-gres yağlayıcı için derin çekme oranı 2,05 iken PTFE film yağlayıcı için derin çekme oranın 2,25 olduğu görölmüşür. Bu konuda çelik üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır.
- Sacların plastik deformasyon özellikleri hadde yönüne bağlı olduğu için anizotropi sac şekillendirme konusunda önemli bir etkindir. Sac ısıtıldığı zaman malzemenin hadde geçmişı ve dolayısıyla anizotropik özellikleri ortadan kalkması yada etkisinin azalması nedeniyle şekillendirme esnasında sacın beklenmedik kusurlar gösterme olasılığı zayıflar. Dolayısıyla, yırtılma - kırılma gibi kusurlar ortaya çıkmadan yüksek derin çekme oranlarına ulaşılmasını sağlar.

- Docol ve Domex ticari adlı ekstra yüksek mukavemetli çelik saclar üzerinde yapılan deneylerde gözleendiği şekilde ve literatürden edinilen bilgiler ışığında, artan sıcaklıkla pekleşme üsteli (n) azalmakta buna karşında birim şekil değıştirme hızı duyarlılık üsteli (m) artmaktadır ve yüksek sıcaklıklarda baskın rol oynamaktadır. Bu değışim toplam uzamayı arttırırken üniform uzamanın neden olur.
- Docol ve Domex malzemelerinin şekillendirilmemiş orijinal (üreticiden geldiği gibi) halinin sertlik değeri, gerek sıcaklığı 600°C'ye çıkarılıp havada soğutulan ve gerekse 600°C'de şekillendirilen ve havada soğumaya bırakılan numuneler ile karşılaştırıldığında çok fazla değışmediği görülmüştür. Sertlik değeriindeki küçük düşüşün nedeni deformasyon yoğunluğundaki azalmadan kaynakladığı düşünülmektedir. Fakat sıcaklığı 1000°C'ye çıkarılıp havada soğumaya bırakılan ve 1000°C'de şekillendirildikten sonra havada soğumaya bırakılan Docol 22 MnB 5 malzeme numunelerin sertliği, orijinal malzeme sertlik değeri, ile karşılaştırıldığında daha büyük değeri olduğı görülmüştür. Sertlikteki artışın nedeni mikroyapıda kısmî beynit ve martenzit oluşumudur.
- Docol ve Domex malzemelerinin üreticiden geldiği durumdaki mikroyapıları oda sıcaklığı ve 600°C'de şekillendirildikleri ardından havada soğumaya bırakıldıkları ve 600°C'den şekillendirilmeden havada soğumaya bırakıldıkları durumdaki mikroyapıları ile büyük benzerlik içermektedir. Docol 22 MnB 5 sacın üreticiden geldiği durumdaki mikroyapısı ferrit matris içine dağılmış karbürlerden oluşurken 1000 °C'den havada soğumaya bırakılan numunelerin mikroyapısında ferrit, beynit ve martenzit görülmüştür.
- Yapılan deneylerde artan sıcaklıkla özellikle 800 ve 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda malzeme (Docol 22 MnB 5) yüzeyinde tufal oluşumu gözlenmiştir. Bu tufal oluşumu da malzeme yüzeyinde ve giderek malzeme hacmine doğru ilerleyen kusurlara neden olmaktadır. Malzeme yüzeyinde görünen bu kusurlarda malzemenin çabucak hasara uğramasına neden olmaktadır. Oluşan hasar şeklinde (modunda) değışim gözlenmektedir.

Üzerinde deney yapılan dört alaşımdan Docol 22 MnB5 ile 600°C’de yapılan şekillendirme ardından, 1000°C’de yapılacak ısıtma ve havada veya tercihen ütüleme kalıbı içinde süratli soğutma işlemi ile yüksek dayanımlı sac parçalar yapılmasının mümkün olduğu bu çalışma ile tespit edilmiştir. Benzer çalışma ısıtma işlemi elverişli diğer çelik alaşımlarına da uygulanarak genişletilebilir.

Bu çalışma, farklı malzemelere ait sıcak/yarı sıcak sac şekillendirme işlemi ile ilgili literatürden derlenmiş ve çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş deneysel veriler ve sonuçlarını içermektedir. Bu bilgiler ileride gerçekleştirilecek çalışmalarda yol gösterme ve karşılaştırma amaçlı olarak kullanıldığında faydalı olacak niteliktedir. Yüksek mukavemetli sac malzemelerinin şekillendirilmesi işleminin yaygın şekilde kullanılabilmesi için pek çok malzeme ile geniş sıcaklık aralıklarında ve değişik kalıp geometrileri ile deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmesi gerekmektedir. İşlemin geliştirilmesi için malzemelerin yüksek sıcaklık davranışları iyi bir şekilde analiz edilmeli ve yüksek sıcaklık şartlarında ortaya çıkacak içyapısal ve fiziksel durumları en uygun şekilde hesaba katabilecek bünyesel denklemlerin geliştirilmesine devam edilmelidir.

Günümüzde bilgi yetersizliği ve tecrübe eksikliği nedeniyle etkin şekilde kullanılamayan yüksek sıcaklıkta sac şekillendirme işlemlerinin gelecekte imalatla önemli bir paya sahip olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Askeland, D. R.**, 1994. The science and engineering of materials, 3rd Ed., PWS Pub. Boston
- ASM**, 1997. Hot Working Guide, ASM International® The materials Information society, Ed. Prasad Y. V. R. K. and Sasidhara S.
- Bolt, P. J., Lamboo, N. A. P. M. and Rozier P. J. C. M.**, 2001. Feasibility of warm drawing of aluminum product, *J. of Materials Processing Technology*, 115, 118-121.
- Chen, F-K. and Huang, T-B.**, 2003. Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets, *J. of Materials Processing Technology*
- Davies G.**, 2003. Materials for automobile bodies, 1st Ed., Butterworth-Heinemann
- Doege, E. and Dröder K.**, 2001. Sheet metal forming of magnesium wrought alloys - formability and process technology, *J. of Materials Processing Technology*, 115, 14-19.
- Doege, E. and Kurz, G.**, 2001. Development of a formulation to describe the work softening behaviors of magnesium sheets for heated deep drawing processes, *Annals of the CIRP Vol. 50/1/2001*, 177-180.
- Kim, J. H., Ryu, J. G., Choi, C. S., Na, K. H., and Kim, S. S.**, 1996. Investigation of warm deep drawability of square cups of ANSI 304 stainless sheet, *5th ICTP (Int. Conference on Technology of Plasticity)*, Columbus, Ohio, USA, October 7- 10, 739-742.
- Krajewski, P. E.**, 2001. Elevated temperature forming of sheet magnesium alloys, General Motors Research and Development Center, *SAE*, Paper No: 2001-01-3104.
- Li, D. and Ghosh, A.**, 2003-A, Tensile deformation of aluminum alloys at warm forming temperatures, *Materials Science and Engineering*, A352, 279-286

