

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**22MnB5 ÇELİK SACLARIN ELEKTRİKLİ ISITMA İLE PRESTE
SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN METALURJİK ANALİZİ VE MEKANİK
DAVRANIŞLARA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İsmail ÖZCAN**

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**22MnB5 ÇELİK SACLARIN ELEKTRİKLİ ISITMA İLE PRESTE
SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN METALURJİK ANALİZİ VE MEKANİK
DAVRANIŞLARA ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İsmail ÖZCAN
(506071410)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN (İTÜ)
Eş Danışman : Doç. Dr. Haydar LİVATYALI (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. E. Sabri KAYALI (İTÜ)
Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU (İTÜ)
Prof. Dr. Mehmet KOZ (MÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması “Isıl İşlem İle Sertleştirilebilen Çelik Sacların Yüksek Sıcaklıkta Şekillendirilmesi” isim ve 105M178 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, sorunların çözümünde özverili yardımları ve ilgilerini eksik etmeyen değerli hocalarım proje yürütücüm Doç. Dr. Haydar LİVATYALI, Yrd. Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN ve Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU’na, birlik halinde çalışma ruhunu bir an bile kaybetmeyen çalışma dostlarım Oğuzhan KURUMAHMUT ve Emre KURUMAHMUT’a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışmalarında yardımcı olan asistan arkadaşlarım Özgür ÇELİK, Onur MEYDANOĞLU ve Mert GÜNYÜZ’e, herdaim emeğini esirgemeyen atölye teknisyenlerimiz emektar Sami FİDANLI, Osman ÇELEBİ ve Erdal DİNÇ’e şükranlarımı sunarım.

Desteklerini yaşamım boyunca hissettiğim ve hissedeceğim, kutsal varlıklarım kıymetli annem ve babam Reyhan&Mehmet ÖZCAN’a teşekkür ederim.

Haziran 2009

İsmail ÖZCAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Arka Plan	1
1.2 Tezin İçeriği	2
2. SICAK SAC ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİ	5
2.1 Sıcak Sac Şekillendirme Tekniği	5
2.2 Sıcak Sac Şekillendirme Teknikleri	6
2.2.1 Doğrudan sıcak sac şekillendirme	6
2.2.1.1 Geleneksel fırında ısıtma tekniği.....	7
2.2.1.2 Elektrik ile ısıtma tekniği.....	9
2.2.2 Dolaylı sıcak sac şekillendirme.....	10
2.2.3 Yarı sıcak sac şekillendirme	10
2.3 Sıcak Sac Şekillendirmenin Üstünlükleri	11
2.3.1 Geri yaylanma etkisinin azaltılması	11
2.3.2 Uzun takım ömrü	12
2.3.3 Parça boyutlarında daha yüksek doğruluk	12
3. ULTRA YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİKLER	13
3.1 Ultra Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Metalurjik Özellikleri	15
3.1.1 Bor ile sertleştirme mekanizması	15
3.1.2 Bor ile sertleştirme mekanizmasını etkileyen parametreler.....	16
3.1.3 Termo-mekanik işlem sırasında faz dönüşümü.....	17
3.1.3.1 Martensit ve çeliklerde martensitik dönüşüm	17
3.1.3.2 Martensit başlama sıcaklığı.....	19
3.1.3.3 Çubuk (lath) martensit	20
3.1.3.4 Orta karbon martensit	20
3.1.3.5 Martensitik dönüşümü etkileyen faktörler	21
3.2 Ultra Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Karayolu Taşıtlarında Uygulamaları	23
4. 22MnB5 ÇELİK SACLARIN ELEKTRİKLİ ISITMA İLE PRESTE SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN METALURJİK ANALİZİ VE MEKANİK DAVRANIŞLARA ETKİSİ.....	25
4.1 Amaçlar.....	25
4.2 Yöntem	25
4.3 Malzeme.....	26
4.4 Optimum Östenitleme İşleminin Tayini	26

4.5 CCT Diyagramı.....	28
4.6 Deney Planı.....	29
4.7 Deney Düzeneklerinin Tasarımı	29
4.7.1 Fırında ısıtma ile preste sertleştirme ve termo-mekanik düzeneği	29
4.7.2 Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme ve termo-mekanik düzeneği	32
4.8 Fırında Isıtma ile Preste Sertleştirme Deneyi	34
4.9 Elektrikli Isıtma ile Preste Sertleştirme Deneyi.....	35
4.10 Ön Isıl İşlem Sonrası Elektrikli Isıtma ile Preste Sertleştirme Deneyi	37
4.11 Fırında veya Elektrikli Isıtma Sonrası Termo-Mekanik İşlem Deneyi	38
4.12 Kullanılan Yöntem ve Cihazlar-Yapılan Ölçümler	39
4.12.1 Mikroyapı ve EDS analizleri	39
4.12.2 Sertlik ölçümü.....	40
4.12.3 Dayanım ve süneklik ölçümü	41
4.12.4 Dinamik darbe enerjisi ölçümü.....	42
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	45
5.1 Preste Sertleştiririnin Mikroyapı Üzerindeki Etkisi ve EDS Analizleri	45
5.2 Preste Sertleştiririnin Sertlik Üzerindeki Etkisi	49
5.3 Preste Sertleştiririnin Dayanım ve Süneklik Üzerindeki Etkisi	50
5.4 Preste Sertleştiririnin Dinamik Darbe Enerjisi Üzerindeki Etkisi	52
5.5 Termo- Mekanik İşlemin Mikroyapı Üzerindeki Etkisi.....	54
5.6 Termo- Mekanik İşlemin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi.....	57
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	65
EKLER	69

KISALTMALAR

A (%)	: % Uzama
Ac₁	: Ötektoit Dönüşüm Sıcaklığı
Ac₃	: Östenit Dönüşüm Sıcaklığı
CCT	: Sürekli Soğuma Dönüşüm
DP	: Çift Fazlı (Dual Phase)
EDS	: Enerji Dağıtıcı Spektroskopi
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HMT	: Hacim Merkezli Tetragonal
HV	: Vickers Sertlik
Mf	: Martensit Bitiş Sıcaklığı
Ms	: Martensit Başlama Sıcaklığı
PAGS	: Primer Östenit Tane Boyutu
PH	: Preste Sertleşebilen
PLC	: Programlanabilir Lojik Kontrol Sistemi
Rm	: Çekme Dayanımı
Rp_{0.2}	: Akma Dayanımı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TRIP	: Dönüşüm Plastisite Çelikleri (Transformation Induced Plasticity)
TS	: Türk Standartları
TWIP	: İkizlemeyle Plastikliği Arttırılmış (Twinning Induced Plasticity)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : 22MnB5 çelik sacın kimyasal kompozisyonu.....	26
Çizelge 4.2 : Elektrikli ısıtma deney parametreleri.....	35
Çizelge 5.1 : U kanal profilin yan duvar mekanik özellikleri.....	58
Çizelge 5.2 : U kanal profilin alt duvar mekanik özellikleri	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sıcak sac şekillendirmenin şematik gösterimi	5
Şekil 2.2 : Doğrudan sıcak sac şekillendirmenin şematik gösterimi	6
Şekil 2.3 : Sıcaklık akma eğrisi değişimi (22MnB5, $t_0=1.4$ mm)	7
Şekil 2.4 : Soğuma hızına karşılık sertlik değerleri (22MnB5, $t_0=1.4$ mm)	8
Şekil 2.5 : Şekillendirme-sertleştirme işleminin şematik gösterimi	8
Şekil 2.6 : Elektrikli ısıtma ile sıcak sac şekillendirmenin şematik gösterimi	9
Şekil 2.7 : Dolaylı sıcak sac şekillendirmenin şematik gösterimi	10
Şekil 2.8 : Geri yaylanmanın grafiksel gösterimi	11
Şekil 2.9 : Sıcaklık ve geri yaylanma arasındaki ilişki	12
Şekil 3.1 : Preste sertleştirme sonrası dayanım artışının şematik gösterimi	14
Şekil 3.2 : Isıl işlem öncesi (a) ve sonrası (b) mikroyapı görüntüleri (22MnB5)	15
Şekil 3.3 : Borun sertleştirme etkisinin karbon içeriği ile değişimi	16
Şekil 3.4 : Martensit ve östenit fazının ara yüzeyinin şematik gösterimi	18
Şekil 3.5 : Martensitik dönüşümde düzlemi değiştirmeyen deformasyon	18
Şekil 3.6 : Alaşımli çelikte çubuk martensit mikroyapı görüntüleri	20
Şekil 3.7 : Plaka martensit mikroyapı görüntüsü	21
Şekil 3.8 : Dönüşüm sıcaklığı ile soğuma hızı arasındaki ilişki	22
Şekil 3.9 : Östenitleme sıcaklığı ile Ms ve γ tane boyutunun değişimi	23
Şekil 3.10 : Ms ve östenitleme süresi arasındaki ilişki (800°C)	23
Şekil 3.11 : Otomobillerde kullanılan ultra yüksek dayanımlı çelik parçalar	24
Şekil 3.12 : Usibor 1500P çeliğinin araç gövdesindeki uygulamaları	24
Şekil 4.1 : Östenitlenmiş mikroyapı görüntüleri (a) 850°C, 5dk (b) 950°C, 5dk	27
Şekil 4.2 : Tane boyutunun östenitleme süresi ve sıcaklıkla değişimi	27
Şekil 4.3 : 950°C sıcaklıkta 5 dk östenitlenmiş 22MnB5'e ait CCT diyagramı	28
Şekil 4.4 : Fırında ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği	30
Şekil 4.5 : Fırında ısıtma ile preste sertleştirme kalıp düzeneği	30
Şekil 4.6 : Fırında ısıtma ile termo-mekanik işlem deney düzeneği	31
Şekil 4.7 : Fırında ısıtma ile termo-mekanik işlem kalıp düzeneği	31
Şekil 4.8 : Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği ve ekipmanlar	32
Şekil 4.9 : Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği (elektrod tutucu)	33
Şekil 4.10 : Elektrikli ısıtma ile termo-mekanik işlem deney düzeneği	33
Şekil 4.11 : Usibor 1500 sac malzemenin su soğutmalı kalıp altında soğuma eğrisi	34
Şekil 4.12 : Usibor 1500 sac malzemenin elektrik ile ısınma eğrisi	35
Şekil 4.13 : Elektrikli ısıtmada homojen olmayan sıcaklık dağılımı	36
Şekil 4.14 : Elektrikli ısıtmada yüzey iyileştirmesi ile homojen sıcaklık dağılımı	36
Şekil 4.15 : Elektrikli ısıtma sonrasında Al-Si kaplamanın ergimiş hali	37
Şekil 4.16 : Fırında veya elektrikli ısıtma ile termo-mekanik işlem deneyleri	38
Şekil 4.17 : Termo-mekanik işlem ile şekillendirilmiş açık U kanal profil	38
Şekil 4.18 : Optik Mikroskop (İTÜ Kimya-Metalürji Fakültesi)	39
Şekil 4.19 : SEM-EDS (İTÜ Kimya-Metalürji Fakültesi)	39
Şekil 4.20 : Mikro-vickers sertlik ölçme cihazı (İTÜ Kimya-Metalürji Fakültesi)	40
Şekil 4.21 : Çekme testi numunelerinin U kanal profilden çıkarımı	41

Şekil 4.22 : Çekme testi numune boyutlarının şematik gösterimi	41
Şekil 4.23 : Shimadzu çekme test cihazı (İTÜ Makine Fakültesi)	42
Şekil 4.24 : Charpy darbe deneyi numunesi (sol) ve deney sonrası numuneler (sağ)	43
Şekil 4.25 : V çentikli dinamik darbe testi numunesi	43
Şekil 4.26 : İnstron yüksek hızda darbe test cihazı (İTÜ Kimya-Metalürji Fak.)	43
Şekil 5.1 : İşlemsiz Usibor 1500 sac malzemenin mikroyapı görüntüsü	45
Şekil 5.2 : İşlemsiz Usibor 1500 sacın kaplama görüntüsü ve çizgisel EDS analizi	46
Şekil 5.3 : İşlemsiz Usibor 1500 sacın alt metal-kaplama bölgesinin EDS analizi	46
Şekil 5.4 : Fırında ısıtma ile PH sacın mikroyapı (üst) ve kaplama (alt) görüntüsü	47
Şekil 5.5 : Fe çizgisel EDS analizi (a) işlemsiz ve (b) fırında ısıtma ile preste sert.	47
Şekil 5.6 : Elektrikli ısıtma ile PH sac mikroyapı (üst) ve kaplama (alt) görüntüsü	48
Şekil 5.7 : Ön ısıtma işlem + elektrikli ısıtma ile preste sert. sacın kaplama görüntüsü	48
Şekil 5.8 : Usibor 1500 çelik sacların vickers sertlik değişimi	49
Şekil 5.9 : Soğuma hızının sertliğe etkisi (Nippon steel)	50
Şekil 5.10 : Usibor 1500 çelik sacların dayanım ve % uzama değerlerinin değişimi	51
Şekil 5.11 : Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği ve parçalar	51
Şekil 5.12 : Usibor 1500 çelik sacların dinamik darbe enerjilerinin değişimi	52
Şekil 5.13 : Kırık yüzey görüntüsü (a) İşlemsiz (b) elektrikli ısıtma+preste sert.	53
Şekil 5.14 : Usibor 1500 üç nokta eğme test numunesi ve deney sonrası görüntüsü	53
Şekil 5.15 : Farklı çeliklere ait üç nokta eğme testi yük ölçümleri	53
Şekil 5.16 : Termo-mekanik işlem kalıp düzeneğinin şematik gösterimi	54
Şekil 5.17 : Fırında ısıtılan sacın termo-mekanik işlem sonrası mikroyapıları	55
Şekil 5.18 : Elektrikle ısıtılan sacın termo-mekanik işlem sonrası mikroyapıları	56
Şekil 5.19 : Termo-mekanik işlem sonrası U kanal profilin şematik gösterimi	57
Şekil 5.20 : Termo-mekanik işlemde kesitteki incelmenin şematik gösterimi	57
Şekil A.1 : Presto sertleştirme ıstampa katı model tasarımı.	71
Şekil A.2 : Presto sertleştirme kalıp katı model tasarımı.	71
Şekil A.3 : Presto sertleştirme elektrod tutucu katı model tasarımı.	72
Şekil A.4 : Presto sertleştirme tüm montaj katı model tasarımı.	72
Şekil A.5 : Termo-mekanik işlem ıstampa katı model tasarımı.	73
Şekil A.6 : Termo-mekanik işlem kalıp katı model tasarımı.	73
Şekil A.7 : Termo-mekanik işlem elektrod tutucu katı model tasarımı.	74
Şekil A.8 : Termo-mekanik işlem tüm montaj katı model tasarımı.	74

22MnB5 ÇELİK SACLARIN ELEKTRİKLİ ISITMA İLE PRESTE SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN METALURJİK ANALİZİ VE MEKANİK DAVRANIŞLARA ETKİSİ

ÖZET

Otomotiv endüstrisinde çarpma-kaza emniyeti ve konfor taleplerinin yükselmesine paralel olarak araç donanımları arttırılmakta ve bu da beraberinde otomobillerde ağırlık artışına neden olmaktadır. Araç ağırlığı arttıkça, yakıt tüketimi ve CO₂ gibi gazların emisyon değerleri yükselmektedir. İklim değişiklikleri üzerindeki etkileri göz önüne alınarak, gaz emisyon değerlerinin düşürülmesine yönelik çalışmalar ciddiyle yapılmaktadır. Öte yandan; petrol fiyatlarının yükseldiği bir dönemde otomobil ağırlığının azaltılması da ayrı bir motivasyondur. Ağırlık artışına karşılık, hafif ve mukavemetli malzemelerden oluşan konstruksiyonlar üzerinde, yoğun bir şekilde durulmaktadır.

Bu hedefe ulaşırken izlenmesi gereken yol; dayanım/yoğunluk oranının optimize edildiği sac metallerin tercih edilmesidir. Bir tercih, hafif metal malzemelerin kullanılmasıdır. Bir diğer tercih ise geleneksel yöntemle üretilen otomobil parçalarına kıyasla; aynı veya çok daha iyi çarpışma performansı sergileyen, kalınlığı ve ağırlığı düşük, yüksek dayanımlı çelik sacların kullanılmasıdır. Yüksek dayanımlı çelik sacların uygulamaları; geri yaylanmadaki artış ve şekillendirilme kabiliyetinin düşüşü ile bağlantılıdır. Çekme dayanımındaki artış ile kopma uzamasında bir düşüş meydana gelir ve şekillendirilebilirlik sınırlanır. Bu nedenle; karmaşık geometri ve boyutsal doğruluk imkansız hale gelmektedir. Geleneksel üretim yönteminin bu dezavantajı, preste sertleştirme işlemi ile telafi edilebilmektedir.

Sıcak sac şekillendirme ve preste sertleştirme, karmaşık geometrili ve yüksek dayanım gerektiren otomobil parçalarının üretilebildiği bir teknolojidir. Bu proses, çelik saclar için ısıtma işlemi ve şekillendirmenin birleştirildiği bir sertleştirme işlemidir. Sıcak çelik sacın, yüksek şekillenme kabiliyetinden yararlanılarak, karmaşık geometrili parçaların imalat mümkün hale gelebilmektedir. Preste sertleştirme işleminde en yaygın kullanıma sahip sertleştirilebilen sac malzeme 22MnB5'tir.

Preste sertleştirme ile üretilen otomobil parçaları ve bu teknolojinin kullanıcıları gün geçtikçe artmaktadır. Ancak; bu prosesin verimlilik ve ekonomik açıdan geliştirilmesi gereken birçok yönü mevcuttur. Bu metodun dezavantajlarından birisi, şekillendirme öncesi sacın ısıtılması için harcanan enerjidir.

Sac ısıtma tekniğinde alternatif yöntem; elektrik akımı ile ısıtmadır. Bu projede, sac metallerin elektrik akımı ile ısıtılarak preste sertleştirilmesi geliştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılan alüminyum kaplamalı 22MnB5 çelik saclar, Joule prensibine göre hızlı ısıtma imkanı sağlayan elektrikli ısıtma tekniği veya geleneksel fırında ısıtma tekniği ile östenitlenerek preste sertleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Elektrikli ısıtma tekniğinin fırında ısıtma tekniğine nazaran; düşük enerji tüketimi, az yer kaplama ve düşük maliyet gibi bir takım avantajları bulunmaktadır. Preste sertleştirme sonrası, numuneler üzerinde mikroyapı ve mekanik karakterizasyon için optik mikroskop ve sertlik ölçümleri, çekme ve yüksek hızda darbe testleri yapılmıştır.

Preste sertleştirme işlemi, oda koşullarında ferrit-perlit mikroyapısına sahip sacı, süneklik ve darbe dayanımındaki düşüşe karşılık; gerek sertlik gerekse dayanımdaki güçlü artışla martensitik yapıya dönüştürmektedir. Bunun yanısıra; kullanılan farklı ısıtma tekniklerinin kıyası açısından, malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerinde anlamlı bir fark bulunmadığı tespit edilmiştir.

INFLUENCE OF THE CONDUCTIVE HEATING ON PRESS HARDENING ON MECHANICAL AND METALLURGICAL PROPERTIES OF 22MnB5 STEEL SHEETS

SUMMARY

Recently, the weight of automobiles increased, because the requirements on crash-safety and comfort have gone up, and the vehicles are equipped with comprehensive accessories. The weight increase is leading to higher fuel consumption and the involved emissions, for example of CO₂. This is in conflict with the effort of the reduction of emissions to decrease the influence on climate change. Another motivation for the reduction of weight of automobiles is the increase of fuel prices. Against increasing weight of vehicles, the trend to develop effective light weight and strength construction strategies can be noted intensively.

One important strategy to reach this target is the reduction of the weight of car bodies by using sheet metal with an optimised rate of strength to density. On the one hand it is possible to use light metal materials. On the other hand the potential of high strength steel grades can be used to produce car components with reduced sheet metal thickness and weight, which have the same or a better crash performance compared to conventionally manufactured parts. The application of high strength steels is normally connected to an increase of spring back and a decrease of formability. A decreased fracture elongation occurs generally together with an increased tensile strength. This caused limited formability. Therefore it is not possible to realise complex geometries and contouring accuracy with these materials. Press hardening allows to compensate the disadvantages of machining in conventional manufacture processes.

Hot stamping followed by press hardening is one technology to manufacture complex highest-strength automotive components with steels. This process combines the shaping and heat treatment of a sheet metal material with the objective of hardening. It is possible to produce sheet metal parts with complex geometries and contouring with lower forming capacity by using heated blanks. A representative and mostly used steel for press hardening is the quenchable steel 22MnB5.

The number of automotive part which are manufactured by press hardening and the number of users of this technology increase. But there is a lot of room for improvement in this technology to enhance the effectiveness and the economy of this process. One disadvantage of this method is the high effort for the heating of the blanks before forming.

An alternative method of blank heating is the conductive heating. Within this project a conductive heating unit for sheet metal blanks for press hardening is developed.

Aluminum pre-coated 22MnB5 steel sheet especially used in the automotive industry was subjected to press hardening process followed by austenitizing both in a conventional furnace or in a conductive heating unit, which is an innovative method based on the Joule's principle for fast heating of the specimens. It has some advantages over conventional heating such as less energy and less space requirements and lower costs. After press hardening, microstructural and mechanical characterizations of the specimens were made by optical microscopy, hardness measurements, tensile and high speed impact tests.

Results showed that press hardening process transformed the ferritic-pearlitic microstructure in the as-received state into martensite after press hardening and caused substantial increment in hardness and strength in the expense of ductility and impact energy values. On the other hand, there was no significant difference in both microstructure and in mechanical properties with respect to the heating procedure used.

1. GİRİŞ

1.1 Arka Plan

Otomotiv üreticilerinin, pazardaki paylarını koruyabilmek için üzerinde en yoğun çalıştıkları konular; yakıt tüketimini azaltıcı teknolojiler ve kaza emniyetini iyileştirici özelliklerdir. Bunların yanı sıra, üzerinde çalışılan yeni teknolojilerin daha düşük maliyetli ve çevre dostu olmasına gösterilen özen de, üreticileri alternatif imalat yöntemleri ve yenilikçi ürünler gibi çeşitli arayışlara itmektedir. Petrole paralel olarak her türlü hammadde fiyatlarının süratle yükseldiği bir dönemde, alüminyum ve magnezyum gibi hafif metallere ve polimer matrisli kompozitlere kıyasla çelik alaşımları yine ekonomik olarak en cazip malzeme konumuna gelmiştir.

Yüksek dayanımlı metal (özellikle çelik) alaşımların oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirliği genellikle düşüktür. Bunun yanı sıra, yüksek dayanımlı çeliklerin çok fazla mikro yapısı ki bu tür çeliklerin dayanımlı olmasında en önemli etkidir, şekillendirilmeleri sırasında ortaya çıkan yüksek gerilmeler, takım ömrünü kısaltması, sınırlı şekillendirilebilirlik ve ortaya çıkan geri yaylanma kuvvetleri, sıradan sac şekillendirme yöntemlerini kullanışsız hale getirmektedir. Yüksek dayanımlı çeliklerin sıcak şekillendirilmesi, pazardan gelen taleplere cevap verebilen bir yöntem olması yanında, imal edilen parçaların yapısal özelliklerini değiştirmeden, çok daha hafif olarak üretilmeleri açısından otomotiv üreticilerinin ilgisini çekmektedir. Ancak, sıcak şekillendirme yöntemleri endüstriyel alanda sınırlı bir uygulama alanına sahiptir. Bunun nedenleri:

- Yüksek sıcaklıktaki sacların mekanik özellikleri ve mikro yapısı ile ilgili temel bilgi eksikliği,
- Sürtünme veya ısı geçişi gibi sınır koşulları,
- İmal edilen parçanın geometrik, metalurjik ve mekanik özelliklerinin proses parametrelerine olan hassasiyetleri,

şeklinde özetlenebilir.

Geleneksel sac şekillendirme yöntemlerinin aksine, sıcak sac şekillendirme, yüksek sıcaklıktaki malzeme davranışı ve ara yüz olgusu bilgisini gerektirmektedir. Bu bilgilerin ışığında istenilen mikro yapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesi mümkündür. Takımların üzerine daha az yük etkimesi ve imal edilen parçaların istenen doğru boyutlara sahip olması, yüksek sıcaklıklarda sac şekillendirmeyi yukarıda bahsedilen sınırlamalara alternatif olarak sunmaktadır.

Yüksek ve çok yüksek dayanımlı çelik saclar DP, TRIP, TWIP ve PH gibi gruplara ayrılmaktadır. Bunların ilk üçü oda sıcaklığında şekillendirilmek üzere geliştirilmiş süratle pekleşen yapıdaki saclardır. Öte yandan PH (ve bunların en yaygın kullanılanı 22MnB5) yüksek sıcaklıkta şekillendirme ve kalıp basıncı altında soğutularak sertleştirilme için geliştirilmiştir. Soğuk şekillendirme uygulama açısından genel olarak daha pratik ve ekonomiktir, ancak malzemelerin şekillendirilebilirliği düşüktür ve işlem sonrası geri yaylanma çok büyük olduğu için geometri kontrolü önemli bir teknik sorundur. Bu nedenle gerek şekillendirme kolaylığı, gerekse geri yaylanmanın tamamen ortadan kalkması sıcak şekillendirmeyi cazip kılmıştır.

1.2 Tezin İçeriği

Sıcak sac şekillendirmede malzeme ve teknoloji seçimi, verimlilik ve üretkenlik açısından oldukça önem kazanmaktadır. İşlenecek parçada optimum mekanik ve metalurjik özelliklerin sağlanması için malzemenin hangi sıcaklığa ne tür koşullarda ısıtılacağı, şekillendirme ve sertleştirme aşamasında proses ekipmanları üzerindeki iyileştirme çalışmaları, 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 alarak; geleneksel fırında ısıtma tekniği ile östenitlenerek sertleştirilen sac malzemenin, alternatif ve yenilikçi bir yaklaşım olarak, ısıtma işleminin elektrik akımı ile gerçekleştirilmesidir. Bunun yanı sıra, her iki ısıtma tekniği ile östenitleme ve sonrasındaki sertleştirme işleminde parametreleri belirleyip; 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.

Bölüm 2’de, sıcak sac şekillendirme işlemlerinde kullanılan ısıtma yöntemleri ve bunların birbirlerine karşı avantajları ve dezavantajları üzerinde durulmuştur. Öte yandan, sıcak sac şekillendirmenin soğuk sac şekillendirmeye göre üstünlükleri kısaca ifade edilmiştir.

Bölüm 3’te, çok yüksek dayanımlı çelik sacların metalurjik özellikleri ve özellikle borun sertleştirme kabiliyeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sıcak şekillendirmede hızlı soğuma ile malzemede görülen sertleşme davranışı, faz dönüşüm mekanizması ile açıklanmaya çalışılmıştır.

Bölüm 4’te, tezin amaçları ve benimsenen yaklaşımdan söz edilmiştir. Deney parametrelerinin tayini, düzeneklerin tasarımı, fırında veya elektrikli ısıtma tekniği ile preste sertleştirme ve termo-mekanik işlem deneylerinin nasıl yapıldığı hakkında bilgi verilmiş ve ölçümlerde kullanılan yöntem ve cihazlar tanıtılmıştır.

Bölüm 5’te, deneysel çalışma sonuçları ortaya konulmuştur. Prestes sertleştirme ve termo-mekanik işlemin mikroyapı, sertlik, dayanım, süneklik ve dinamik darbe enerjisi gibi malzeme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bölüm 6’da, gerek literatür gerek deneysel çalışmalar sonucunda; preste sertleştirme ve termo-mekanik işlemlerinin, hangi şartlarda ne derecede uygun bir imalat yöntemi olduğu konusunda varılan sonuçlar ve öneriler belirtilmiştir.

