

**USIBOR 1500 ÇELİĞİNİN OSTENİTLEME
SÜRELERİNE BAĞLI OLARAK ÇEKME
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Turan BABUROĞLU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**USIBOR 1500 ÇELİĞİNİN OSTENİTLEME SÜRELERİNE BAĞLI OLARAK
ÇEKME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Turan BABUROĞLU
0000-0001-7797-8152

Prof. Dr. Ali BAYRAM
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

TEZ ONAYI

Turan BABUROĞLU tarafından hazırlanan “USIBOR 1500 ÇELİĞİNİN OSTENİTLEME SÜRELERİNE BAĞLI OLARAK ÇEKME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ali BAYRAM

Başkan : Prof. Dr. Ali BAYRAM
0000-0001-7311-8358
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Hakan AYDIN
0000-0001-7364-6281
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE
0000-0003-1387-907X
BTÜ, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN .
Enstitü Müdürü
12.10.2020

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

12.10.2022.

Turan BABUROĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

USIBOR 1500 ÇELİĞİNİN OSTENİTLEME SÜRELERİNE BAĞLI OLARAK ÇEKME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Turan BABUROĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali BAYRAM

Sıcak şekillendirme işlemi, ultra yüksek dayanımlı çeliklere soğuk şekillendirme proseslerinde verilemeyecek kompleks şekillerin verilmesi amacıyla son dönemlerde yaygın bir şekilde kullanılan teknolojidir. Sıcak şekillendirme prosesi ile birlikte daha hafif, daha dayanıklı ve daha doğru geometriye sahip parçaların üretilebilmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışma için, sıcak şekillendirme prosesine uygun olan ultra yüksek dayanımlı Usibor 1500 çeliği seçilmiştir. Çalışma kapsamında, Usibor 1500 çeliğinin ostenitleme sürelerine bağlı olarak çekme özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Deney numuneleri 910 °C’da farklı sürelerde (30 saniye, 90 saniye, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika) ostenitlenmesi için bekletilmiştir. Müteakiben deney numuneleri suda su verilerek soğutulmuştur. Ardından deney numunelerinin sertlikleri ölçülmüş, mikroyapıları incelenmiş ve çekme testine tabi tutulmuştur. Sertlik ölçümleri sonucu ostenitleme süresi arttıkça sertlikte de artış görülmüştür. Başlangıçta 198 HV civarında olan Usibor 1500 çeliğinin sertliği, 5 dakika ostenitleme süresi ile birlikte 500 HV seviyesine ulaşmıştır. Çekme testi sonucunda ostenitleme süresi arttıkça mukavemette de artış görülmüştür. Çekme mukavemeti 617 MPa civarında olan Usibor 1500 çeliğinin ısı işlem sonrası çekme mukavemetinin beklenildiği gibi 1500 MPa seviyelerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultra yüksek mukavemetli çelikler, Usibor 1500, sıcak şekillendirme

2020, viii + 57 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

**INVESTIGATION OF THE TENSILE PROPERTIES OF THE USIBOR 1500 STEEL
DEPENDING ON AUSTENITIZATION TIMES**

Turan BABUROĞLU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali BAYRAM

Hot stamping process is the technology that has been widely used recently in order to give complex shapes that cannot be given to ultra high strength steels in cold forming processes. With the hot stamping process, it is possible to produce lighter, more durable and more accurate geometry parts. For this study, ultra high strength Usibor 1500 steel, which is suitable for hot stamping process, has been chosen. Within the scope of the study, changes in tensile properties of Usibor 1500 steel depending on the austenitization times were investigated. The test samples were kept at 910 °C for austenitization at different times (30 seconds, 90 seconds, 3 minutes, 5 minutes and 10 minutes). Subsequently, the test samples were cooled by giving water in water. After, the hardness of the test samples were measured, their microstructures were examined and they were subjected to tensile testing. As the waiting time increased as a result of hardness measurements, an increase in hardness was observed. The hardness of the Usibor 1500 steel, which was originally around 198 HV, reached 500 HV with a 5 minutes austenitization time. As a result of the tensile test, as the austenitization time increased, the strength increased. The tensile strength of Usibor 1500 steel, which has a tensile strength of around 617 MPa, has been observed to reach 1500 MPa levels as expected after heat treatment.

Key words: Ultra-high strength steels, Usibor 1500, hot stamping

2020, viii + 57 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının yűrűtűlmesinde destek ve yardımlarını esirgemeyen, yűksek lisans eđitimim boyunca danıőmanlıđımı yapan ve akademik anlamda geliőimime destek olan deđerli hocam Prof. Dr. Ali BAYRAM'a teőekkűrlerimi sunarım.

Projenin belirlenmesi ve hayata geçirilmesi sűrecinde bilgi ve deneyimi ile çalıőmalarımı yűnlendiren, ihtiyaç duyduđum testlerin gerçekleőtirilmesine imkân sađlayan deđerli yűneticim Dr. Recep KURT'a ve deđerli bűyűđűm Mesut YAYLAK'a teőekkűrlerimi sunarım.

Tez çalıőmam sűresince desteklerini esirgemeyen deđerli arkadaőım Vedat ARAS'a teőekkűrlerimi sunarım.

Gerek eđitim hayatım gerekse mesleki hayatım boyunca her zaman yanımda olup yűn gűsteren deđerli ađabeyim Hasan PŪSKŪL'e teőekkűrlerimi sunarım.

Sonsuz emekleri ve destekleri sayesinde bugűnlere gelmiő olduđum kıymetli aileme teőekkűrlerimi sunarım.

Turan BABUROĞLU

1.0.10.8/2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kaynak Araştırması.....	3
2.2. Sıcak Şekillendirme.....	12
2.3. Sıcak Şekillendirme Yöntemleri.....	15
2.3.1. Doğrudan Sıcak Şekillendirme.....	16
2.3.2. Geleneksel Fırında Isıtma Tekniği İle Şekillendirme.....	17
2.3.3. Elektrikle Isıtma Tekniği İle Şekillendirme.....	18
2.3.4. Dolaylı Sıcak Şekillendirme.....	18
2.4. Sıcak Şekillendirme Prosesinde Geri Yaylanma.....	20
2.5. Ultra Yüksek Dayanımlı Usibor 1500 Çeliği.....	21
2.5.1. Usibor 1500 Çeliğinin Kaplama Özellikleri.....	22
2.5.2. Borun Usibor 1500 Çeliğinin Sertleşmesine Etkisi.....	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Materyal.....	27
3.2. Yöntem.....	28
3.2.1. Numune Hazırlama İşlemleri.....	28
3.2.2. Isıl İşlem.....	29
3.2.3. Su Verme İşlemi.....	32
3.2.4. Sertlik Testleri.....	32
3.2.5. Mikroyapı İncelenmesi.....	33
3.2.6. Çekme Testleri.....	33
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	34
4.1. Mikroyapı Sonuçlarının Yorumlanması.....	34
4.2. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Yorumlanması.....	41
4.3. Çekme Testi Sonuçlarının Yorumlanması.....	43
5. SONUÇ.....	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	57

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
°C	Santigrad Derece
Ac3	Tamamen ostenite dönüşümün başladığı sıcaklık
Al	Alüminyum
B	Bor
C	Karbon
Fe	Demir
HV	Vickers Sertliği
H ₂ O	Su
HCl	Hidroklorik asit
HNO ₃	Nitrik asit
K	Kelvin
kg	Kilogram
mm	Milimetre
Mn	Mangan
MPa	Megapascal
Si	Silisyum
V	Volt
µm	Mikrometre
σ	Standart Sapma
X	Aritmetik Ortalama

Kısaltmalar	Açıklama
CCT	Continous Cooling Transformation
HS	Hot Stamping
HSS	High Strength Steel
PT	Partitioning Treatment
QT	Quenching Treatment
TTT	Time-Temperature Transformation

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2. 1. Taramalı elektron mikroskobu ile gözlemlenen ısıtma.....	3
Şekil 2. 2. 920 °C fırın sıcaklığına sahip bir oda fırınında zamana bağlı tabaka sıcaklığı	4
Şekil 2. 3. Yuvarlanma yönüne bağlı olarak Usibor 1500P, sac kalınlığı 1.75 mm	5
Şekil 2. 4. Sıcaklığın USIBOR 1500P'nin akış eğrisi özelliklerine etkisi, gerinim oranı $d\varepsilon / dt = 1 \text{ s}^{-1}$	5
Şekil 2. 5. Sıcaklığın USIBOR 1500P'nin akış eğrisi özelliklerine etkisi, gerinim oranı $d\varepsilon / dt = 0.1 \text{ s}^{-1}$	5
Şekil 2. 6. Gerinim oranının 650 °C'de USIBOR 1500P'nin akış özellikleri üzerindeki etkisi	6
Şekil 2. 7. Numuneye uygulanan termal programların bir şematik gösterimi, sıcak şekillendirme (HS), su verme işlemi (QT) ve bölümlenme işlemi (PT).....	7
Şekil 2. 8. Elektrikli ısıtma kullanarak ısıtma ve sıcak şekillendirme işlemleri	9
Şekil 2. 9. VDA238-100 standardına göre kurulan serbest bükme test düzeneği.....	11
Şekil 2. 10. (a) Ostenitleme süresine göre maksimum yük miktarı (b) Ostenitleme süresine göre maksimum yükte meydana gelen bükme açısındaki değişim	11
Şekil 2. 11. Sıcak şekillendirilmiş parçaların kullanım oranındaki artış.....	12
Şekil 2. 12. Orta sınıf bir araçta sıcak şekillendirilmiş parçalara ait örnekler	13
Şekil 2. 13. Sıcak şekillendirme işleminin şematik gösterimi	14
Şekil 2. 14. (a) Sıcak şekillendirme kalıp su verme işleminin şematik gösterimi (b) 30 °C/s kritik soğutma hızı için tam bir martensitik dönüşümünü gösteren CCT diyagramı (c) Geliştirilmiş çarpışma performansı için optimize edilmiş mikroyapılara sahip B-sütun parçası.....	14
Şekil 2. 15. İndüksiyonla ısıtma yöntemi kullanılarak ısıtılan parça örneği.....	16
Şekil 2. 16. Doğrudan sıcak şekillendirme işlemi	16
Şekil 2. 17. Sıcak şekillendirme sürecinde malzemenin sıcaklık değişimi.....	17
Şekil 2. 18. Geleneksel fırında ısıtma işlemi.....	17
Şekil 2. 19. Elektrikle ısıtma işlemi	18
Şekil 2. 20. Dolaylı sıcak şekillendirme işlemi.....	19
Şekil 2. 21. Doğrudan ve dolaylı sıcak şekillendirme süreçleri.....	19
Şekil 2. 22. Ultra yüksek dayanımlı çeliğin sıcak şekillendirme ve soğuk şekillendirme sonrası görünümü	20
Şekil 2. 23. Geri yaylanma miktarı ve bükme bölgesi sıcaklığı arasındaki ilişki	20
Şekil 2. 24. Şekillendirme işleminde (a) 750 K'dan düşük sıcaklıklarda (b) 750 K'dan yüksek sıcaklıklarda geri yaylanma miktarının azalma mekanizması	21
Şekil 2. 25. (a) 22MnB5 çeliğinin mekanik özellikleri (b) CCT diyagramı	22
Şekil 2. 26. Al-Si kaplamalı 22MnB5 çeliğinin teslimat koşulundaki kaplaması	23
Şekil 2. 27. Fırında ısıtma süresine göre faz değişimi	24
Şekil 2. 28. Bor sertleştirme faktörünün karbon yüzdesi ile değişimi	26
Şekil 3. 1. Usibor 1500 çeliğinin mikroyapısı (ferrit+perlit)	27
Şekil 3. 2. Çekme testi deney numunelerinin ölçüleri	28
Şekil 3. 3. Çekme özelliklerindeki değişimin incelenmesi için hazırlanan deney numuneleri.....	28
Şekil 3. 4. Fe-C Denge Diyagramı	29
Şekil 3. 5. Temel Benzerlik Teoremi	30

Şekil 3. 6. Usibor 1500 çeliğinin ostenitleme sıcaklığının bulunabilmesi için Fe-C Denge Diyagramı üzerinden oluşturulan üçgen.....	30
Şekil 3. 7. Deneysel çalışmalarda kullanılan Teknik Isısan Rezistans Sanayi ve Ticaret LTD. ŞTİ. tarafından temin edilen 30 kW gücündeki ısıtma işlem fırını.....	31
Şekil 3. 8. Isıtma işlem esnasında operatörün kullandığı koruyucu ekipmanlar.....	31
Şekil 3. 9. SHIMADZU AG-I model çekme cihazında numunenin test öncesi görünümü	33
Şekil 4. 1. Başlangıç malzemesine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (ferrit+perlit)	36
Şekil 4. 2. 30 saniye ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (ferrit+perlit)	37
Şekil 4. 3. 90 saniye ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (ferrit+perlit)	38
Şekil 4. 4. 3 dakika ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (ferrit+perlit)	39
Şekil 4. 5. 5 dakika ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (martensit)	40
Şekil 4. 6. 10 dakika ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (martensit)	41
Şekil 4. 7. Başlangıç malzemesine ait çekme testi sonuçları	44
Şekil 4. 8. 30 saniye ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları	45
Şekil 4. 9. 90 saniye ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları	46
Şekil 4. 10. 3 dakika ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları.....	47
Şekil 4. 11. 5 dakika ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları.....	48
Şekil 4. 12. 10 dakika ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları.....	49
Şekil 4. 13. Ostenitleme süresi ve müteakiben su verme işlemi sonucunda çekme mukavemetinin değişimi	50
Şekil 4. 14. Ostenitleme süresi ve müteakiben su verme işlemi sonucunda akma mukavemetinin değişimi	50
Şekil 4. 15. Ostenitleme süresi ve müteakiben su verme işlemi sonucunda uzama miktarının değişimi	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Faz analizleri özeti	24
Çizelge 2.2. Borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri	25
Çizelge 3.1. Usibor 1500 çeliğinin çekme özellikleri	27
Çizelge 3.2. Usibor 1500 çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	27
Çizelge 4.1. Sertlik ölçüm sonuçları	42
Çizelge 4.2. Sertlik ölçümlerinin istatistiki hesaplamaları.....	42
Çizelge 4.3. Başlangıç malzemesine ait çekme özellikleri	44
Çizelge 4.4. 30 saniye ostenitleme süresine ait çekme özellikleri	45
Çizelge 4.5. 90 saniye ostenitleme süresine ait çekme özellikleri	46
Çizelge 4.6. 3 dakika ostenitleme süresine ait çekme özellikleri.....	47
Çizelge 4.7. 5 dakika ostenitleme süresine ait çekme özellikleri.....	48
Çizelge 4.8. 10 dakika ostenitleme süresine ait çekme özellikleri.....	49

1. GİRİŞ

Önümüzdeki yıllarda otomotiv endüstrisi için en önemli unsurlardan biri, güvenlik özelliklerinin eşzamanlı olarak artmasıyla birlikte yakıt tüketimini azaltma talebini karşılamaktır. Bu talep, öncelikle daha yüksek mukavemetli ve ince kesitli malzemeler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, ultra yüksek mukavemetli çelikler, gelişmiş şekillendirme özellikleri nedeniyle otomotiv endüstrisinde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Merklein ve Lechler 2006).