- Li, D. and Ghosh, A.**, 2003-B, Uniaxial and biaxial deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures, <http://msewww.engin.umich.edu/research/groups/ghosh/publications/WFposter/>.
- Li, D. and Ghosh, A.**, 2003-C, Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys, *Journal of Materials Processing Technology*
- Li, D., Ghosh, K. A. and Xia, X.**, 2003-D, Warm forming of aluminum sheet – a review, <http://msewww.engin.umich.edu/research/groups/ghosh/publications/review/>.
- Liu, J. –M. and Chou, S. –S.**, 2000, Effect of anisotropy in commercial purity titanium on deep drawability at elevated temperatures, *Materials Science & Technology*, 16, September 2000, 1037-1040.
- Marciniak, Z. and Duncan, J. L.**, 1992. The mechanics of sheet metal forming, Edward Arnold, London.
- Naka, T. and Yoshida F.**, 1999. Deep drawability of type 5083 aluminium-magnesium alloy sheet under various conditions of temperature and forming speed, *J. of Materials Processing Technology*, 89-90, 19-23.
- Naka, T., Torikai, G., Hino, R. And Yoshida, F.**, 2001. The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet, *J. of Materials Processing Technology*, 113, 648-653.
- Shelyaskov, S.**, 1993. Warm forging in comparison with hot and cold forging, *4th ICTP (Int. Conference on Technology of Plasticity)*, Beijing, China, September 1993, 1082-1087.
- Shipton, M. H. and Roberts, W. T.**, 1991. Hot deep drawing of titanium sheet, *Materials Science & Technology*, 7, June 1991, 537-540.
- SSAB TUNNPLAT**, 2003-A. Domex range of hot-rolled high strength sheet steel, <http://www.ssabtunnplat.com/templates/InformationMaterial.aspx?id=24>

SSAB TUNNPLAT, 2003-B. Docol range of cold-reduced steel sheet products, <http://www.ssabtunnplat.com/templates/InformationMaterial.aspx?id=2441>

SSAB TUNNPLAT, 2000, Higher strength – lower weight The new steel concept in automotive design, <http://www.ssabtunnplat.com/templates/InformationMaterial.aspx?id=2441>

Sugamata, M., Kaneko, J., Usagawa, H. and Suzuki, M., 1987. Effect of Forming Temperature on the Deep Drawability of Aluminum Alloy Sheets, *2nd ICTP (International Conference on Technology of Plasticity)*, Stuttgart, Germany, August 24-28, 1275-1281.

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

Terziakın, M., 2002. Instant heating process with electric current application to the workpiece for high strength metal forming, *US Patent No: 6.463.779*

EKLER

Ek1 Çekme deneyleri sırasında erişilen son BŞD hızı değerleri

Sıcaklıklar (°C)		ODA		400		500		600		800		1000	
Başlangıç BŞD Hızı (sn ⁻¹)		Son BŞD Hızı Sandart Sapması	Son BŞD Hızı Ortalaması	Son BŞD Hızı Sandart Sapması	Son BŞD Hızı Ortalaması	Son BŞD Hızı Sandart Sapması	Son BŞD Hızı Ortalaması	Son BŞD Hızı Sandart Sapması	Son BŞD Hızı Ortalaması	Son BŞD Hızı Sandart Sapması	Son BŞD Hızı Ortalaması	Son BŞD Hızı Sandart Sapması	Son BŞD Hızı Ortalaması
Docol 22 MnB 5	0,05	0,0004	0,0411	0,0002	0,0401	0,0008	0,0380	0,0006	0,0362	0,0006	0,0344	0,0008	0,0393
	0,001	0,0000	0,0008	0,0000	0,0008	0,0000	0,0007	0,0000	0,0006	0,0000	0,0006	0,0000	0,0008
Docol 22 MnB	0,05	0,0001	0,0406					0,0001	0,0341				
	0,001	0,0000	0,0008					0,0000	0,0006				
Domex 024 B	0,05	0,0001	0,0417	0,0006	0,0397	0,0005	0,0385	0,0007	0,0363				
	0,001	0,0000	0,0008	0,0000	0,0008	0,0000	0,0007	0,0000	0,0006				
Domex 700 MC D	0,05	0,0000	0,0432	0,0006	0,0434	0,0001	0,0429	0,0002	0,0413				
	0,001	0,0000	0,0009	0,0000	0,0009	0,0000	0,0008	0,0000	0,0007				

Ek2 Docol 22 MnB 5 malzemesinin farklı sıcaklık ve BŞD hızlarda elde edilmiş akma ve çekme mukavemetleri ve onlara ait ortalama değerleri ve standart sapmaları