2. SICAK SAC ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİ

2.1 Sıcak Sac Şekillendirme Tekniği

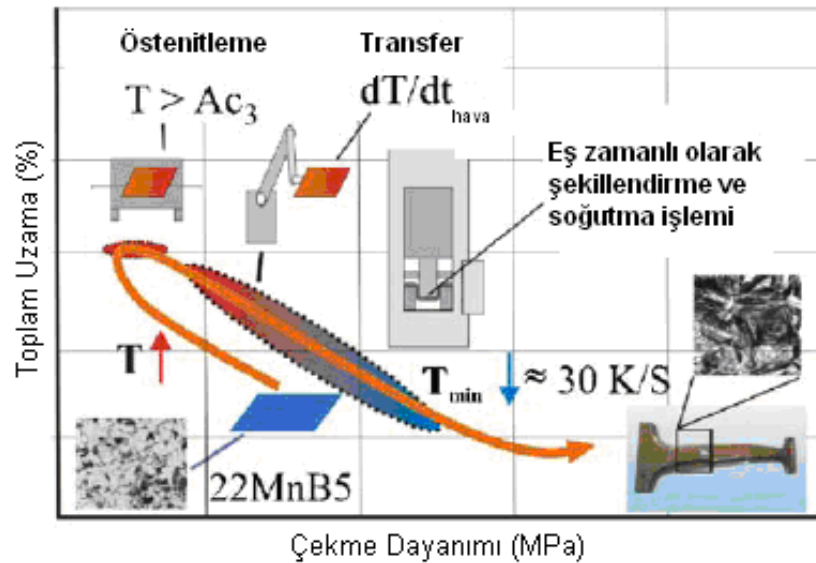
Sıcak sac şekillendirme, özellikle yüksek dayanımlı çelik sacların şekillendirilmesinde önemli iyileştirmeler sağlayan bir yöntemdir.

Proses temel olarak aşağıdaki iki adımdan oluşmaktadır:

- Östenitleme
- Şekillendirme ve ısı işlem ile sertleştirme

Sıcak şekillendirilecek sacların öncelikle, YMK yapıdaki östenit fazında olması gerekmektedir. Bu sebeple saclar A_{c3} sıcaklığının üzerine ısıtılıp, tamamen östenit içeren bir mikroyapıya sahip olmaları sağlanmalıdır.

Şekillendirme ve ısı işlem ile sertleştirme farklı adımlar gibi bir çağrışım yaratsa da, yüksek dayanımlı sacların sıcak şekillendirilmesinde eş zamanlı olarak prosese dâhil olurlar. Östenit fazındaki malzeme, yüksek sıcaklıkta şekillendirilip, kalıp altında soğutularak istenilen mikroyapı (genellikle yüksek oranda martensit veya % 100 martensit) ve mekanik özellikler elde edilir. Şekil 2.1’de sıcak şekillendirmenin şematik gösterimi verilmektedir [1].



Şekil 2.1 : Sıcak sac şekillendirmenin şematik gösterimi [1].

İşlem yüksek sıcaklıkta yapılması nedeniyle, yüksek dayanımlı çeliklerin soğuk şekillendirilmesinde ortaya çıkan yüksek gerilmeler, kısa takım ömrü, sınırlı şekillendirilebilirlik ve geri yaylanma gibi istenmeyen sonuçlara çözüm getirir [2]. Diğer yandan sıcaklık ve buna bağlı olarak faz dönüşümlerinin kontrolü önemli hale gelir.

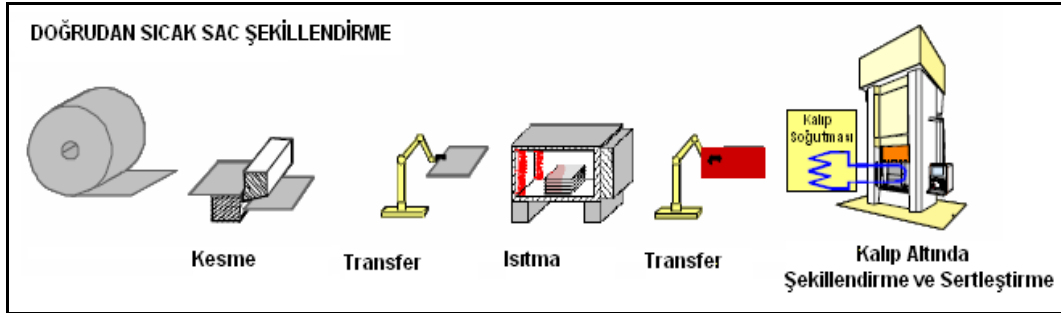
2.2 Sıcak Sac Şekillendirme Teknikleri

Sıcak sac şekillendirme teknikleri, içerdikleri adımların sırasına göre ikiye ayrılabilir [3].

1. Doğrudan Sıcak Sac Şekillendirme
2. Dolaylı Sıcak Sac Şekillendirme

2.2.1 Doğrudan sıcak sac şekillendirme

Doğrudan sıcak sac şekillendirmede, işlenmemiş sac yaklaşık 900°C-950°C östenit sıcaklığına ısıtıldıktan sonra kalıba yerleştirilir ve yüksek bir pres hızında şekillendirilir. Sac istenilen forma getirilirken simultane olarak, kalıpta uygun soğutma hızı ile istenilen sertlik derecesine ulaştırılır [3]. Şekil 2.2’de doğrudan sıcak sac şekillendirenin şematik gösterimi verilmektedir [4].



Şekil 2.2 : Doğrudan sıcak sac şekillendirmenin şematik gösterimi [4].

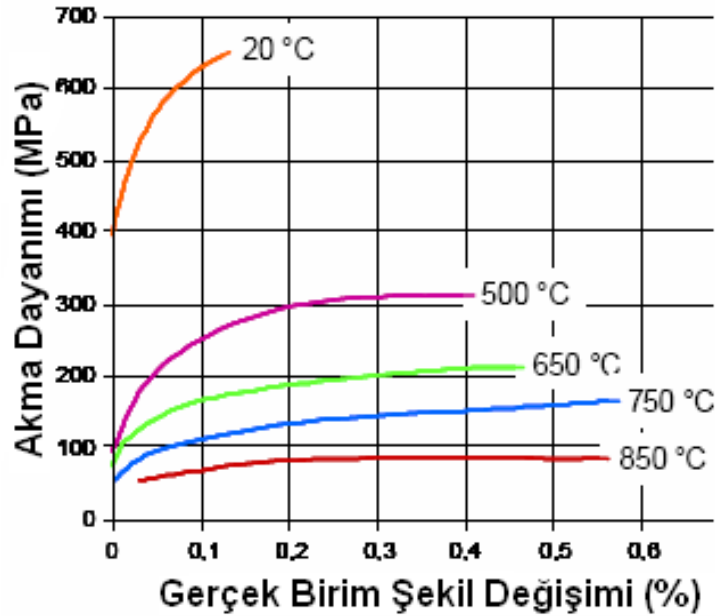
Doğrudan sıcak şekillendirme, sacın ısıtılması için izlenilen yönteme göre ikiye ayrılabilir. Bunlardan ilkinde, sac kalıba alınmadan önce fırında ısıtılırken, diğer yöntemde sac şekillendirilmeden hemen önce kalıpta elektriksel dirençten yararlanılarak ısıtılır.

2.2.1.1 Geleneksel fırında ısıtma tekniği

Bu yöntem, sacın östenitik mikroyapıya sahip olması için ilk olarak bir fırında ısıtılmasını öngörür. Prosesin aşamaları; östenitleme işlemi, sac malzemenin transferi ve sıcak şekillendirme-sertleştirme işlemi şeklinde sıralanabilir.

Östenitleme işlemi

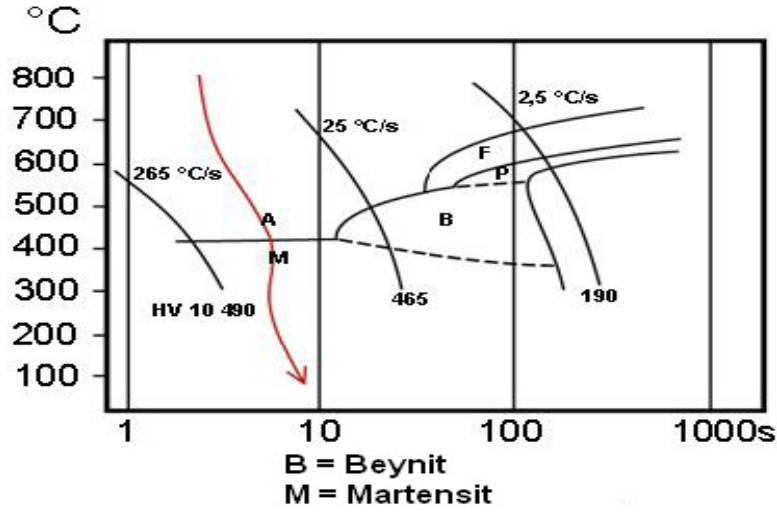
Sac malzemenin fırın içinde 900°C–950°C (östenitik faz bölgesi) sıcaklığa ısıtılması işlemidir. Şekil 2.3’de görülebileceği üzere, çok yüksek sıcaklık mertebelerine ısıtılan yüksek dayanımlı çelik sac malzemenin dayanımı düşer, oldukça sünek ve kolay şekillendirilebilecek yapısal bir dönüşüme maruz kalır [4]. Isıtma süresi sac kalınlığına bağlı olup, işlem sırasında olası dekarbürizasyonu önlemek adına atmosfer kontrollü fırınlar tercih edilir [3].



Şekil 2.3 : Sıcaklık akma eğrisi değişimi (22MnB5, $t_0=1.4$ mm) [4].

Sac malzemenin transferi

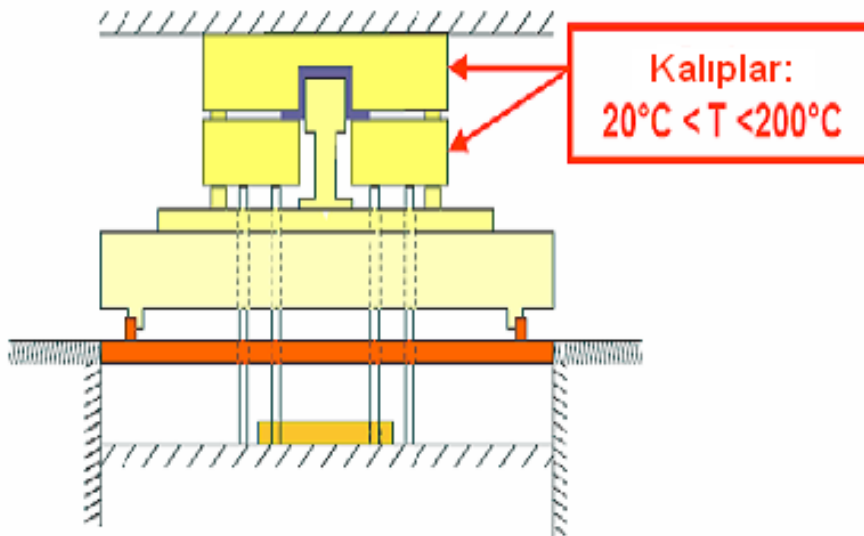
Östenit sıcaklığına ısıtılmış sac malzeme, nihai üründe elde edilmek istenen sertlik değerinin CCT diagramında karşılık gelen soğuma eğrisi dikkate alınarak, hızla pres içine taşınması gerekir (Şekil 2.4) [4]. Tümüyle martensitik yapının arzulandığı durumda, pres altında kalıp temasının başladığı anki malzeme sıcaklığı olan östenit dönüşüm sıcaklığı 780°C’nin altında olmamalıdır [3]. Aksi takdirde; mikroyapıda beynit ve/veya ferrit oluşumlarının önü açılır. Endüstriyel işlemler için, yalıtılmış taşıyıcılar içeren otomatik taşıma sistemleri uygulanabilir [5].



Şekil 2.4 : Soğuma hızına karşılık sertlik değerleri (22MnB5, $t_0=1.4$ mm) [4].

Şekillendirme-sertleştirme işlemi

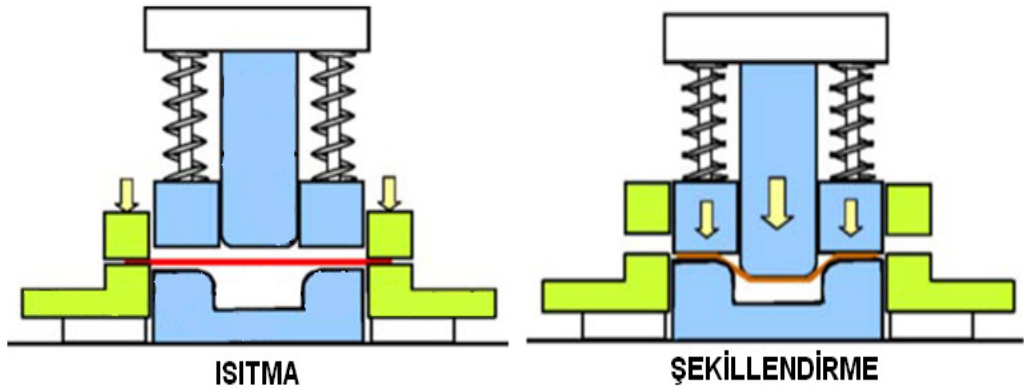
Robotik bir kol yardımı ile su soğutmalı kalıp içine nakledilen çelik sac malzeme, hidrolik pres yardımıyla 10-15 saniye boyunca, eş zamanlı olarak kalıp altında şekillendirme ve soğutma işlemlerine tabi tutulur. İşlem sonunda parça boyutlarında yüksek doğruluk elde etmek için kalıptan alınıp havada soğumaya bırakılacak nihai ürünün sıcaklığının, yaklaşık 80°C olması gerekmektedir [3]. Şekil 2.5'te yüksek dayanımlı çelik sac malzemelerde, su soğutmalı kalıp altında şekillendirme ve sertleştirme işleminin şematik gösterimi verilmektedir [6]. Fırında ısıtmanın avantajı homojen sac sıcaklığını sağlaması, dezavantajı ise fırından kalıba taşınması sırasında gerçekleşen süratli ısı kaybıdır.



Şekil 2.5 : Şekillendirme-sertleştirme işleminin şematik gösterimi [6].

2.2.1.2 Elektrik ile ısıtma tekniği

Son yıllarda Türkiye’de geliştirilen, patenti Mehmet Terziakın’a ait ve birçok üniversitede araştırma konusu olan elektrik ile ısıtma tekniği, fırında ısıtmaya göre sağladığı bir takım avantajlar nedeniyle araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Bu yöntemde, yüksek dayanımlı çelik sac malzeme fırında ısıtılarak östenit fazına ulaştırılması yerine, ısıtma işlemi kalıba entegre edilmiş elektrotlar aracılığı ile yapılmaktadır. Öncelikle malzeme elektrotların üzerine yerleştirilir. Pnömatik silindirler sacı çift taraflı olarak bir plaka ile elektrot arasına sıkıştırır ve hemen ardından yüksek akımda elektrik akımı, elektrotlar aracılığı ile saca iletilir. Malzemenin öz direncinden yararlanılarak, uygulanan elektrik enerjisi ısıya dönüştürülür. Çelik sac, A_{c3} sıcaklığının üstüne 4-5 saniye gibi kısa bir sürede ulaşır ve uygulanan yüksek akım kesilir. Akım kesilir kesilmez, pres harekete geçer ve su soğutmalı kalıp altında şekillendirme-sertleştirme işlemi eş zamanlı olarak gerçekleştirilir (Şekil 2.6) [7].



Şekil 2.6 : Elektrikli ısıtma ile sıcak sac şekillendirmenin şematik gösterimi [7].

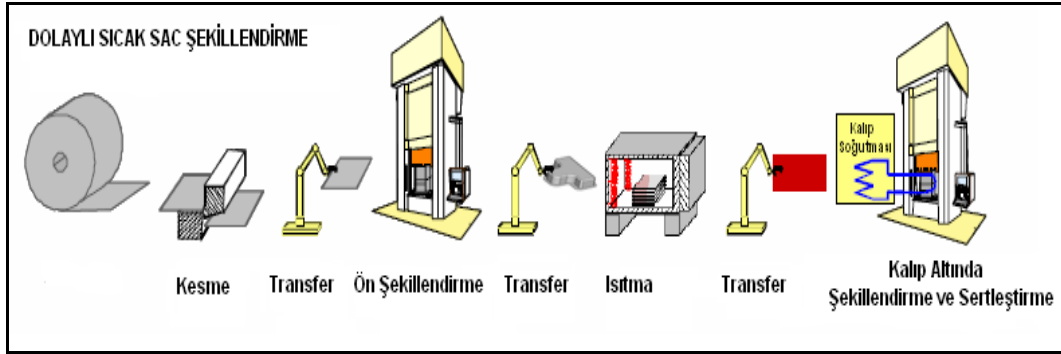
Elektrik ile ısıtma tekniğinin geleneksel fırında ısıtma tekniğine kıyasla ortaya çıkan üstünlükleri şöyle sıralanabilir [4].

- Düşük ısıtma süresi
- Düşük toplam maliyet
- Enerji tüketiminde azalma
- Daha az yer kaplaması
- İyi tekrarlanabilirlik

Öte yandan karmaşık geometrili parçaların homojen bir şekilde ısıtma zorluğu, elektrikli ısıtma tekniğinin bir dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.2.2 Dolaylı sıcak sac şekillendirme

Doğrudan sıcak şekillendirmenin aksine dolaylı sıcak şekillendirmede sac, ilk olarak geleneksel bir kalıpta, soğuk şekilde %90–%95 mertebesinde bir ön şekillendirmeye tabi tutulur. Ön şekillendirilmiş sac, fırın içinde östenit sıcaklığına ısıtıldıktan sonra soğutmalı kalıpta sertleştirilerek istenilen nihai şekil ve mikroyapı elde edilir. Dolaylı sıcak şekillendirmenin asıl önemli getirisi, abrasif aşınmayı azaltmasıdır. İşlenmemiş parça ile kalıp arasındaki bağıl hareket, sıcak şekillendirme sırasında kalıp yüzeyinde büyük aşınmalara sebep olur [8]. Parçanın önceden şekillendirilmiş olması bu aşınmaların azalmasını sağlar. Şekil 2.7’de dolaylı sıcak sac şekillendirme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [4].



Şekil 2.7 : Dolaylı sıcak sac şekillendirmenin şematik gösterimi [4].

2.2.3 Yarı sıcak sac şekillendirme

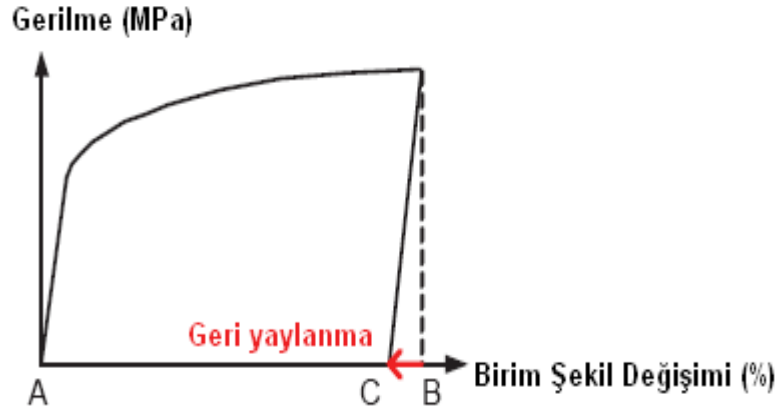
Yarı sıcak sac şekillendirme işlemi, sıcak sac şekillendirme işlemine; proses adımları açısından çok benzemekle beraber küçük bir farkla ayrılmaktadır. Fırında östenit sıcaklığına ısıtılan kimi sac malzemelerin kalıba transferi sırasında, oksitlenme riski göz önüne alınarak galvanizlenmiş (ince çinko tabakasıyla kaplanmış) çelik saclar tercih edilmektedir. Galvanizli çelik saclarda, yüksek sıcaklığa maruz kalan çinko tabakasının buharlaşma tehlikesi mevcuttur. Bu nedenle yarı sıcak sac şekillendirmede, işlem A_{c1} sıcaklığının altında bir değerde gerçekleştirilir. [9].

2.3 Sıcak Sac Şekillendirmenin Üstünlükleri

Sıcak sac şekillendirme işleminin soğuk sac şekillendirme işlemine kıyasla öne çıkan üstünlükleri; geri yaylanma etkisinin azalması, uzun takım ömrü ve parça boyutlarında daha yüksek doğruluk şeklinde sıralanabilir.

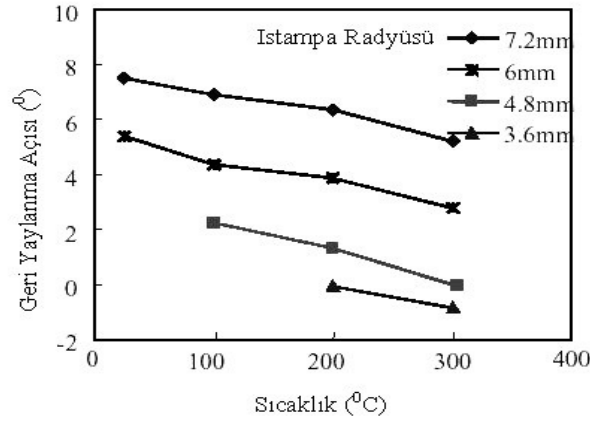
2.3.1 Geri yaylanma etkisinin azaltılması

Soğuk sac şekillendirme koşullarında, sacın şekillendirilmesi için uygulanan yük kaldırıldıktan sonra, malzemede oluşan deformasyonun bir kısmı geri kazanılır. Deformasyondaki bu azalma, uygulanan kuvvetin yarattığı elastik ve plastik deformasyonun, elastik kısmının geri kazanılmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 2.8) [10].



Şekil 2.8 : Geri yaylanmanın grafiksel gösterimi [10].

Şekil 2.9, çeşitli ıstampa yarıçapları için sıcaklık ve geri yaylanma arasındaki ilişkiyi göstermektedir [10]. Istampa yarıçapına bakılmaksızın şekillendirme sıcaklığı arttıkça geri yaylanmanın azaldığı görülmektedir. Bu da bize sac metallerin yüksek sıcaklıklarda yalnızca şekillendirilebilirliklerinin yüksek olduğunu değil, geri yaylanmalarının da daha düşük olduğunu göstermektedir. Geri yaylanmanın hem elastisite modülünden hem de akma dayanımından etkilendiği iyi bilinir. Sıcaklık artışı ile sac malzemenin akma mukavemetinin ve elastiklik modülünün düşmesinden dolayı; yüksek sıcaklıklarda geri yaylanmadaki azalma, akma mukavemetindeki ve elastiklik modülündeki azalmadan kaynaklanır (Çizelge 2.1) [11].



Şekil 2.9 : Sıcaklık ve geri yaylanma arasındaki ilişki [10].

Çizelge 2.1 : Elastiklik modülü ve akma dayanımının sıcaklıkla değişimi [11].

Sıcaklık [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Elastiklik Modülü [GPa]	212	205	200	164	158	140	95	62	55	45
Akma Dayanımı [MPa]	370	362	350	338	295	254	167	95	72	46

2.3.2 Uzun takım ömrü

Sıcaklık, atomların hareket yeteneğini arttırdığı için çelik sac malzemelerin içyapılarında difüzyon esaslı mekanizmaların etkin rol oynamasına neden olmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda atomsal boşluk yoğunluğu da yükselmekte, bu ise dislokasyonların tırmanma ve kayma hareket kabiliyetlerini maksimize etmekte ve plastik şekil değişiminin daha kolay gerçekleşmesi olasılığı artmaktadır [12]. Bir başka deyişle yüksek sıcaklıkta sac malzemenin akma ve çekme dayanımı düşmekte ve daha sünek bir yapıya sahip olmaktadır. Bunun sonucunda ısıtılan malzemeye daha düşük ıstampa kuvveti ile istenilen şekil verilebilmekte ve takım-parça ara yüzeyindeki aşınmalar azaltılıp, takım ömrü uzatılabilmektedir.

2.3.3 Parça boyutlarında daha yüksek doğruluk

Bölüm 2.3.1'de belirtildiği gibi, geri yaylanma etkisinin ortadan kaldırılmasıyla, daha yüksek boyutsal doğruluk elde etmek mümkündür. Boyutsal doğruluğu etkileyen diğer bir faktör ise artık gerilmelerdir. Sıcak sac, soğuk kalıpla temas ettiğinde malzemede çekme etkisi ortaya çıkar. Ancak sacın kalıbın içinde olması bu çekme etkisini kontrol altında tutar ve kalıp bir nevi ütüleme etkisi gösterir. Böylece sac bünyesinde daha az artık gerilmeler oluşur ve bu da beraberinde daha kesin bir boyutsal doğruluk sağlar.

3. ULTRA YÜKSEK DAYANIMLI ÇELİKLER

Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelikler birkaç farklı biçimde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar aşağıdaki başlıklar altında gruplandırılır.

Metalurjik sınıflandırma:

- Düşük dayanımlı çelikler: Yumuşak çelikler
- Geleneksel yüksek dayanımlı çelikler: Karbon-mangan (C-Mn) çelikleri, fırınlanarak sertleştirilen (BH)
- Çok yüksek dayanımlı çelikler: Çift fazlı (DP) çelikler, TRIP çelikleri, kompleks fazlı (CP) çelikler, martensitik çelikler ve yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler (HSLA)

Mekanik özelliklere (çekme dayanımı) göre sınıflandırma:

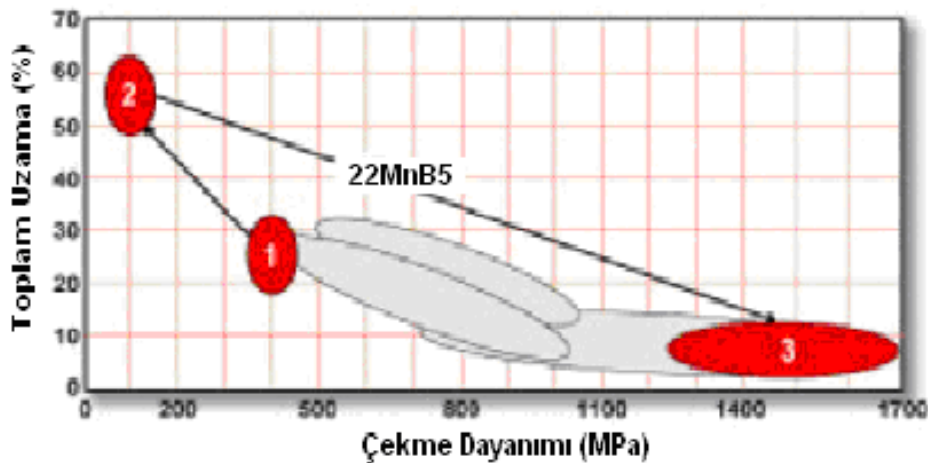
- Düşük dayanımlı çelikler (LSS): Çekme dayanımı <270 MPa
- Yüksek dayanımlı çelikler (HSS): Çekme dayanımı 270-700 MPa
- Ultra yüksek dayanımlı çelikler (UHSS): Çekme dayanımı >700 MPa

Özel bir tanımı olmamakla beraber; ekseriyetle akma dayanımı 560 MPa'ın üzerinde olan çelikler, ultra yüksek dayanımlı çelikler olarak bilinir [3]. Bu çeliklere ultra yüksek dayanım kazandırabilmek için birtakım dayanım arttırıcı yöntemlere başvurulmaktadır. Bunlar şöyle sıralanabilir [13]:

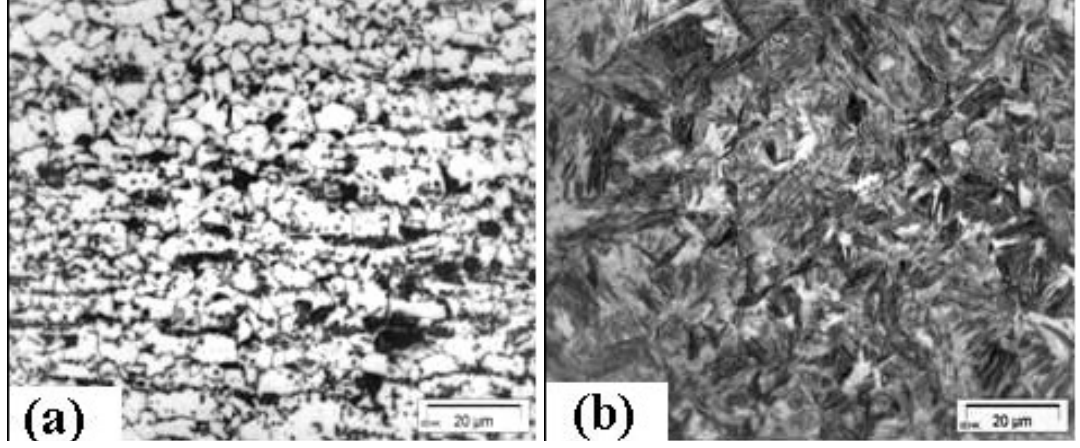
- Katı çözelti sertleştirilmesi (C, Mn, Si gibi arayer ve yeralan atomları yardımıyla)
- Çökelti sertleştirilmesi (Ti, Nb, V)
- Tane küçültme
- Dislokasyon sertleştirilmesi
- Dönüşüm sertleştirilmesi (martensit)

Dayanım arttırıcı yöntemler üzerinde, birçok araştırmacı oldukça çok sayıda çalışma ortaya koymuştur. Son yıllarda otomotiv endüstrisinde; araç ağırlığını azaltmak ve çarpma-kaza emniyetini arttırmak için dayanımın yanı sıra, şekillenebilirliği ve darbe dayanımı yüksek sac ürünlere ihtiyaç doğmuştur. Bu beklentiler UHSS (ultra yüksek dayanımlı çelik) ve alüminyum saclar tercih edilerek karşılanmaya çalışılmıştır. Kompleks şekilli parçalar için araç ağırlığını düşürmekte alüminyum sac kullanımı çözüm olmasına karşın; yüksek maliyeti ve sınırlı dayanıma sahip olması bir handicap olarak ortaya çıkmıştır [14]. Öte yandan UHSS saclar, karmaşık geometrili olmayan parçalarda, yüksek dayanım ve kaynak kabiliyetine ve oldukça iyi darbe direncine sahip olması nedeniyle etkin bir çözüm olarak sunulmaktadır [15].