Sac şekillendirme üretim teknolojileri son yıllarda hızla gelişmiştir. Günümüzde; derin çekme, artımlı sac şekillendirme ve sıcak şekillendirme sac metal şekillendirme işleminde oldukça popüler hale gelmiştir. Araç ağırlığının azaltılması ve dayanımın artırılması için sıcak şekillendirme proseslerinden faydalanılmaktadır. Sıcak şekillendirme prosesi, 1974 yılında NJA tarafından geliştirilmiş ve patentlenmiştir. Daha sonra SSAB Hardtech ile birleşen NJA bugün Gestamp Hardtech olarak bilinmektedir. Sıcak şekillendirme işleminde genellikle Usibor 1500 olarak adlandırılan Al-Si tabakasına sahip bor alaşımlı 22MnB5 çeliği kullanılır. Sıcak şekillendirilmiş Usibor 1500 çeliği otomotiv sektöründe tavan ile kaporta arasındaki bağlantıyı sağlayan A sütunu, iki kapı arasındaki B sütunu, tampon kirişleri, yan raylar, kapı kirişleri gibi ürünlerde kullanılır. Bor çeliğinin sıcak şekillendirme işleminde kullanılmasının avantajları arasında yüksek şekillendirilebilirlik, karmaşık geometrilerin oluşturulması, yüksek tokluk, kopmada yüksek uzama, şekillendirme derinliğinde malzeme özelliklerinin bağımsızlığı, iyi boyut toleransları, iyi kaynaklanabilirlik ve çarpışma uygulamaları için uygunluk sayılabilir (Güler 2013).

Yüksek mukavemetli çeliklerin (HSS) sıcak şekillendirilmesi, işlem görmemiş malzemenin sıcak ve ısınma koşullarında şekillendirme işlemini soğutulmuş kalıplar arasında pres sertleştirmesiyle birlikte tek bir adımda oluşturulan izotermal olmayan bir sac şekillendirme işlemidir. Oda sıcaklığında ferritik-perlitik mikroyapıya ve düşük mekanik özelliklere sahip olan işlem görmemiş malzeme, ostenitleme sıcaklığındaki fırında ısıtılır ve homojen bir ostenitik mikroyapının oluşumuna yol açacak kadar fırında tutulur. Malzeme daha sonra şekillendirilmek üzere prese gönderilerek su

soğutmalı kalıplar arasında kontrollü bir soğutma hızında soğutularak şekil verilir. İşlem sonunda, parça 1500 MPa'nın üzerindeki mukavemet seviyelerine sahip, tamamen martensitik bir mikro yapıya sahip olmaktadır. Avantajlarına rağmen sıcak şekillendirme işlemi, final ürününün özellikleri ve kalitesi, şekillendirme ve soğuma aşamaları esnasında gerinim, gerinim hızı yolları, sıcaklık ve mikroyapı değişimi gibi termo mekanik döngü içinde malzeme ve birçok parametreden şiddetli bir şekilde etkilenen karmaşık bir üretim sürecidir (Bariani ve ark. 2008).

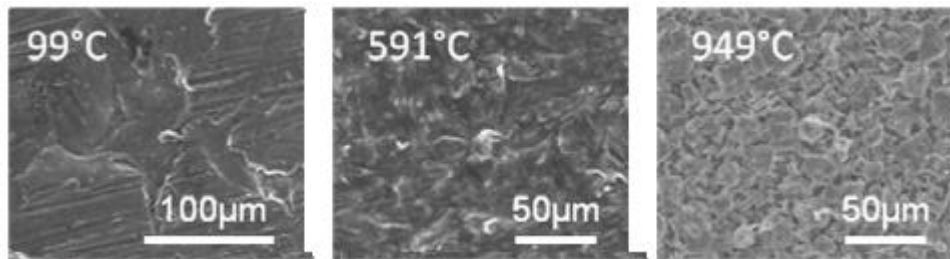
Bu tez çalışması kapsamında, Usibor 1500 çeliği sıcaklığı 910 °C'da ve değişik sürelerde ostenitlenmiş ve suda su verilerek sertleştirilmiştir. Bilahare Usibor 1500 çeliğinin çekme özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

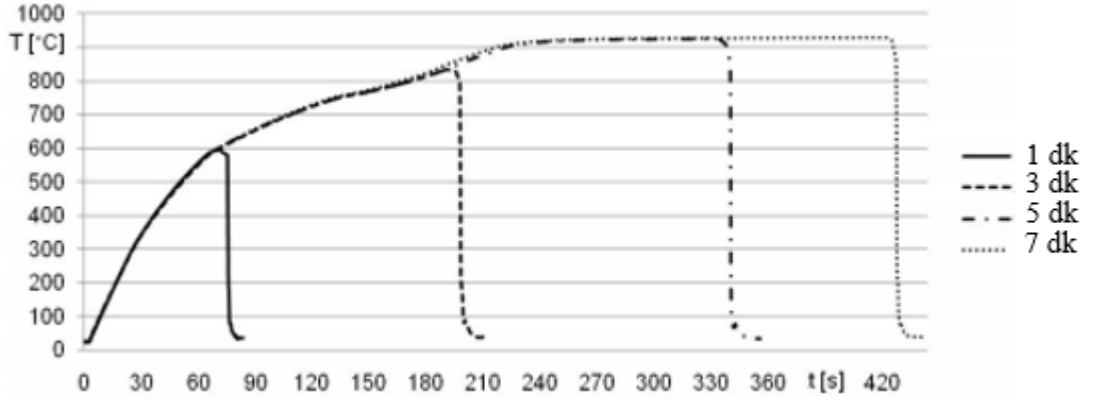
Literatürde Usibor 1500 çeliğinin sıcak şekillendirme işlemi ile ilgili çok çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Güler (2013) yaptığı çalışmada su soğutmalı prototip kalıplar kullanarak Usibor 1500 çeliğinin sıcak şekillendirme prosesini incelemiştir. Sıcak şekillendirme sonrası çekme testleri, sertlik ölçümleri ve mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ostenitik mikroyapının sıcak şekillendirme ile birlikte büyük ölçüde martensite dönüştüğünü göstermiştir. Çekme mukavemeti ve sertlik değerleri sırasıyla 1485 MPa ve 492 HV değerlerine yükselmiştir. Sıcak şekillendirilmiş parçalar soğuk şekillendirilmiş parçalardan daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir.

Veit ve ark. (2011) gerçekleştirdikleri çalışmada, Al-Si kaplı 22MnB5 numunelerinin geleneksel bir fırın ve bir indüksiyonlu ısıtma cihazı ile karşılaştırmalı ısıtma testlerinin sonuçlarını sunmuştur. Farklı zaman/sıcaklık koşulları için kaplama içindeki faz oluşumu tarif edilmiştir. Şekil 2.1'de taramalı elektron mikroskobu ile gözlemlenen ısıtma işlemi sonucu elde edilen mikroyapı görünmektedir. Fırın sıcaklığı 99 °C'ye ayarlandığında kaplamanın yüzeyi hala malzemenin teslimat koşullarına benzemektedir. Malzeme, kaplama işleminden tipik yüzey dokularını göstermektedir. Fırın sıcaklığı 591 °C'ye ayarlandığında bu dokular kaybolmakta, çünkü kaplama sıvı faza geçerek bir faz dönüşümü göstermiştir. Fırın sıcaklığı 949 °C'ye ayarlandığında ise kaplama, tamamen yeni bir tane yapısı ile yeniden katılaşmıştır.



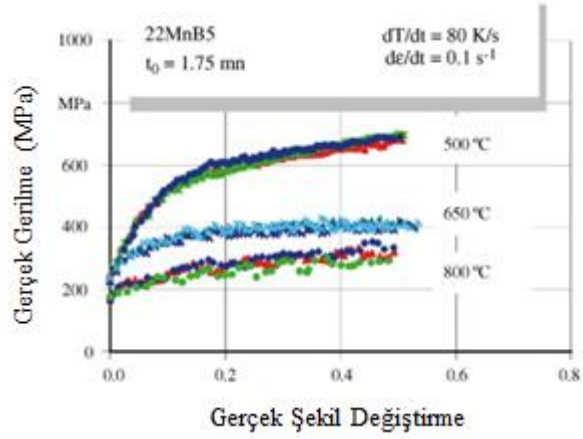
Şekil 2.1. Taramalı elektron mikroskobu ile gözlemlenen ısıtma (Veit ve ark. 2011)

Kaplamanın ısıtma süresine bağlı olarak çökmesini araştırmak için, Thyssen Krupp Steel Europe'un (MBW 1500 AS) Al-Si kaplı 22MnB5 numuneleri, elektrikle ısıtılmış bir oda fırınına yerleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı 920 ° C'ye ayarlanmış, tabakaların sıcaklığı kaynak tipi-n termokupllarla ölçülmüştür. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi fırında tutma süresi 1 ile 7 dakika arasında değişmiş ve daha sonra suda sertleştirilen levhalar arasında tabakalar oluşturulmuştur.

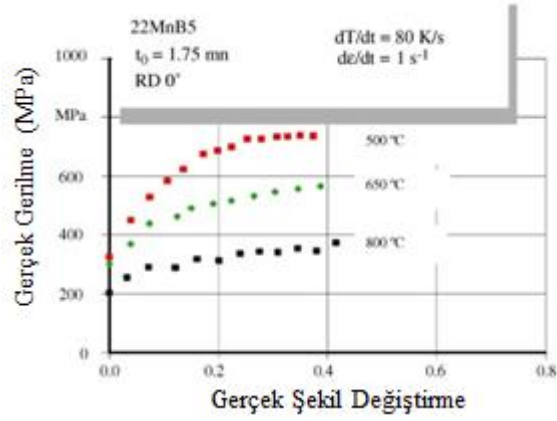


Şekil 2.2. 920 °C fırın sıcaklığına sahip bir oda fırınında zamana bağlı tabaka sıcaklığı (Veit ve ark. 2011)

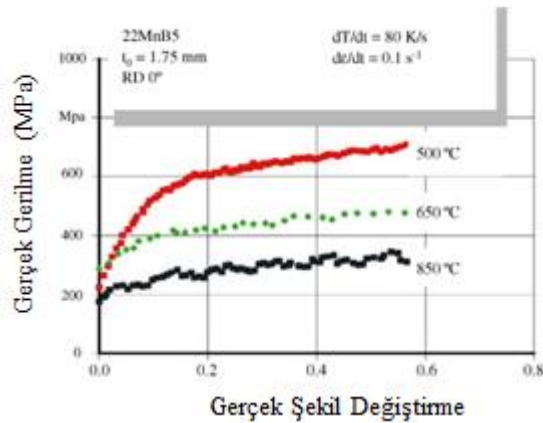
Sıcak şekillendirme çeliklerinin termo-mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla Merklein ve Lechler (2006), 22MnB5 çeliğinin ostenitik durumda akış davranışı, sıcak şekillendirme işleminin zaman-sıcaklık karakteristiğine bağlı olarak Gleeble 1500 sistemi ile iletken, sıcak çekme testleri ile incelenmiştir. Sıcaklığın artırılması, akış gerilme değerlerinin ve başlangıç gerilme sertleşmesinin eğiminin önemli ölçüde azalmasına yol açmıştır. Malzemenin şekil verme oranına ilişkin şekillendirme özelliklerinin hassasiyeti için, deformasyon oranındaki bir artış, stres seviyelerinde ve gerilme sertleşmesinde önemli bir artışa yol açmıştır. Sıcaklığın ostenitik durumda akış özelliklerine etkisi Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te; gerinim oranının ostenitik durumda akış özelliklerine etkisi Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



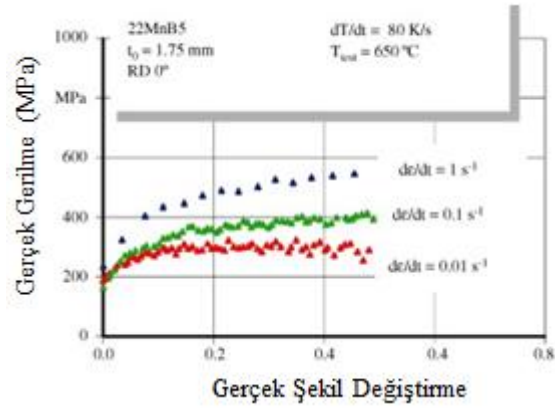
Şekil 2.3. Yuvarlanma yönüne bağlı olarak Usibor 1500P, sac kalınlığı 1.75 mm (Merklein ve Lechler 2006)



Şekil 2.4. Sıcaklığın USIBOR 1500P'nin akış eğrisi özelliklerine etkisi, gerinim oranı $de/dt = 1 \text{ s}^{-1}$ (Merklein ve Lechler 2006)



Şekil 2.5. Sıcaklığın USIBOR 1500P'nin akış eğrisi özelliklerine etkisi, gerinim oranı $de/dt = 0.1 \text{ s}^{-1}$ (Merklein ve Lechler 2006)



Şekil 2.6. Gerinim oranının 650 °C'de USIBOR 1500P'nin akış özellikleri üzerindeki etkisi (Merklein ve Lechler 2006)

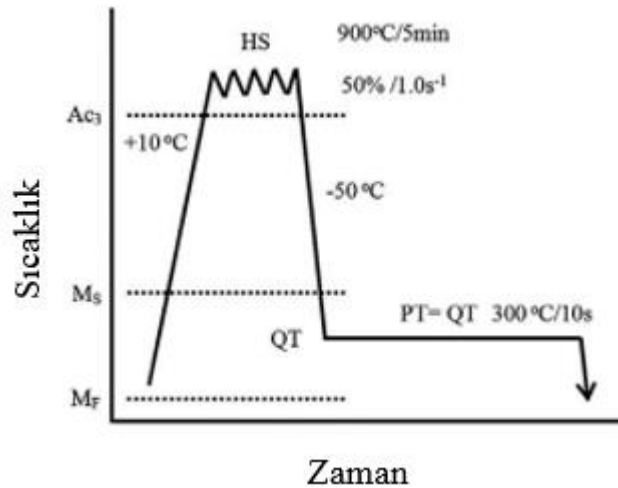
Merklein ve ark. (2006) yaptıkları başka bir çalışmada, su verilebilir ultra yüksek mukavemetli 22MnB5 çeliğinin akış özelliklerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sıcak şekillendirme prosesini etkileyen parametrelere göre 22MnB5 çeliğinin termo-mekanik özelliklerini belirlemek için değiştirilmiş bir deneysel kurulum sunulmuştur. Elde edilen akış eğrilerinin sonuçları, sıcaklık, gerinim oranı ve soğutma oranının, ostenitik durumda yüksek sıcaklıklarda malzemenin şekillendirme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Kurumahmut (2009) yaptığı çalışmada, alüminyum-silisyum kaplamalı 22MnB5 çelik sac levha üzerinde şekillendirilebilirlik özelliklerinin geliştirilebilmesi için elektrikli ısıtma yöntemi, özel bir test düzeneği tasarlanıp kurularak uygulanmıştır. Sıcak şekillendirme sonrası, başlangıçta ferrit-perlit mikroyapısına sahip 22MnB5 sacı süneklik ve darbe dayanımındaki düşüğe karşılık gerek sertlik gerekse dayanımdaki güçlü artışla tama yakın martensit veya martensit-beynit karma yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir. Sıcak şekillendirme sırasında malzemenin şekillendirilebilirliği önemli ölçüde arttığı; geri yaylanmanın yok denecek kadar düşük olduğu görülmüştür. Gerçekleşen çalışma sonunda çok hızlı bir ısınma gerçekleşmesine rağmen elektrikli ısıtma ile geleneksel fırında ısıtma arasında belirgin bir farkın ortaya çıkmadığı belirtilmiştir.