Docol 22 MnB 5		Tekrar	Akma Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti Standart Sapması (MPa)	Akma Mukavemeti Ortalaması (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti Standart Sapması (MPa)	Çekme Mukavemeti Ortalaması (MPa)
Sıcaklık (°C)	Başlangıç BŞD hızı (sn ⁻¹)							
ODA	0,05	1.	385	7,94	382,0	644	10,69	641,7
		2.	388			651		
		3.	373			630		
ODA	0,001	1.	345	4,51	349,3	638	7,00	633,0
		2.	354			636		
		3.	349			625		
400	0,05	1.	275	7,64	273,3	574	13,20	585,7
		2.	280			600		
		3.	265			583		
400	0,001	1.	243	8,74	233,3	553	9,64	542,0
		2.	231			535		
		3.	226			538		
500	0,05	1.	225	7,64	223,3	448	5,57	442,0
		2.	215			437		
		3.	230			441		
500	0,001	1.	200	7,64	191,7	387	12,29	378,0
		2.	185			364		
		3.	190			383		
600	0,05	1.	178	9,29	175,3	295	7,94	298,0
		2.	183			307		
		3.	165			292		
600	0,001	1.	140	2,00	140,0	216	2,00	223,3
		2.	138			222		
		3.	142			232		
800	0,05	1.	104	1,53	102,7	177	3,46	175,0
		2.	103			177		
		3.	101			171		
800	0,001	1.	73	1,53	74,3	97	5,03	102,3
		2.	74			103		
		3.	76			107		
1000	0,05	1.	45	2,65	42,0	67	0,58	67,3
		2.	40			68		
		3.	41			67		
1000	0,001	1.	26	1,00	27,0	36	1,15	37,3
		2.	28			38		
		3.	27			38		

Ek3 Docol 22 MnB malzemesinin farklı sıcaklık ve BŞD hızlarda elde edilmiş akma ve çekme mukavemetleri ve onlara ait ortalama değerleri ve standart sapmaları

Docol 22 MnB		Tekrar	Akma Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti Standart Sapması (MPa)	Akma Mukavemeti Ortalaması (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti Standart Sapması (MPa)	Çekme Mukavemeti Ortalaması (MPa)
Sıcaklık (°C)	Başlangıç BŞD hızı (sn ⁻¹)							
ODA	0,05	1.	362	8,08	369,3	660	3,79	661,7
		2.	368			659		
		3.	378			666		
ODA	0,001	1.	350	8,72	360,0	654	2,65	655,0
		2.	366			653		
		3.	364			658		
600	0,05	1.	180	3,61	184,0	300	2,52	297,7
		2.	185			298		
		3.	187			295		
600	0,001	1.	144	3,79	148,3	212	3,79	216,7
		2.	150			220		
		3.	151			218		

Ek4 Domex 024 B malzemesinin farklı sıcaklık ve BŞD hızlarda elde edilmiş akma ve çekme mukavemetleri ve onlara ait ortalama değerleri ve standart sapmaları

Domex 024 B		Tekrar	Akma Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti Standart Sapması (MPa)	Akma Mukavemeti Ortalaması (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti Standart Sapması (MPa)	Çekme Mukavemeti Ortalaması (MPa)
Sıcaklık (°C)	Başlangıç BŞD hızı (sn ⁻¹)							
ODA	0,05	1.	445	5,13	449,3	775	8,00	767,0
		2.	455			767		
		3.	448			759		
ODA	0,001	1.	455	19,00	471,0	775	12,70	782,3
		2.	492			797		
		3.	466			775		
400	0,05	1.	350	12,58	361,7	655	13,00	647,0
		2.	360			632		
		3.	375			654		
400	0,001	1.	358	4,51	353,3	596	9,29	591,7
		2.	353			581		
		3.	349			598		
500	0,05	1.	320	5,00	315,0	500	12,34	489,7
		2.	310			476		
		3.	315			493		
500	0,001	1.	280	4,00	276,0	417	2,08	414,7
		2.	276			413		
		3.	272			414		
600	0,05	1.	249	3,06	248,3	333	2,89	329,7
		2.	251			328		
		3.	245			328		
600	0,001	1.	207	4,00	203,0	251	4,00	244,3
		2.	199			238		
		3.	203			244		

Ek5 Domex 700 MC D malzemesinin farklı sıcaklık ve BŞD hızlarda elde edilmiş akma ve çekme mukavemetleri ve onlara ait ortalama değerleri ve standart sapmaları

Domex 700 MC D		Tekrar	Akma Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti Standart Sapması (MPa)	Akma Mukavemeti Ortalaması (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti Standart Sapması (MPa)	Çekme Mukavemeti Ortalaması (MPa)
Sıcaklık (°C)	Başlangıç BŞD hızı (sn ⁻¹)							
ODA	0,05	1.	783	3,21	781,7	969	3,51	968,7
		2.	778			965		
		3.	784			972		
ODA	0,001	1.	762	11,24	752,3	954	12,12	943,0
		2.	755			945		
		3.	740			930		
400	0,05	1.	590	27,54	588,3	789	13,32	773,7
		2.	560			767		
		3.	615			765		
400	0,001	1.	545	16,52	546,0	724	8,62	722,3
		2.	530			730		
		3.	563			713		
500	0,05	1.	505	14,01	520,7	604	10,44	616,0
		2.	525			621		
		3.	532			623		
500	0,001	1.	468	8,89	461,0	541	10,21	533,7
		2.	451			522		
		3.	464			538		
600	0,05	1.	410	8,08	408,7	451	8,74	453,3
		2.	400			446		
		3.	416			463		
600	0,001	1.	329	12,01	316,7	345	12,01	332,0
		2.	316			335		
		3.	305			316		

Ek6 Docol 22 MnB 5 malzemesinin oda – 500 °C’de yapılan çekme deneylerinden elde edilmiş kopma uzaması, pekleşme üsteli, K faktörü ve R² (yakınsama değerleri)