Farklı bileşimde ultra yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik saclardan, endüstriyel alanda en yaygın kullanıma sahip olan 22MnB5'tir. Bu çelik saclar, ısıtılma veya preste sertleştirme sonrası, düşük karbon oranına rağmen özellikle içerdiği mangan ve bor elementlerinin güçlü sertleştirme etkisi ile, 1500 MPa'nın üzerinde çekme, 1100 MPa'nın üzerinde de akma dayanımına sahip hale gelir. Bor elementinin sertleştirme mekanizmasındaki aktif rolü nedeniyle bor çelikleri olarak da adlandırılan 22MnB5 çelik sacların, preste sertleştirme sonrası dayanım artışı, Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilmektedir [16]. 22MnB5 çeliğine ait ısıtılma öncesi ve sonrası mikro yapı görüntüleri gösterilmektedir. İşlem öncesi ferrit, perlit ve karbür içeren yapı; işlem sonrasında martensitik bir yapıya dönüşmüştür (Şekil 3.2) [3].



Şekil 3.1 : Preste sertleştirme sonrası dayanım artışının şematik gösterimi [16].



Şekil 3.2 : Isıl işlem öncesi (a) ve sonrası (b) mikroyapı görüntüleri (22MnB5) [3].

3.1 Ultra Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Metalurjik Özellikleri

3.1.1 Bor ile sertleştirme mekanizması

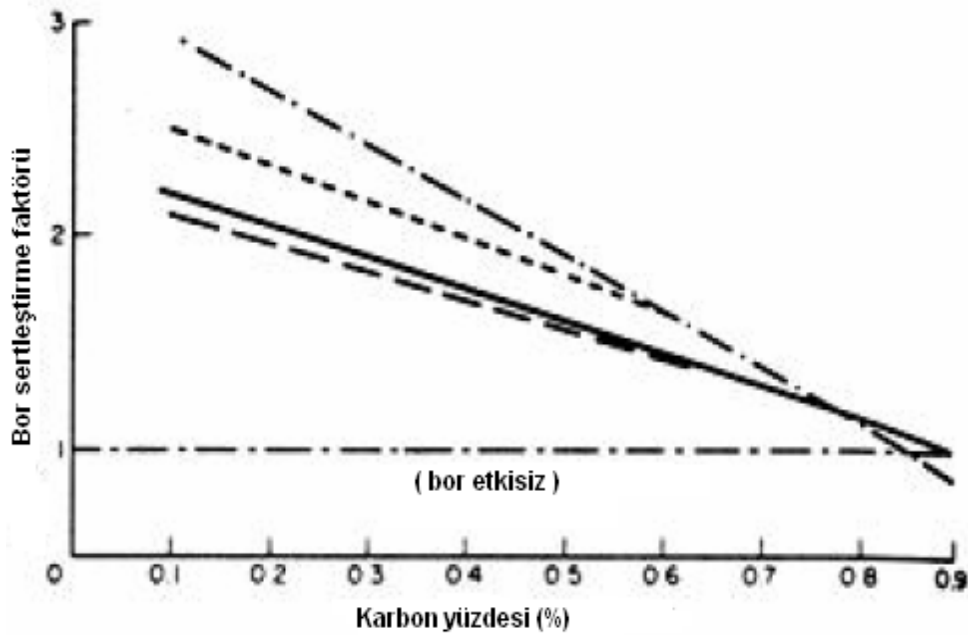
Düşük alaşımlı çeliklere, 10–20 ppm civarında bor katkısı ile östenit tane sınırları boyunca borun segregasyonu sağlanır [17, 18] ve böylece ferritin çekirdeklenmesi engellenerek malzemenin sertleşebilirliği artırılır [19, 20]. Bu mekanizmanın işleyişine dair iki yaklaşım geliştirilmiştir. İlk model; östenit tane sınırlarındaki borun yüzey enerjisini düşürmesi [21] ve düşük yüzey enerjisi ile ferritin çekirdeklenmesinin engellenmesi şeklindedir [22, 23]. Diğer yaklaşımda [24, 25] ise çekirdeklenmeyi durdurucu faktör olarak, östenit tane sınırlarındaki $\text{Fe}_{23}(\text{CB})_6$ partikülleri gösterilmektedir. Öte yandan, 5 ppm altındaki bor, yeniden kristalleşme kinetiğinde etkisiz kalırken; 20 ppm üzerindeki bor, doygunluk etkisi gösterir [26].

Borun sertleşebilirlik üzerindeki etkisi ile ilgili birçok çalışma literatürde mevcut iken [27, 28]; sıcak işleme etkisine dair çalışmalar sınırlı sayıdadır. Östenit tane sınırlarındaki bor segregasyonu, tane sınırlarının termodinamik karakteristiğini değiştirir [29]. Östenitleme sıcaklığından veya izotermal deformasyon bölgesinden hızlı soğutma yapıldığında tane sınırlarındaki bor segregasyonu, denge seviyelerinin üstüne çıkar [30].

3.1.2 Bor ile sertleştirme mekanizmasını etkileyen parametreler

22MnB5 bor çeliklerinde, bor katkısı oldukça güçlü sertleştirme etkisi yaratır. 20 ppm mertebelerinde bor katkısı, %0,6 Mn veya %0,7 Cr veya % 0,5 Mo veya %1,5 Ni ile eşdeğer ölçüde sertleştirici unsur olarak kendini göstermektedir [31]. 22MnB5 bor çeliğinin sertleşme kabiliyetini etkileyebilecek olan diğer faktörler; östenitleme sıcaklığı ve süresi, östenit tanelerinin boyutu, önceden yapılmış olan ısıt işlemler, karbon içeriği, diğer alaşım elementleri (azot, titanyum, alüminyum gibi kalıntı ve katışkıları) şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Chongzhe [32] Grange and Mitchell [33], bor çeliklerinde optimum sertleşme kabiliyetini elde edebilmek için A_{c3} sıcaklığının üstünde mümkün olan en düşük sıcaklıkta su verme işleminin yapılmasını önermektedir. Chongzhe, Grange and Mitchell göre tane sınırlarındaki bor konsantrasyonu ile katı çözelti bor konsantrasyonu arasında bir rekabet vardır. Östenitleme sıcaklığı arttıkça katı çözelti halindeki bor miktarı artmakta ve bu nedenle sertleşebilme kabiliyeti düşmektedir. Şekil 3.3'de düşük alaşımlı bor çeliklerinde artan karbon içeriğine karşılık borun sertleştirme etkisinin düştüğü görülmektedir. Görülen o ki; bor, sertleştirme kabiliyetini düşük karbonlu çeliklerde efektif bir şekilde ortaya koyarken, %0,8 ve üzerindeki karbon içeriğinde ise etkisiz kalmaktadır [27].



Şekil 3.3 : Borun sertleştirme etkisinin karbon içeriği ile değişimi [27].

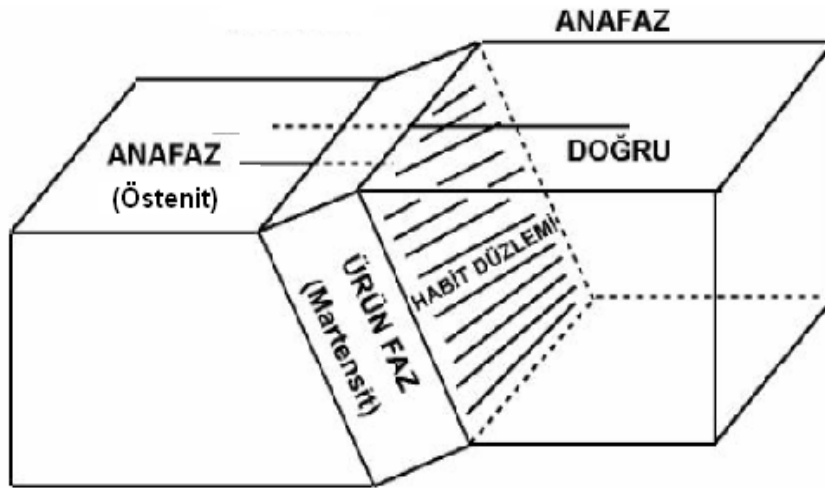
3.1.3 Termo-mekanik işlem sırasında faz dönüşümü

3.1.3.1 Martensit ve çeliklerde martensitik dönüşüm

Demirin en önemli allotropu olan martensit, yarı kararlı bir faz olup dayanımı ferritten 3–4 kat yüksektir [34]. Martensitik dönüşümün gerçekleşebilmesi için malzeme kompozisyonunda bulunması gereken minimum karbon yüzdesi 0.4'tür [35]. Martensit, 3500 MPa dayanım ve 200 MPa-m^{1/2} tokluk değerlerinin birlikte gözlemlenebildiği, çelikler için oldukça önemli bir fazdır.

Martensitik dönüşüm, ana fazın ani soğutulması veya dışardan uygulanan mekanik zorlamanın ayrı ayrı veya birlikte etkimesiyle meydana gelen faz dönüşümüdür. Çeliğin östenit bölgeden ani olarak hızla soğutulması neticesinde YMK yapıdaki östenit, oda sıcaklığında dengeli HMK yapıdaki ferrite dönüşmeye fırsat bulamaz. Bunun yerine içindeki fazla karbonu difüzyon ile atamamış, kararsız ve çarpılmış durumda, aktivasyon enerjisi ferrite göre daha düşük olan, HMT (hacim merkez tetragonal) yapıdaki martensite dönüşür. İlk durumdaki birim hücreyi oluşturan atomlar, bu işlem esnasında, iki atom aralığından daha küçük bir mesafede yerleşimlerini hep birlikte ve aynı hızda (ses hızında) değiştirirler. Bu yer değiştirme sonucu atomların önceki komşulukları değişmez [36]. Bu mertebedeki yüksek hızda kristolografik değişim, difüzyon mekanizmasının devre dışı kaldığını ortaya koyar [34].

Östenit fazının ani ve hızlı bir şekilde soğutulması ile martensit başlama sıcaklığı olan Ms sıcaklığından itibaren, östenit yapı içerisinde martensitik kristal yapılar oluşmaya başlar. Kristalografik açıdan en belirgin özellik, östenit ile martensit yapı arasındaki ortak bir ara yüzey düzleminin bulunmasıdır. Bu ara yüzey düzlemi yerleşim düzlemi (habit plane) olarak adlandırılır (Şekil 3.4) [36]. Bunun yanı sıra dönüşüm sonucu mevcut iki yapı arasında belirli bir dönme bağıntısı ortaya çıkar. Çünkü östenit yapıdaki doğrular martensit yapıdaki doğrulara ve benzer şekilde östenit yapıdaki düzlemler de martensit yapıdaki düzlemlere dönüşür.



Östenitik fazdan martensit faza olan dönüşümlerde görülen şekil deformasyonu, toplam şekil deformasyonu olarak adlandırılır. Toplam şekil deformasyonunun kaynağını, düzlemi değişmez bırakan deformasyon sağlar. Düzlemi değiştirmeyen deformasyon, yerleşme düzlemine paralel olarak uygulanan basit kesme ve bunun etkisi ile ortaya çıkan hacim değişikliğidir. Düzlemi değişmez bırakan deformasyon şartını sağlayan şematik bir gösterim Şekil 3.5'te görülmektedir [36]. ABCD dörtgeni nihayetinde AB"C"D geometrik yapısına dönüşmektedir. Bu şekil deformasyonu, B noktasını B' noktasına ve C noktasını C' noktasına dönüştüren s kesme doğrultusundaki S kesme büyüklüğü etkisi ile B' noktasını B" noktasına ve C' noktasını C" noktasına dönüştürür. Bu dönüşüm işlemi yerleşim (habit) düzlemine dik doğrultudaki ΔV hacim değişimi ile açıklanabilir.

Martensit gerek çarpılmış yapısından dolayı iç gerilmeler içerdiğinden gerekse içinde 10^{11} adet/cm² mertebelerinde dislokasyon yoğunluğu bulunduğundan dislokasyon hareketlerinin kolaylıkla gerçekleşebildiği bir ortam sağlamamaktadır. Dislokasyon hareketlerinin bu şekilde kısıtlanması malzemenin dayanım artışına neden olmaktadır [12].

Bu tür yapılara uygulanan menevişleme ve temperleme işlemi tetragonal yapıda sıkışmış halde bulunan karbonun difüzyonuna neden olduğundan kafesteki çarpılma miktarı azalır ve sertlikte düşme görülür. Menevişleme işleminin aşırı uygulanması durumunda yapı temperlenmiş-martensit halinden giderek ferrite dönüşmektedir. Bu işlem arzulanan sertlik elde edilinceye kadar sıcaklık ve süre ile oynanmak suretiyle gerçekleştirilmektedir [12].

İdeal olarak, martensitik dönüşüm; difüzyonsuz, kristalografik bir karakterde, atermal kayma mekanizmalarının geçerli olduğu bir faz dönüşümüdür [36].

3.1.3.2 Martensit başlama sıcaklığı

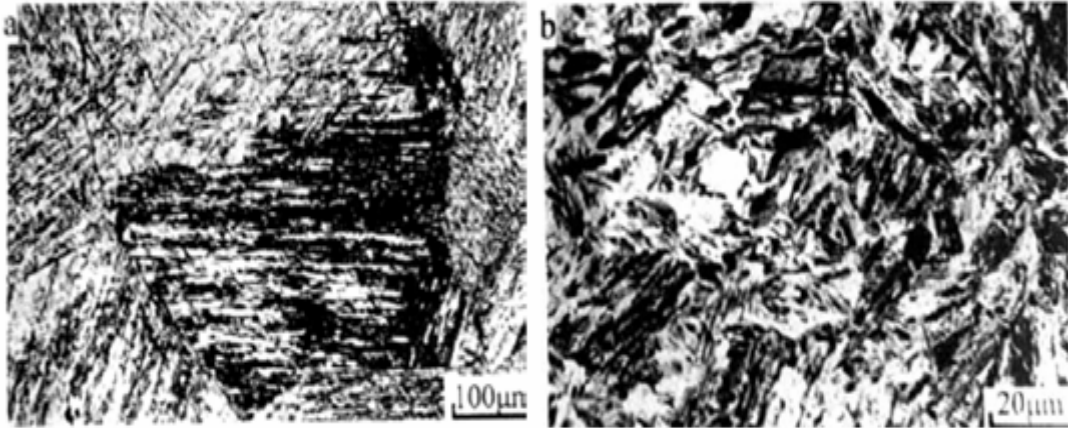
Martensitik dönüşümün başladığı sıcaklık, martensit başlama sıcaklığı (M_s) şeklinde tanımlanır ve dönüşüm, malzeme bünyesindeki alaşım elementlerine bağlı östenit stabilizasyonuna göre 500°C'de başlayıp oda sıcaklığına kadar geniş bir sıcaklık aralığında tamamlanır [37]. Martensitik dönüşümü etkileyen temel parametre malzemenin kimyasal kompozisyonudur. Özellikle düşük alaşımlı çeliklerde, karbon ve alaşım elementlerinin martensitik başlama sıcaklığı üzerindeki etkisi, çeşitli ampirik bağıntılar ile ortaya konulmuştur.

Capdevilla, 20µm östenit tane boyutuna (PAGS) ve farklı karbon içeriğine sahip düşük alaşımlı çeliklerde, V ve Nb'un martensitik başlama sıcaklığına etkisini incelemiştir [38]. Mikro alaşım miktarı arttıkça daha yüksek bir martensitik başlama sıcaklığı gözlemlenir. Aynı etki artan karbon miktarı içinde geçerlidir. Öte yandan; kimyasal özelliklerinden dolayı V ve Nb yüksek karbür yapıcı özelliklere sahiptir ve karbon ile karbür yapıcı elementlerin bir araya gelmesi, karbon artışının M_s üzerindeki etkisini zayıflatır.

Karbon çeliklerinde martensitin morfolojisi içerdiği karbon miktarına göre değişir. Düşük karbonlu çeliklerde ($C < \%0.6$), yüksek yoğunlukta dislokasyon içeren, çubuk şeklinde (lath-shaped martensite) demet halinde martensit oluşumları gözlemlenir. Karbon içeriği arttıkça; martensitin morfoloji, yüksek yoğunlukta dislokasyonların yanında paralel ikizlerin gözlemlendiği mercek (lens-shaped martensite) şeklini almaktadır [39].

3.1.3.3 Çubuk (lath) martensit

Çubuk martensitik yapı, çeliklerde görülen en önemli martensit morfolojisidir. Sade karbonlu çeliklerde ($C < \%0.5$), aynı yerleşim düzleminde ‘paketlenmiş’ ve bu paketler içinde aynı oryantasyona sahip ‘bloklardan’ oluşan martensit çeşididir (Şekil 3.6) [40]. Paketleri arasında düşük sınır açılarına sahip çubuk martensitlerde ikizlere rastlanmamaktadır [37]. Çubuk martensitlerin dayanımı ve tokluğu, ilk östenit tane büyüklüğü (PAGS) ile orantılı olan paket ve blokların, büyüklükleri ile doğrudan bağlantılıdır [40].



Şekil 3.6 : Alaşımlı çelikte çubuk martensit mikroyapı görüntüleri [40].

3.1.3.4 Orta karbon martensit

Orta karbon ($\%0.5 < C < \%1$) martensiti, çeliklerde plaka morfolojisinde görülmektedir. Çubuk martensitten farklı olarak bir paket içinde değil de daha çok tanenin bir bölümünde çeşitli varyantlarda ve büyüklüklerde çubuk martensitle beraber kompleks bir görüntü oluşturur (Şekil 3.7) [3].



Şekil 3.7 : Plaka martensit mikroyapı görüntüsü [3].

3.1.3.5 Martensitik dönüşümü etkileyen faktörler

Kimyasal kompozisyonun etkisi

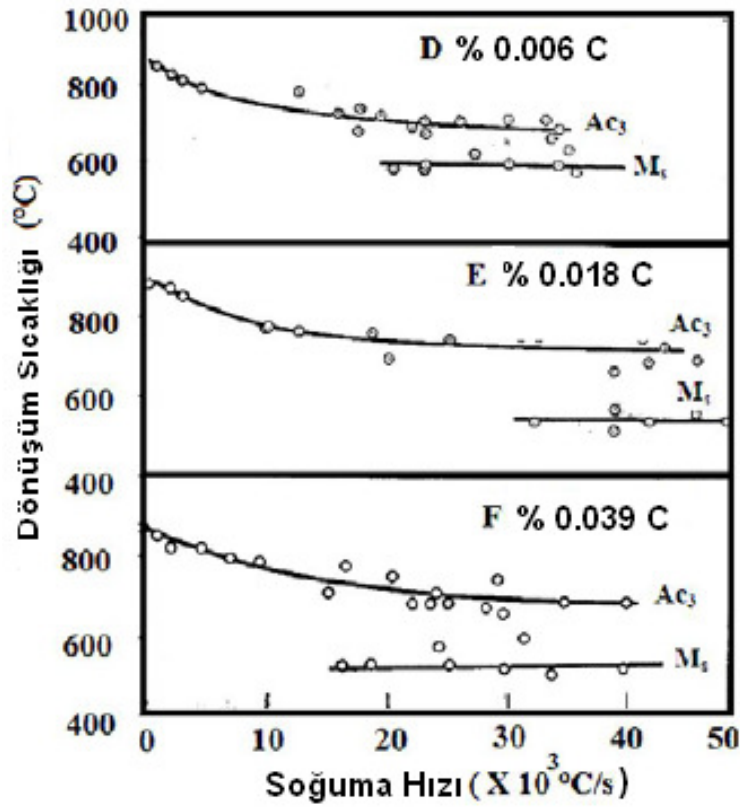
Mikroyapı (dislokasyonlar, boşluklar, tane, ikizlenme, interfaz sınırı ve çökeltiler), dış yükler ve plastik deformasyon gibi önemli roller üstlenen faktörler dışında, martensit oluşum sıcaklığını belirleyen temel parametre kimyasal kompozisyonudur.

Saf demir için martensitik oluşum sıcaklığı (M_s) 540°C 'dir. C, Mn, Cr ve Si elementleri, martensit oluşum sıcaklığının düşmesine neden olurken; Mo elementi martensit oluşum sıcaklığını arttırıcı etki göstermektedir. Buradan yola çıkarak, ekseriyetle alaşım elementlerinin martensit oluşum sıcaklığı üzerinde aynı yönde, arttırıcı etki gösterdiği sonucunu ifade edilmektedir. İlk olarak malzeme martensit oluşum sıcaklığına ulaşır ve soğumanın etkisi ile dönüşüm, martensit bitiş sıcaklığına (M_f) kadar devam eder. Bu sıcaklıkta tüm östenitik yapı martensite dönüşmesi beklenirken pratikte östenitin küçük bir kısmı dönüşmeden kalmaktadır (kalıntı östenit). Alaşım miktarı arttıkça; kalıntı östenit miktarı, martensit bitiş sıcaklığının düşmesine bağlı olarak artış göstermektedir.

Martensitik dönüşümün gerçekleşmesi için gerekli hızlı soğutma etkisi ile yarı kararlı östenit, martensit oluşum sıcaklığına ulaşır. Bu noktada soğutma, termal difüzyon kontrollü ferritik ve perlitik reaksiyonlarının gerçekleşmesini önleyecek hızda olmalıdır. Kritik soğuma hızı, çelik bünyesindeki alaşım elementlerine duyarlı olup alaşım konsantrasyonu arttıkça soğuma hızı düşer [37].

Soğuma hızı etkisi

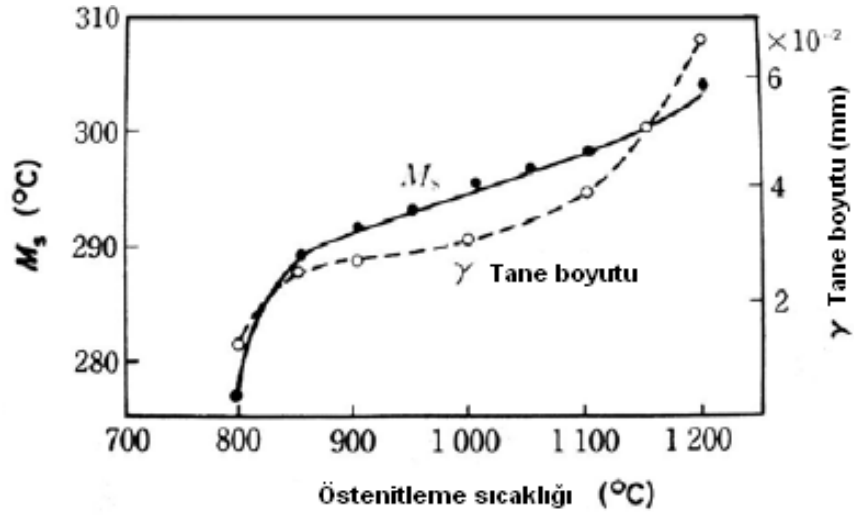
Soğuma hızının düşük olduğu koşullarda martensit dönüşüm sıcaklığı soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızının kritik soğuma hızından yüksek olduğu durumda ise martensit dönüşüm sıcaklığı sabittir. Dönüşüm sıcaklığı-soğuma hızı eğrisinde kritik soğuma hızının aşıldığı koşullarda iki farklı asimptotik eğri gözlemlenmektedir. Bu eğrilerden düşük sıcaklıkta görülenin M_s , yüksek sıcaklıkta görülenin ise A_{c3} sıcaklığı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.8) [41].



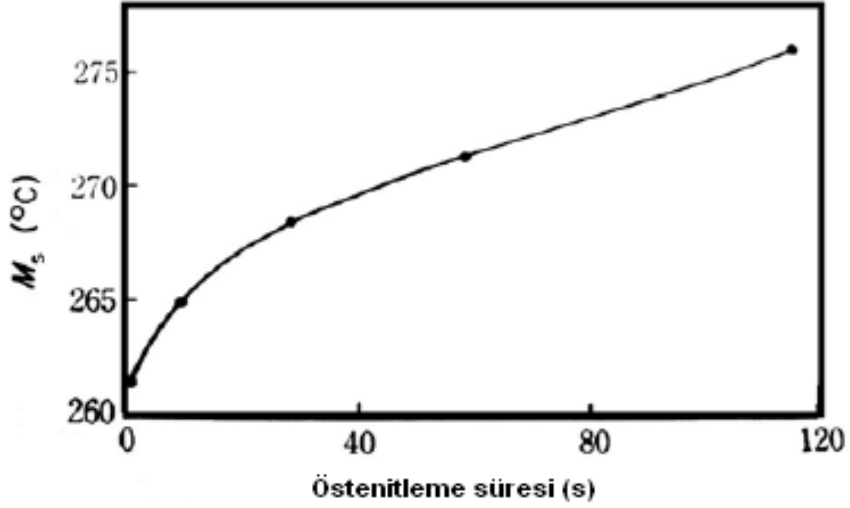
Şekil 3.8 : Dönüşüm sıcaklığı ile soğuma hızı arasındaki ilişki [41].

Östenitleme sıcaklığı etkisi

Yüksek östenitleme sıcaklığı, martensit başlama sıcaklığını ve östenit tane boyutunu artıran bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır (800°C–1000°C için 2 dk, 1000°C ve üstü için 1 dk ısıtma süresi, Fe –0.33C–3.26Ni–0.85Cr–0.09Mo) (Şekil 3.9) [41]. Öte yandan ısıtma süresi artışı ile de martensit başlama sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.10) [41].



Şekil 3.9 : Östenitleme sıcaklığı ile M_s ve γ tane boyutunun değişimi [41].