El-Shennawy ve ark. (2016) gerçekleştirdikleri çalışmada, düşük karbonlu çeliğin metalurjik ve mekanik özelliklerine farklı bor içeriğinin etkisini bulmayı amaçlamıştır. Çalışma sonunda borun, tabaka kalınlığı ve dağılımı gibi mikroyapı ve ferrit-perlit özelliklerinin yoğun bir şekilde oluşmasında güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Güler ve ark. (2012), ısıtım işlem parametrelerinin bor alaşımlı çeliklerin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini inceleme adına bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda ısıtım işlem 700 °C ile 950 °C aralığında gerçekleştirilmiş; suda ve havada olmak üzere iki farklı soğutma tekniği uygulanmıştır. Çalışma sonunda, sıcaklığın artmasıyla; martensit oranının, sertliğin ve çekme mukavemetinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, 900 °C'ye ulaşıldıktan sonra su verme işleminin 22MnB5 çeliğinin sıcak şekillendirme süreci için ideal olduğu belirlenmiştir.

Liu ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada, kimyasal bileşimi %0.22 C, %1.58 Mn, %0.81 Si, %0.022 Ti, %0.0064 P, %0.0014 S ve %0.0024 B şeklinde olan malzeme kullanarak sıcak şekillendirme, su verme ve bölümlenme işlemlerinden martensitik mikroyapısal dönüşümleri incelemiştir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi numuneler 10 °C/s oranında 900 °C ostenitleme sıcaklığına ısıtılmış ve 5 dakika bekletilmiş ve 50 °C/s oranında 300 °C'lik bir sertleştirme sıcaklığında soğutulmuştur.



Şekil 2.7. Numuneye uygulanan termal programların bir şematik gösterimi, sıcak şekillendirme (HS), su verme işlemi (QT) ve bölümlenme işlemi (PT) (Liu ve ark. 2011)

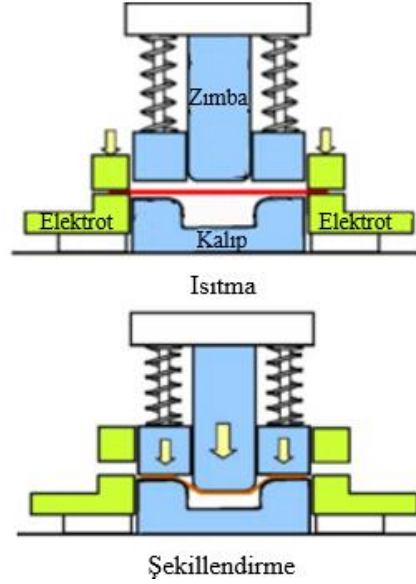
Çalışmada, sıcak şekillendirmenin ince taneli ostenit; su verme ve bölümlenme işlemlerinin tutulan ostenitte iğnemsiz martensitten oluşan iki fazlı bir mikroyapı ürettiği görülmüştür. Bu işlemle üretilen martensit plakalarının parçalı ve tırtıklı kenarlara sahip olduğu ve bunun nedeninin ostenit fazının artan mukavemetinin ve martensit plakalarının büyümesini sınırlayan tane sınırlarında barındırılan yüksek dislokasyon yoğunluğunun sonucu olduğu saptanmıştır.

So ve ark. (2012), sıcak şekillendirme işlemi öncesi ve sonrası su verilebilir bor alaşımli 22MnB5 çeliğinin kesme prosesini incelemiştir. Bu kapsamda takım ömrünü artıracak ekonomik kesme yöntemleri geliştirmeyi amaçlamıştır. Sertleştirilmiş bor çeliği 22MnB5'in kesme stratejilerine yönelik bir ön araştırma olarak, parçaların kesilmiş kenarlarını ve kesme aletlerinin kesme vuruşlarının aşınma evrimini tahmin etmek için geleneksel mekanik kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kesme yükünü azaltarak takım ömrünü uzatmak için sıcak şekillendirme işlemi eşzamanlı olarak uygulanırken, gelişmiş bir aletle sıcak kesme işlemi gerçekleştirilmiştir.

George ve ark. (2012), ısıtılmış ve soğutulmuş takımlar kullanarak ArcelorMittal tarafından üretilen Usibor 1500P çeliklerinin sıcak şekillendirilmesi üzerine araçlarda iki kapı arasında bulunan B-sütun parçası ile ilgili çalışma gerçekleştirmiştir. Beynit oluşumunu sağlamak için 400 °C'ye kadar ısıtılmış kalıp kullanılmış ve 30 °C/s kritik soğuma hızının altında soğuma gerçekleştirilmiştir. Soğutulmuş ve ısıtılmış bölgelerden sırasıyla 488 HV ve 234 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Sertlikte %52'lik bir azalma görülmüştür. 4s ve 10s'lik iki soğutma süresi incelenmiş ve daha kısa soğutma sürelerinin daha yumuşak mikroyapılara neden olduğu gözlenmiştir. Soğutulmuş fazların yüzde alan oranları ölçülmüş ve sonuçlar, çeşitli ısıtılmış kalıp sıcaklığı koşulları için martensit, beynit ve ferritin oluştuğunu göstermiştir.

Mori ve ark. (2005), elektrikli ısıtma yöntemini kullanarak ultra yüksek mukavemetli çeliklerin (SPFC440, 590Y, 780Y ve 980Y) ısınma ve sıcak şekillendirmesini incelemiştir (Şekil 2.8). Çalışmada aynı zamanda ultra yüksek mukavemetli çelik levhaların geri yaylanma ve şekillendirilebilirliği üzerine ısıtma sıcaklığının etkileri incelenmiştir. Elektrikli ısıtma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen ısınma ve sıcak

şekillendirme işleminin, ultra yüksek mukavemetli çelik levhaların şekillendirilmesi için cazip bir yöntem olduğu ve bu çeliklerin geri yaylanma, şekillendirilebilme ve sertlik özelliklerinin ısıtma ile birlikte iyileştirildiği gözlenmiştir. Hızlı elektrikli ısıtmanın sıcaklıktaki azalmayı ve oksidasyonu önlemede etkili olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.8. Elektrikli ısıtma kullanarak ısıtma ve sıcak şekillendirme işlemleri (Mori ve ark. 2005)

Karbasian ve Tekkaya (2010), 22MnB5 çeliği üzerinde sıcak şekillendirmenin termal, mekanik, mikroyapısal ve teknolojik olarak en gelişmiş alanlarını gözden geçirmiştir. Çalışma, şekillendirme prosedürü geçmişleri hakkında bir fikir vermeyi amaçlamış ve sıcak sac şekillendirme alanında daha fazla araştırma ve yenilik için büyük bir potansiyel göstermiştir. Çalışmada, fırında kalma süresinin azalmasının ancak iletken ve endüktif ısıtma gibi daha hızlı ısıtma şekilleriyle sağlanabileceği bu nedenle alternatif ısıtma sistemlerinin (iletim ve indüksiyonla ısıtma) gelecek için büyük bir potansiyel sergilediği sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda ostenitik durumda 22MnB5'in akış davranışının gerçekçi bir modellemesinin malzemenin mekanik, termal ve mikroyapı alanları arasındaki etkileşimi göz önünde bulundurularak mümkün olduğu ve bunun ancak ısı transfer katsayısı, malzeme akış davranışı ve proses ile ilgili koşullar altında faz dönüşümü gibi proses özellikleri ile elde edilebileceği tespit edilmiştir.

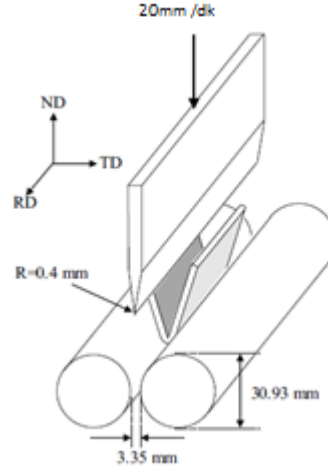
Akbaş (2011) yaptığı çalışmada, 22MnB5 eliğinin sıcak şekillendirme parametrelerini inceleme amacıyla farklı sıcaklık değerlerinde suda ve havada soğutma gerçekleştirmiştir. Sıcaklığın değişmesine bağlı olarak malzeme içyapısındaki değişimlerden dolayı farklı mukavemet değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu kapsamda ideal mukavemet ve uzama değerlerinin suda soğutma için 950 C'de 1506 MPa ve % 5 uzama; havada soğutma için 950 C'de 735 MPa ve % 4 uzama olduğu saptanmıştır.

Zhang ve ark. (2019), ultra yüksek mukavemetli Usibor 1500 eliğinin sıcak şekillendirilmesi işlemi sırasındaki faz dönüşümleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yüksek mukavemetli elik fazın başlangıç faz dönüşüm sıcaklığı hesaplanmış ve ferrit, perlit ve beynit dönüşüm kinetik eğrileri ve TTT (time-temperature transformation) eğrileri çizilmiştir. Eğrilerin analizi, son parçanın martensit içeriğini sağlamak için, su verme işlemindeki soğutma oranının 27 C/s'nin üzerinde tutulması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca, son su verme işleminin sonunda geliştirilmiş martensit içeriğinin sağlanması için, levhanın başlangıç sıcaklığı için en iyi seçimin 850 C olduğu görülmüştür.

Zhang ve ark. (2019a) yaptıkları başka bir çalışmada, ultra yüksek mukavemetli Usibor 1500 eliğinin yüksek sıcaklıklardaki akış gerilme eğrileri, gerçekleştirilen çekme testleri ile elde edilmiştir. Malzemenin yüksek sıcaklık deformasyonunun yapısal bir modeli, sırasıyla bir ve iki aşamalı sıcak şekillendirme işlemleri için 300-600 C ve 500-800 C'de kurulmuştur. Kurulan yapısal denklemin temelinde, bir ve iki aşamalı sıcak şekillendirme yöntemleri simüle edilmiş ve en iyi süreç belirlenmiştir. Çalışma sonunda, basit şekil ve yapıya sahip parçaların tek aşamalı sıcak şekillendirme teknolojisine; karmaşık parçaların ise iki aşamalı sıcak şekillendirme teknolojisine uygun olduğu belirlenmiştir.

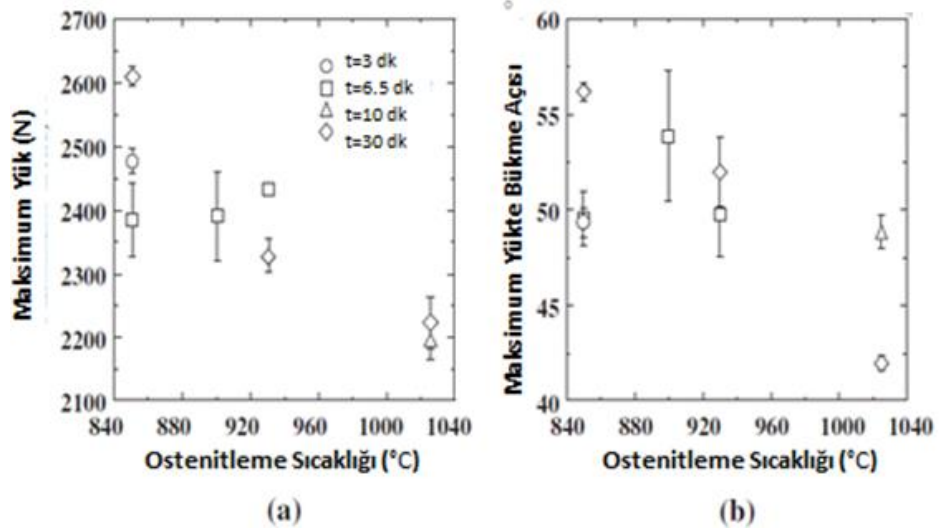
Golem ve ark. (2019) gerçekleştirdikleri çalışmada, ostenitleme parametrelerinin Al-Si kaplı sertleştirilmiş ultra yüksek dayanımlı 22MnB5 eliğinin mikro yapısı ve mekanik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. şekil 2.9'daki VDA238-100 standardına göre

kurulan serbest bükme test düzeneğini kullanarak mekanik özelliklerdeki değişim incelenmiştir



Şekil 2.9. VDA238-100 standardına göre kurulan serbest bükme test düzeneği (Golem ve ark. 2019)

Serbest bükme testi sonucunda 850 °C’de ostenitlenmiş numuneler için tutma süresinin bükülme açısı üzerinde gözle görülür bir etki yarattığı tespit edilmiştir. Kısa tutma sürelerindeki bükülme açısının daha uzun tutma sürelerindeki bükülme açısına kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