Docol 22 MnB 5		Tekrar	lk (mm)	Kopma Uzaması (%)	Ortalama Kopma Uzaması (%)	Pekleşme Üsteli (n)	Ortalama Pekleşme Üsteli (n)	K Faktörü (MPa)	Ortalama K Faktörü (MPa)	R ² (Yakınsama Değeri)	Ortalama R ² (Yakınsama değeri)
Sıcaklık (°C)	BŞD Hızı (sn ⁻¹)										
ODA	0,05	1.	63,78	27,56	26,04	0,2938	0,289	1002,3	993,81	0,9905	0,993
		2.	62,98	25,96		0,2786		989,73		0,9941	
		3.	62,30	24,60		0,294		989,4		0,9938	
ODA	0,001	1.	65,32	30,64	28,83	0,2897	0,285	959,7	936,07	0,9883	0,989
		2.	63,32	26,64		0,2931		954,57		0,9827	
		3.	64,60	29,20		0,2717		893,94		0,9957	
400	0,05	1.	65,12	30,24	29,57	0,2553	0,238	841,05	838,37	0,981	0,984
		2.	64,34	28,68		0,2255		847,68		0,9881	
		3.	64,90	29,80		0,2324		826,39		0,9814	
400	0,001	1.	67,10	34,20	32,91	0,2084	0,205	718,27	713,80	0,9826	0,984
		2.	66,04	32,08		0,1983		701,1		0,9841	
		3.	66,22	32,44		0,209		722,03		0,9858	
500	0,05	1.	70,60	41,20	38,00	0,1561	0,155	548,84	546,60	0,9775	0,977
		2.	67,24	34,48		0,1557		541,38		0,9775	
		3.	69,16	38,32		0,1527		549,59		0,9757	
500	0,001	1.	75,80	51,60	47,03	0,1495	0,155	451,03	445,58	0,9976	0,997
		2.	71,85	43,70		0,1591		433,11		0,9972	
		3.	72,90	45,80		0,1555		452,6		0,997	

Ek7 Docol 22 MnB 5 malzemesinin 600 – 1000 °C’de yapılan çekme deneylerinden elde edilmiş kopma uzaması, pekleşme üsteli, K faktörü ve R² (yakınsama değerleri)

Docol 22 MnB 5		Tekrar	lk (mm)	Kopma Uzaması (%)	Ortalama Kopma Uzaması (%)	Pekleşme Üsteli (n)	Ortalama Pekleşme Üsteli (n)	K Faktörü (MPa)	Ortalama K Faktörü (MPa)	R ² (Yakınsama Değeri)	Ortalama R ² (Yakınsama değeri)
Sıcaklık (°C)	BŞD Hızı (sn ⁻¹)										
600	0,05	1.	71,36	42,72	45,57	0,1270	0,127	346,06	349,20	0,9858	0,989
		2.	74,10	48,20		0,1234		356,92		0,9911	
		3.	72,90	45,80		0,1301		344,63		0,9900	
600	0,001	1.	92,90	85,80	83,97	0,1117	0,117	235,53	242,21	0,9928	0,991
		2.	90,60	81,20		0,1197		238,98		0,9951	
		3.	92,45	84,90		0,1203		252,11		0,9858	
800	0,05	1.	79,20	58,40	54,57	0,1889	0,191	217,19	214,98	0,9911	0,993
		2.	76,18	52,36		0,2082		220,86		0,9923	
		3.	76,48	52,96		0,175		206,89		0,9956	
800	0,001	1.	87,00	74,00	72,13	0,095	0,103	107,38	112,83333	0,9652	0,976
		2.	88,20	76,40		0,1035		112,28		0,9804	
		3.	83,00	66,00		0,1117		118,84		0,9811	
1000	0,05	1.	64,80	29,60	32,58	0,2882	0,268	99,093	96,90	0,993	0,995
		2.	66,15	32,30		0,2628		97,787		0,9954	
		3.	67,92	35,84		0,2536		93,824		0,9965	
1000	0,001	1.	67,05	34,10	37,37	0,1091	0,111	42,119	43,171	0,949	0,924
		2.				0,0934		42,435		0,9119	
		3.	70,32	40,64		0,1313		44,958		0,9107	

Ek8 Docol 22 MnB malzemesinin oda sıcaklığında ve 600 °C’de yapılan çekme deneylerinden elde edilmiş kopma uzaması, pekleşme üsteli, K faktörü ve R² (yakınsama değerleri)

Docol 22 MnB		Tekrar	lk (mm)	Kopma Uzaması (%)	Ortalama Kopma Uzaması (%)	Pekleşme Üsteli (n)	Ortalama Pekleşme Üsteli (n)	K Faktörü (MPa)	Ortalama K Faktörü (MPa)	R ² (Yakınsama Değeri)	Ortalama R ² (Yakınsama değeri)
Sıcaklık (°C)	BŞD Hızı (sn ⁻¹)										
ODA	0,05	1.	64,10	28,20	27,90	0,2847	0,279	975,26	975,71	0,9957	0,994
		2.	64,00	28,00		0,2822		977,27		0,9929	
		3.	63,75	27,50		0,2696		974,6		0,9938	
ODA	0,001	1.	64,60	29,20	29,83	0,2889	0,276	956,75	952,68	0,9931	0,994
		2.	65,40	30,80		0,2746		954,99		0,993	
		3.	64,75	29,50		0,2649		946,29		0,9955	
600	0,05	1.	78,00	56,00	56,05	0,1209	0,124	345,48	344,14	0,9939	0,993
		2.	78,35	56,70		0,1284		346,16		0,9927	
		3.	77,73	55,46		0,1233		340,77		0,9932	
600	0,001	1.	91,45	82,90	85,47	0,1088	0,109	228,28	233,25	0,9855	0,982
		2.	92,00	84,00		0,1110		236,21		0,9810	
		3.	94,75	89,50		0,1058		235,27		0,9802	