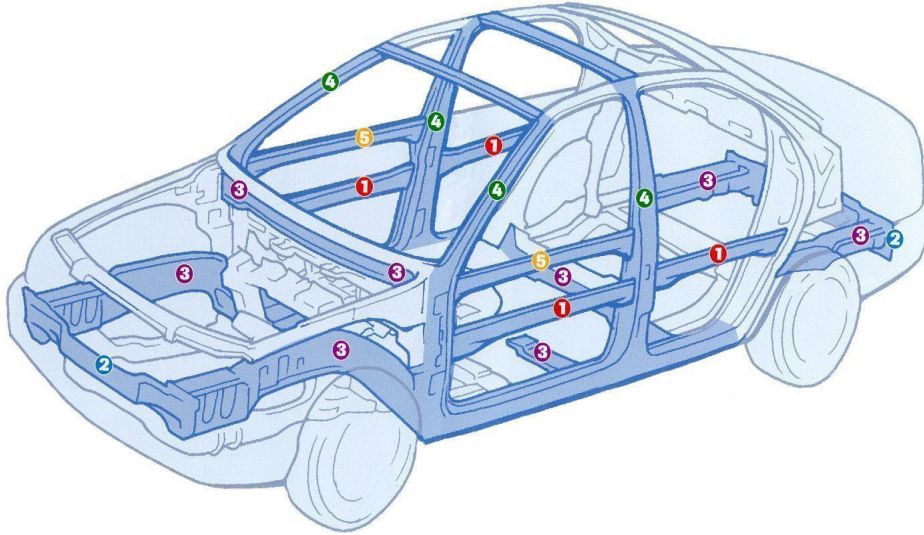


Şekil 3.10 : M_s ve östenitleme süresi arasındaki ilişki (800°C) [41].

3.2 Ultra Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Karayolu Taşıtlarında Uygulamaları

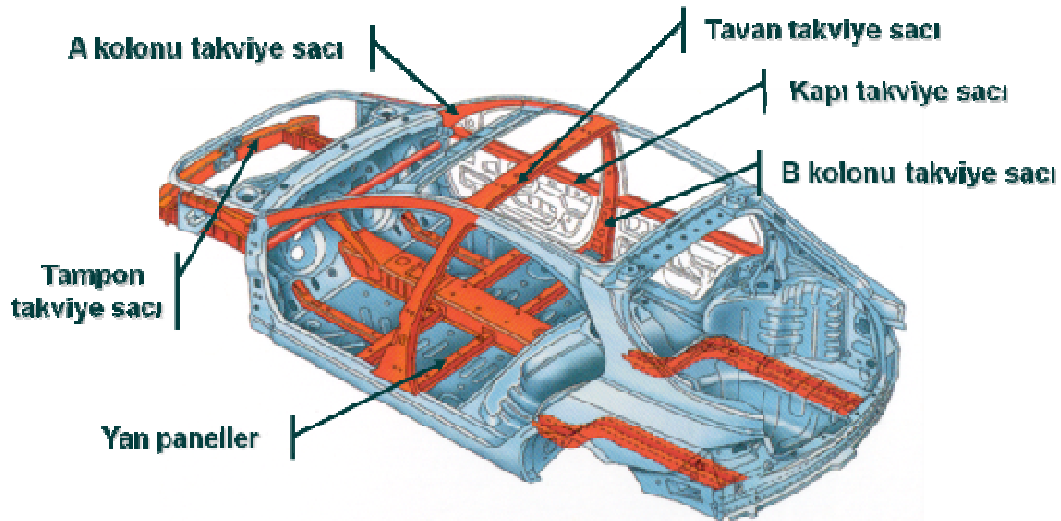
Şekil 3.11'de bir otomobil gövdesinde kullanılan ultra yüksek dayanımlı çeliklerden yapılmış parçalar gösterilmiştir.

1. Kapı takviye sacı (door beam)
2. Tampon takviye sacı (bumper beam)
3. Çapraz ve yan paneller (cross and side members)
4. A/B kolonu takviye sacı (A/B pillar reinforcement)
5. Dirsek şasi takviye sacı (Waist rail reinforcement)



Şekil 3.11 : Otomobillerde kullanılan ultra yüksek dayanımlı çelik parçalar [3].

Preste sertleştirme işleminde en yaygın kullanıma sahip, ultra yüksek dayanımlı çelik türü 22MnB5'tir. Şekil 3.12'de, Al-%10Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500P) çelik sac malzemenin araç gövdesindeki kullanım yerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : Usibor 1500P çeliğinin araç gövdesindeki uygulamaları [6].

4. 22MnB5 ÇELİK SACLARIN ELEKTRİKLİ ISITMA İLE PRESTE SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN METALURJİK ANALİZİ VE MEKANİK DAVRANIŞLARA ETKİSİ

4.1 Amaçlar

Bu çalışmanın hedefi ultra yüksek mukavemetli çelik saclarda preste sıcak şekillendirme işleminin fizibilitesini incelemek, mekanik ve metalurjik etkilerini ve sınırlarını belirlemek ve geliştirmektir.

Temel amaçlar;

- Verimli ve üretken bir imalat süreci ile ultra yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik sacların fırında veya elektrikli ısıtma tekniği ile ısıtılması ve hemen sonrasında süratle preste sertleştirilmesi.
- Verimli ve üretken bir imalat süreci ile ultra yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik sacların fırında veya elektrikli ısıtma tekniği ile ısıtılması ve hemen sonrasında süratle, termo-mekanik işleme tabi tutulması.
- Farklı ısıtma tekniklerinin ve sıcaklık değişiminin (soğuma) nihai ürünün mukavemet, süneklik, dinamik darbe enerjisi ve yüzey özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi.
- İncelenen bu özellikler ışığında imalat verimliliği ve nihai ürünün servis koşullarına uygunluğu açısından proseslerin birbirlerine göre üstünlüklerinin tespit edilmesi.

4.2 Yöntem

Kesilerek aynı boyutlara getirilmiş sac numuneler; fırın içinde konveksiyon yoluyla veya elektrodlerden verilen şiddetli ve kısa süreli elektrik akımının, malzemenin iletim direncinden yararlanılarak ısıya dönüştürülmesi suretiyle östenit sıcaklığına ısıtılacaktır.

Östenit sıcaklığına ulaşıldıktan sonra PLC kontrollü pres harekete geçecek ve su soğutmalı kalıp altında soğutma veya soğutma-şekillendirme işlemleri eş zamanlı

olarak gerçekleştirilecektir. Isıtma sıcaklığı ve soğuma hızı temassız termometre yardımıyla kontrol edilecektir. Soğutma veya soğutma-şekillendirme sonrası farklı ısıtma tekniklerinin ve sıcaklık değişiminin (soğuma) nihai ürünün mukavemet, süneklik, dinamik darbe enerjisi ve yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenecektir.

4.3 Malzeme

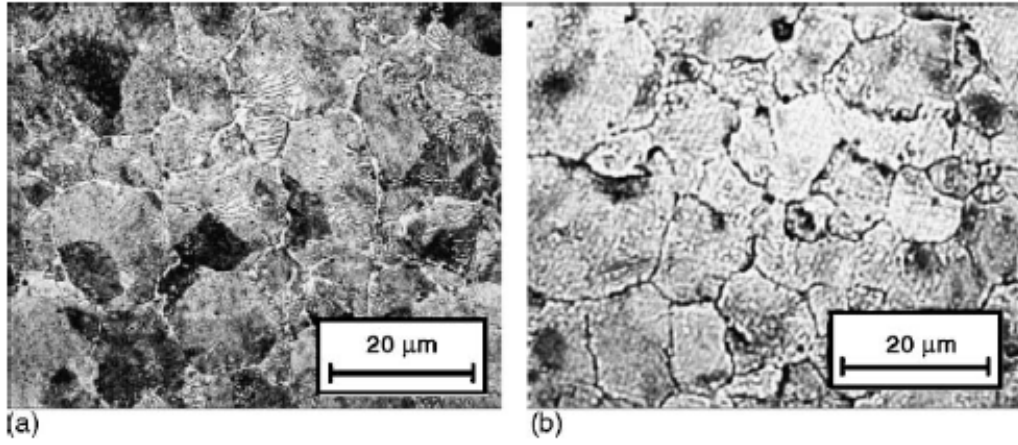
Ultra yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik saclar içinde, preste sertleştirmede en yaygın kullanıma sahip olanı 22MnB5'tir. Bu çalışma kapsamında, birçok firmanın farklı ticari isimlerle piyasaya sunduğu 22MnB5 çelik sacların arasından; Arcelor-Mittal firmasının ürünü, ticari adıyla Usibor 1500 kullanılmıştır. 22MnB5 çeliğinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1'de verilmektedir [42]. Sacın sertlik değeri 170–200 HV_{0.1} aralığındadır. Oda koşullarında perlit-ferrit mikroyapısındaki çelik sacın kalınlığı 1.46 mm olup, Al-%10Si kaplamaya sahiptir. Mikroyapı görüntüleri ve mekanik özellikler detaylı bir şekilde Bölüm 5'de verilecektir.

Çizelge 4.1 : 22MnB5 çelik sacın kimyasal kompozisyonu [42].

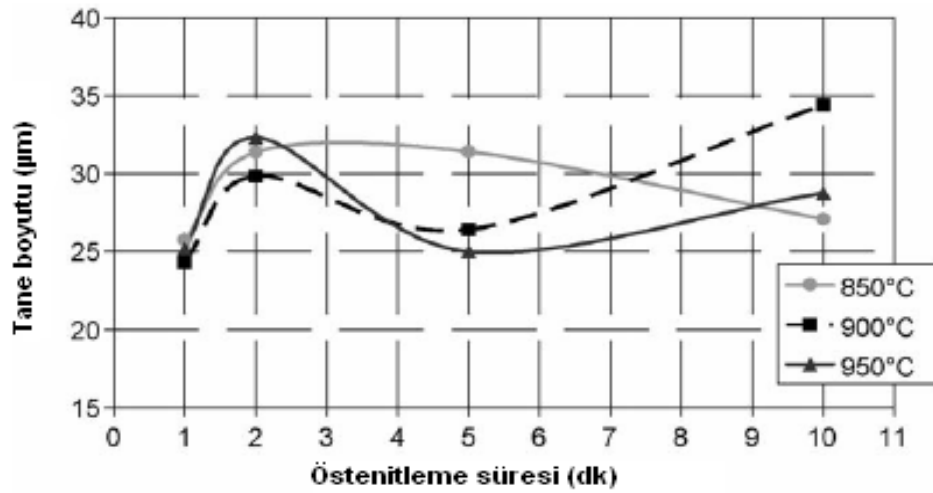
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B
0.22	0.27	1.14	0.015	0.001	0.17	0.036	0.003

4.4 Optimum Östenitleme İşleminin Tayini

Preste sertleştirmede ilk aşama sacın östenitleme işlemidir. Östenitleme işlemindeki kritik hedef, ikinci bir faz kalmaksızın tamamen östenitik yapının elde edilmesidir. Östenitik bölgedeki optimum sıcaklık ve süre tayini için çelik sac malzemenin kalınlığının ve kimyasal yapısının dikkate alınması gerekmektedir. Bu iki faktör göz önüne alınarak, Ac₃ (22MnB5 için 870°C) sıcaklığının üzerinde iki sıcaklık ve her sıcaklık değeri için üç farklı tutma süresi belirlenir. Belirlenen bu parametreler doğrultusunda yapılan östenitleme deneyleri sonrasında, tane boyutu ölçümleri yapılarak optimum östenitleme süre ve sıcaklığı tespit edilir [3]. Bu çalışma kapsamında, Şekil 4.1'deki mikroyapı görüntüleri dikkate alınarak, tane boyutunda anlamlı bir büyüme olmaksızın, 22MnB5 çelik sac malzeme için östenitleme parametreleri 950°C sıcaklık ve 5 dakika olarak belirlenmiştir (Şekil 4.2) [2].



Şekil 4.1 : Östenitlenmiş mikroyapı görüntüleri (a) 850°C, 5dk (b) 950°C, 5dk [3].

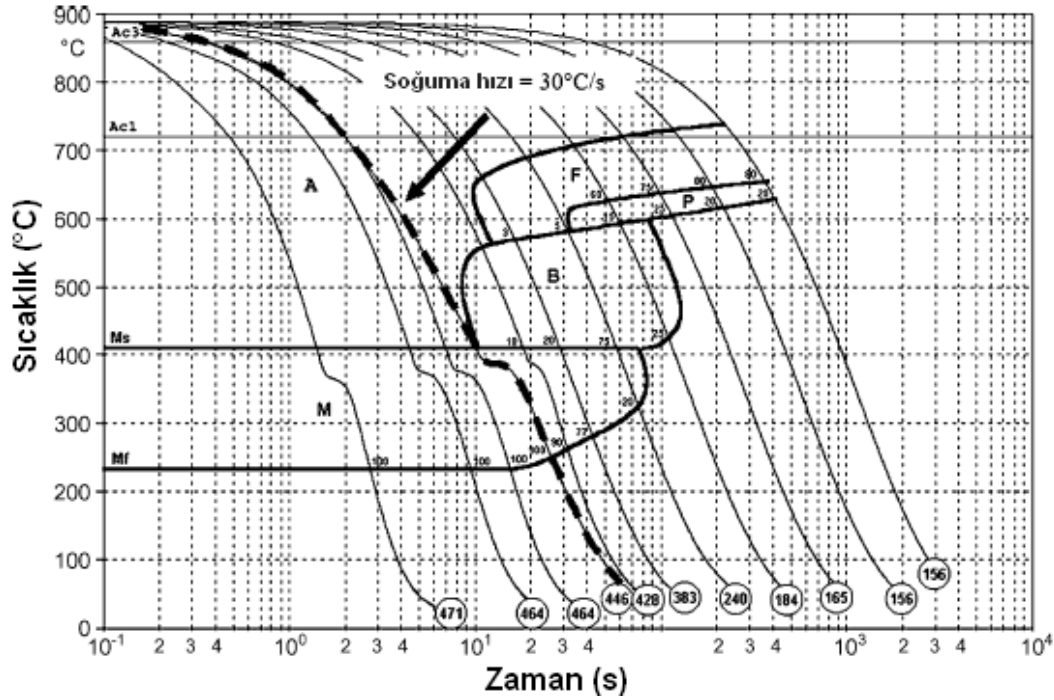


Şekil 4.2 : Tane boyutunun östenitleme süresi ve sıcaklıkla değişimi [2].

Östenitleme işlemi kaplamasız sac üzerinde, atmosfer kontrollü fırın kullanımı tercih edilmelidir. Aksi takdirde; korunumsuz fırında ısıtma sırasında direkt atmosferik oksijenle temas söz konusu olduğundan; oksidasyon ve dekarbürüzyon kaçınılmazdır. Keza; östenitleme işlemi sonrası sacın fırından prese taşınması sırasında da aynı durum görülebilmektedir. Sac yüzeyinde yaklaşık 60 mikrona kadar oluşabilecek dekarbürüzyon, nihai ürünün mekanik özelliklerini zarar verici yönde etkiler. Öte yandan oksidasyon etkisiyle oluşabilecek abrasif demir oksit tabakası da şekillendirme sırasında, kalıp ile sac malzeme arasındaki harekette, kalıbı aşındırma etkisi gösterir. Bu parçalarda, preste sertleştirme sonrası yüzeyde oluşan oksit tabakası kumlama yoluyla giderilmektedir. Kumlama, pahalı bir yöntem olmasının yanı sıra bu tip ince sacların geometrik toleranslarına zarar verebilmektedir [41]. Tüm bu etkiler düşünüldüğünde; bu çalışma kapsamında Al-Si kaplamalı Usibor 1500 çelik sac malzeme tercih edilmiştir.

4.5 CCT Diyagramı

22MnB5 çelik saca ait CCT (sürekli soğuma dönüşüm) diyagramı Şekil 4.3 :’de verilmektedir [42]. Çember içine alınan değerler, $HV_{0.1}$ çizelgesinde, işlem sonrası sertlik değerlerini ifade etmektedir. 5°C/s ısıtma hızı için, ötektoid dönüşüm sıcaklığı (Ac_1) 722°C ve ferritin östenite dönüşüm sıcaklığı (Ac_3) 870°C ’dir. Öte yandan martensit başlama sıcaklığı 410°C iken martensit bitiş sıcaklığı ise 230°C ’dir. 950°C sıcaklıkta 5 dakika süreyle östenitleme işlemi sonrasında, 30°C/s ve üstü soğuma hızının sağlandığı koşullarda tamamıyla martensitik yapı elde edilir (Şekil 4.3, M bölgesi). Daha düşük soğuma hızında ise beynitik (Şekil 4.3, B bölgesi), hatta ferritik (Şekil 4.3, F bölgesi) yapı oluşturulabilir [42]. Bu çalışma kapsamında tümüyle martensitik yapının elde edilmesine yönelik soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3 : 950°C sıcaklıkta 5 dk östenitlenmiş 22MnB5’e ait CCT diyagramı [42].

4.6 Deney Planı

Preste sertleştirme ve termo-mekanik işlem deneyleri aşağıdaki işlem sırası ile gerçekleştirilmiştir.

- Deney düzeneklerinin tasarımı
- Fırında ısıtma ile preste sertleştirme deneyleri
- Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deneyleri
- Ön ısıtma işlem sonrası elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deneyleri
- Fırında veya elektrikli ısıtma sonrası eşzamanlı olarak deformasyon ve preste sertleştirme (termo-mekanik işlem) deneyleri
- Tüm numunelerin deney sonrası kaplama-altmetal mikroyapı ve EDS analizleri ve sertlik, dayanım, süneklik, dinamik darbe tokluğu ölçümlerinin yapılması

Deneyler ve ölçümler gerekli durumlarda arttırılmak üzere üç tekrar ile gerçekleştirilmiştir.

4.7 Deney Düzeneklerinin Tasarımı

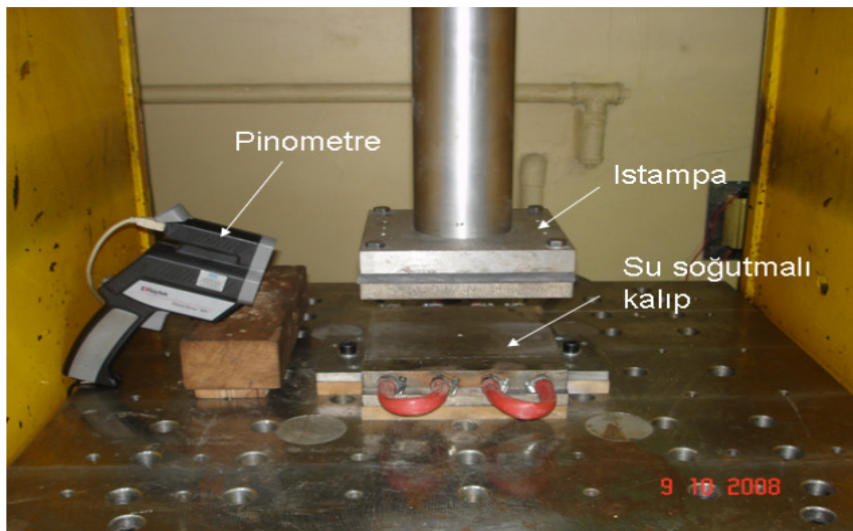
4.7.1 Fırında ısıtma ile preste sertleştirme ve termo-mekanik düzeneği

Fırında ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği ve fırından çıkarılıp sertleştirilmek üzere kalıp üzerine yerleştirilmiş örnek numune Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Hidromode marka hidrolik presin maksimum kuvveti 1500 KN'dur. Su soğutmalı kalıp alt tablaya monte edilmiş olup, üst kalıp üst tabla ile tek eksenli olarak hareket etmektedir. Üst kalıp ile alt kalıp arasındaki mesafe 80 mm olarak sabitlenmiştir. Atmosfer kontrolü olmayan fırının maksimum ısıtma sıcaklığı 1600°C'dir.

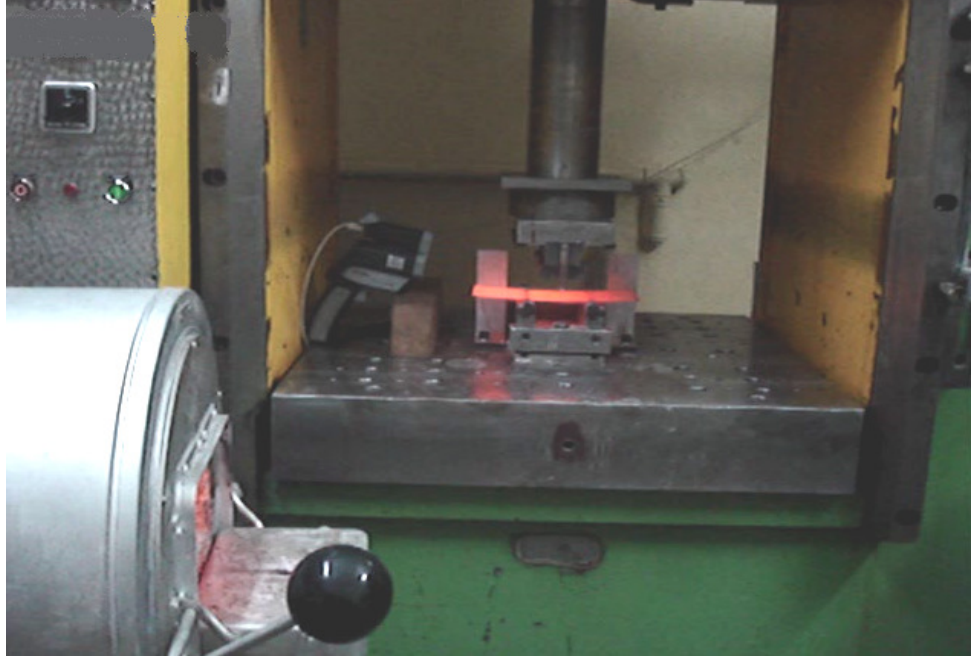
Bunun yanısıra Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de, yine fırında ısıtma ve sonrasında eşzamanlı olarak gerçekleştirilen deformasyon ve preste sertleştirme işleminin (termo-mekanik işlem) deney düzeneği ve fırından çıkarılıp sertleştirilmek üzere kalıp üzerine yerleştirilmiş örnek numune verilmektedir. Bu deney düzeneğinin preste sertleştirme deney düzeneği ile arasında, kalıp tasarımı dışında bir farklılık bulunmamaktadır. İTÜ Makine Fakültesi, İmal usulleri laboratuvarı bünyesinde mevcut olan U kanal kalıbı üzerinde, kullanılan sac malzemenin kalınlığı ve yüksek sıcaklık davranışı dikkate alınarak, kalıp boşluğu ve bükme radyusları tasarlanmış ve gerekli modifikasyonlar yapılarak pres içine monte edilmiştir.



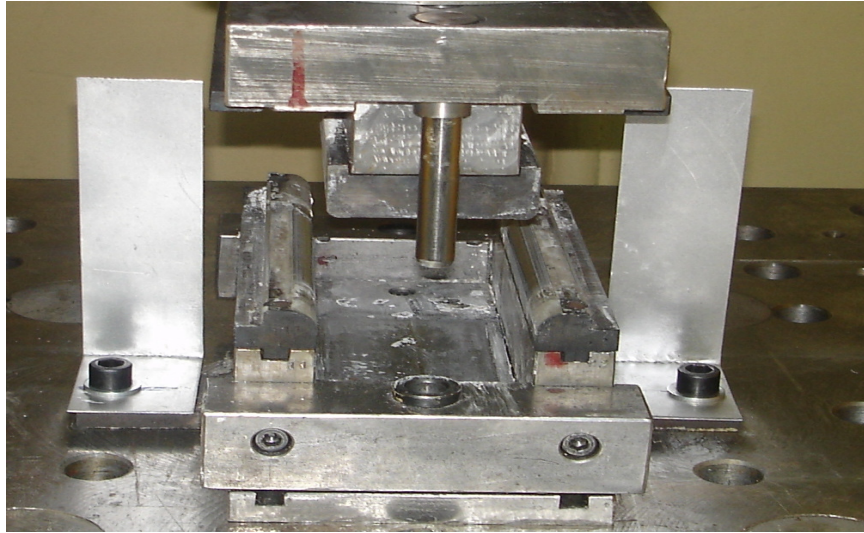
Şekil 4.4 : Fırında ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği.



Şekil 4.5 : Fırında ısıtma ile preste sertleştirme kalıp düzeneği.



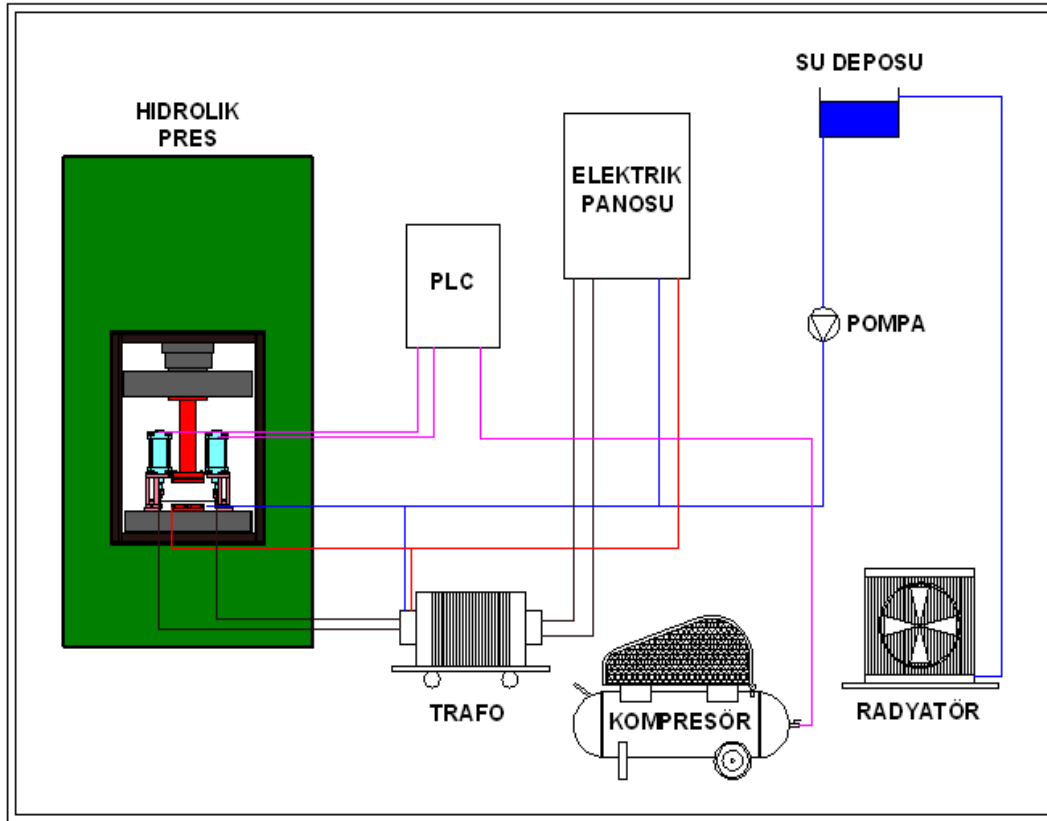
Şekil 4.6 : Fırında ısıtma ile termo-mekanik işlem deney düzeneği.



Şekil 4.7 : Fırında ısıtma ile termo-mekanik işlem kalıp düzeneği.