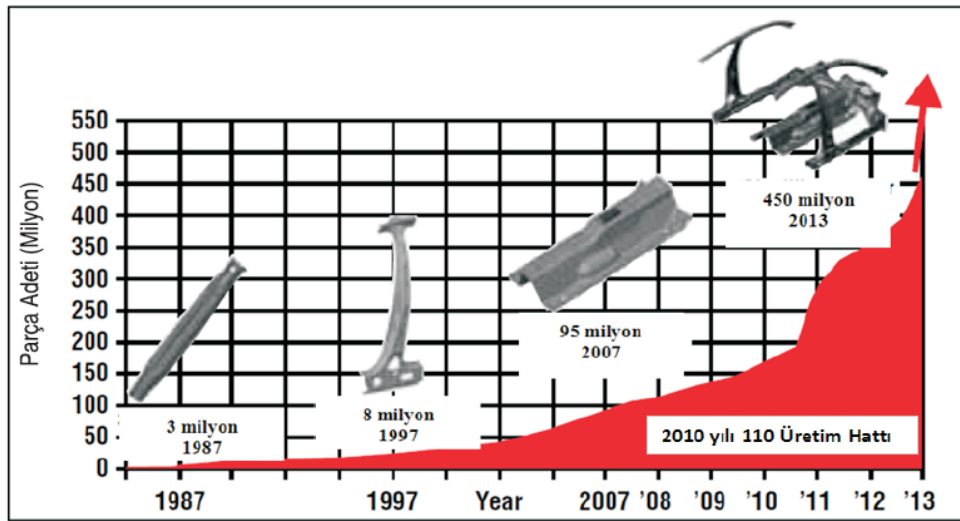


Şekil 2.10. (a) Ostenitleme süresine göre maksimum yük miktarı (b) Ostenitleme süresine göre maksimum yükte meydana gelen bükme açısındaki değişim (Golem ve ark. 2019)

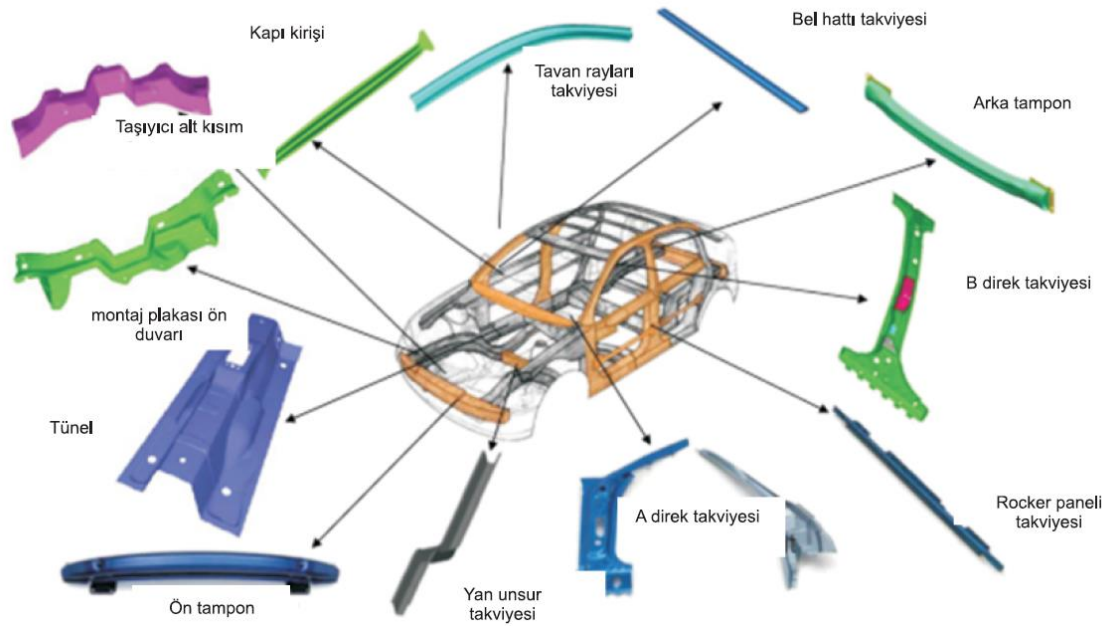
2.2. Sıcak Şekillendirme

Araçların çevreyle olan zararlı etkileşiminin azaltılması, güvenlik unsurlarının artırılması, araç parçalarının daha ucuz, daha hafif ve daha kolay üretilibilmeleri, son yıllarda otomotiv endüstrisinin ana hedefleri arasında yerini almıştır. Otomobillerden beklenen konfor ve güvenlik unsurları araç ağırlıklarının artmasına neden olmaktadır. Bu durum yakıt tüketimi ve egzoz emisyonların artmasına, bununla birlikte çevre kirliliğinin de artmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı otomotiv endüstrisinde yeni üretim teknikleri, yeni malzemeler ve yeni kavramlar geliştirilmektedir. Sıcak şekillendirme teknolojisi, parçaların yüksek mukavemetli ve hafif olarak üretilmesi için günümüzde yaygın olarak kullanılan üretim yöntemleri arasında yerini almıştır (Güler 2015).

Sıcak şekillendirme işlemi, ultra yüksek dayanımlı karmaşık yapıları geometrilerin üretilmesinde kullanılan bir şekillendirme yöntemidir. 1975 yılında İsveç'te faaliyet gösteren HardTech firması tarafından ziraat ve tarım ekipmanları üretimi için geliştirilen sıcak şekillendirme yöntemi daha sonra 1980 yılında SSAB, Jaguar ve Rover firmalarıyla anlaşma sağlayarak otomotiv endüstrisinde kendisine yer bulmuştur (Önal 2012). Sıcak şekillendirme teknolojisi kullanılarak üretilen parçaların kullanım oranındaki artış Şekil 2.11'de; sıcak şekillendirilmiş parçalara ait örnekler Şekil 2.12'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Sıcak şekillendirilmiş parçaların kullanım oranındaki artış (Önal 2012)



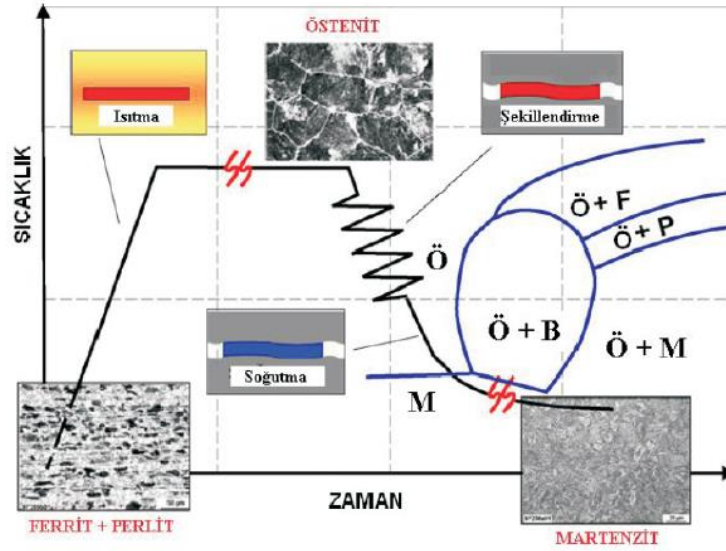
Şekil 2.12. Orta sınıf bir araçta sıcak şekillendirilmiş parçalara ait örnekler (Yao ve ark. 2013)

Sıcak şekillendirme, özellikle hafif çelik araba gövde parçalarının üretiminde giderek daha popüler hale gelen nispeten yeni bir süreçtir. Son martensitik mikroyapı sayesinde, HSS'nin yüksek sıcaklıklarda sergilediği azaltılmış geri yaylanma ve yeterli şekillendirilebilirlik, daha ince ve daha karmaşık sac parçalar, yüksek veya çok yüksek mukavemet-kütle oranı ve yüksek geometrik doğruluk ile üretilebilir (Bariani ve ark. 2008).

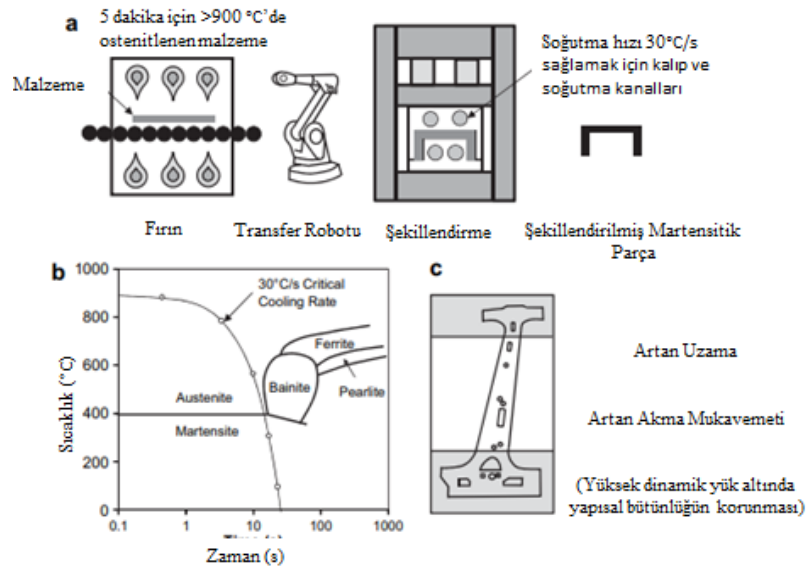
Sıcak şekillendirme işleminde, soğuk şekillendirme işlemi esnasında meydana gelen kalıntı gerilmeler oluşmamakta ve daha doğru geometride parçalar üretilebilmektedir. Aynı zamanda soğuk şekillendirme işleminde elde edilemeyen kompleks geometriler sıcak şekillendirme işlemi ile elde edilebilmektedir. Dolayısıyla sıcak şekillendirme işlemi, parça tasarımlarında farklı tasarımların ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır (Ece ve Öztürk 2010).

Sıcak şekillendirme işlemi, ostenitleme ile eş zamanlı olarak şekillendirme ve su verme aşamalarından oluşan bir şekillendirme yöntemidir. Bu yöntemle, malzeme 900 °C'den yüksek bir sıcaklıkta 5 dakika süre ile ostenitlenir ve daha sonra 30 °C/s'den büyük

soğutma hızına sahip olan kalıplara yönlendirilir. Soğutma hızının 30 °C/s'den daha düşük olması durumunda istenmeyen beyrit, ferrit ve perlit gibi yapılar elde edilir (Önal 2012). Sıcak şekillendirme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te görülmektedir.



Şekil 2.13. Sıcak şekillendirme işleminin şematik gösterimi (Önal 2012)



Şekil 2.14. (a) Sıcak şekillendirme kalıp su verme işleminin şematik gösterimi (b) 30 °C/s kritik soğutma hızı için tam bir martensitik dönüşümünü gösteren CCT diyagramı (c) Geliştirilmiş çarpışma performansı için optimize edilmiş mikroyapılara sahip B-sütun parçası (Bardelcik ve ark. 2010)

Geleneksel sac şekillendirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, sıcak şekillendirme işlemi sürecinin uygun tasarımı, mikroyapı ve mukavemet özellikleri açısından nihai ürünlerin istenen özelliklerini elde etmek için yüksek sıcaklıklarda hem arayüz olayları hem de malzeme davranışı hakkında derin bilgi gerektirir (Turetta ve ark. 2006).

2.3. Sıcak Şekillendirme Yöntemleri

Sıcak şekillendirme işleminde birçok ısıtma yöntemi kullanılmaktadır. Doğrudan ve dolaylı olmak üzere 2 farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Doğrudan sıcak şekillendirme işlemi geleneksel fırında ısıtma ve elektrikle ısıtma olmak üzere iki farklı yolla gerçekleşmektedir. Dolaylı sıcak şekillendirme işleminde ise bir ön soğuk şekillendirme işlemi gerçekleşmektedir (Güler 2013).

Geleneksel sıcak şekillendirme işleminde, düz veya dairesel üretim hattında parça döngüsüne sahip fırınlar kullanılmaktadır. Malzeme radyasyon ve konveksiyon yoluyla ısıtılmaktadır. Fırın içerisinde ostenitleme sıcaklığına kadar ısıtılan ve belli bir süre bekletilen parçalar eşzamanlı şekillendirme ve soğutma işlemleri için kalıplara transfer edilmektedir.

İletimle ısıtma işlemi daha çok boru, rod, tel ve bant gibi ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Isınan malzeme bir güç kaynağı serisine bağlanmaktadır. Malzemenin elektrik direncinden dolayı ısı, güç kaybıyla orantılı olarak oluşmaktadır (Önal 2012).

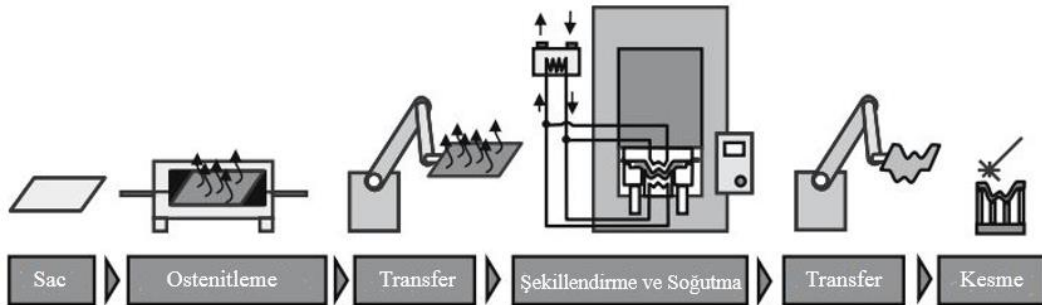
İndüksiyonla ısıtma işleminde, ısıtma esnasında malzemeye doğrudan temas gerçekleşmemektedir. Literatür araştırmaları yöntemin daha çok Şekil 2.15'te görüldüğü gibi parçayı ısıtmak için kullanıldığını göstermiştir (Ece ve Öztürk 2010).