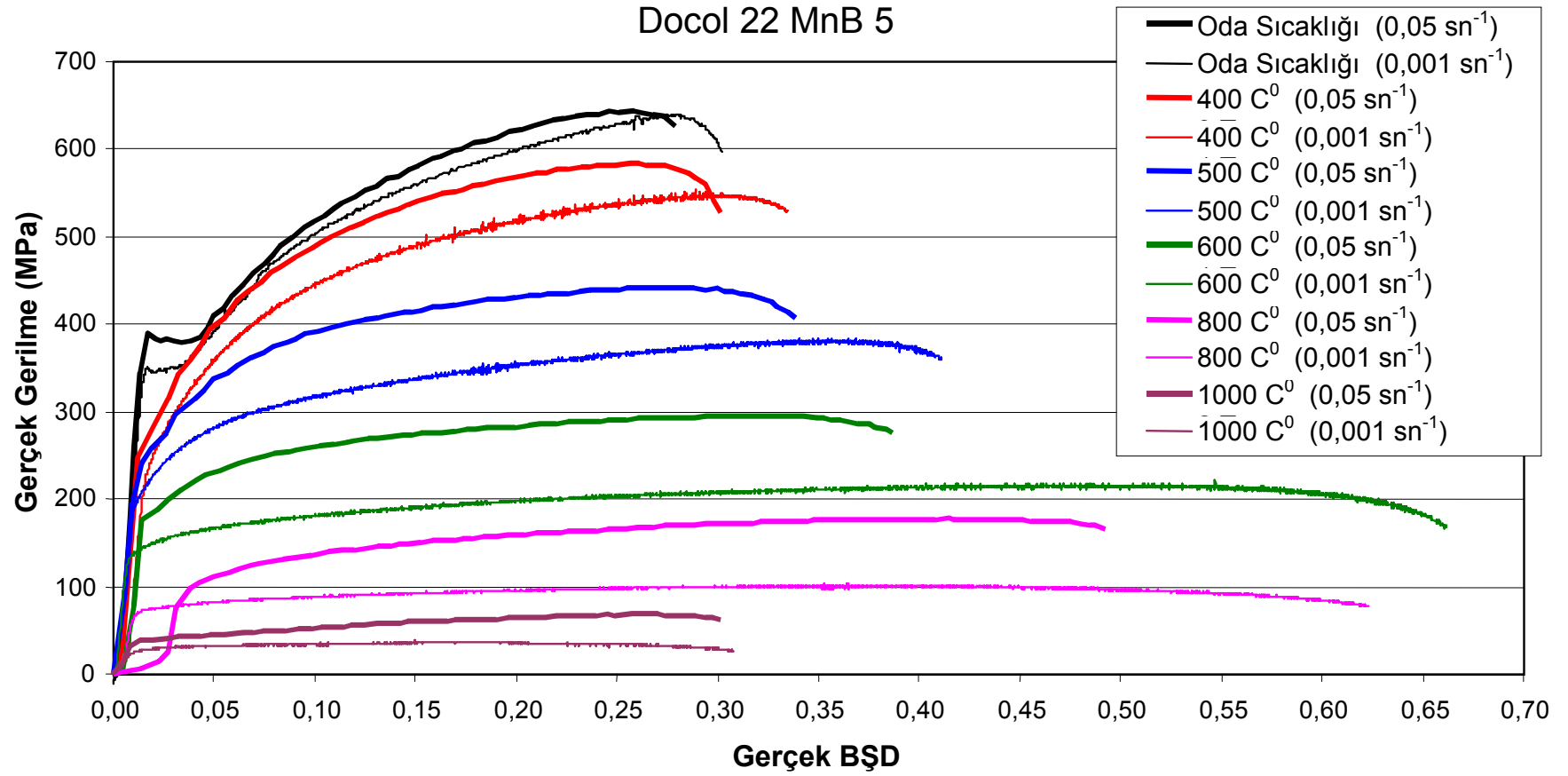
Ek9 Domex 024 B malzemesi kullanılarak yapılan çekme deneylerinden elde edilmiş kopma uzaması, pekleşme üsteli, K faktörü ve R^2 (yakınsama değerleri)

Domex 024 B		Tekrar	lk (mm)	Kopma Uzaması (%)	Ortalama Kopma Uzaması (%)	Pekleşme Üsteli (n)	Ortalama Pekleşme Üsteli (n)	K Faktörü (MPa)	Ortalama K Faktörü (MPa)	R^2 (Yakınsama Değeri)	Ortalama R^2 (Yakınsama değeri)
Sıcaklık (C)	BŞD Hızı (sn)										
ODA	0,05	1.	62,04	24,08	23,73	0,2407	0,249	1106,6	1130,07	0,9886	0,992
		2.	61,60	23,20		0,265		1170,4		0,9927	
		3.	61,95	23,90		0,2403		1113,2		0,9948	
ODA	0,001	1.	62,10	24,20	23,30	0,2339	0,238	1114,1	1140,87	0,9921	0,992
		2.	61,25	22,50		0,2446		1178,9		0,9911	
		3.	61,60	23,20		0,2358		1129,6		0,9925	
400	0,05	1.	65,14	30,28	31,31	0,1697	0,177	844,44	841,23	0,99	0,986
		2.	64,84	29,68		0,1878		838,76		0,9868	
		3.	66,98	33,96		0,1728		840,48		0,9815	
400	0,001	1.	66,98	33,96	33,23	0,1675	0,180	774,65	783,10	0,9909	0,992
		2.	66,06	32,12		0,1759		766,97		0,9929	
		3.	66,80	33,60		0,196		807,69		0,993	
500	0,05	1.	68,84	37,68	35,81	0,1072	0,111	576,79	575,05	0,9778	0,979
		2.	66,88	33,76		0,1106		559,78		0,9803	
		3.	68,00	36,00		0,1155		588,59		0,9776	
500	0,001	1.	70,30	40,60	44,21	0,1031	0,107	465,63	467,63	0,9971	0,997
		2.	71,32	42,64		0,106		468,61		0,997	
		3.	74,70	49,40		0,1132		468,65		0,9959	
600	0,05	1.	72,85	45,70	45,40	0,0745	0,077	371,75	370,28	0,9800	0,981
		2.	74,25	48,50		0,0776		367,71		0,9812	
		3.	71,00	42,00		0,0801		371,38		0,9818	
600	0,001	1.	86,70	73,40	69,71	0,0570	0,046	264,39	254,63	0,9649	0,944
		2.	83,15	66,30		0,0434		247,24		0,9381	
		3.	84,72	69,44		0,0385		252,26		0,9304	