4.7.2 Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme ve termo-mekanik düzeneği

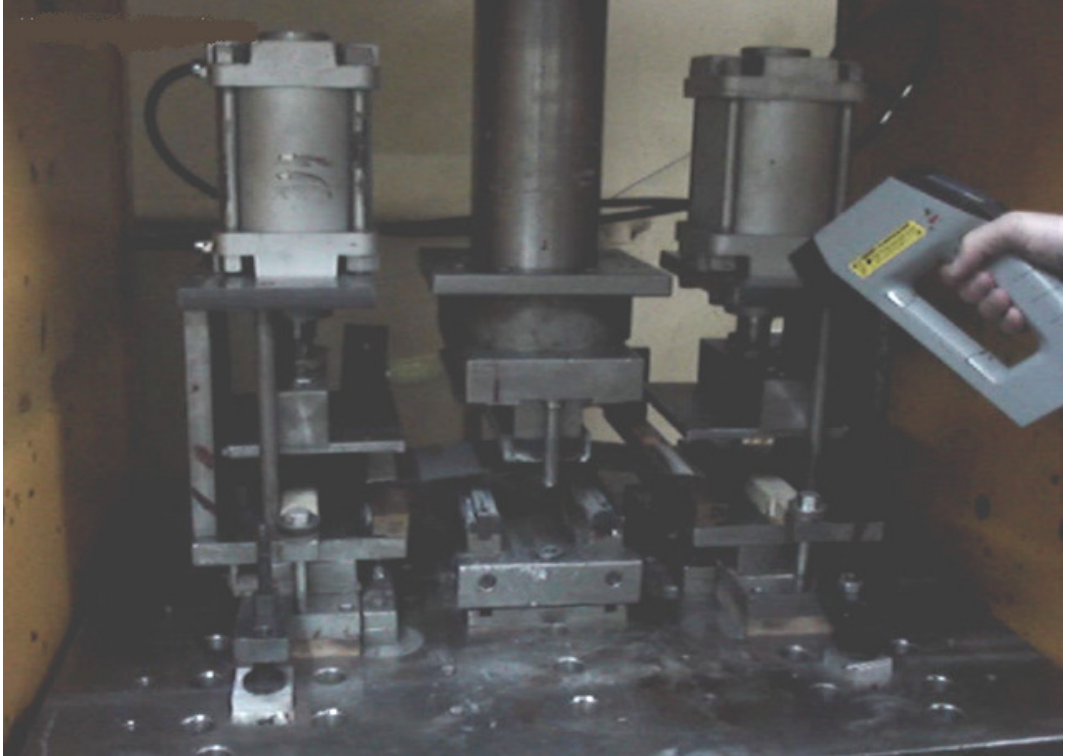
Şekil 4.8’de elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği ve yardımcı ekipmanlar gösterilmektedir. Bu düzende; maksimum kuvvet kapasitesi 1500 KN olan hidrolik pres, akım kontrolünü sağlamak için 120 kVA kapasitede kaynak trafosu ve kontrol ünitesi, 100 lt lik su deposu, 24 lt/dk debili kapalı devre devridaim pompası ve fanlı radyatörden oluşan soğutma ünitesi ve ek olarak pnömatik silindirleri besleyen kompresör bulunmaktadır. Ayrıca sistemin işleyişini (presin ve pnömatik silindirlerin harekete geçiş anını ve elektrik akımının ne zaman verilir ne zaman kesileceğini) kontrol edebilmek için PLC kontrol ünitesi kurulmuştur. Bunların yanı sıra; ısıtma işlemi sırasında üzerinden akım geçen elektrodların bağlanacağı elektrod tutucu düzeneğinin pres içine entegrasyonu sağlanmıştır. Gerek elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme (Şekil 4.9) gerekse elektrikli ısıtma ve sonrasında eşzamanlı olarak gerçekleştirilen deformasyon ve preste sertleştirme (Şekil 4.10) deneylerinde, kıyaslanabilirlik açısından fırında ısıtma deneylerinde kullanılan kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 4.8 : Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği ve ekipmanlar.



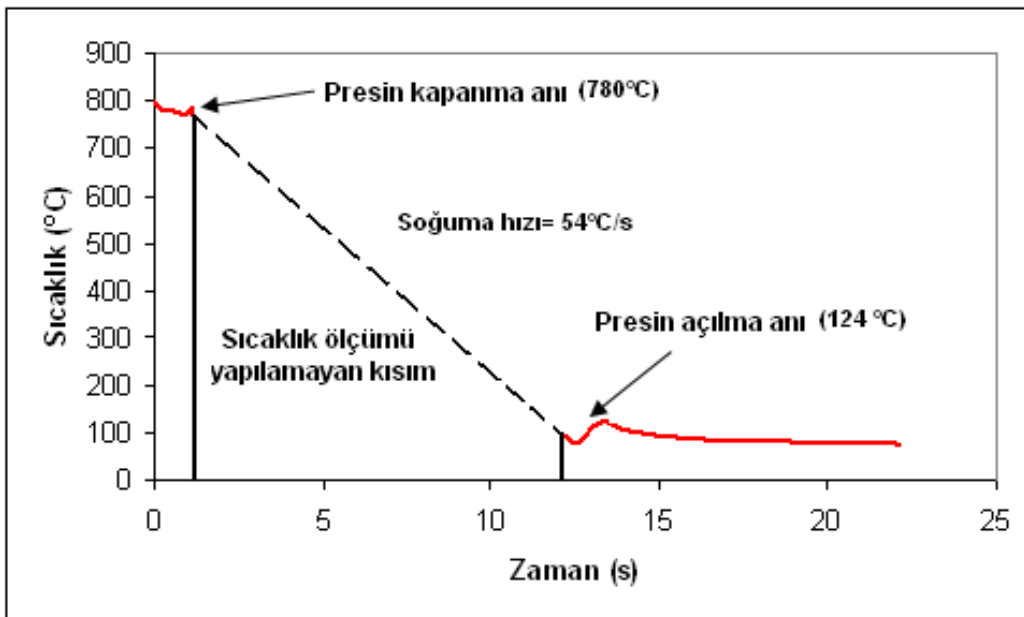
Şekil 4.9 : Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği (elektrod tutucu).



Şekil 4.10 : Elektrikli ısıtma ile termo-mekanik işlem deney düzeneği.

4.8 Fırında Isıtma ile Preste Sertleştirme Deneyi

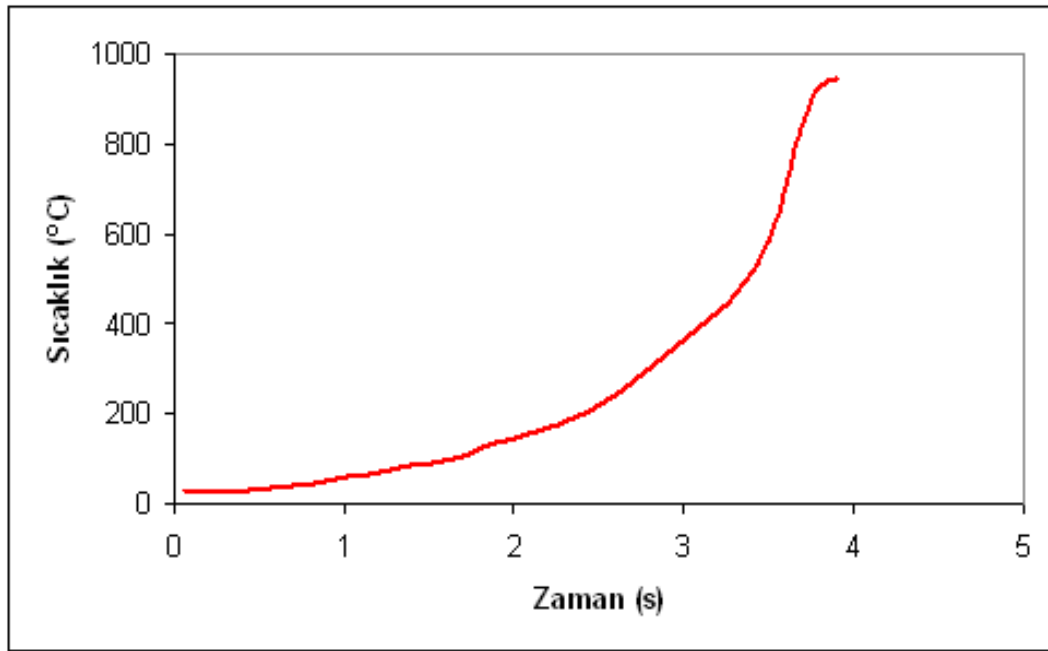
Usibor 1500 sac plakadan, 100x250 mm boyutlarında kesilerek hazırlanan numuneler, Bölüm 4.4'te belirlenen östenit sıcaklığına (950°C) 15°C/dk hızla ısıtılmış ve malzemede homojen östenitik bir mikroyapıyı elde edebilmek için 5 dakika boyunca bu sıcaklıkta tutulmuştur. Östenitleme işlemi sonrası numuneler, kısa süre içinde (3–4 s) sertleştirme işleminin yapılacağı su soğutmalı kalıp içine taşınmıştır. Taşıma, atmosfere açık koşullarda yapıldığı için kaçınılmaz olarak ısı kaybı yaşanmıştır. Kalıp teması ile başlayan hızlı soğumanın hemen öncesinde temassız termometre ile yapılan ölçümlerde, malzeme sıcaklıklarının, tümüyle martensitik yapının oluşabilmesi için şart olan 780°C sıcaklığın altına düşmedikleri pinometre ile ölçülerek tespit edilmiştir (Şekil 4.11). PLC kontrollü pres, ısıtılmış numune kalıba taşınır taşınmaz harekete geçmiş, kalıplar kapanmış ve 10 MPa temas basıncı ile su soğutmalı kalıp altında 10 saniye boyunca kalan sac malzemede ısı transferi etkisiyle hızlı soğuma sağlanmıştır. Şekil 4.11'de, tamamıyla martensitik yapının oluşabilmesi için gerekli minimum soğuma hızının (30 °C/s) üzerinde bir soğuma hızına ulaşıldığı gösterilmektedir. Soğuma hızı ölçümünde, kalıba monte edilmiş K tipi termokupllardan yararlanılmaya çalışılmış ancak bu noktada istenen verim alınamamıştır. Alternatif ölçüm tekniği olarak; preste sertleştirme işleminin başlangıç ve bitiş sıcaklıkları temassız termometre yardımıyla tespit edilerek ortalama bir soğuma hızı ölçülmüştür.



Şekil 4.11 : Usibor 1500 sac malzemenin su soğutmalı kalıp altında soğuma eğrisi.

4.9 Elektrikli Isıtma ile Preste Sertleştirme Deneyi

Fırında ısıtma ile preste sertleştirme numuneleri ile aynı boyuttaki numuneler (100x250 mm) elektrodların üzerine yerleştirildikten sonra PLC kontrollü deney düzeneği harekete geçirilmiştir. Öncelikle sac numune, pnömatik silindirler yardımıyla elektrod tutucu düzeneğinde sıkıştırılmış ve hemen ardından elektrik akımı elektrodlar aracılığı ile saca iletilmiştir. Malzemenin öz direncinden yararlanılarak, uygulanan elektrik enerjisi ısıya dönüşmüştür. Malzeme istenen östenit sıcaklığına (950°C) 4 saniye gibi kısa bir sürede ulaşmış ve uygulanan yüksek akım kesilmiştir (Şekil 4.12). Akım kesilir kesilmez, pres harekete geçmiş ve 10 MPa temas basıncı ile 10 saniye boyunca su soğutmalı kalıp altında kalan malzemede kritik soğuma hızının üzerinde bir hızlı soğuma sağlanmıştır. Malzeme boyutlarına göre değişkenlik gösteren elektrikli ısıtma deney parametreleri Çizelge 4.2’de verilmektedir.

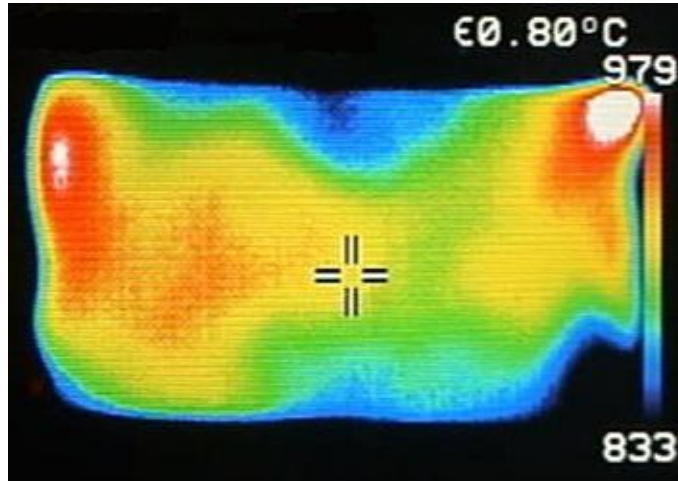


Şekil 4.12 : Usibor 1500 sac malzemenin elektrik ile ısınma eğrisi.

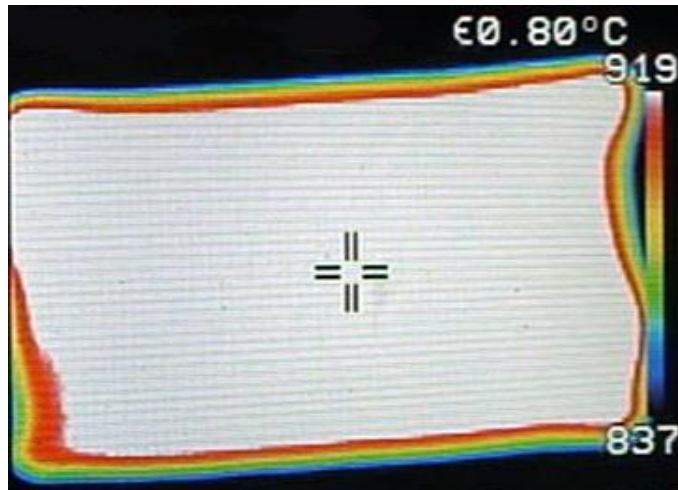
Çizelge 4.2 : Elektrikli ısıtma deney parametreleri.

Kesit alanı	146 mm ²
Kalınlık	1,46 mm
Sıcaklık	(950±25)°C
Akım	7000 A
Akım süresi	4 s

Elektrikle ısıtma sırasında en çok dikkat edilmesi gereken nokta, sac malzeme üzerindeki ısı dağılımının homojen olarak elde edilip edilmediğinin belirlenmesidir. Eğer homojen bir ısı dağılımı sağlanamaz ise sıcaklık bölgesel olarak çok fazla farklılık gösterebilmektedir. Bazı bölgeler östenitlenme sıcaklığının altında kalabilmekte veya aşırı derecede sıcaklık artışı oluşabilir. Bu sıcaklık farkları, soğuma sonrası malzemenin mekanik özelliklerinde de bölgesel olarak farklılıklar oluşmasına neden olabilmektedir. Şekil 4.13’de elektrod-plaka ile sac malzeme arasındaki, homojen olmayan temas sonucu meydana gelen sıcaklık dağılım farklılıkları gösterilmiştir. Bu sıcaklık dağılımı resminden faydalanılarak, sac ile elektrod arasındaki düzgün temas olmayan bölgeler belirlenmiş ve gerek malzeme gerekse tasarımda gerekli yüzey iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. İyileştirmeler sonrasında tekrar termal analiz yapılmış ve Şekil 4.14’te gösterilen homojen sıcaklık dağılımı elde edilebilmiştir.



Şekil 4.13 : Elektrikli ısıtmada homojen olmayan sıcaklık dağılımı.



Şekil 4.14 : Elektrikli ısıtmada yüzey iyileştirmesi ile homojen sıcaklık dağılımı.

4.10 Ön Isıl İşlem Sonrası Elektrikli Isıtma ile Preste Sertleştirme Deneyi

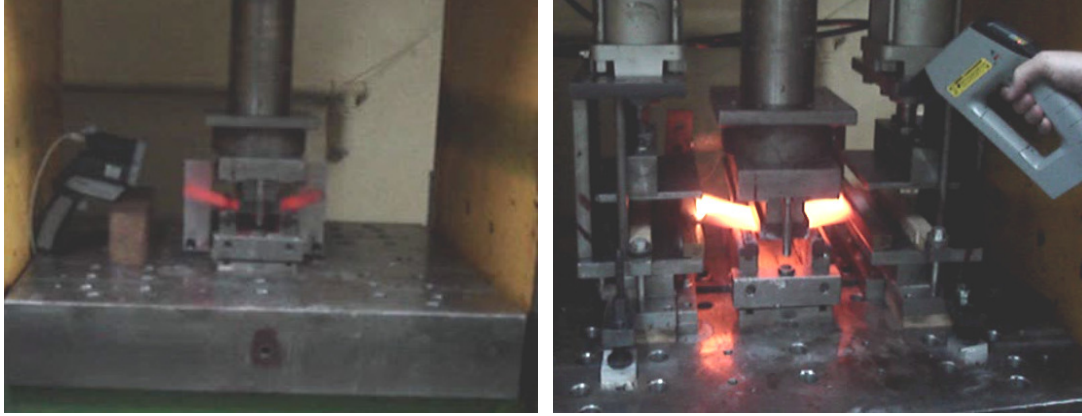
Usibor 1500 üzerindeki Al-Si kaplamanın ergime sıcaklığı 600°C olup hızlı ısıtma sırasında kaplama ergimektedir [43]. Nitekim, ön deneyler sırasında çok kısa sürede ısıtma gerçekleştiğinde, kaplamanın heterojen biçimde ergidiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.15). Ancak sac malzeme fırın içinde ısıtıldığı takdirde; Al-Si kaplama, arayüzeyden başlayarak hızla yüzeye kadar difüzyonun etkisiyle büyümekte ve farklı karakterdeki Fe-Al-Si faz formlarına dönüşmektedir [44]. Bu yeni kaplama fazı, yüksek ergime noktasına sahip olma, hızla yüksek sıcaklığa ısıtıldığında kompakt yapısını koruyabilme ve ana metale çok iyi yapışma özelliklerine sahiptir. Bu dönüşümün gerçekleşebilmesi için 1.6 mm kalınlığındaki Al-Si kaplamalı çelik sacın yaklaşık olarak 2 dakika boyunca resistanslı bir fırın içinde tutulması gerekmektedir [43]. Bu bilgiler ışığında, yüksek akımda elektrik akımı ile ısıtma öncesinde, sac malzeme, fırın içinde Ac_3 altındaki 800°C sıcaklıkta 3 dakika tutulmuştur. Fırından çıkarılan numune, herhangi bir faz dönüşümüne izin vermemek için havada yavaş soğumaya bırakılmıştır. Bu ön ısıtıl işleminden sonra artık deney numunesinin yüzeyi, elektrikli ısıtma ile preste sertleştirmeye uygun hale getirilmiştir.



Şekil 4.15 : Elektrikli ısıtma sonrasında Al-Si kaplamanın ergimiş hali.

4.11 Fırında veya Elektrikli Isıtma Sonrası Termo-Mekanik İşlem Deneyi

Al-Si kaplamalı 22MnB5 sac plakadan 100x280 mm boyutlarında kesilen numuneler fırında veya elektrikli ısıtma tekniği ile östenit sıcaklığına (950°C) ısıtılmıştır. Fırından çıkarılarak kalıba taşınan veya halihazırda kalıbın üstünde elektrik ile ısıtılmış sac numune, PLC kontrollü presin harekete geçmesiyle, U kanal kalıbı altında 10 MPa temas basıncı ile 20 s boyunca eş zamanlı olarak soğutma-şekillendirme işlemlerine tabi tutulmuştur (Şekil 4.16). İşlem sonrası sac numunenin aldığı form Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



Şekil 4.16 : Fırında veya elektrikli ısıtma ile termo-mekanik işlem deneyleri.

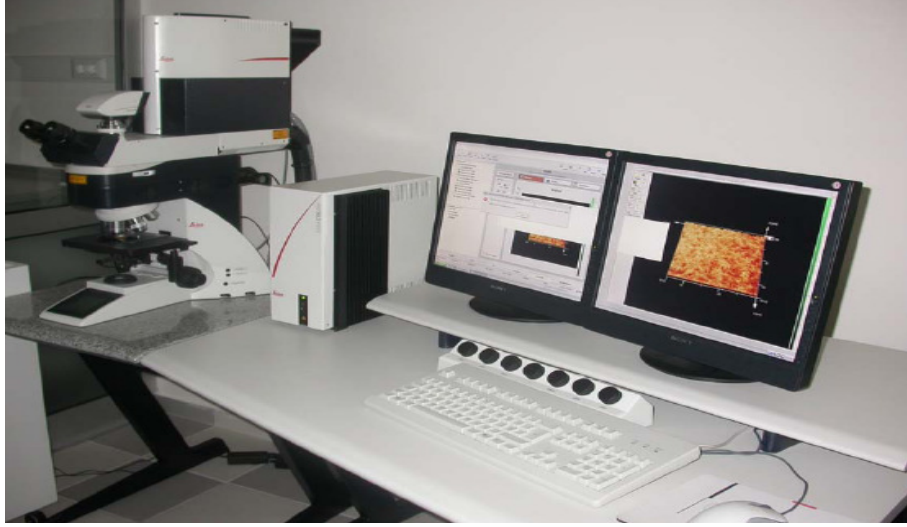


Şekil 4.17 : Termo-mekanik işlem ile şekillendirilmiş açık U kanal profil.

4.12 Kullanılan Yöntem ve Cihazlar-Yapılan Ölçümler

4.12.1 Mikroyapı ve EDS analizleri

Mikro-vickers sertlik ölçümleri için hazırlanan numuneler, Nital ile dağlanarak mikroyapı analizlerinde kullanılmıştır. Mikroyapı görüntüleri için İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesindeki 3000 büyütme kapasiteli Optik Mikroskop ve gerekli görüldüğü durumlarda SEM (scanning electron microscopy) kullanılmıştır (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19). Optik mikroskopta numunelerin mikroyapı görüntüleri 800 ve/veya 1600 büyütme altında incelenmiştir. Öte yandan; kaplama analizleri için EDS (enerji dağıtıcı spektroskopi)'den yararlanılmıştır.



Şekil 4.18 : Optik Mikroskop (İTÜ Kimya-Metalürji Fakültesi).



Şekil 4.19 : SEM-EDS (İTÜ Kimya-Metalürji Fakültesi).

4.12.2 Sertlik ölçümü

Sertlik ölçümü yapılacak olan numuneler, tel erozyon tezgâhında, tüm deney numunelerinden 10x10 mm boyutlarında kesilerek alınmıştır. Daha sonra bu numuneler, soğuk kalıplama tekniği ile bakalit içine gömülmüştür. Bakalit içine gömülü sac numunelerin yüzeyleri zımparalanmış, parlatılmış ve sonrasında ölçümlere geçilmiştir.

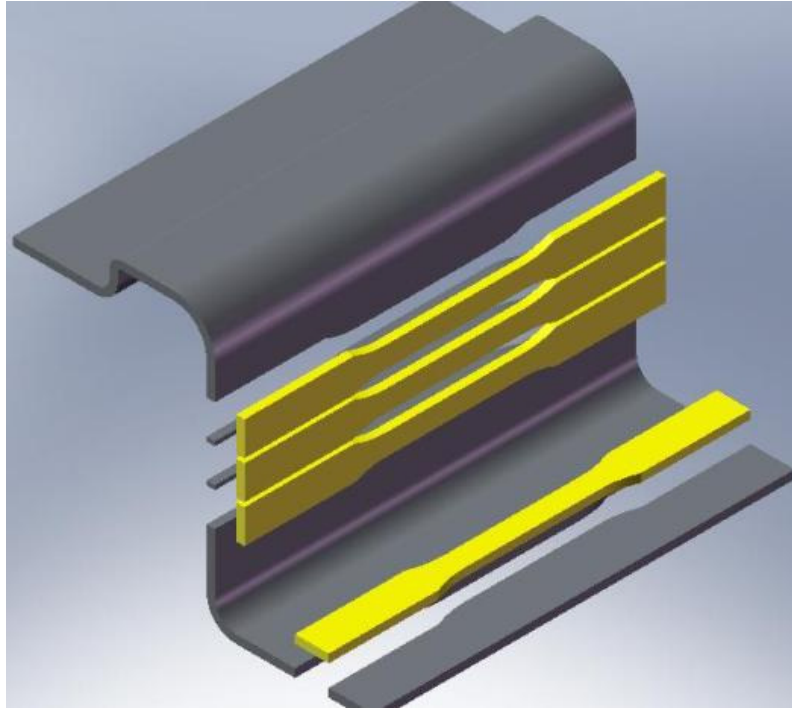
Ölçümler, mikro-vickers sertlik ölçme cihazında Vickers sistemine göre yapılmıştır (Şekil 4.20). Uygulanan yük 100 gr olup malzeme üzerine 15 saniye etkimıştır ($HV_{0.1}$). Sertlik değerleri, numune üzerinde oluşturulan piramit şeklindeki izin köşegen uzunluklarının ölçümüne bağlı olarak otomatik bir şekilde cihaz üzerinde okunmuştur. Tüm numuneler üzerinden hata payını azaltmak amacıyla en az üç noktadan alınan ölçüm değerlerinin ortalaması, deney sonuçlarında kullanılmıştır.



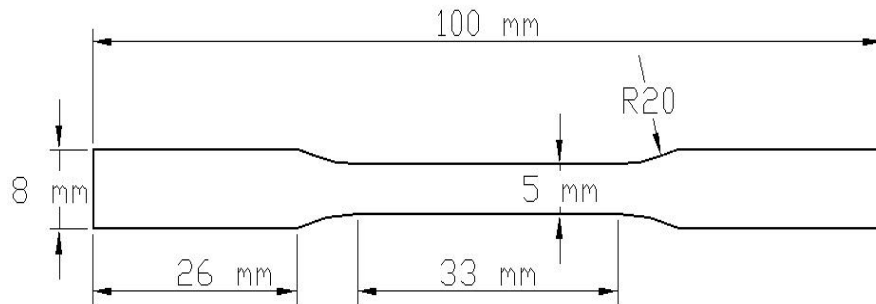
Şekil 4.20 : Mikro-vickers sertlik ölçme cihazı (İTÜ Kimya-Metalürji Fakültesi).

4.12.3 Dayanım ve süneklik ölçümü

Mukavemet ve süneklik ölçümü için çekme testleri yapılmıştır. Çekme numuneleri, TS 1980 [45] standardına uygun olarak tüm deney numuneleri üzerinden tel erozyon tezgâhında kesilerek alınmıştır (Şekil 4.21, Şekil 4.22). Çekme testleri, 1 mm/dk sabit yükleme hızıyla, 5 tonluk Shimadzu çekme test cihazında % 0.5 hassasiyetle yapılmıştır (Şekil 4.23). Deneyler sırasında numunede meydana gelen deformasyon miktarı, çekme test cihazına entegre edilmiş video ekstansometre yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 4.21 : Çekme testi numunelerinin U kanal profilden çıkarımı.



Şekil 4.22 : Çekme testi numune boyutlarının şematik gösterimi [47].

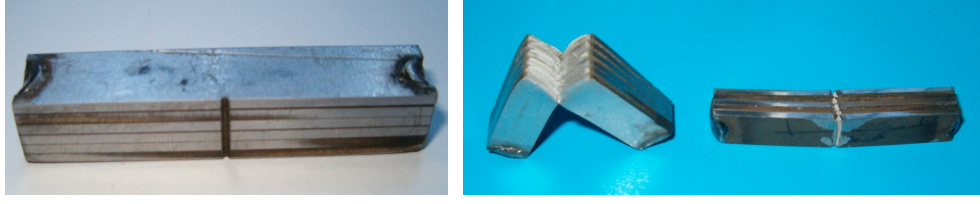


Şekil 4.23 : Shimadzu çekme test cihazı (İTÜ Makine Fakültesi).

4.12.4 Dinamik darbe enerjisi ölçümü

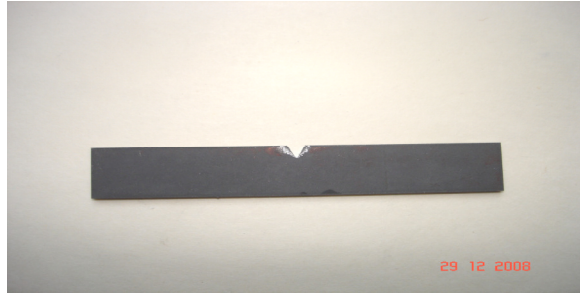
Bu çalışma kapsamında standart bir Charpy darbe testi numunesinin 10 mm olan yüksekliğini elde etmek için preste sertleştirilen 22MnB5 çelik sac malzemelerden, 10x55 boyutundaki parçalar tel erozyon tezgâhında kesilmiştir. Bu parçaların altısı üst üste konulmuş, uç noktalarından elektrik ark kaynağı yapılarak standartlara uygun bir Charpy numunesi elde edilmeye çalışılmıştır. Son olarak % 2 hassasiyetle çalışan tel erozyon tezgahında 45°'lik V çentikler açılan numuneler, oda sıcaklığında standart darbe deney cihazı ile Charpy darbe testine tabi tutulmuş ve darbe enerjisi ölçülmüştür (Şekil 4.24).