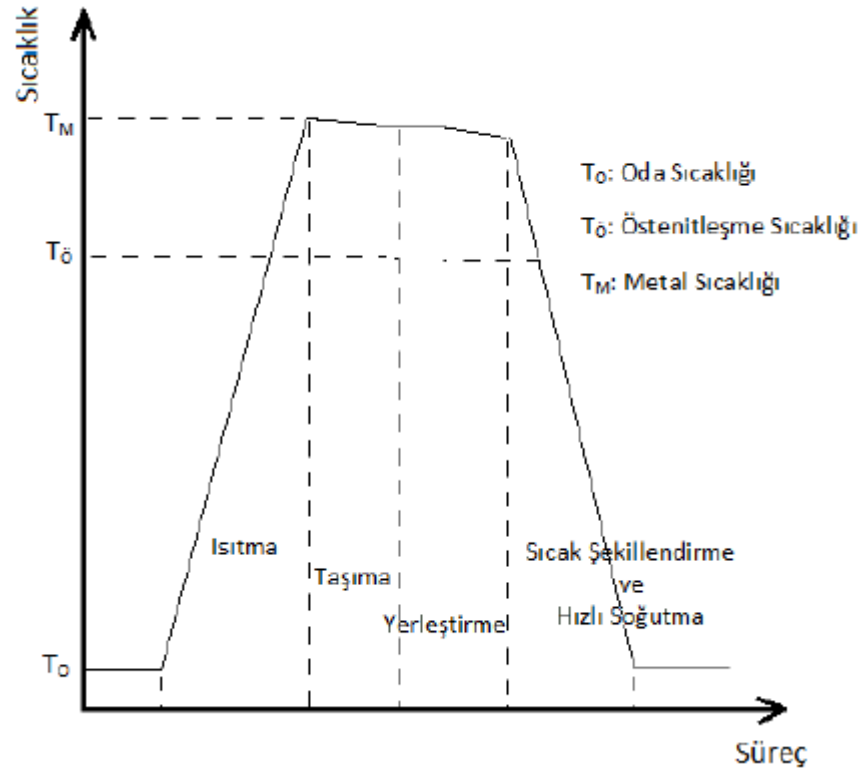
Şekil 2.15. İndüksiyonla ısıtma yöntemi kullanılarak ısıtılan parça örneği (Ece ve Öztürk 2010)

2.3.1. Doğrudan Sıcak Şekillendirme

Basit şekiller için uygun olan doğrudan sıcak şekillendirme işleminde genellikle kaplanmış bir bor alaşımli çelik kullanılır. İşlem süresinin analizi, gerekli östenitleme (3-5 dakika) ve transfer fazının (5-10 s) ele alınmasının yanı sıra, soğutma fazı (15-25 s) için önemli bir sürenin gerekli olduğunu göstermektedir (Steinbeiss ve ark. 2007). Doğrudan şekillendirme işlemi, malzemenin 4-10 dakika süreyle östenitleme sıcaklığının üzerinde yaklaşık 900-950 °C sıcaklıkta bekledikten sonra eşzamanlı olarak şekillendirilmesi ve 20-30 °C/s soğutma hızıyla soğutulması işlemidir. İşlem sonrası nihai ürünün çekme mukavemeti 1400-1600 Mpa ve akma mukavemeti 1000-1200 Mpa seviyelerine çıkmaktadır (Güler 2013a). Doğrudan sıcak şekillendirme işlemi şematik olarak Şekil 2.16’da ve sıcak şekillendirme sürecinde malzemenin sıcaklık değişimi Şekil 2.17’de görülmektedir.



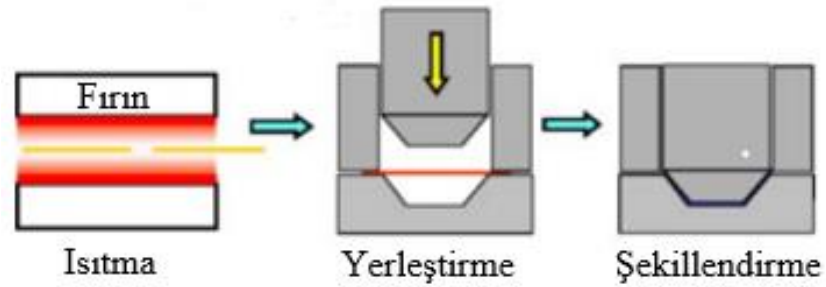
Şekil 2.16. Doğrudan sıcak şekillendirme işlemi (Steinbeiss ve ark. 2007)



Şekil 2.17. Sıcak şekillendirme sürecinde malzemenin sıcaklık değişimi (Güler 2015)

2.3.2. Geleneksel Fırında Isıtma Tekniği İle Şekillendirme

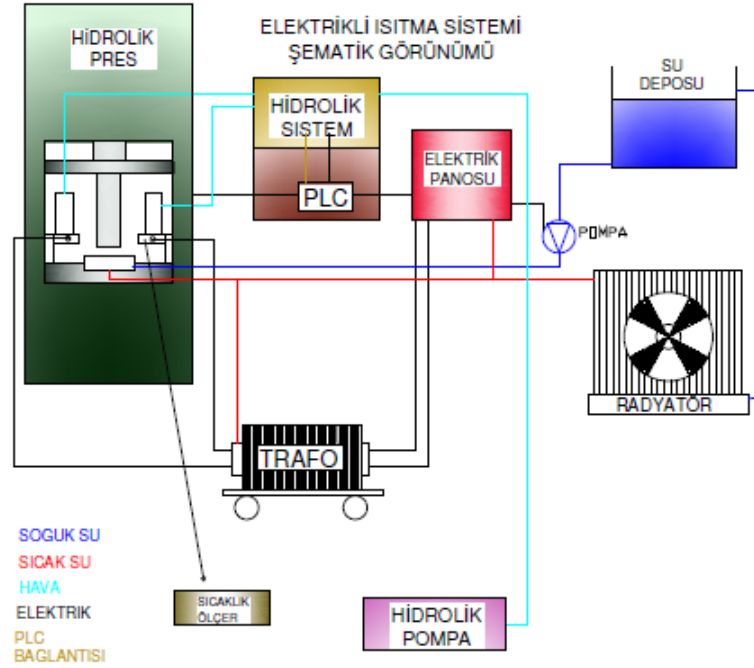
Geleneksel fırında ısıtma tekniği ile şekillendirme, bor alaşımli ultra yüksek dayanımlı çeliğin ostenitleme sıcaklığının (900-950 °C) üzerine çıkarılarak ısıtılması ve ardından şekillendirilip soğutulması işlemidir (Şekil 2.18). Fırın ile kalıplar arasındaki transfer esnasında sıcaklıkta 100 °C'lik hızlı düşüşler görülebilmektedir. Ayrıca bu transfer sırasında malzeme oksidasyona uğrayabilmektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için malzemenin yüksek sıcaklıklarda ısıtılması gerekmektedir (Mori ve ark. 2005).



Şekil 2.18. Geleneksel fırında ısıtma işlemi (Mori ve ark. 2005)

2.3.3. Elektrikle Isıtma Tekniği İle Şekillendirme

Elektrik akımı ile ısıtma yöntemi, malzeme üzerinden elektrik akımının geçirilmesi ile birlikte malzemenin elektrik öz direncine bağlı olarak kısa sürede ısınması işlemidir (Şekil 2.19). Elektrikle ısıtma işleminde gereken yüksek akımı sağlamak için güçlü bir trafo kullanılmaktadır. İşlem süresince, malzemeyi sisteme bağlamak ve malzemenin elektrik akımıyla ısınmasını sağlamak için yüksek elektrik iletkenliğinden dolayı bakır malzemelerden yapılan çeneler kullanılmaktadır. Bir hidrolik/pnömatik sistem ile bu çeneler kontrol edilmektedir. Trafodan okunan akım değeri ve sistemin sıcaklık kontrolünün PLC kontrol ünitesi ile hassas bir şekilde kontrolü sağlanmaktadır (Ece ve Öztürk 2010).

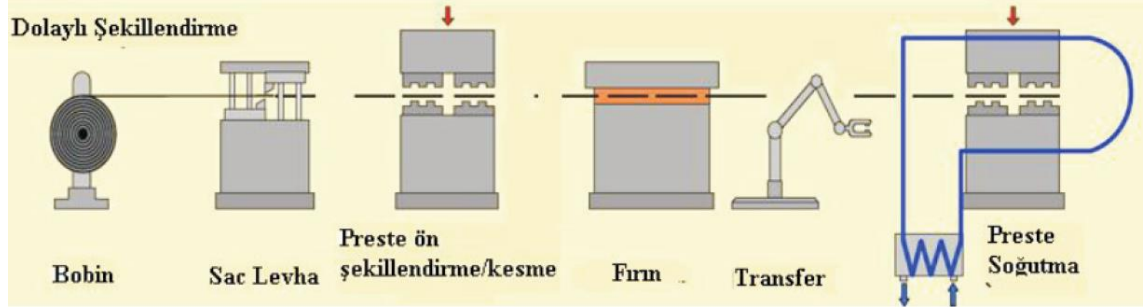


Şekil 2.19. Elektrikle ısıtma işlemi (Ece ve Öztürk 2010)

2.3.4. Dolaylı Sıcak Şekillendirme

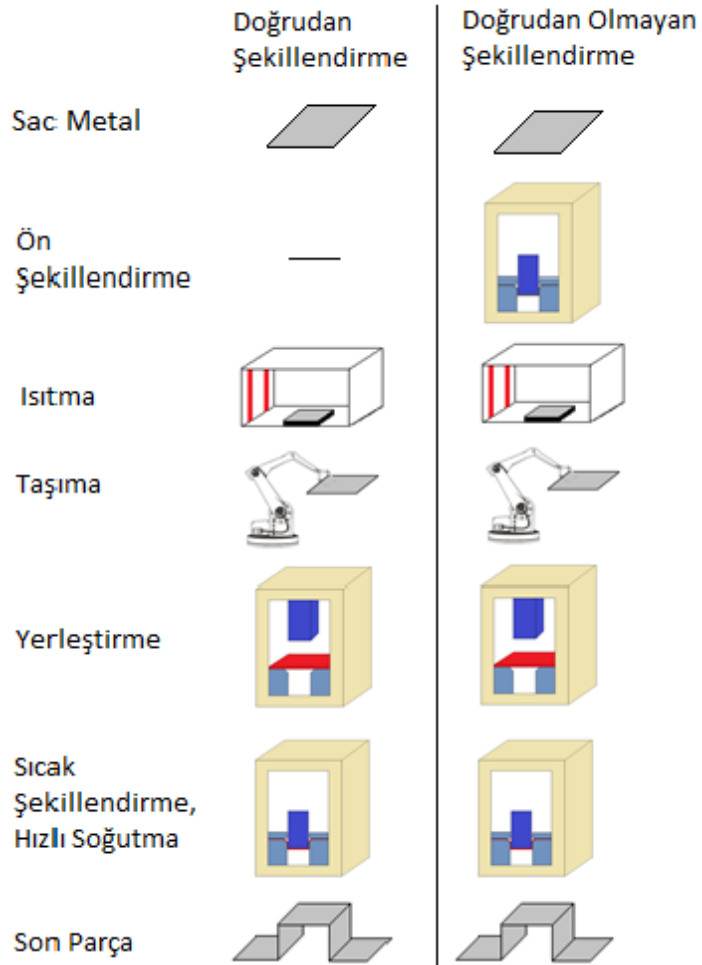
Dolaylı sıcak şekillendirme işleminde, ısıtma işleminden önce malzeme bir kalıp ile şekillendirileceği formun %90-95'ine kadar şekillendirilip daha sonra doğrudan sıcak şekillendirmedeki aşamalar gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.20). İlk şekillendirme işleminin amacı kompleks parçalar için şekillendirilebilirliği artırmaktır (Güler 2015).

Bu yöntem ekstra kalıp ve pres maliyetleri oluşturduğu için yalnızca özel projelerde kullanılmaktadır (Önal 2012).



Şekil 2.20. Dolaylı sıcak şekillendirme işlemi (Önal 2012)

Özetlenecek olursa doğrudan ve dolaylı sıcak şekillendirme işlemlerindeki süreçlerin kıyaslanması Şekil 2.21’de görülmektedir.



Şekil 2.21. Doğrudan ve dolaylı sıcak şekillendirme süreçleri (Güler 2015)

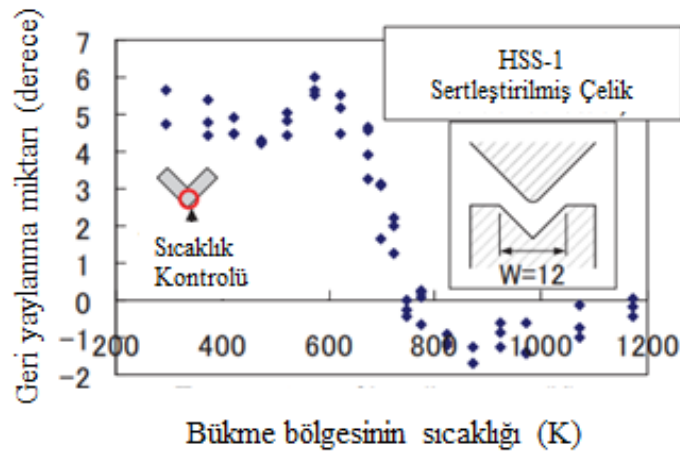
2.4. Sıcak Şekillendirme Prosesinde Geri Yaylanma

Ultra yüksek dayanımlı çeliklerin soğuk şekillendirme işlemleri sırasında, yüksek mukavemet oranı nedeniyle geri yaylanma problemleri görülmektedir. Bu durum ultra yüksek dayanımlı çeliklerin kullanılmasını sınırlandırmaktadır. Sıcak şekillendirme teknolojisi, geri yaylanma ve şekillendirme problemlerini ortadan kaldıran, mukavemet değerlerinin 1500 MPa seviyelerine çıkmasını sağlayan alternatif bir şekillendirme yöntemi olarak günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu ve ark. 2011a).

Şekil 2.22’de ultra yüksek mukavemetli bir çeliğin sıcak şekillendirilmiş ve soğuk şekillendirilmiş halindeki geometrisi görülmektedir. Soğuk şekillendirmede elde edilemeyen doğru geometri, sıcak şekillendirmede elde edilmiştir.



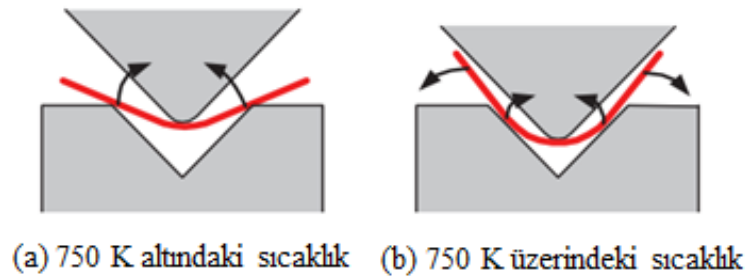
Şekil 2.22. Ultra yüksek dayanımlı çeliğin sıcak şekillendirme ve soğuk şekillendirme sonrası görünümü (Yao ve ark. 2013)



Şekil 2.23. Geri yaylanma miktarı ve bükme bölgesi sıcaklığı arasındaki ilişki (Yanagitomo ve Oyamada 2007)

Yüksek mukavemetli çeliklerin sıcak şekillendirme işlemlerinde, Şekil 2.23'te görüldüğü gibi plastik olarak deforme olan (bükme) bölgenin sıcaklığı 750 K'den yüksek olduğunda geri yaylanma miktarı azalmaktadır (Yanagitomo ve Oyamada 2007).

Yanagitomo ve Oyamada (2007) gerçekleştirdikleri çalışmada, sıcak çelik sac şekillendirme işleminde 750 K'dan daha yüksek sıcaklıklarda geri yaylanma miktarının ciddi miktarda azaldığını gözlemlemiştir (Şekil 2.24).