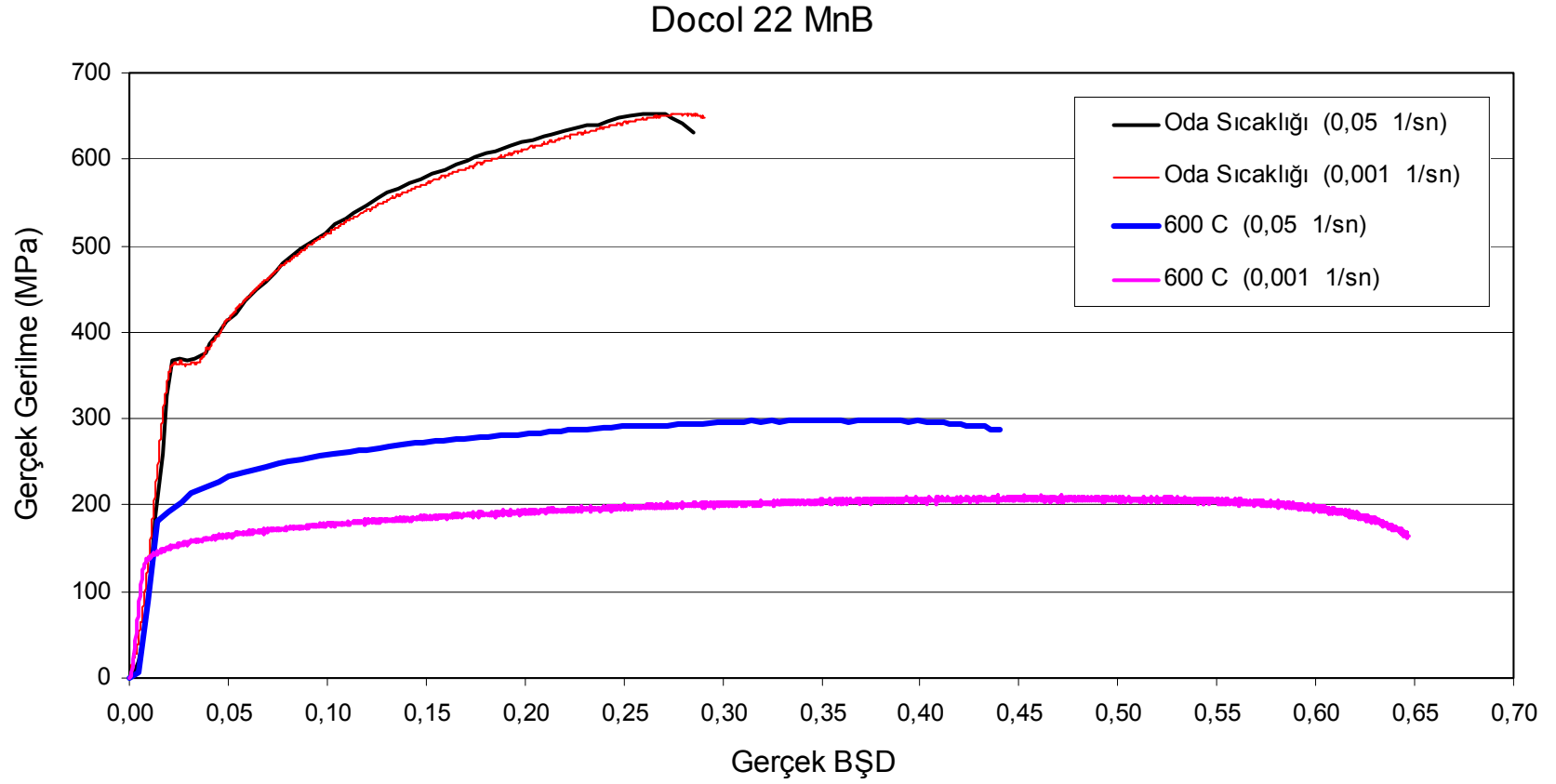
Ek10 Domex 700 MC D malzemesi kullanılarak yapılan çekme deneylerinden elde edilmiş kopma uzaması, pekleşme üsteli, K faktörü ve R^2 (yakınsama değerleri)

Domex 700 MC D		Tekrar	İlk (mm)	Kopma Uzaması (%)	Ortalama Kopma Uzaması (%)	Pekleşme Üsteli (n)	Ortalama Pekleşme Üsteli (n)	K Faktörü (MPa)	Ortalama K Faktörü (MPa)	R^2 (Yakınsama Değeri)	Ortalama R^2 (Yakınsama değeri)
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	BŞD Hızı (sn^{-1})										
ODA	0,05	1.	59,37	18,74	18,87	0,1592	0,155	1270,7	1263,33	0,9958	0,995
		2.	59,49	18,98		0,152		1254,2		0,9945	
		3.	59,45	18,90		0,154		1265,1		0,995	
ODA	0,001	1.	60,00	20,00	19,50	0,1682	0,162	1269,8	1247,30	0,9958	0,998
		2.	59,50	19,00		0,1578		1241,5		0,9989	
		3.	59,75	19,50		0,1606		1230,6		0,9987	
400	0,05	1.	60,38	20,76	18,35	0,1152	0,117	981,96	971,80	0,9921	0,989
		2.	58,58	17,16		0,1313		990,28		0,987	
		3.	58,56	17,12		0,1048		943,17		0,9885	
400	0,001	1.	59,88	19,76	20,20	0,1238	0,109	916,36	887,96	0,9859	0,987
		2.	60,33	20,66		0,1113		891,93		0,9853	
		3.	60,09	20,18		0,0931		855,58		0,9905	
500	0,05	1.	59,70	19,40	19,76	0,0652	0,069	690,32	709,62	0,9769	0,980
		2.	59,88	19,76		0,0685		712,34		0,9806	
		3.	60,06	20,12		0,0728		726,2		0,9832	
500	0,001	1.	64,77	29,54	30,17	0,0446	0,045	580,45	572,47	0,9778	0,984
		2.	65,22	30,44		0,0434		559,31		0,9869	
		3.	65,26	30,52		0,048		577,64		0,9864	
600	0,05	1.	63,00	26,00	25,45	0,0301	0,033	482,67	487,98	0,9560	0,964
		2.	62,92	25,84		0,0358		482,14		0,9687	
		3.	62,26	24,52		0,0339		499,14		0,9669	
600	0,001	1.	76,65	53,30	53,09	X	X	X	X	X	X
		2.	75,75	51,50		X		X		X	
		3.	77,24	54,48		X		X		X	