Burada dikkat edilmesi gereken nokta; plastik şekil değiştirerek kırılma daha büyük iş gerektirdiğinden ve ince kesitlerde bu tür deformasyon sonrası kırılmanın oranı fazla olduğundan darbe enerji değeri de artar. Ancak deformasyonla kırılmanın yüzeydeki oranı azaldıkça gevrek davranış belirginleşir ve kırma enerjisi düşer. Böylece parça kalınlığı arttıkça düzlem genişleme halinde tokluk en düşük değerini alır. Bu noktada, yapılan deneyler neticesinde elde edilen darbe enerjisi ölçümleri bu çerçevede değerlendirilip yüksek hızda darbe testleri yapılmaya karar verilmiştir.



Şekil 4.24 : Charpy darbe deneyi numunesi (sol) ve deney sonrası numuneler (sağ).

Dinamik darbe enerjisi ölçümü için yüksek hızda darbe testleri yapılmıştır. Darbe testi numuneleri, tel erozyon işlemi ile 10x55 mm boyutlarında tüm deney numunelerinden kesilerek alınmış ve çentik açma makinesinde 45°'lik V çentikler açılarak teste hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.25). Testler, maksimum 20 m/s kapasiteli İnstron yüksek hızda darbe test cihazında yapılmıştır (Şekil 4.26). Bir dizi ön deney sonrasında test parametreleri, 29,045 kgf yük ve 20 Joule enerji şeklinde belirlenmiştir.



Şekil 4.25 : V çentikli dinamik darbe testi numunesi.



Şekil 4.26 : İnstron yüksek hızda darbe test cihazı (İTÜ Kimya-Metalürji Fak.).

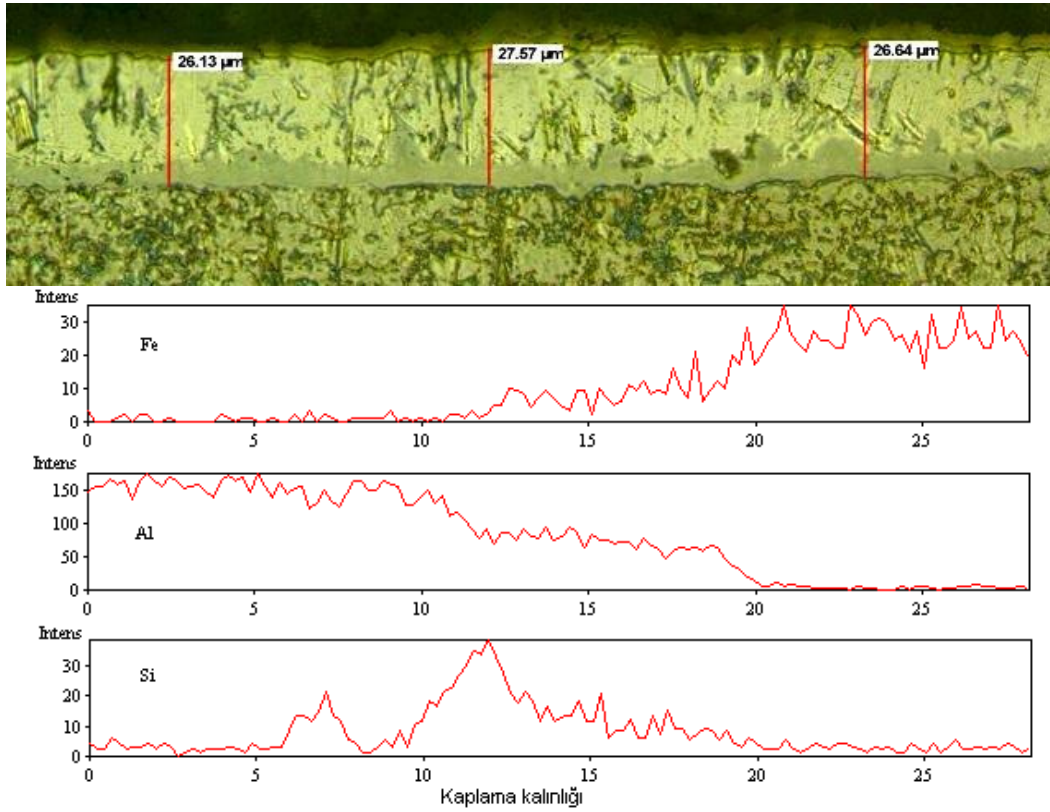
5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Preste Sertleştiririnin Mikroyapı Üzerindeki Etkisi ve EDS Analizleri

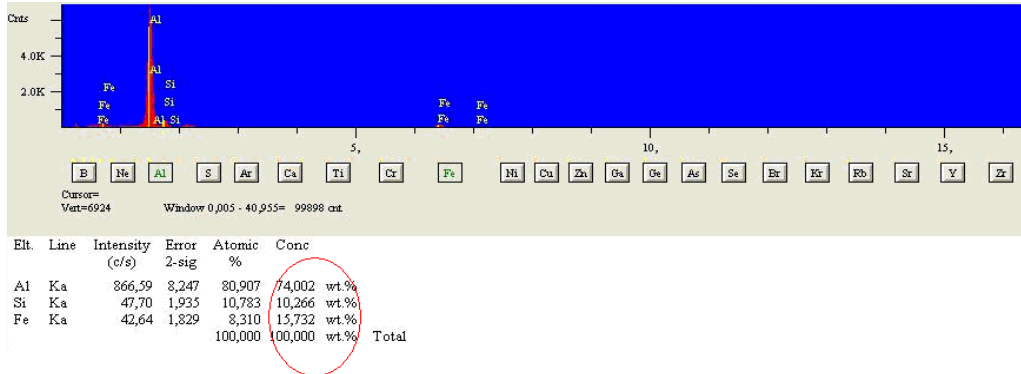
22MnB5, oda sıcaklığında ferrit-perlit mikroyapısına sahip olup; perlit, ferrit fazının tane sınırlarına yerleşmiş durumdadır (Şekil 5.1). Bunun yanısıra, kalınlığı 26 μm olarak tespit edilen kaplamanın, yüzeyden alt metala kadar alınan çizgisel EDS analizinde, içeriğinin Al-10Si olduğu görülmüştür (Şekil 5.2). Alt metal ile kaplama arasında bir ara bölgenin varlığı dikkat çekmektedir. Bu bölgenin EDS analizi Şekil 5.3'de verilmiştir. Analiz neticesinde bölgenin, Al-(Si) içeriğinin yanı sıra Fe elementinin yer aldığı bir geçiş bölgesi olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 5.1 : İşlemsiz Usibor 1500 sac malzemenin mikroyapı görüntüsü.



Şekil 5.2 : İşlemsiz Usibor 1500 sacın kaplama görüntüsü ve çizgisel EDS analizi.

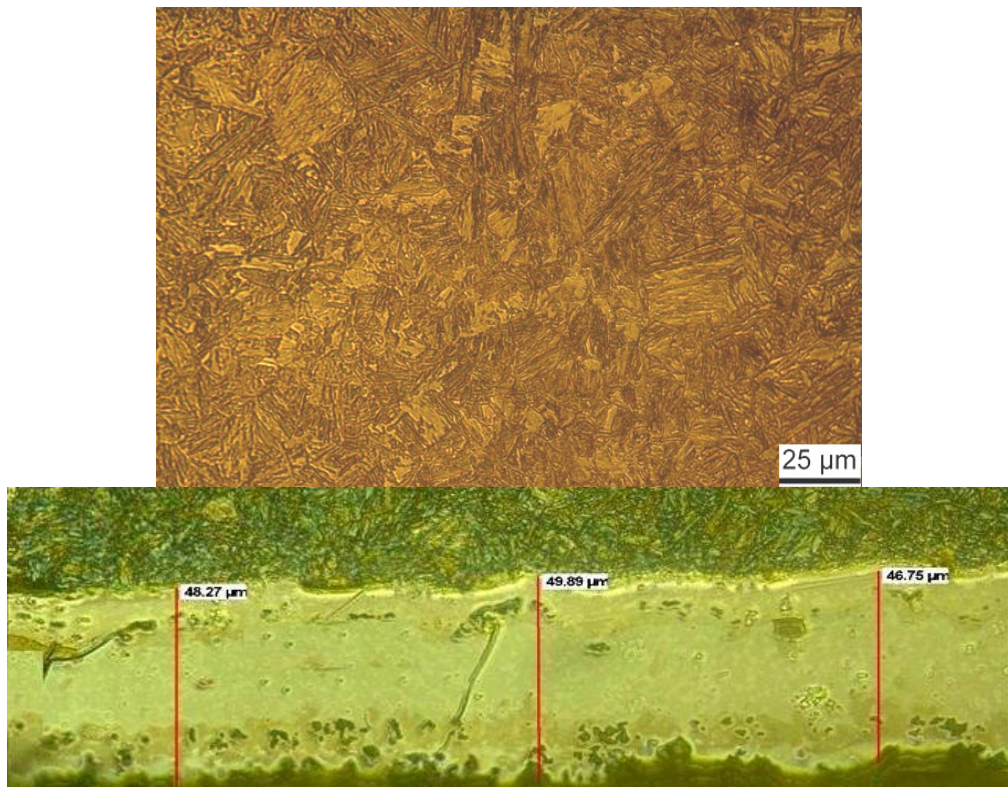


Şekil 5.3 : İşlemsiz Usibor 1500 sacın alt metal-kaplama bölgesinin EDS analizi.

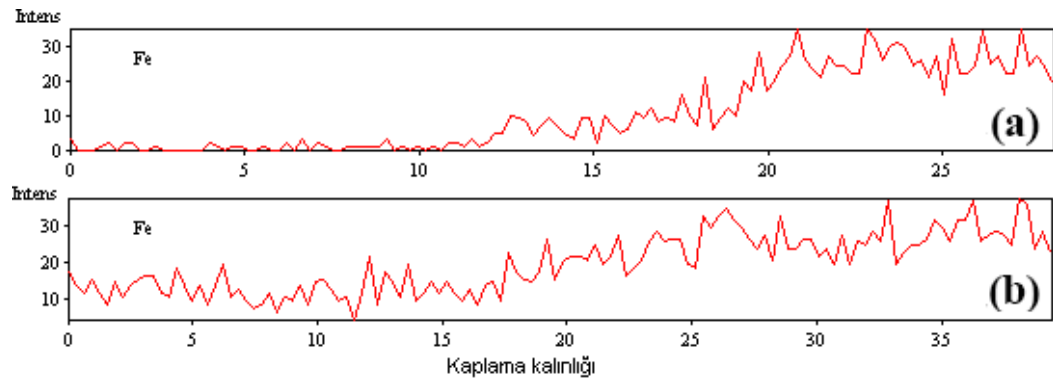
Fırında ısıtma ile preste sertleştirilmiş Usibor 1500 sac malzemenin mikroyapı görüntüsünde, östenitlenmiş sac malzemenin su soğutmalı kalıp altında 54 °C/s hızla sertleştirilmesinin etkisi ile martensitik yapıya sahip olduğu ve kaplama kalınlığının 46 µm seviyelerine çıktığı görülmüştür (Şekil 5.4). Kaplama kalınlığındaki bu artışın nedeni, fırında ısıtma evresinde alt metalden kaplamaya doğru Fe difüzyonunun etkisi ile Al-Si yapının; farklı karakterlerdeki Fe-Al-(Si) fazına dönüşmesidir. Al içeriğine ve mikrosertliğine bakılarak şu fazlar tanımlanabilir [44]:

- % 50 Al içeren FeAl_2 (ζ -fazı) ve Fe_2Al_5 (η -fazı) ve 1000 HV
- Faz sınırlarında % 45 Al içeren Fe_2Al_7 (ϵ -fazı) ve 650–750 HV
- % 33 Al içeren FeAl (β'' -fazı) ve 400–500 HV
- Alt metal difüzyon bölgesinde % 14 Al içeren Fe_3Al ve 250–350 HV

İşlemsiz numunenin kaplamasında, özellikle yüzeye yakın yerlerde yok denecek kadar az bulunan Fe elementinin; fırında ısıtma ve sertleştirme işlemi sonrasında, kaplama boyunca bilhassa alt metale yakın bölgelerde konsantrasyonunun arttığı görülmüştür (Şekil 5.5).

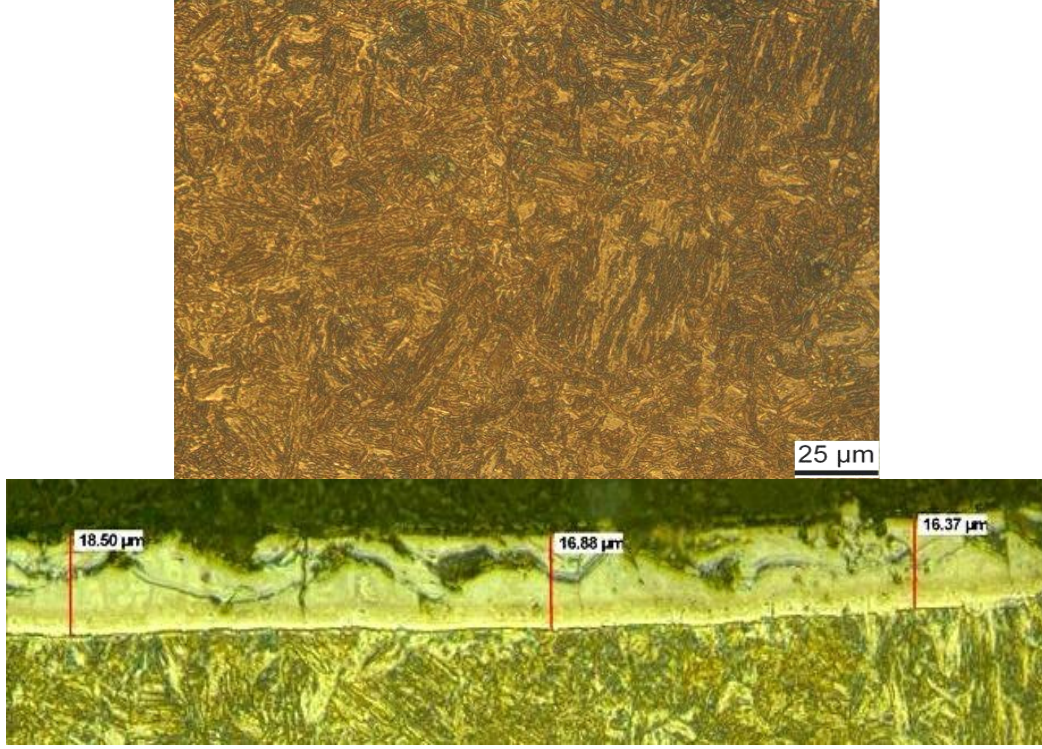


Şekil 5.4 : Fırında ısıtma ile PH sacın mikroyapı (üst) ve kaplama (alt) görüntüsü.



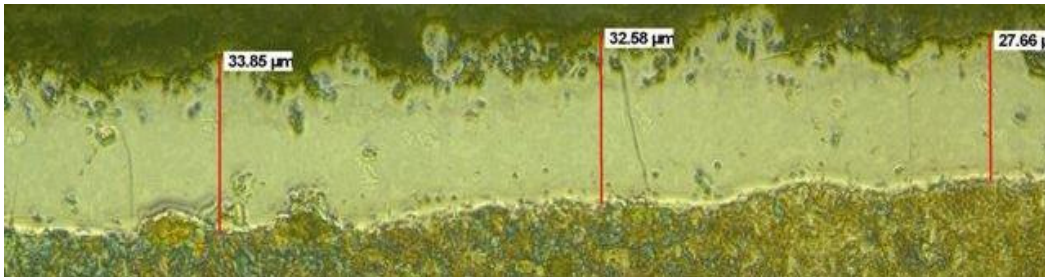
Şekil 5.5 : Fe çizgisel EDS analizi (a)işlemsiz ve (b)fırında ısıtma ile preste sert.

Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirilmiş sac malzemede, fırında ısıtma tekniğindeki gibi etkin bir soğuma ile benzer martensitik mikroyapı elde edilmiştir. Ancak; yüksek akımda elektrik akımı ile ısıtma sırasında; numuneye ait kaplamanın ergiyerek kaplama kalınlığının 16 μm seviyelerine düştüğü görülmüştür (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 : Elektrikli ısıtma ile PH sac mikroyapı (üst) ve kaplama (alt) görüntüsü.

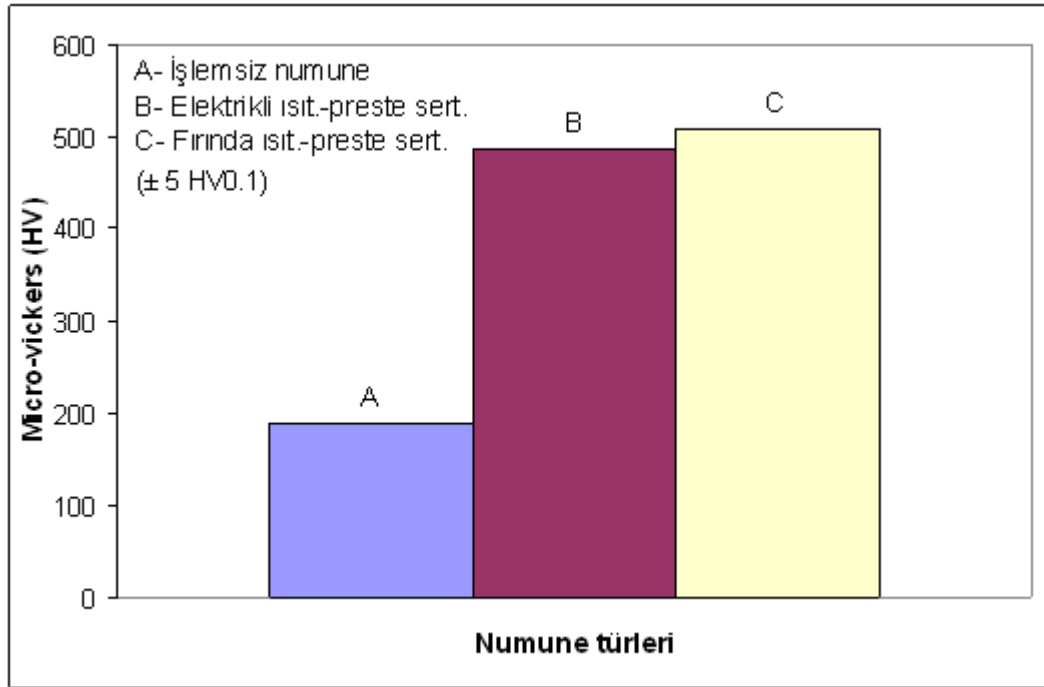
Kaplamanın ergime problemini ortadan kaldırmak için sac numune, elektrikli ısıtma öncesi, Bölüm 4.10’da belirtilen reçete ile bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Ön ısıtma işlem sonrası elektrikli ısıtma ile preste sertleştirilen sac malzemede, kaplamanın ergimeden ve bozunmadan yapısını muhafaza edebildiği görülmüştür (Şekil 5.7). Isıl işlem sırasında difüzyonun etkisi ile oluşan Fe-Al(-Si) fazı alt metale çok iyi yapışma ve ani ısıtma sırasında kompakt yapısını koruma özelliği göstermiştir.



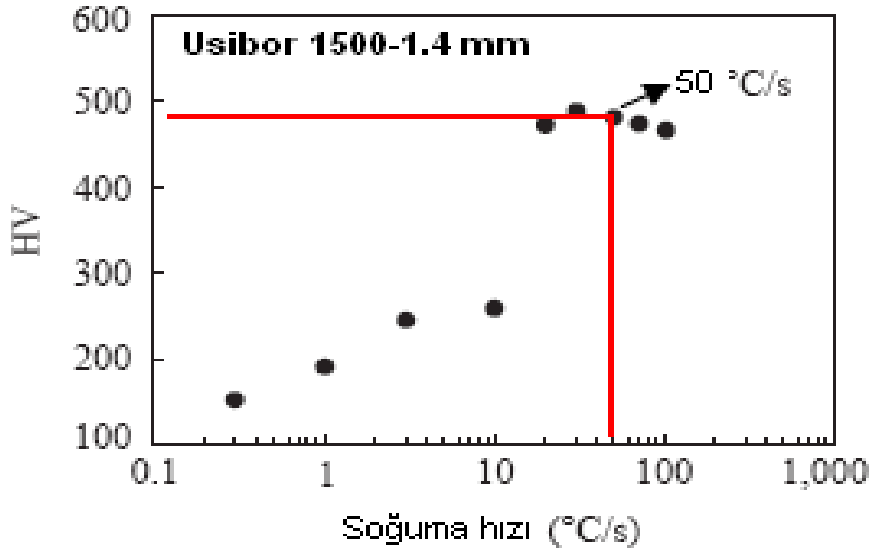
Şekil 5.7 : Ön ısıtma işlem + elektrikli ısıtma ile preste sert. sacın kaplama görüntüsü.

5.2 Preste Sertleştirmenin Sertlik Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.8’de herhangi bir işleme tabi tutulmayan, fırında veya elektrikli ısıtma ile preste sertleştirilen Usibor 1500 sac malzemelerin sertlik değerlerindeki değişim şematik olarak verilmektedir. Sertliklerde, her iki ısıtma tekniği ile preste sertleştirme sonrasında belirgin bir artış görülmektedir. Artışa neden olan temel faktör, iki ısıtma tekniği ile östenitlenmiş sac malzemede, su soğutmalı kalıp altında ani soğuma etkisi ile meydana gelen martensitik dönüşümdür. Fırında veya elektrikli ısıtma tekniği ile sertleştirilmiş numunelerde yine mikroyapıdaki benzerliklere bağlı olarak; sertlik ölçüm değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Nippon Steel firmasında yapılan bir çalışmada, fırında 950°C sıcaklıkta 3 dakika östenitlenen Usibor 1500 çelik sac malzeme, 50 °C/s soğuma hızı ile sertleştirilmiş ve işlem sonunda elde edilen üründe yaklaşık olarak 500 HV sertlik değerine ulaşılmıştır (Şekil 5.9) [43].



Şekil 5.8 : Usibor 1500 çelik sacların vickers sertlik değişimi.

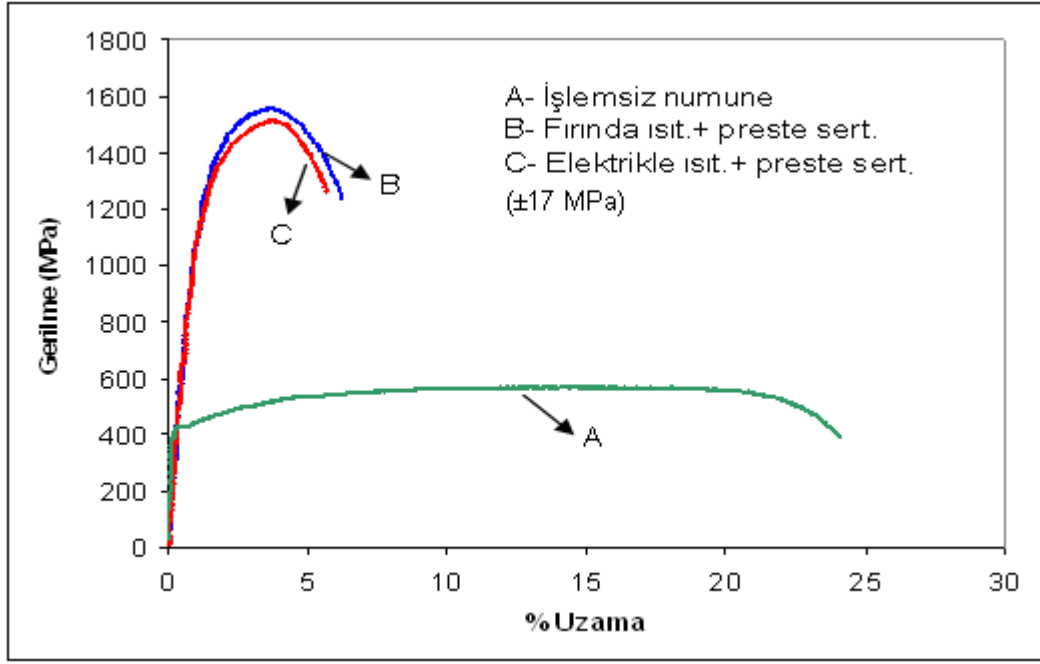


Şekil 5.9 : Soğuma hızının sertliğe etkisi (Nippon steel) [43].

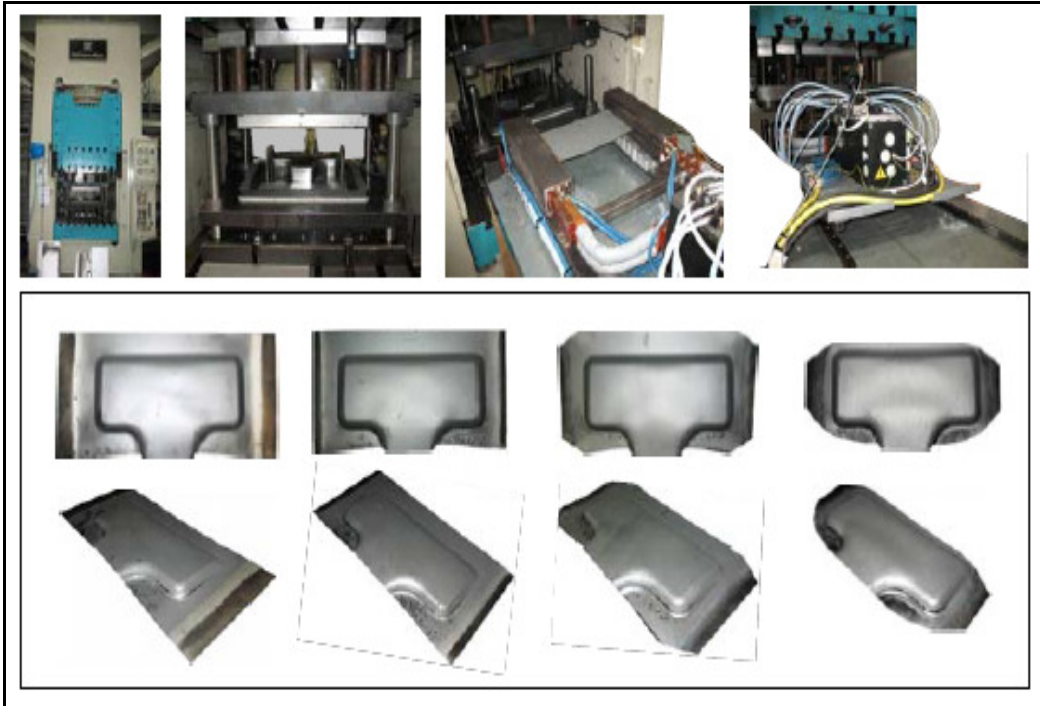
5.3 Preste Sertleştirilmenin Dayanım ve Süneklik Üzerindeki Etkisi

Herhangi bir işleme tabi tutulmayan, fırında veya elektrikli ısıtma ile preste sertleştirilen Usibor 1500 sac malzemelerin çekme eğrileri Şekil 5.10'da verilmektedir. Eğrilerden anlaşılabileceği üzere; gerek fırında, gerekse elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme sonrası, Usibor 1500 sac malzemelerin çekme dayanımları 1500 MPa'nın üzerine çıkmıştır. Dayanımdaki artışın nedeni; sertlik artış mekanizmasına benzer şekilde, östenit sıcaklığına ısıtılan malzemenin su soğutmalı kalıp altında hızlı soğumaya maruz bırakılması ve buna bağlı olarak martensitik dönüşümün gerçekleşmesidir. Martensit, yarı kararlı faz olup akma dayanımı ferritten 3–4 kat yüksektir. Öte yandan dayanım değerlerindeki bu artışa karşın, % uzama değerlerindeki düşüş dikkate değerdir. Martensit, dayanımı yüksek bir fazdır, ancak; ferrite göre oldukça gevrek karakterdedir ve buna bağlı olarak süneklik kabiliyeti zayıflamıştır.