Şekil 2.24. Şekillendirme işleminde (a) 750 K'dan düşük sıcaklıklarda (b) 750 K'dan yüksek sıcaklıklarda geri yaylanma miktarının azalma mekanizması (Yanagitomo ve Oyamada 2007)

Liu ve ark. (2011a) tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek sıcaklıkta azalan malzeme mukavemeti nedeniyle şekillendirme başlangıç sıcaklığının 700 °C'den 950 °C'ye artırılmasıyla geri yaylanma miktarının büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Geri yaylanma miktarının azaltılması yan duvar ve zımba köşe bölgelerinde belirgindir. Bununla birlikte, yan duvar bölgesinin yakınlarında artan bükülmeme etkisi nedeniyle kalıp köşesindeki geri yaylanma göz ardı edilebilir. Çalışma sonunda, sıcak sac metal şekillendirme tekniğindeki yüksek sıcaklığın boyutsal doğruluğun yanı sıra 22MnB5 kalite bor çelik sacların şekillendirilebilirliğinin iyileştirilmesini sağladığı sonucuna varılmıştır.

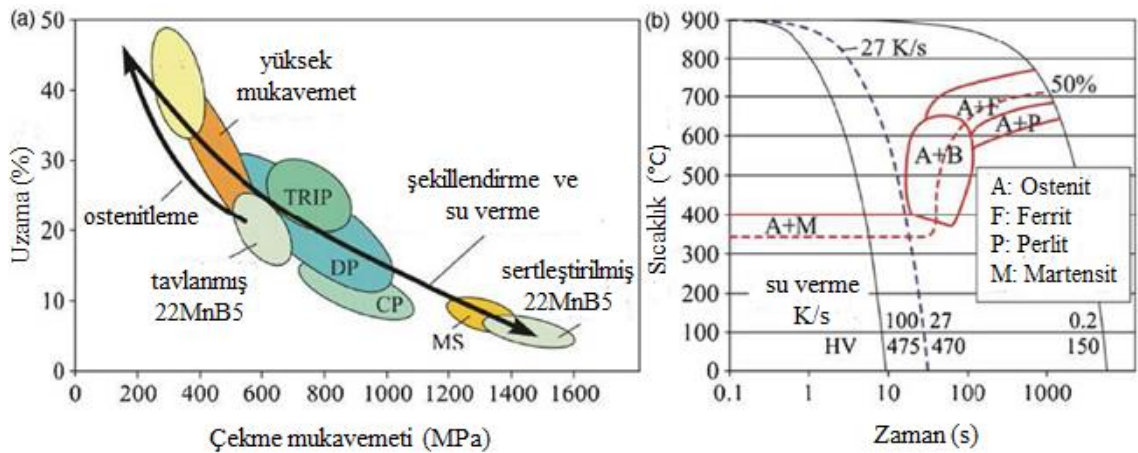
2.5. Ultra Yüksek Dayanımlı Usibor 1500 Çeliği

Otomotiv endüstrisinde kullanılan yapısal parçaların daha hafif ve daha dayanımlı üretilebilmeleri yüksek mukavemetli çeliklerin kullanılmasıyla mümkün olmaktadır. Sıcak şekillendirme prosesinde en yaygın kullanılan yüksek mukavemetli çelik, Usibor

1500 çeliği olarak da adlandırılan Al-Si kaplamalı 22MnB5 boron çeliğidir. Bu tür çeliklerin sıcak şekillendirme işleminde kullanılması, malzeme özellikleri bakımından daha iyi ve daha ince parçaların üretilmesini sağlamaktadır. Sertleşme davranışları sıcaklıkla ilişkilidir (Güler 2015).

Sıcak şekillendirme işleminde yaygın olarak kullanılan Usibor 1500 çeliği, ultra yüksek dayanımlı çelikler (UHSS) sınıfına girmektedir. Sıcak şekillendirme öncesi çekme mukavemeti 500-700 MPa, akma mukavemeti 300-550 MPa ve uzama miktarı %10'un üzerinde olan Usibor 1500 çeliğinin sıcak şekillendirme sonrası çekme mukavemeti 1500 MPa, akma mukavemeti 1100 MPa ve uzama miktarı %6 seviyelerinde olmaktadır (Önal 2012).

22MnB5 çeliğinin çekme mukavemeti ve uzama arasındaki ilişki ile zaman ve sıcaklık arasındaki ilişki sonucu elde edilen mekanik özellikler ve içyapı değişimleri Şekil 2.25'te görülmektedir.

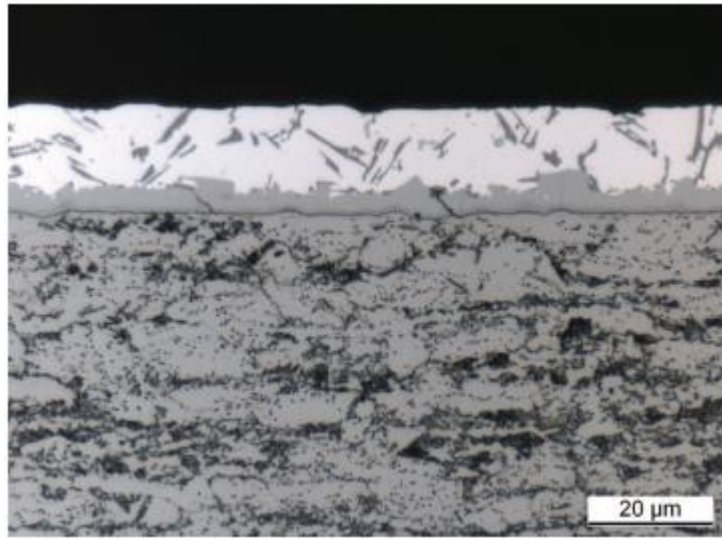


Şekil 2.25. (a) 22MnB5 çeliğinin mekanik özellikleri (b) CCT diyagramı (Yao ve ark. 2013)

2.5.1. Usibor 1500 Çeliğinin Kaplama Özellikleri

Şekillendirme kalıbındaki abrazyon aşınmayı azaltmak ve şekillendirilen parçanın boyanabilirliğini sağlamak için ısıtma işlemi sırasında kabuk oluşumundan kaçınılmalıdır. Bu nedenle, kaplanmamış malzemeler koruyucu gaz altında ısıtılmalı

veya sac üzerine koruyucu bir kaplama uygulanmalıdır. Kaplama, tipik olarak yaklaşık %87 alüminyum, %10 silikon ve %3 demirden oluşur. Şekil 2.26, 22MnB5 çeliğinin teslimat koşulundaki kaplamasını göstermektedir. Üst tabaka iki fazlı ötektik alüminyum ve silikondan oluşur. Aşağıdaki katman yaklaşık %31 demir içeren fazdır (Al_8Fe_2Si). Ötektik erime noktası, malzemenin ostenitleme sıcaklığının altında, yaklaşık $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Malzemenin ısıtılması sırasında Fe kaplamaya yayılır ve bu da erime sıcaklığının yaklaşık $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükselmesine yol açar (Veit ve ark. 2011).



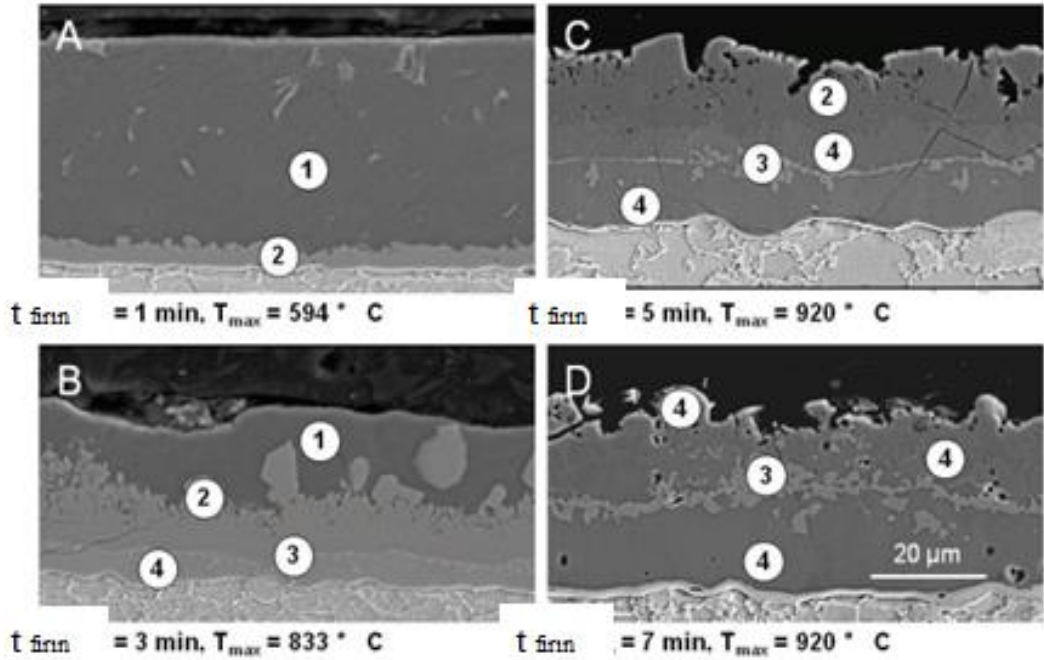
Şekil 2.26. Al-Si kaplamalı 22MnB5 çeliğinin teslimat koşulundaki kaplaması (Veit ve ark. 2011)

Çizelge 2.1’de enerji dağıtıcı X-ışını analizleri yapılan numuneler için tespit edilen tüm fazlar özetlenmiştir. Farklı metallerin belirtilen yüzdeleri, farklı ölçümlerin ortalama değerleridir. Şekil 2.27, farklı ısıtma süresi için elde edilen fazları göstermektedir. Şekil 2.27A’da, maksimum $594\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bir dakika sonra, teslimat koşuluna kıyasla neredeyse hiçbir değişiklik görülmemektedir. Bu durum, kaplamanın difüzyon işleminin erime sıcaklığının altında çok yavaş olduğunu göstermektedir. 3 dakika sonrasında, malzeme üzerinde silikon için düşük çözünürlüğe sahip bir Fe_2Al_5 veya $FeAl_2$ fazı (η veya ζ) oluşmaktadır. Silikon, $833\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşan sıcaklıkta Al_8Fe_2Si (τ_5) fazını takiben Al_2Fe_2Si (τ_1) fazını ile bir sonraki tabakaya yayılmaktadır (Şekil 2.27B). Yakın bölgedeki yüzeyde hala kalan bir alüminyum ve silikon tabakası görülmektedir. 5 dakika sonra (Şekil 2.27C), Al_8Fe_2Si fazı üste ulaşmakta ve Al_2Fe_2Si fazı

$Fe_2Al_5/FeAl_2$ 'nin iki yatay tabakası arasında gömülmektedir. 7 dakika sonra (Şekil 2.27D), Al_8Fe_2Si fazı kaybolmakta ve $Fe_2Al_5/FeAl_2$ arasında yalnızca Al_2Fe_2Si fazı kalmaktadır (Veit ve ark. 2011).

Çizelge 2.1. Faz analizleri özeti (Veit ve ark. 2011)

No	Faz	Formül	Al %	Si %	Fe %	T _{erg.}
1		Al + Si	87	10	3	577
2	τ_5	Al_8Fe_2Si	56	9	35	855
3	τ_1	Al_2Fe_2Si	32	13	55	1050
4	η/ζ	$Fe_2Al_5/FeAl_2$	49	2	49	1156



Şekil 2.27. Fırında ısıtma süresine göre faz değişimi (Veit ve ark. 2011)

5 dakika sonra, geleneksel olarak ısıtılmış Al/Si kaplı tabakaların tipik yüzey pürüzlülüğünün geliştiği ve Al_8Fe_2Si fazının ilerlemesinin yatay olmadığı görülmektedir. Nispeten düşük ısıtma hızı, kalan Al/Si tabakasının eşit olmayan bir dönüşümüne yol açan yatay olmayan difüzyon yönlerini tercih etmesine sebep olmaktadır (Veit ve ark. 2011).

2.5.2. Borun Usibor 1500 Çeliğinin Sertleşmesine Etkisi

Bor, yer kabuğu üzerinde nadir bulunan elementlerden biridir. 150'den fazla mineralin bileşiminde bulunmasına rağmen doğada serbest halde bulunmamaktadır. Özellikle ülkemiz bor mineralleri açısından çok zengindir. Dünya rezervinin yaklaşık %62' si ülkemizde olmakla birlikte mineral çeşitliliği ve cevher tenörü açısından da doğal bir zenginliğe sahiptir.

Çeliklerde yüzey sertleştirme yöntemlerinden biri de borlama işlemidir. Söz konusu yüzey sertleştirme işlemi termo-kimyasal bir işlem olup, borun yüksek sıcaklıklarda çelik yüzeyine difüzyonu olarak tanımlanabilmektedir. Borlama işlemi sonucu yüzeylerde sürtünme katsayısı azalmakta, aşınma direnci artmakta ve yüksek sıcaklıklarda malzemenin sertlik ve tribolojik özellikleri korunmaktadır.

Borlama işlemi ile elde edilebilen sertlik değerleri karbon çeliklerinde 1800-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV ve titanyumda 3000 HV civarlarındadır. Çizelge 2.2'de borlama işlemi ile diğer yüzey sertleştirme işlemleri ile elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri görülmektedir (Ünlü ve Yılmaz 2006).

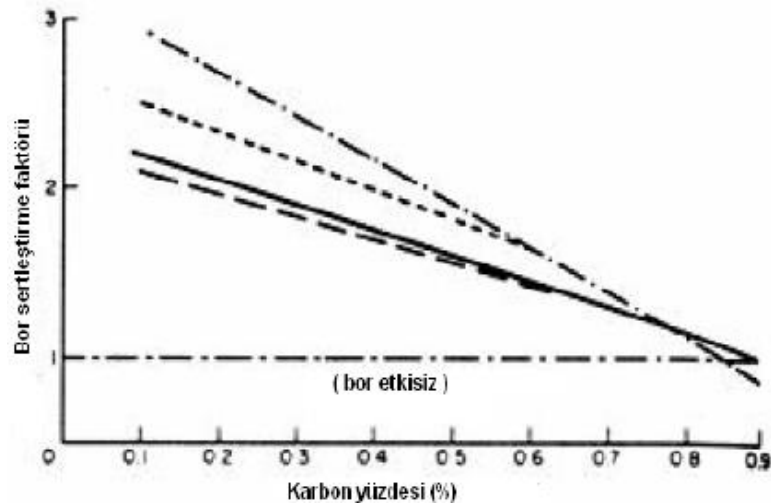
Çizelge 2.2. Borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri (Ünlü ve Yılmaz 2006)

Malzeme	Mikro Sertlik (kg/mm ²)
Nitrürlenmiş yüzey	610-940
Gaz ile karbürize edilmiş yüzey	700-820
Sert krom kaplı yüzey	950-1100
WC+%13 Co Sinter malzeme	1300
Borlanmış karbon çeliği	1600
Borlanmış AISI H13 çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900

Bor alaşımlı çelik olan Usibor 1500 çeliği üzerinde borun sertleşmeye etkisi ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Düşük alaşımlı çeliklere yaklaşık 10 ila 20 ppm

civarında bor katkısı ile ostenit tane sınırları boyunca bor segregasyonu sağlanmaktadır. Bu sayede ferritin çekirdeklenmesi engellenerek malzeme sertliği artırılmaktadır. 5 ppm'den düşük bor oranının yeniden kristalleşme kinetiğinde etkisiz kaldığı; 20 ppm'nin üzerindeki bor oranının doygunluk etkisi gösterdiği görülmüştür. Borun malzeme sertliğini arttırması ile ilgili olarak iki yaklaşım mevcuttur. Birincisi ostenit tane sınırlarındaki borun yüzey enerjisini düşürmesi ve düşük enerjisi ile ferritin çekirdeklenmesinin engellenmesi şeklindedir. İkincisi ise, çekirdeklenmeyi durdurucu faktör olan ostenit sınırlarındaki $Fe_{23}(CB)_6$ partikülleridir.