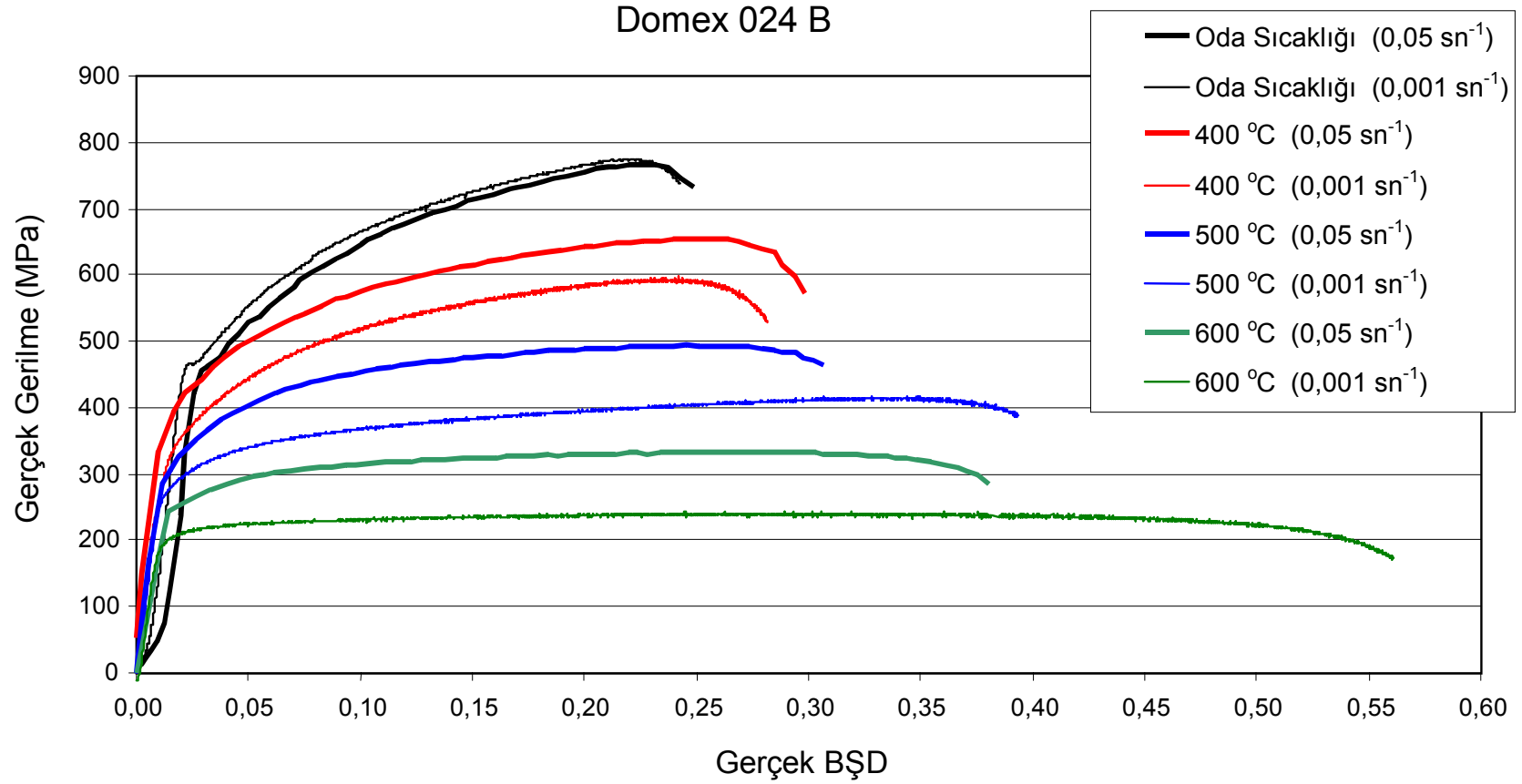
Ek11 Docol 22 MnB 5 malzemesine ait farklı sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızlarındaki gerçek gerilme–gerçek birim şekil değiştirme eğrileri (Her bir eğri bir çekme deneyine aittir.).