Behrens'in bir çalışmasında; 0.2 m² yüzey alanına sahip, 1.25 mm kalınlıktaki 22MnB5 çelik sac lar; 20 s süreyle elektrikli ısıtma ile sertleştirme işlemine tabi tutulmuş ve sonrasında nihai ürün üzerinde mekanik analizler yapılmıştır (Şekil 5.11). Analiz neticesinde sertleştirilmiş sac ürünlerin küçük tanelere ve 1500 MPa'nın üzerinde çekme dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir [4].



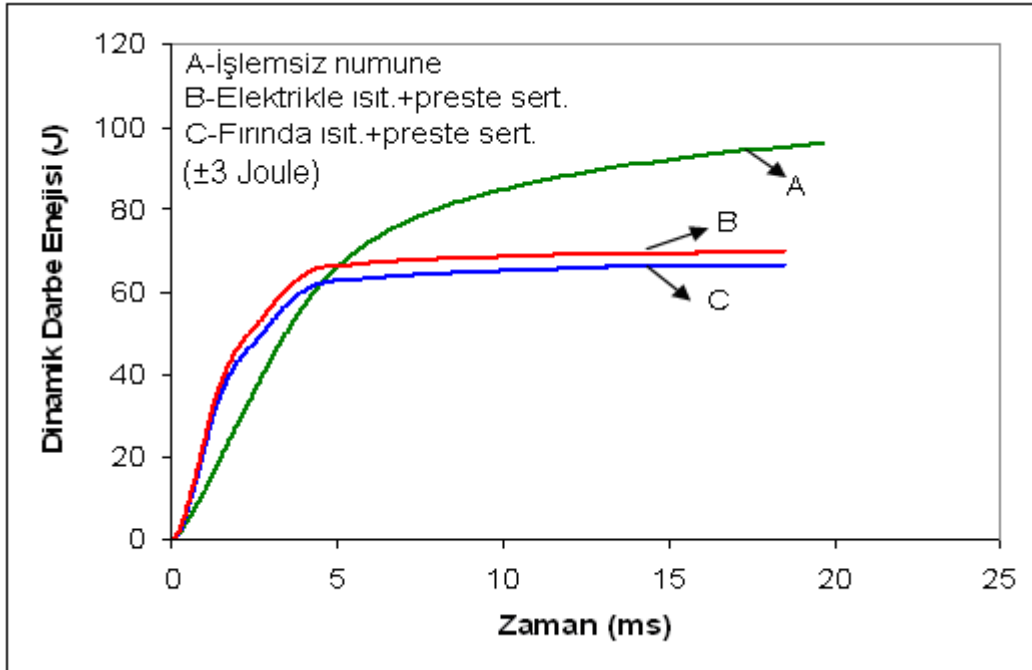
Şekil 5.10 : Usibor 1500 çelik sacların dayanım ve % uzama değerlerinin değişimi..



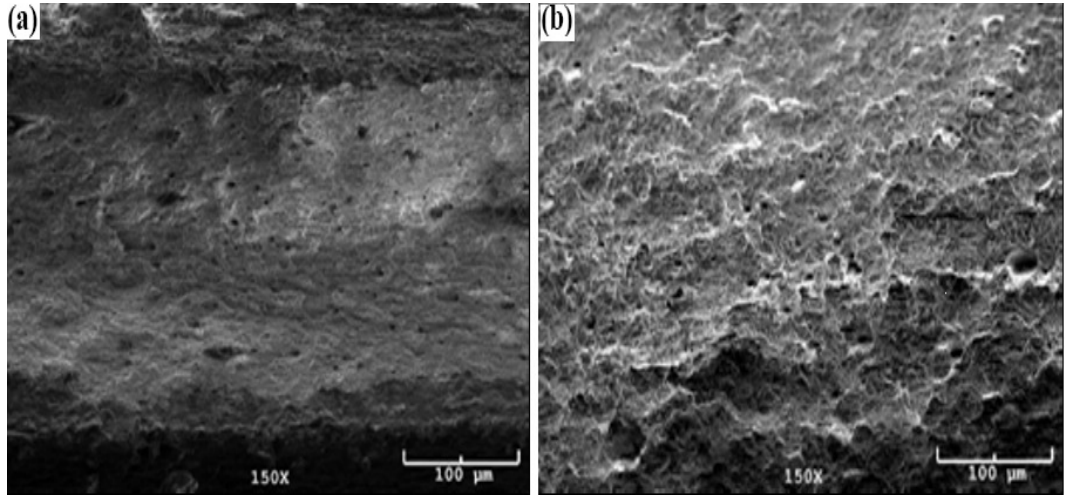
Şekil 5.11 : Elektrikli ısıtma ile preste sertleştirme deney düzeneği ve parçalar [4].

5.4 Preste Sertleştirmenin Dinamik Darbe Enerjisi Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.12’de her hangi bir işleme tabi tutulmayan, fırında veya elektrikle ısıtma ile preste sertleştirilen Usibor 1500P sac malzemelerin, oda sıcaklığında, ani yük altında kırılana kadar soğurdukları darbe enerjisi gösterilmektedir. Preste sertleştirilen sac malzemeler, yüksek dayanım kazanmasına karşın; çentik veya kusurlara karşı hassasiyeti artmaktadır. Sertleştirme işlemi sonrasında yaşanan temel korku; gevrek martensitik fazın etkisiyle darbe enerjilerinde ciddi düşüşlerin gözlemlenebilmesidir. Bu bağlamda, Bölüm 4.12.4’te belirtilen numune boyutları ve test parametreleri dikkate alınarak; oda koşullarında yüksek hızda dinamik darbe testleri yapılmıştır. Testler neticesinde; gerek fırında ısıtma tekniği gerekse elektrikli ısıtma tekniği ile preste sertleştirilen numunelerde, işlemsiz numuneye göre darbe enerjilerinde % 30 oranında bir düşüş ortaya çıkmıştır. İşlemsiz numunede 96 Joule olarak ölçülen dinamik darbe enerjisi, fırında ısıtma ile sertleştirilen numunede 69 Joule, elektrikli ısıtma ile sertleştirilen numunede ise 66 Joule şeklinde tespit edilmiştir. Fırında ve elektrikli ısıtma ile sertleştirilen numunelerde, darbe enerjilerinin birbirine yakın değerde olması; benzer mikroyapı, sertlik ve dayanım değerlerine sahip olmalarının olağan bir sonucudur. Şekil 5.13’de dinamik darbe testi sonrası, işlemsiz numuneye ait sünek karakterde ve elektrikli ısıtma ile preste sertleştirilmiş numuneye ait gevrek karakterde kırık yüzey görüntüleri verilmiştir.

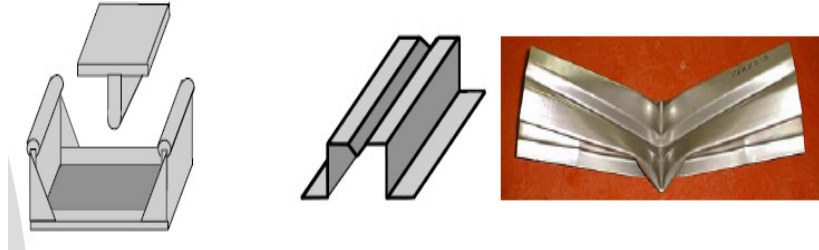


Şekil 5.12 : Usibor 1500 çelik sacların dinamik darbe enerjilerinin değişimi.

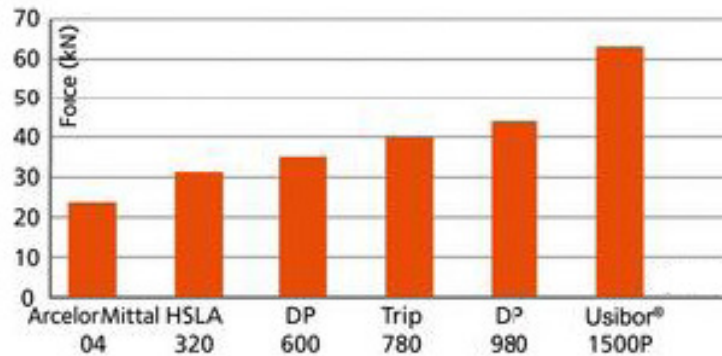


Şekil 5.13 : Kırık yüzey görüntüsü (a)İşlemsiz (b)elektrikli ısıtma+preste sert.

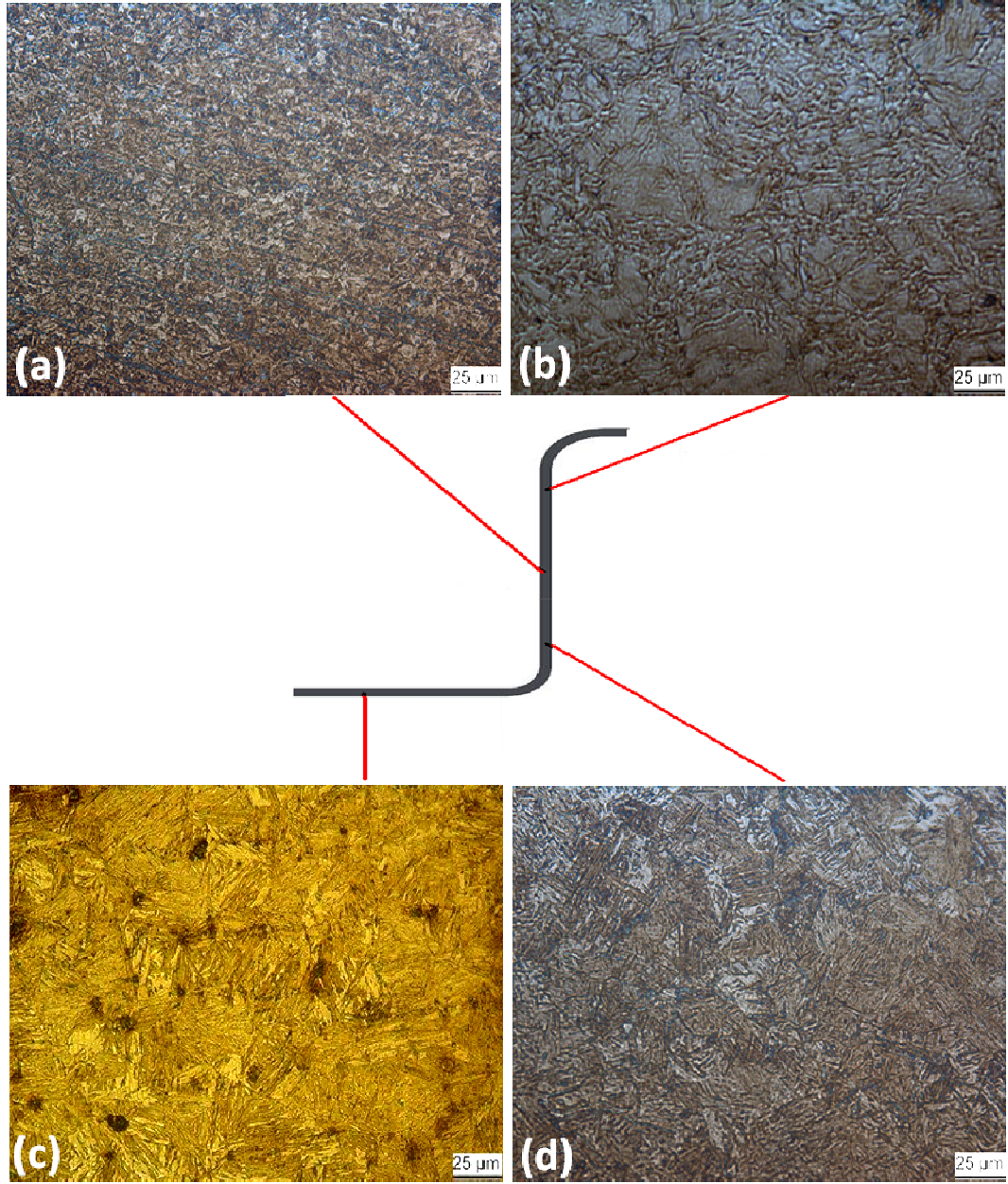
Öte yandan; bu çalışmada yapılan dinamik darbe enerjisi ölçümü dışında, Arcelor-Mittal firmasının, sıcak şekillendirilmiş Usibor 1500 çelik sac malzeme üzerinde uyguladığı üç nokta eğme deneyleri de literatürde yer almaktadır. Şekil 5.14'te üç nokta eğme test numunesinin boyutları ve test sonrası numunenin aldığı form gösterilmektedir. Üç nokta eğme testleri 29 kph hızda (10 kJ) yapılmış ve maksimum yükler ölçülmüştür.Şekil 5.15'te şematik olarak verilen test sonuçlarına göre sıcak şekillendirilmiş Usibor 1500 çelik sac malzemedede, diğer yüksek dayanımlı çelik saclara nazaran üç nokta eğme deneylerinde daha yüksek yüke ihtiyaç duyulmuştur.



Şekil 5.14 : Usibor 1500 üç nokta eğme test numunesi ve deney sonrası görüntüsü.

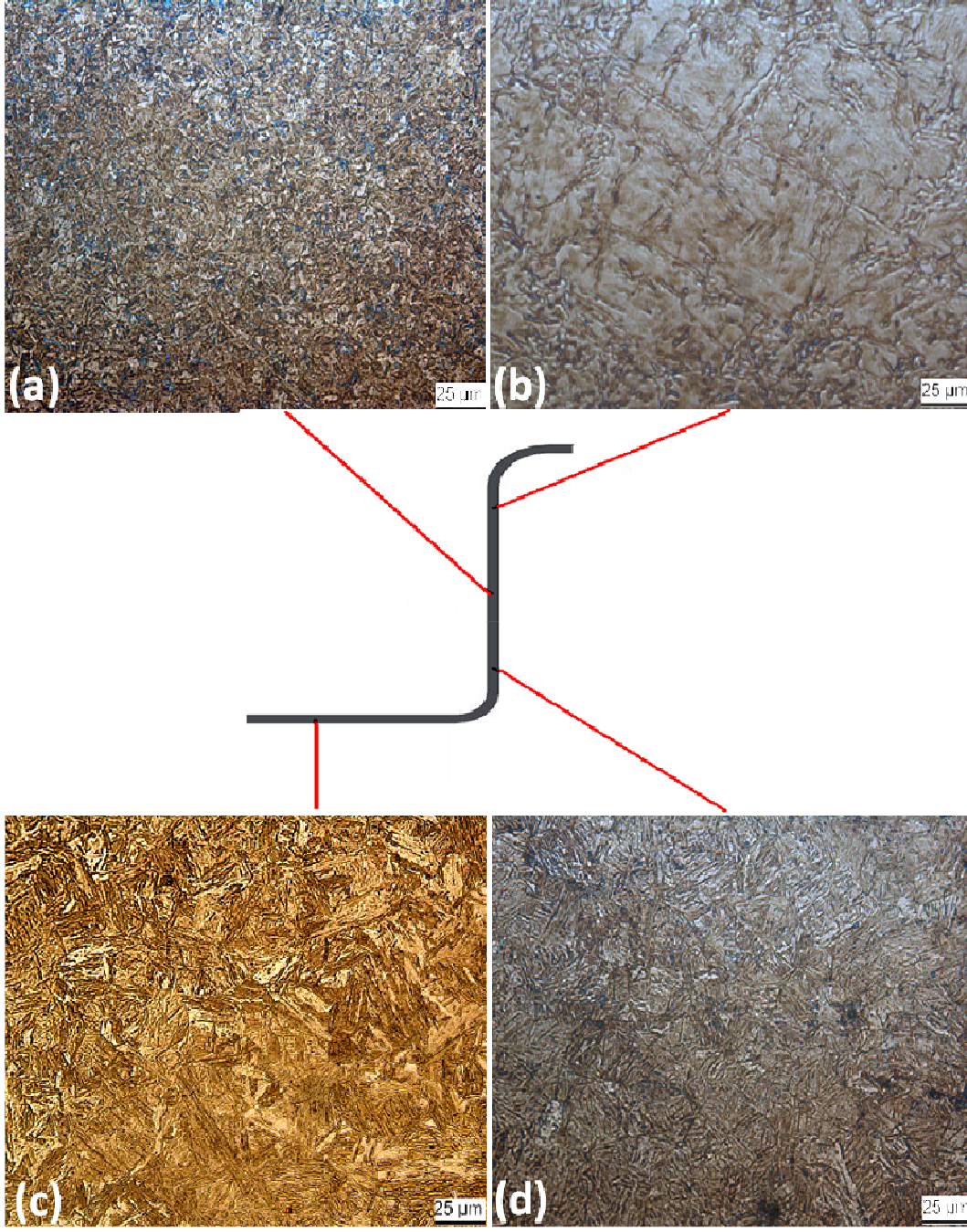


Şekil 5.15 : Farklı çeliklere ait üç nokta eğme testi yük ölçümleri.



Şekil 5.17 : Fırında ısıtılan sacın termo-mekanik işlem sonrası mikroyapıları.

Yan duvar girintisi nedeniyle ıstampa temasının olmadığı ve sadece kalıp temasının olduğu üst bölgelerde ise çok az miktarda martensit içeren (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18, a resmi) yada martensit içermeyen beynit-ferrit morfolojisi (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18, b resmi) görülmüştür. Yan duvarda gözlemlenen bu durum her iki ısıtma tekniği için ortaktır.



Şekil 5.18 : Elektrikle ısıtılan sacın termo-mekanik işlem sonrası mikroyapıları.

Termo-mekanik işlem sonrasında numuneler üzerinde sertlik, çekme ve dinamik darbe testleri yapılmış ve böylece parçanın yan ve alt duvar mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Fırında veya elektrikle ısıtarak şekillendirilen U kanal profilin üç bölgeye ayrılmış yan duvarına ait mekanik özellikler Çizelge 5.1, alt duvarına ait mekanik özellikler ise Çizelge 5.2’de verilmektedir. Her iki ısıtma tekniği için birbirine yakın değerlerde ve her bir bölgeye ait mikroyapı karakteristiğine uyumlu mekanik davranışlar görülmüştür.

Çizelge 5.1 : U kanal profilin yan duvar mekanik özellikleri.

İşlem	Kalınlık ölçümü (mm)	Kesitte incelme (%)	R _{p0,2} (±23MPa)	R _m (±11MPa)	A (±%0,5)	Dinamik darbe enerjisi (±3J)	Vickers sertlik (±5HV _{0,1})
Elektrikli ısıtma	1,24-1,29	13,0	466	653	20,1	94	218
	1,34-1,33	8,4	552	785	16,0	-	316
	1,42	2,5	1041	1481	8,1	70	472
Fırında ısıtma	1,25-1,30	12,5	508	712	20	92	238
	1,35-1,36	7,0	606	856	14,2	-	377
	1,43-1,44	1,5	1052	1494	7,2	70	496

Çizelge 5.2 : U kanal profilin alt duvar mekanik özellikleri.

İşlem	Kalınlık ölçümü (mm)	Kesitte incelme (%)	R _m (±21MPa)	R _{p0,2} (±9MPa)	A (±%0,3)
Elektrikli ısıtma	1,46	0	1108	1574	5,5
Fırında ısıtma	1,46	0	1104	1569	5,6

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda otomobil endüstrisinde; araç ağırlığını azaltmak ve çarpma-kaza emniyetini arttırmak için dayanımın yanı sıra, şekillenebilirliği ve darbe dayanımı yüksek sac ürünlere ihtiyaç doğmuştur. Bu beklentiler; yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik ve alüminyum saclar tercih edilerek karşılanmaya çalışılmıştır. Kompleks şekilli parçalar için araç ağırlığını düşürmekte alüminyum sac kullanımı çözüm olmasına karşın; yüksek maliyeti, 1/3 oranında düşük elastiklik modülü ve sınırlı dayanıma sahip olması bir handikap olarak ortaya çıkmıştır. Öte yandan; UHSS saclar, karmaşık geometrili olmayan parçalarda, yüksek dayanım ve kaynak kabiliyetine ve oldukça iyi darbe direncine sahip olması nedeniyle etkin bir çözüm olarak sunulmaktadır.

Yüksek ve çok yüksek dayanımlı çelik saclar DP, TRIP, TWIP ve PH gibi gruplara ayrılmaktadır. Bunların ilk üçü oda sıcaklığında şekillendirilmek üzere geliştirilmiş, süratle pekleşen yapıdaki saclardır. Öte yandan; PH (ve bunların en yaygın kullanılabildiği 22MnB5) yüksek sıcaklıkta şekillendirme ve kalıp basıncı altında soğutulularak sertleştirilme için geliştirilmiştir. Soğuk şekillendirme uygulama açısından genel olarak daha pratik ve ekonomiktir, ancak malzemelerin şekillendirilebilirliği düşüktür ve işlem sonrası geri yaylanma çok büyük olduğu için geometri kontrolü önemli bir teknik sorundur. Bu nedenle gerek şekillendirme kolaylığı, gerekse geri yaylanmanın tamamen ortadan kalkması sıcak şekillendirmeyi cazip kılmıştır.

Yüksek dayanımlı sacların şekillendirilmesi işlemi, özellikle otomotiv sektöründe üzerinde durulması gereken bir konudur. Oda sıcaklığında kısıtlı olan malzeme şekillendirebilirliği, sıcak şekillendirme şartlarında genişletilerek bu malzemelerin kullanımında artış sağlanması ve böylece taşıt araçlarında belirgin ağırlık düşüşü yanında iyileştirilmiş yapısal dayanım ve çarpma dayanımı sağlamak mümkün olabilecektir.

Bu çalışmada, ultra yüksek dayanımlı sac malzemeler içinde en yaygın teknolojik uygulamaya sahip olan 22MnB5 (Al-Si kaplamalı 22MnB5 tercih edilmiştir) çelik sac, verimli ve üretken bir imalat süreci ile fırında veya elektrikli ısıtma tekniği ile ısıtılmış ve hemen sonrasında süratle, preste sertleştirme veya termo-mekanik şekillendirme işlemlerine tabi tutulmuştur. Farklı ısıtma tekniklerinin ve kalıp altında sıcaklık değişiminin (soğuma) nihai ürünün mikroyapı, dayanım, süneklik, dinamik darbe enerjisi ve yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İncelenen bu özellikler ışığında verimlilik ve nihai ürünün servis koşullarına uygunluğu açısından proseslerin birbirlerine göre üstünlükleri tespit edilmiştir.

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

- Preste sertleştirme, yüksek dayanımlı çeliklerin soğuk şekillendirilmesinde ortaya çıkan; yüksek gerilmeler, kısa takım ömrü, sınırlı şekillendirilebilirlik, geri yaylanma ve parça boyutlarında düşük doğruluk gibi istenmeyen sonuçlara çözüm getirir.
- Preste sertleştirmede ilk aşama sacın östenitleme işlemidir. Östenitleme işlemindeki kritik hedef, ikinci bir faz kalmaksızın tamamen östenitik yapının elde edilmesidir. Östenitik bölgedeki optimum sıcaklık ve süre tayini için çelik sac malzemenin kalınlığının ve kimyasal yapısının dikkate alınması gerekmektedir.
- Östenitlenmiş sıcak çelik sacın istenen mekanik ve metalurjik özelliklere sahip olabilmesi için belli bir soğuma hızında soğutulması gerekir. Soğuma hızının tespitinde CCT diyagramına başvurulmaktadır. Bu çalışma kapsamında martensitik mikroyapı istenmiştir ve 22MnB5'e ait CCT diyagramına göre minimum soğuma hızı 30 °C/s'dir.
- Tümüyle martensitik yapının arzulandığı durumda, pres altında kalıp temasının başladığı anki malzeme sıcaklığı 780°C'nin altında olmamalıdır.
- İşlem sonunda parça boyutlarında yüksek doğruluk elde etmek için kalıptan alınıp havada soğumaya bırakılacak nihai ürünün sıcaklığının yaklaşık 80°C olması gerekmektedir.

- Östenitleme işlemi kaplamasız sac ile yapıldığında, atmosfer kontrollü fırın kullanımı tercih edilmelidir. Aksi takdirde; korunumsuz fırında ısıtma sırasında direkt atmosferik oksijenle temas söz konusu olduğundan; oksidasyon ve dekarbürüzyon kaçınılmazdır. Keza; östenitleme işlemi sonrası sacın fırından prese taşınımı sırasında da aynı durum görülebilmektedir. Sac yüzeyinde yaklaşık 60 mikrona kadar oluşabilecek dekarbürüzyon, nihai ürünün mekanik özelliklerini zarar verici yönde etkiler. Öte yandan oksidasyon etkisiyle oluşabilecek abrasif demir oksit tabakası da şekillendirme sırasında, kalıp ile sac malzeme arasındaki harekette, kalıbı aşındırma etkisi gösterir. Bu parçalarda, preste sertleştirme sonrası yüzeyde oluşan oksit tabakası kumlama yoluyla giderilmektedir. Kumlama, pahalı bir yöntem olmasının yanı sıra bu tip ince sacların geometrik toleranslarına zarar verebilmektedir. Tüm bu etkiler düşünülerek; bu çalışma kapsamında Al-Si kaplamalı Usibor 1500 çelik sac malzeme tercih edilmiştir.

- Elektrikle ısıtma sırasında en çok dikkat edilmesi gereken nokta; sac malzeme üzerindeki ısı dağılımının homojen olarak elde edilip edilmediğinin belirlenmesidir. Eğer homojen bir dağılım sağlanamaz ise sıcaklık bölgesel olarak çok fazla farklılık gösterebilmektedir. Bazı bölgeler östenitleme sıcaklığının altında kalabilmekte veya aşırı derecede sıcaklık artışı oluşabilmektedir. Bu sıcaklık farkları, soğuma sonrası malzemenin mekanik özelliklerinde de bölgesel olarak farklılıklar oluşmasına neden olabilmektedir. Çözüm olarak; termal kamera yardımıyla elde edilen sıcaklık dağılımı resminden faydalanılarak, sac ile elektrod arasındaki düzgün temas olmayan bölgeler belirlenmiş ve gerek malzeme gerekse tasarımda gerekli yüzey iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. İyileştirmeler sonrasında tekrar termal analiz yapılmış ve homojen sıcaklık dağılımı elde edilebilmiştir.
- Yüksek değerlerde elektrik akımı ile ısıtma tekniğinde yaşanan temel çekince, 4 sn gibi kısa sürede çok yüksek hızda gerçekleşen ısıtma işleminde malzemenin tamamıyla östenitik faza ulaşip ulaşamayacağıdır. Fırında 60 dakikaya yakın veya elektrik ile 4 saniye ısıtma sonrasında preste sertleştirilen 22MnB5 sac numunelerde, her iki teknik için de benzer şekilde, tamamına yakın martensit içeren mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Bu sonuç yüksek hızda elektrik ile ısıtmanın östenitleme açısından herhangi bir sorun teşkil etmediğini ortaya koymuştur.
- Usibor 1500 üzerindeki Al-Si kaplamanın ergime sıcaklığı 600°C olup hızlı ısıtma sırasında kaplama ergimektedir. Nitekim, ön deneyler sırasında çok kısa sürede ısıtma gerçekleştiğinde, kaplamanın heterojen biçimde ergidiği gözlemlenmiştir. Fakat, sac malzeme fırın içinde ısıtıldığı takdirde; Al-Si kaplama, arayüzeyden başlayarak hızla yüzeye kadar difüzyonun etkisiyle büyümekte ve farklı karakterdeki Fe-Al-Si faz formlarına dönüşmektedir. Bu yeni kaplama fazı, yüksek ergime noktasına sahip olma, hızla yüksek sıcaklığa ısıtıldığında kompakt yapısını koruyabilme ve ana metale çok iyi yapışma özelliklerine sahiptir. Bu bilgiler ışığında, yüksek akımda elektrik akımı ile ısıtma öncesinde, sac malzeme fırın içinde Ac_3 altındaki 800°C sıcaklıkta 3 dakika tutulmuştur.