Al-Si kaplamalı bor çeliği olan 22MnB5 çeliğinde, bor katkısı oldukça güçlü bir sertleştirme etkisi meydana getirmektedir. 20 ppm seviyelerindeki bor katkısı, %0,6 Mn veya %0,7 Cr veya % 0,5 Mo veya %1,5 Ni ile eşdeğer ölçüde sertleşmeyi sağlamaktadır. Sertleşme oranına ostenitleme süresi ve sıcaklığı, ostenit tanelerinin boyutu, ısıtma işlemler, %C bileşimi ve alaşım elementleri gibi birçok faktör etki etmektedir. Ostenitleme sıcaklığının artmasıyla birlikte katı çözültü halindeki bor miktarı artmakta ve sertleşebilme kabiliyeti düşmektedir. Şekil 2.28'de düşük alaşımlı bor çeliklerinde karbon yüzdesindeki artışa karşılık, bor sertleştirme faktörünün azaldığı görülmektedir. Yani bor, düşük karbonlu çeliklerde sertleştirme özelliği gösterirken, karbon oranı %0,8 ve üzerindeki çeliklerde etkisiz kalmaktadır (Özcan 2009).



Şekil 2.28. Bor sertleştirme faktörünün karbon yüzdesi ile değişimi (Özcan 2009)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

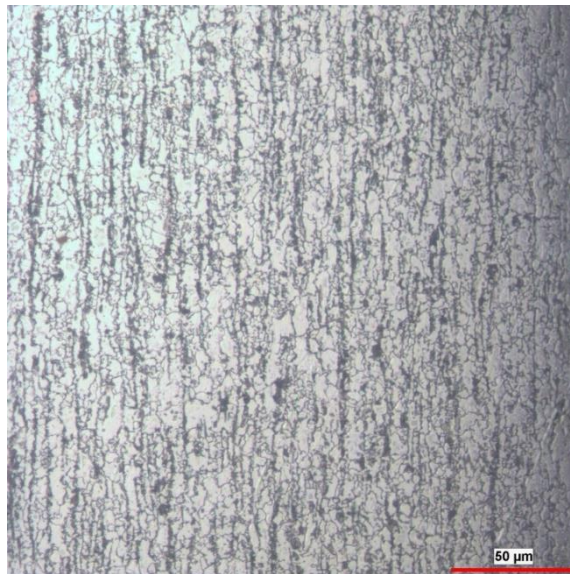
Deneysel çalışmalarda ArcelorMittal firması tarafından temin edilen ultra yüksek dayanımlı Usibor 1500 çeliği kullanılmıştır. Kalınlığı 1.5mm olan Usibor 1500 çeliğinin kullanılmasının esas nedeni bu çeliğin sıcak şekillendirme prosesine uygun olmasıdır. Usibor 1500 çeliğinin çekme özellikleri Çizelge 3.1’de, spektral analiz sonucu elde edilen kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2’de ve mikroyapı görünümü Şekil 3.1’de verilmiştir. Mikroyapı ferrit ve perlit fazından oluşmaktadır.

Çizelge 3.1. Usibor 1500 çeliğinin çekme özellikleri

Çekme Mukavemeti	617 MPa
Akma Mukavemeti	420 MPa
Kopma Uzaması	21,60%
Sertlik	198 HV

Çizelge 3.2. Usibor 1500 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Element	C	Si	Mn	P	S	Al	B	Ti+Nb	Cr+Mo
Bileşim (%)	0,223	0,252	1,18	0,0119	0,0005	0,0339	0,0025	0,0362	0,1842

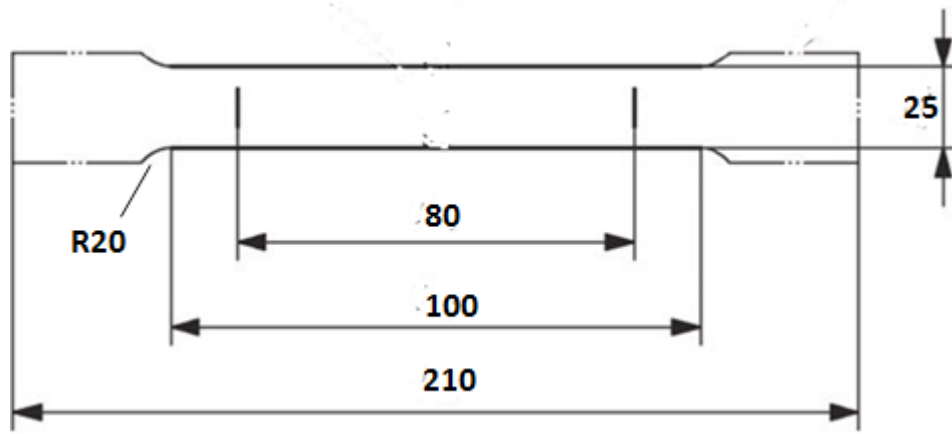


Şekil 3.1. Usibor 1500 çeliğinin mikroyapısı (ferrit+perlit)

3.2. Yöntem

3.2.1. Numune Hazırlama İşlemleri

Deneyisel çalışmalarda kullanılan Usibor 1500 çeliği 1.5*1000*2000 mm 'lik levhalar halinde temin edilmiştir. Deney numuneleri TS EN ISO 6982-1 standardı göz önünde bulundurularak Agie Charmilles CUT E 600 model tel erozyon cihazında $\pm 0,005$ ölçü toleransında kesilmiştir. Çekme testleri için her bir grup için 3'er adet numune kullanılmıştır. Çekme testi deney numunelerinin ölçüleri mm cinsinden Şekil 3.2'de görülmektedir.



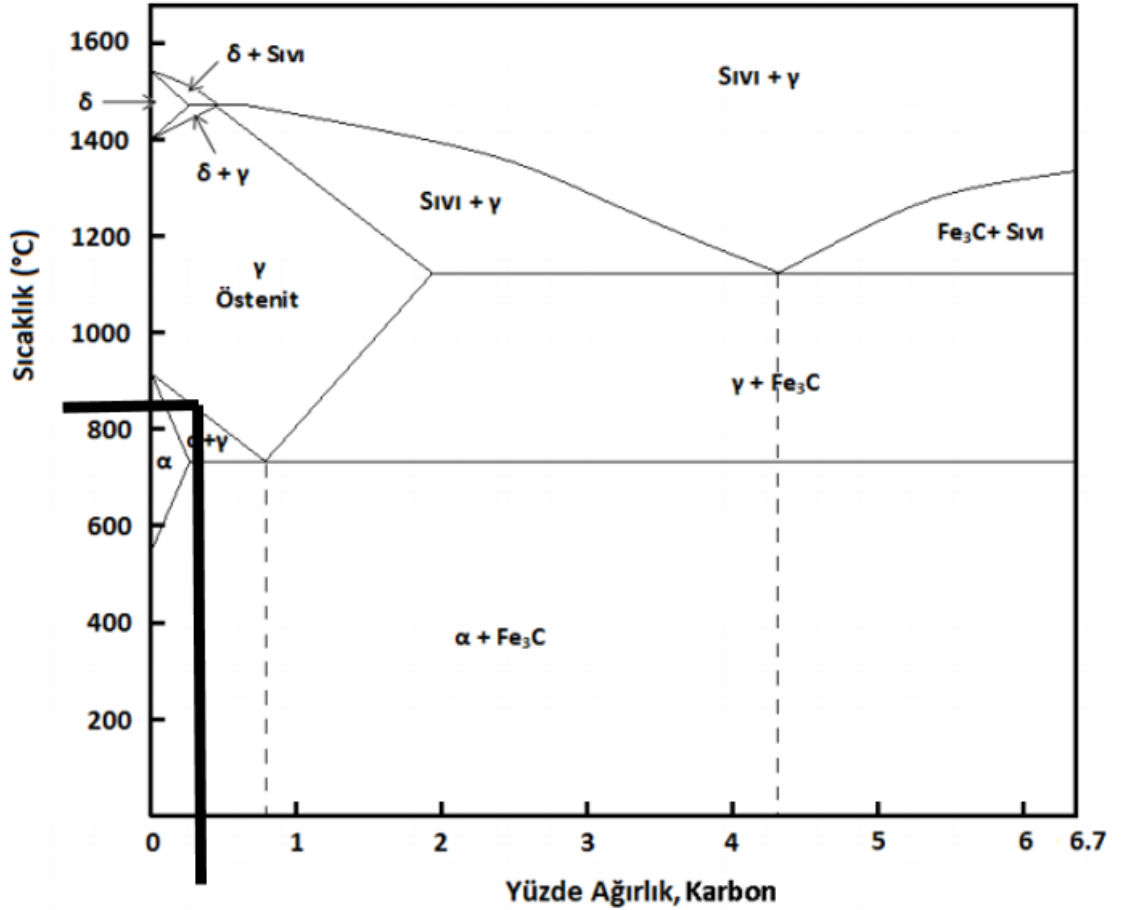
Şekil 3.2. Çekme testi deney numunelerinin ölçüleri



Şekil 3.3. Çekme özelliklerindeki değişimin incelenmesi için hazırlanan çekme testi deney numuneleri

3.2.2. Isıl İşlem

Ostenitleme sıcaklığı Şekil 3.4'teki Fe-C Denge Diyagramı kullanılarak belirlenmiştir. Kolay şekillendirilebilirlik, yüksek sıcaklıkta kararlılık ve yüksek süneklik göstermesinden dolayı çeliklerde sıcak şekillendirme ve ısıl işlemlerin pek çoğu ostenitik fazda gerçekleşmektedir (Aydın 2017). Karbon oranı %0.223 olan Usibor 1500 çeliğinin ostenitleme sıcaklığının bulunabilmesi için öncelikle Şekil 3.4'teki Fe-C Denge Diyagramı üzerinden % 0.223 C oranına denk gelen noktadan yukarıya doğru bir çizgi çizilir. Bu çizginin ostenit bölgesini sınırlandıran A3 sıcaklığı eğrisi ile kesiştiği noktadaki sıcaklık değeri Şekil 3.5'teki Temel Benzerlik Teoremi yöntemiyle bulunur.



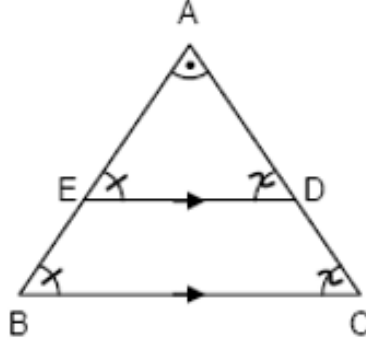
Şekil 3.4. Fe-C Denge Diyagramı (Anonim 2015)

Temel benzerlik teoremini göz önünde bulunduracak olursak;

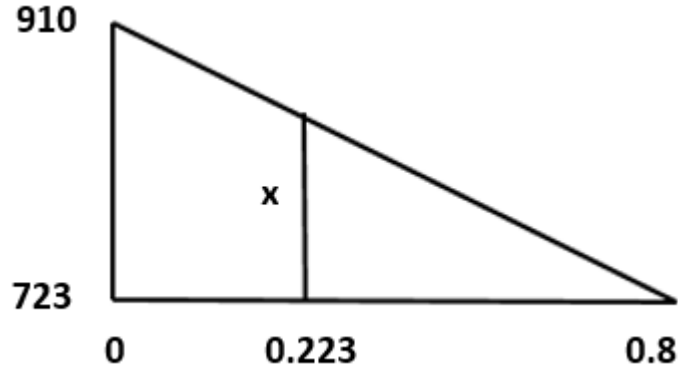
ABC üçgeninde [ED] // [BC]

$$\frac{|AE|}{|AB|} = \frac{|AD|}{|AC|} = \frac{|ED|}{|BC|}$$

(3.1)



Şekil 3.5. Temel Benzerlik Teoremi (Anonim 2012)



Şekil 3.6. Usibor 1500 çeliğinin ostenitleme sıcaklığının bulunabilmesi için Fe-C Denge Diyagramı üzerinden oluşturulan üçgen

Şekil 3.6'da Usibor 1500 çeliğinin %C oranı dikkate alınarak oluşturulan üçgen üzerinden temel benzerlik teoremiyle x değeri yaklaşık 135 olarak bulunur ve üzerine 723 eklenerek Usibor 1500 çeliğinin ostenitleme sıcaklığı yaklaşık 858 °C olarak bulunur. Isıl işlemin ostenitik fazda gerçekleştirileceği için fırın sıcaklığının Usibor 1500 çeliğinin ostenitleme sıcaklığının üzerine çıkarılması gerekmektedir. Bu kapsamda çalışmalar esnasında ısıl işlem fırınının sıcaklığı 910 °C ±10 °C olarak belirlenmiştir.

Çekme özelliklerdeki değişimin gözlemlenmesi amacıyla tel erozyon cihazı ile kesilen Usibor 1500 çeliği, 910 °C sıcaklıktaki ısıl işlem fırınında sırasıyla 30 saniye, 90 saniye, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika ostenitlenmiştir.



Şekil 3.7. Deneysel çalışmalarda kullanılan Teknik Isısan Rezistans Sanayi ve Ticaret LTD. ŞTİ. tarafından temin edilen 30 kW gücündeki ısıl işlem fırını

Isıl işlem esnasında iş güvenliği bakımından operatör özel koruyucu ekipman kullanarak deney numunelerinin fırına girmesini ve fırından çıkarılmasını sağlamıştır.



Şekil 3.8. Isıl işlem esnasında operatörün kullandığı koruyucu ekipmanlar

3.2.3. Su Verme İşlemi

Su verme yani sertleştirme işlemi, ostenitleme işleminden sonra çeliğin ostenitleme sıcaklığından, bu çelik için kritik soğuma hızından daha hızlı bir şekilde soğutulması işlemidir. Buradaki amaç martensitik yapı oluşturmaktır.