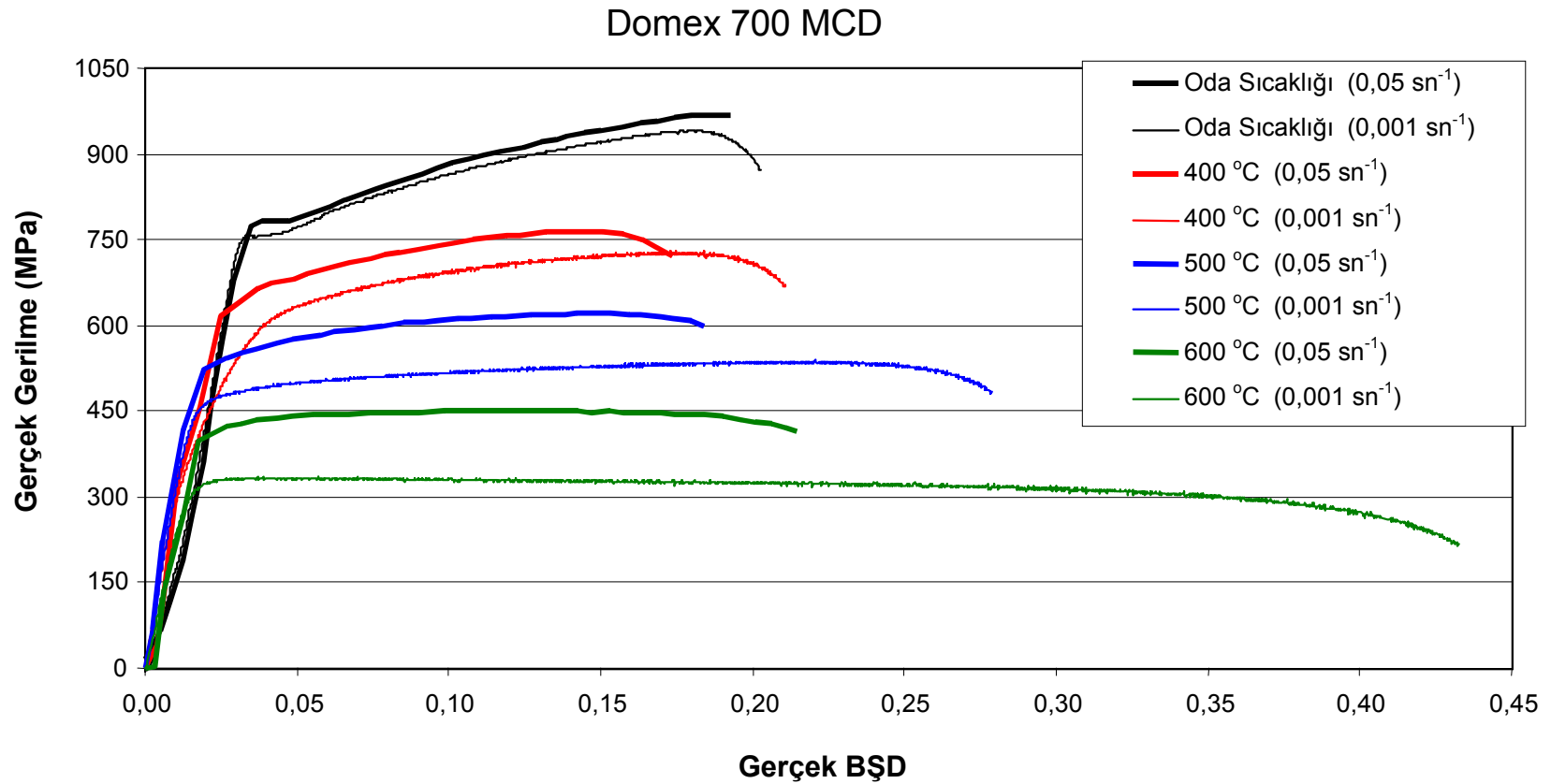
Ek12 Docol 22 MnB malzemesine ait farklı sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızlarındaki gerçek gerilme–gerçek birim şekil değiştirme eğrileri (Her bir eğri bir çekme deneyine aittir.).



Ek13 Domex 024 B malzemesine ait farklı sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızlarındaki gerçek gerilme–gerçek birim şekil değiştirme eğrileri (Her bir eğri bir çekme deneyine aittir.).



Ekl14 Domex 700 MCD malzemesine ait farklı sıcaklık ve birim şekil değiştirme hızlarındaki gerçek gerilme–gerçek birim şekil değiştirme eğrileri (Her bir eğri bir çekme deneyine aittir.).



Ek15 Sertlik ölçümleri sonunda elde edilmiş Vickers sertlik değerleri, ortalamaları ve standart sapmaları

		Çekme Hızı mm/sn (BŞD Hızı sn ⁻¹)	Ölçüm Tekrarı	Oda Sıcaklığı			600 (°C)			1000 (°C)		
				Vickers Sertliği	Ortalama Sertlik	Sertliğin Standart Sapması	Vickers Sertliği	Ortalama Sertlik	Sertliğin Standart Sapması	Vickers Sertliği	Ortalama Sertlik	Sertliğin Standart Sapması
Docol 22 MnB 5	Isıtma Soğutma Yapılmış Numune		1.	167	169	5.291503	171	169.6667	3.2145	249	252	4.258899
			2.	175			172			257		
			3.	165			166			250		
	Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.06 (0,001)	1.	207	208.3333	1.527525	179	181	2.645751	220	221	6.557439
			2.	210			180			228		
			3.	208			184			215		
		3 (0,05)	1.	220	219.6667	1.527525	189	193	3.605551	284	284	11
			2.	218			196			273		
			3.	221			194			295		
Domex 024 B	Isıtma Soğutma Yapılmış Numune		1.	219	219	2	202	197,6667	3,785939			
			2.	217			195					
			3.	221			196					
	Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.06 (0,001)	1.	265	262	3.605551	229	231.6667	3.05505			
			2.	258			231					
			3.	263			235					
		3 (0,05)	1.	278	275.6667	2.516611	234	230.3333	4.041452			
			2.	273			226					
			3.	276			231					
Domex 700 MC D	Isıtma Soğutma Yapılmış Numune		1.	274	265	7.81025	254	244.3333	8.736895			
			2.	260			242					
			3.	261			237					
	Çekme Deneyi Yapılmış Numune	0.06 (0,001)	1.	281	283.6667	2.309401	269	271	1.732051			
			2.	285			272					
			3.	285			272					
		3 (0,05)	1.	350	356	5.196152	298	295.6667	2.081666			
			2.	359			295					
			3.	359			294					

ÖZGEÇMİŞ

Suat GÜLSUYU, 04.02.1978 tarihinde İstanbul'da doğdu. 1996'da lise öğrenimini Kartal Endüstri Meslek ve Teknik Lisesi'nde Makina Bölümünde tamamladıktan sonra Ağustos 2000'de Yıldız Teknik Üniversitesi'nden Makina Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Halen İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği - Konstrüksiyon Programı'nda yüksek lisans tez çalışmasına devam etmektedir. Ayrıca İ.T.Ü. Makina Fakültesi Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.