- Fırında veya elektrikli ısıtma sonrasında preste sertleştirilen sac numuneler üzerinde mekanik testler yapılmıştır. Test sonuçlarına göre her iki ısıtma tekniği için sertlik, dayanım değerlerinde ciddi ve anlamlı artış gözlemlenirken, bu artışa karşılık dinamik darbe enerjisinde belli bir ölçüde ve özellikle süneklikte büyük oranda bir kayıp görülmüştür.
- Fırında ısıtmanın avantajı homojen sac sıcaklığını sağlaması, dezavantajı ise fırından kalıba taşınması sırasında gerçekleşen süratli ısı kaybıdır.
- Yüksek değerde elektrik akımı ile ısıtma tekniğinin geleneksel fırında ısıtma tekniğine kıyasla ortaya çıkan üstünlükleri şöyle sıralanabilir:
 - Düşük ısıtma süresi
 - Düşük toplam maliyet
 - Enerji tüketiminde azalma
 - Daha az yer kaplaması
- Yüksek değerde elektrik akımı ile ısıtma sırasında karşılaşılan zorluk, karmaşık geometrili parçaların homojen bir şekilde ısıtılamamasıdır. Akım, iki elektrod arasındaki en kısa yolu tercih ettiğinden bu bölgelerdeki ısınma diğer bölgelere göre daha fazla gerçekleşir. Öte yandan elektrikli ısıtmanın göz ardı edilemeyecek bir diğer dezavantajı ise yüksek hızda ısıtmadan kaynaklanan sıcaklık kontrolünün zorluğudur.

Bu çalışma, Arcelor-Mittal ürünü Al-Si kaplamalı 22MnB5 (Usibor 1500) çelik sacın sıcak 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 dayanımlı sac malzemelerinin sıcak şekillendirme işleminin yaygın şekilde kullanılabilmesi için pek çok malzeme ile alternatif ısıtma teknikleri (indüksiyon akımı ile), yeni kalıp malzeme ve 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.

Öte yandan sıcak şekillendirilmiş 22MnB5 çelik parçaların, imalat ve servis koşulları dikkate alındığında kaynak kabiliyeti, yorulma davranışı ve korozyon direnci yönünden kapsamlı bir inceleme ve araştırmaya açık olduğu görülmektedir.

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

KAYNAKLAR

- [1] **Merklein, M., and Lechler, J.**, 2006: Investigation of the Thermo-Mechanical Properties of Hot Stamping Steels. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. **177**, no. 1–3, Pp: 452–455.
- [2] **Turetta, S., Bruschi, S., and Ghiotti, A.**, 2006: Investigation of 22MnB5 Formability in Hot Stamping Operations. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. **177**, no. 1–3, Pp: 396–400.
- [3] **Malek, N.**, 2007. Hot Stamping of Ultra High Strength Steels, *PhD Thesis*, RWTH, Aachen.
- [4] **Behrens, B., Hübner, S., Schaffner, C., Olle, P., and Schafer, F.**, 2008. Conductive Heating System for Hot Sheet Metal Forming, *Proceedings of the 1st International Conference in Hot Sheet Metal Forming of High-performance Steel*, Kassel, Germany, 63-68.
- [5] **Gülsuyu, S.**, 2004. Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı Çelik Sacların Yüksek Sıcaklıkta Şekillendirmesi, *Yüksek lisans tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] http://www.manganese.org/admin/event_docs/06%20Potential%20for%20Mn20in%20new%20Automotive%20Steels%20by%20M%20Babbitt%20Arcelor.pdf, alındığı tarih 05.11.2008.
- [7] **Mori, K., Maki, S., and Tanak, Y.**, 2005: Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. **54**, no. 1, Pp: 209–212.
- [8] **Kolleck, R., Steinhoefer, D., Feindt, J.A., and Bruneau, P.**, 2004. Manufacturing Methods for Safety and Structural Body Parts for Lightweight Body Design, *Proceeding of the IDDRG International Deep Drawing Research Group Conference*, Sindelfingen, Germany, 167-173.
- [9] **Kalpajian, S., and Schmid, S.R.**, 2003: *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Prentice Hall, New Jersey.
- [10] **Yanagimoto, J., and Oyamada, K.**, 2007: Mechanism of Springback-Free Bending of High Strength Steel Sheets Under Warm forming Conditions. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. **56**, no. 1, Pp: 265–268.
- [11] **Chen, F.K., and Huang, T.B.**, 2003: Formability of Stamping Magnesium-Alloy AZ31 Sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. **144**, no. 3, Pp: 643-647.
- [12] **Demirkol, M.**, 2008. Kişisel görüşme.
- [13] <http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2005/LINK/138.pdf>, alındığı tarih 13.01.2009

- [14] **Bano, X., and Laurent, J.**, 1998. Heat Treated Boron Steels in the Automotive Industry, *39th MWSP Conference* , Indianapolis, USA, 673–677.
- [15] **Nonaka, T., Goto, K., Taniguchi, H., and Yamazaki, K.**, 2003: Development of Ultra High Strength Cold Rolled Steel Sheets for Automotive Use. *Nippon Steel Technical Report*, No: **88**, Pp: 13–15.
- [16] < <http://www.autosteel.org>>, alındığı tarih 15.02.2009.
- [17] **Kapadia, B.M.**, 1978. *Hardenability Concepts with Application to Steel*, The Metallurgical Society of A.I.M.E, Warrendale, USA, Pp: 448.
- [18] **Morral, J.E., and Cameron, J.B.**, 1980. *Boron Hardenability Mechanism*, The Metallurgical Society of A.I.M.E.
- [19] **Thelning, K.E.**, 1984. *Steel and its Heat Treatment*, Butterworths, Pp: 409–419
- [20] **Leslie, W.C.**, 1981. *The Physical Metallurgy Steels*, McGraw-Hill International Book Company, USA, Pp: 269–281.
- [21] **Jandeska, W.F., and Moral, J.F.**, 1972. *Metallurgical Transformation*, **3**, Pp: 2933
- [22] **Mortimer, D.A., and Nicholas, M.G.**, 1976. *Metarials Science*, **10**, Pp: 326
- [23] **Morral, J.E., and Cameron, J.B.**, 1977. *Metallurgical Transformation*, **8**, Pp: 1817
- [24] **Maitrepierre, P., Thivellier, D., Roves-Vernis, J., Rousseau, D., and Tricot, R.**, 1978. *Hardenability Concepts with Application to Steel*, The Metallurgical Society of A.I.M.E, Warrendale, USA, Pp: 421.
- [25] **Sharma, R.C., and Purdy, G.R.**, 1974. *Metallurgical Transformation*, **5**, Pp: 939
- [26] **Haga, J., Mizui, N., Nagamichi, T., and Okamoto, A.**, 1998: *The Iron and Steel Institute of Japan*, **38**, Pp: 580.
- [27] **Kapadia, B.**, 1977. Prediction of the Boron Hardenability Effect in Steel-A comprehensive review, *Hardenability Concepts with Applications to Steel*, The Metallurgical Society of A.I.M.E, Warrendale, USA, Pp: 448–482.
- [28] **Maitrepierre, P., Thivellier, D., and Roves-Vernis, J.**, 1977. Microstructure and Hardenability of Low-Alloy Boron Containing, *Hardenability Concepts with Application to Steel*, The Metallurgical Society of A.I.M.E, Warrendale, USA, Pp: 421–447.
- [29] **Hondros, E.D., and Seah, M.P.**, 1977. *Int. Met. Rev.*, **22**, Pp: 262.
- [30] **He, X.L., Chu, Y.Y., and Jonas, J.J.**, 1989. *Acta Metal.*, **37**, Pp: 2905 – 2916.
- [31] **Tackle, G., Forch, k., and Sartorius, J.**, 1993: Heat Treatable and Surface Hardening Steels for Vehicle and Machine Construction, *Steel*. Vol. **2**, Pp: 118–176.
- [32] <<http://www.scribd.com/doc/3273817/Study-Integrated-Thesis>>, alındığı tarih 24.03.2009
- [33] **Grange, R.A., and Mitchell, J.B.**, 1961. *Trans. ASM*, **53**, Pp: 157.

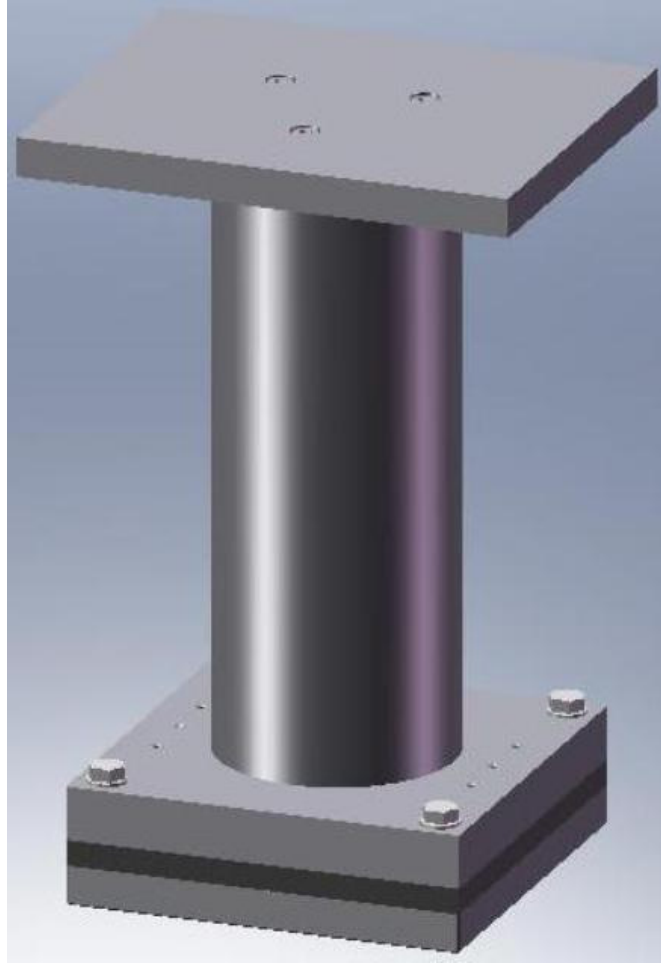
- [34] <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2000/C9/lectures45>>, alındığı tarih 12.10.2008.
- [35] <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/index.html>>, alındığı tarih 22.04.2009.
- [36] **Cin, K.**, 2001. B2→7r Martensitik Dönüşüm Kristalografisinin Teorik Analizi ve Ni-%37Al Alaşımına Uygulanması, *Yüksek lisans tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [37] <<http://www.keytosteel.com/cn/Articles/Art155.htm>>, alındığı tarih 12.03.2009.
- [38] <<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=14817388>>, alındığı tarih 22.01.2009
- [39] **Nishiyama, C.**, 1978. *Martensitic Transformation*, Academic Press, New York, Pp: 28.
- [40] **Morito, S., Saito, H., Ogawa, T., Furuhashi, T., and Maki, T.**, 2005: Effect of Austenite Grain Size on the Morphology and Crystallography of Lath Martensite in Low Carbon Steels. *ISIJ International*. Vol. **45**, no. 1, Pp. 91–94.
- [41] <<http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/Jan07RDUpdate.pdf>>, alındığı tarih 01.04.2009.
- [42] **Suehiro, M., Kusumi, K., Maki, J., Ohgami, M., and Miyakoshi, T.**, 2003: Properties of Aluminum-coated Steels for Hot-forming. *Nippon Steel Technical Report*, No: **88**, Pp: 16–21.
- [43] **Naderi, M., Durrenberger, L., Molinari, A., and Bleck, W.**, 2007: Constitutive Relationships for 22MnB5 Boron Steel Deformed Isothermally at High Temperatures. *Materials Science and Engineering*. Vol. **478**, no. 1-2, Pp: 130-139.
- [44] **Lachmann, C., and Eisenberg, S.**, 2008. Press Hardening Steels in Automotive Application-Chances and Challenges, *2nd International conference on steels in Cars and Trucks*, Wiesbaden, Germany, 133 – 140.
- [45] **TS-1980**, 2005. Genel Toleranslar-Bölüm: 1-Toleransı Verilmemiş Uzunluk ve Açık Ölçüleri İçin Toleranslar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

EKLER

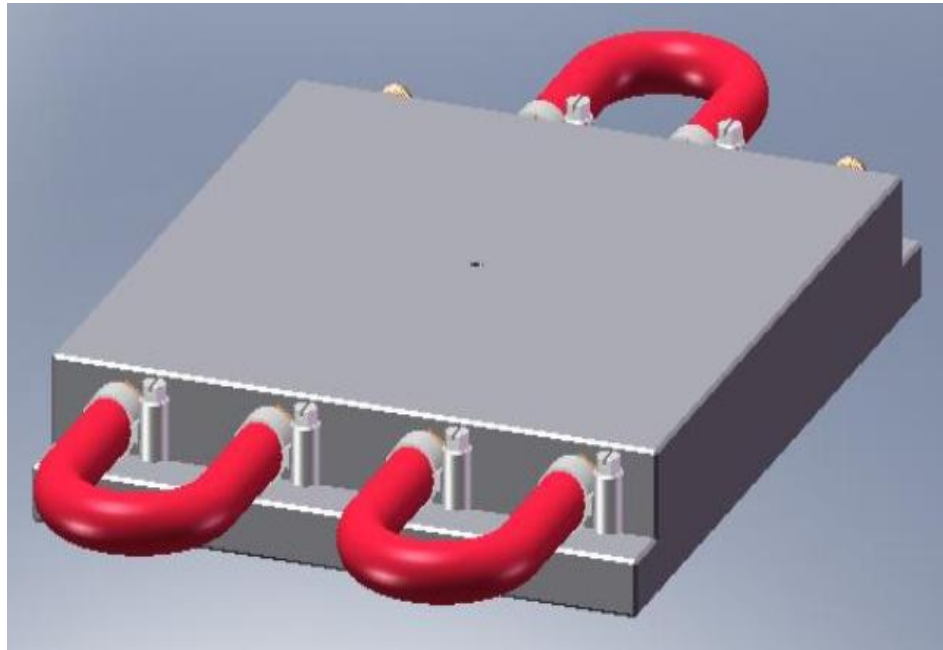
EK A.1: Preste sertleştirme katı model tasarımları

EK A.2: Termo-mekanik işlem katı model tasarımları

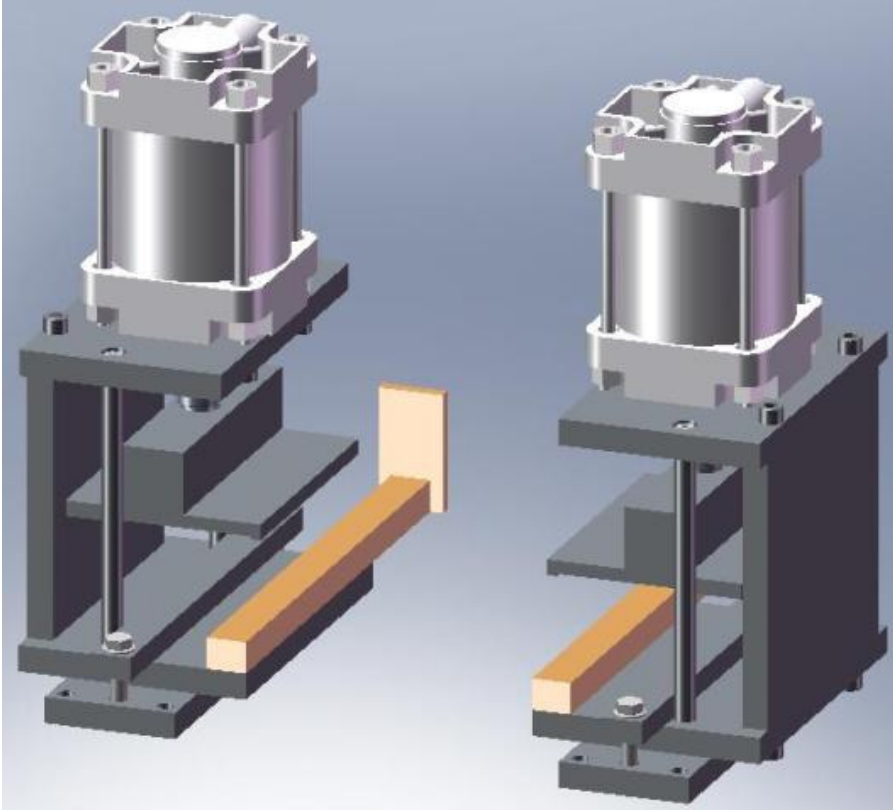
EK A.1



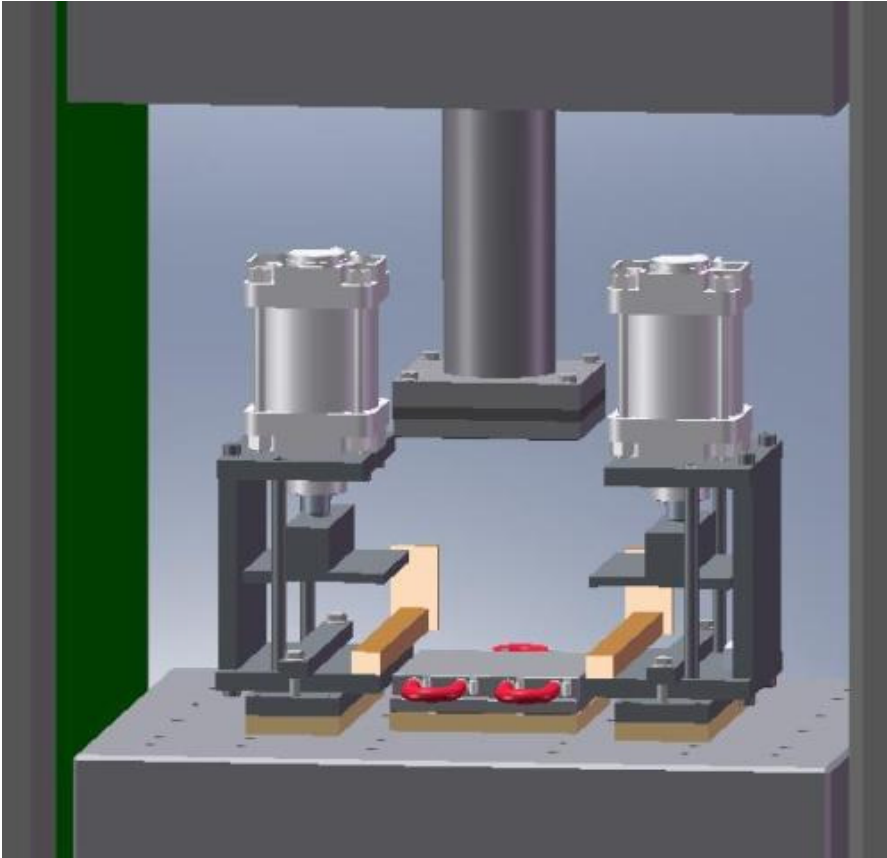
Şekil A.1 : Preste sertleştirme ıstampa katı model tasarımı.



Şekil A.2 : Preste sertleştirme kalıp katı model tasarımı.

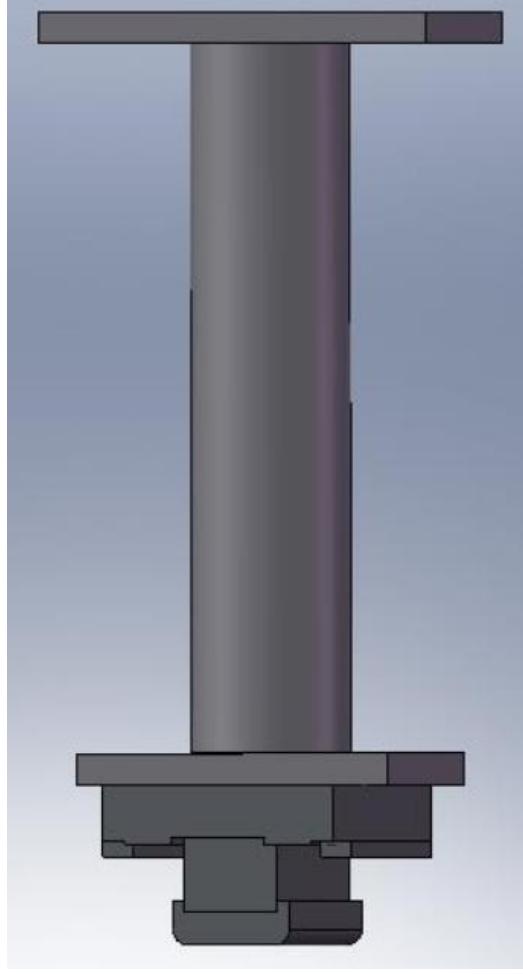


Şekil A.3 : Preste sertleştirme elektrod tutucu katı model tasarımı.

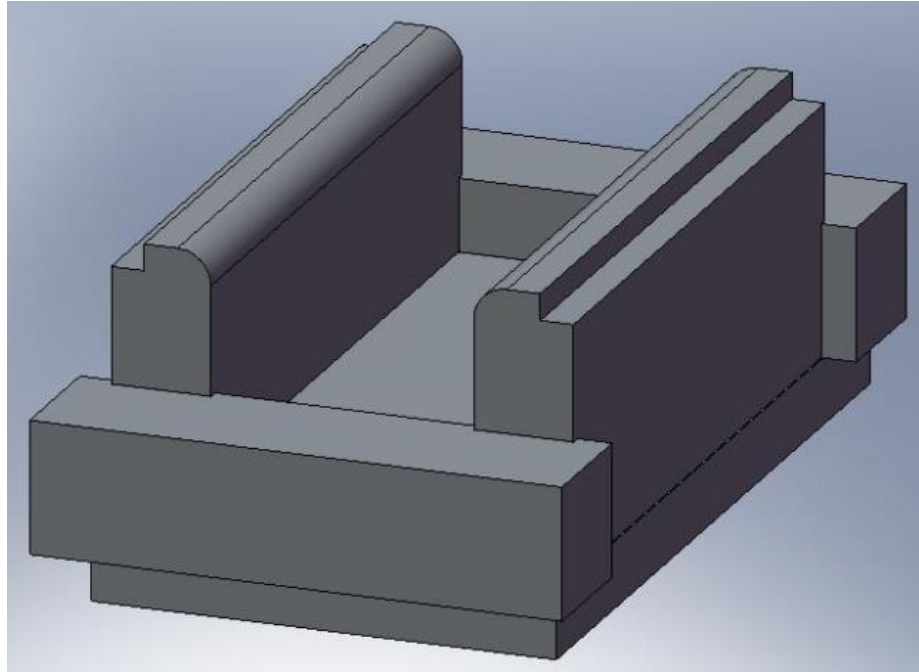


Şekil A.4 : Preste sertleştirme tüm montaj katı model tasarımı.

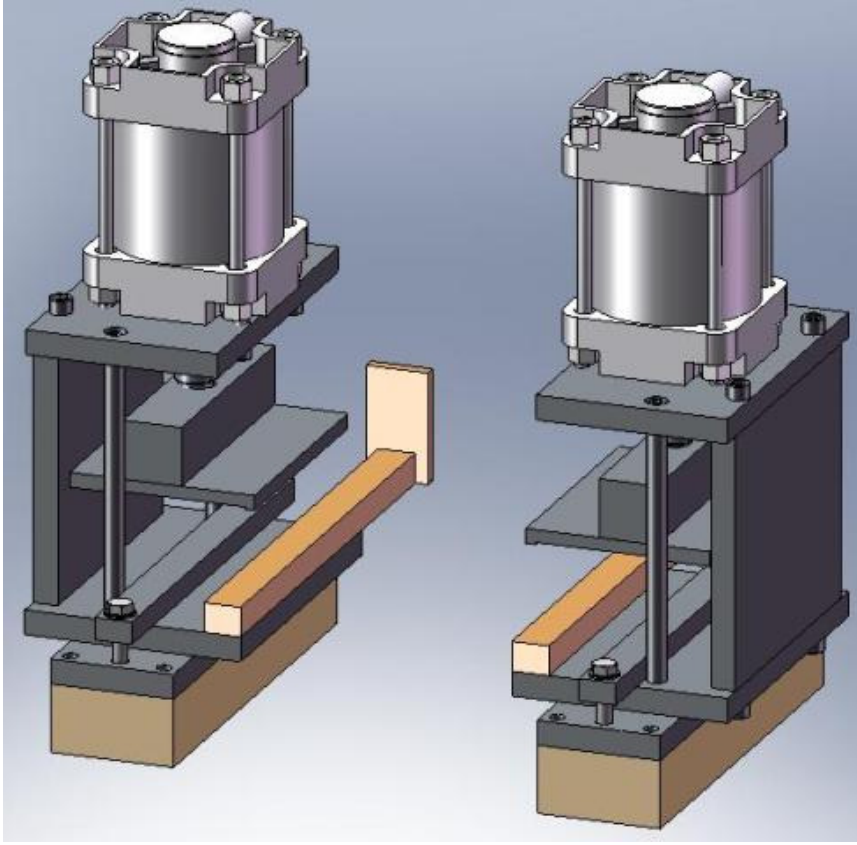
EK A.2



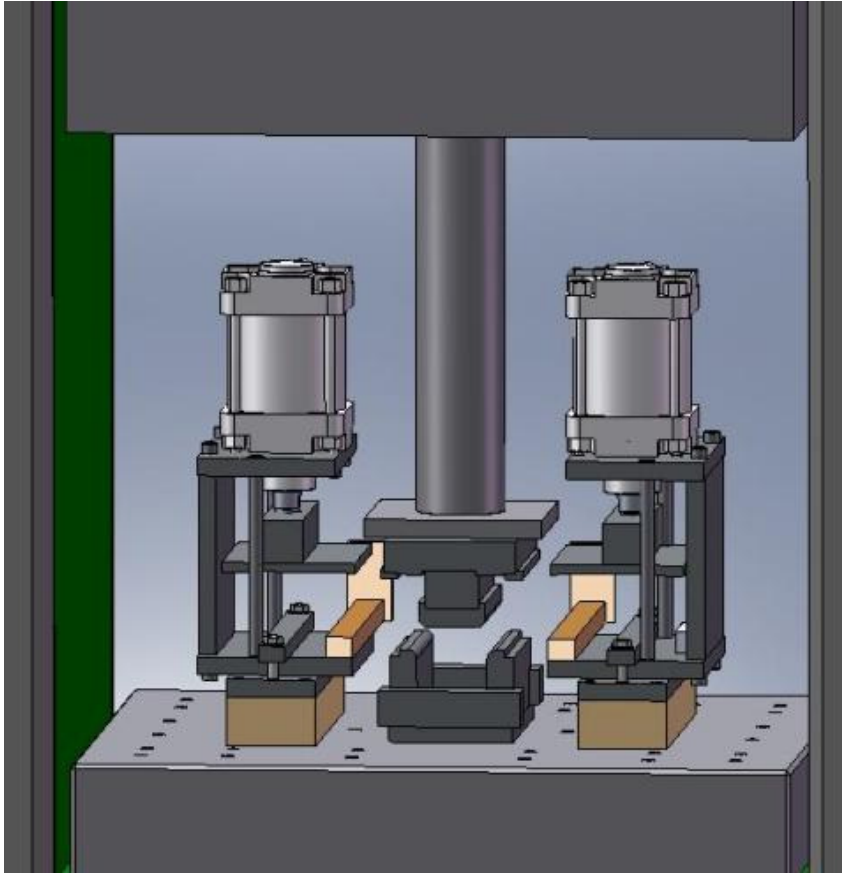
Şekil A.5 : Termo-mekanik işlem ıstampa katı model tasarımı.



Şekil A.6 : Termo-mekanik işlem kalıp katı model tasarımı.



Şekil A.7 : Termo-mekanik işlem elektrod tutucu katı model tasarımı.



Şekil A.8 : Termo-mekanik işlem tüm montaj katı model tasarımı.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: İsmail ÖZCAN
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul-06.02.1983
Adres: Ordu Caddesi 55. Sokak No:22/3 Sultangazi-İSTANBUL
Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Müh. Bölümü