Çalışmalar esnasında ısıtma işlemi sonrası fırından alınan numuneler su dolu bir kaba bırakılarak hızlı bir şekilde soğuması yani sertleştirilmesi sağlanmıştır.

3.2.4. Sertlik Testleri

Bu çalışmada Vickers Yöntemi kullanılarak sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme mikroyapısının ve sertlik değerlerinin incelenmesi amacıyla parçalardan numune alınması için Metkon SERVOCUT 301-MA model hassas kesme cihazı kullanılmış ve 10 mm boyunda numuneler kesilmiştir. Numunelerin küçük ve tutulmasının zor olmasından dolayı bakalite alınmıştır. Çalışmalar esnasında Metkon ECOPRESS 100 model bakalite alma cihazı kullanılmıştır. Çalışmalarda Metkon FORCIPOL 2V model zımparalama cihazı kullanılmıştır. Kaba yüzeyden ince yüzeye doğru olacak şekilde 120-180-320-400-600-800 nolu zımpara kağıtları kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işleminden sonra yüzey parlatma işlemi Metkon FORCIPOL 1V model cihazda elmas pasta kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey parlatma işleminden sonra numunelerde metalik olmayan kalıntılar ve çatlak gibi yüzey kusurları görülebilmektedir. İyiyapı özelliklerinin daha sağlıklı bir şekilde elde edilmesi bakımından numuneler HCl (%40) + HNO₃ (%20) + H₂O (%40) solüsyonu kullanılarak dağlanmıştır.

Dağlama işlemi sonrası EMCOTEST DuraScan model sertlik ölçme cihazında 1 kg yük altında her bir deney numunesinin 6 farklı noktasından sertlik ölçümü yapılmış ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Aynı zamanda, aşağıda verilen istatistikî yöntem esas alınarak ölçümlerin istatistik hesaplamaları yapılmıştır:

Standart sapma, σ : Veri değerlerinin aritmetik ortalamadan (X) farklarının

karelerinin toplamının ortalamasının kareköküdür ($\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$).

Standart hata : Aritmetik ortalamada oluşan bir hatanın ölçüsüdür (σ/\sqrt{n}).

Varyasyon katsayısı : Standart sapmanın ortalamaya göre yüzde kaçlık bir değişim gösterdiğini belirtir [$(\sigma/X).100$].

Range : Veri değerleri içerisinde en büyük ve en küçük değerler arasındaki farktır ($X_{maks} - X_{min}$).

3.2.5. Mikroyapı İncelenmesi

Bakalite alınıp zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri sonrası mikroyapı incelenmesi adına hazır hale gelen deney numuneleri Nikon marka optik mikroskop altında 50 μm , 100 μm , 200 μm ve 500 μm büyütme oranlarında görüntülenmiştir.

3.2.6. Çekme Testleri

Mikroyapı ve sertlik ölçümleri için hassas kesme cihazında bir kısmı kesilen deney numuneleri SHIMADZU AG-I model çekme cihazında 50 kN altında 5 mm/dk çekme hızında çekilerek mukavemet değerleri belirlenmiştir. Uzama değerleri manuel olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.9. SHIMADZU AG-I model çekme cihazında numunenin test öncesi görünümü

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışma kapsamında, ArcelorMittal firması tarafından temin edilen ultra yüksek dayanımlı Usibor 1500 çeliğinin ostenitleme sıcaklığı üzerinde farklı ostenitleme sürelerine bağlı olarak çekme özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Çekme özelliklerindeki değişimin incelenmesi adına her bi grup için 3'er adet olacak şekilde hazırlanan numuneler ostenitleme sıcaklığının üzerinde 910 °C'ye çıkarılan ısıtma fırınında sırasıyla 30 saniye, 90 saniye, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika ostenitlenmiştir. Ardından suda su verilerek sertleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonrası mikroyapı, sertlik ölçümü ve çekme testi sonuçları incelenmiş ve yorumlanmıştır.

4.1. Mikroyapı Sonuçlarının Yorumlanması

Isıl işlem fırınında sırasıyla 30 saniye, 90 saniye, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika ostenitlenen malzemelerin, su verme işlemi sonrası optik mikroskop altında 50 µm, 100 µm, 200 µm ve 500 µm büyütme oranlarında mikroyapı görüntüsü alınmıştır.

Martensitik yapı oluşturmak amacıyla kolay şekillendirilebileceği ostenitleme sıcaklığı üzerine çıkarılan numunelerin tamamen martensit yapı oluşturması ve sertleştirilmesi için hızlı soğutma işlemi uygulanmıştır.

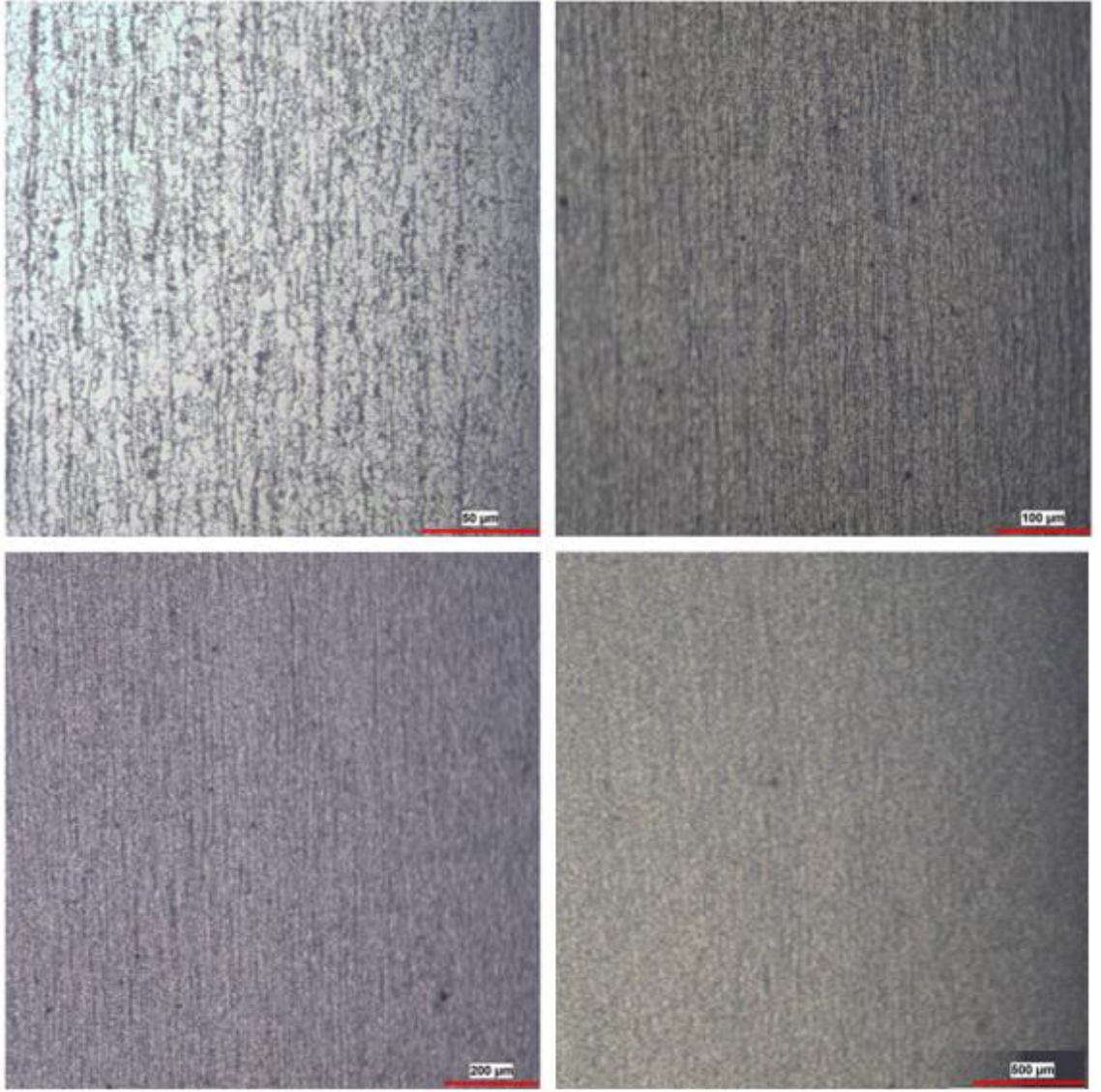
Başlangıçta ferritik ve perlitik mikroyapıda olan Usibor 1500 çeliğinin 30 saniye ostenitleme süresi ve ardından hızlı soğutma işlemi sonrası gözlemlenen içyapısı (Şekil 4.2), başlangıç malzemesinin içyapısıyla (Şekil 4.1) karşılaştırıldığında neredeyse içyapıda bir değişiklik meydana gelmediği görülmektedir. Malzemenin ferritik-perlitik mikroyapısını koruduğu ve 30 saniyelik ostenitleme süresinin martensitik mikroyapı oluşturmak için yeterli olmadığı görülmektedir.

90 saniye ve 3 dakika ostenitleme ve ardından hızlı soğutma işlemlerinde meydana gelen içyapılarda, ferritik ve perlitik yapı ile birlikte optik mikroskobun ayırma gücünün dışında kalan ara yapıların oluştuğu düşünülmektedir. Bunu da 90 saniye ve 3 dakika ostenitleme sürelerinde meydana gelen sertlik ve mukavemet artışı doğrulamaktadır.

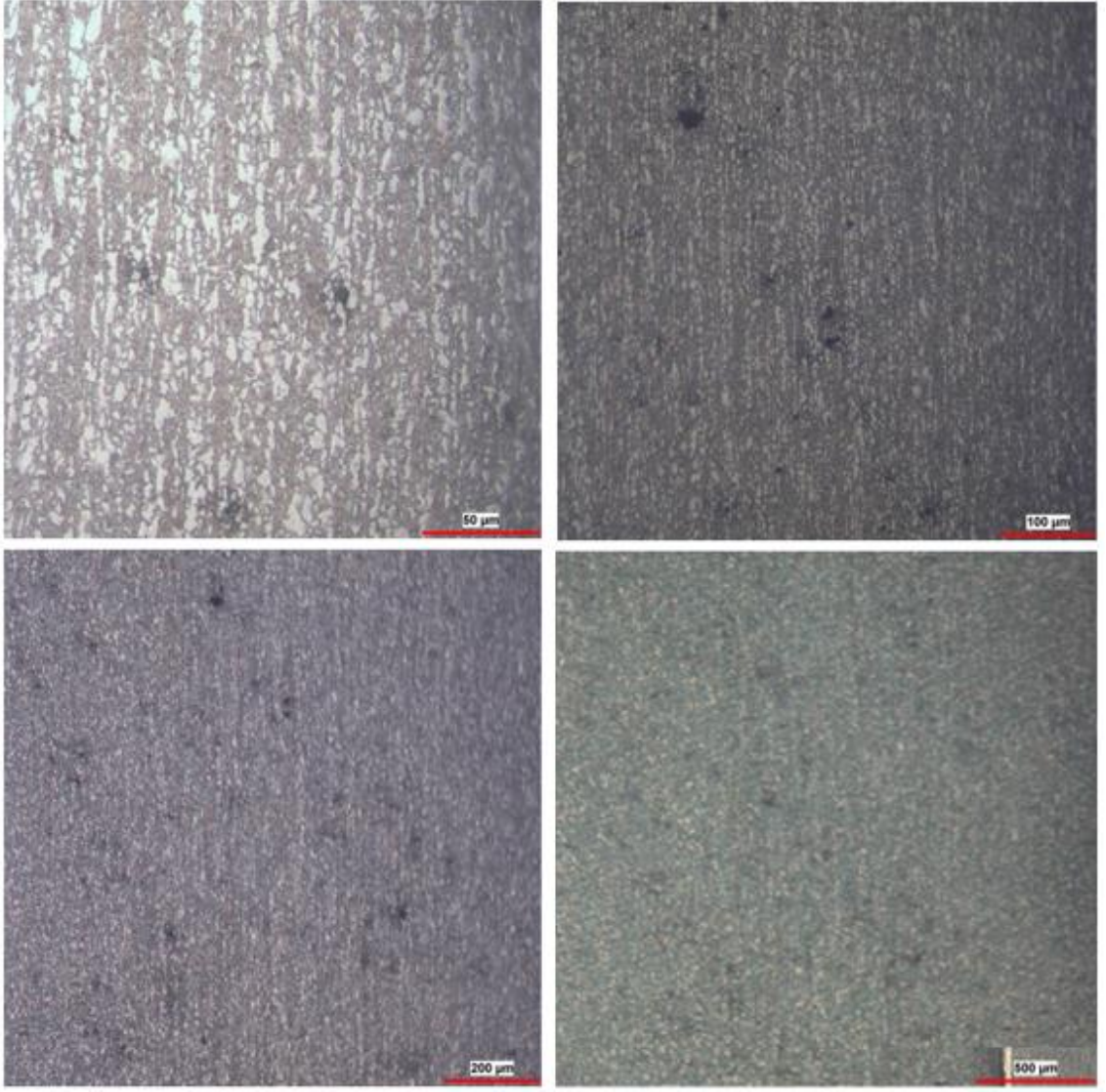
5 dakika ostenitleme ve hızlı soğutma işlemi ile birlikte martensitik yapı görüntülenmiştir. 10 dakika ostenitleme süresi ve hızlı soğutma işlemi sonrasında da tıpkı 5 dakika ostenitleme süresinde olduğu gibi martensitik içyapı elde edilmiştir. Martensitik içyapı, sıcak şekillendirme işleminde beklenen özellik olup 5 dakika ostenitleme süresi ile yakalanmıştır.

Liu ve ark. (2011), sıcak şekillendirme, su verme ve bölümlenme işlemleri sonrasındaki martensitik mikroyapısal dönüşümleri incelemiştir. Sıcak şekillendirmenin ince taneli ostenit; su verme ve bölümlenme işlemlerinin tutulan ostenitte iğnemsiz martensitten oluşan iki fazlı bir mikroyapı ürettiği görülmüştür. Güler (2013), Usibor 1500 çeliğinin sıcak şekillendirme prosesini incelemiş ve ostenitik mikroyapının sıcak şekillendirme ile birlikte büyük ölçüde martensite dönüştüğünü gözlemiştir. Kurumahmut (2009), sıcak şekillendirme sonrası, başlangıçta ferrit-perlit mikroyapısına sahip 22MnB5 sacı süneklik ve darbe dayanımındaki düşüşe karşılık gerek sertlik gerekse dayanımdaki güçlü artışla tama yakın martensit veya martensit-beynit karma yapıya dönüştüğünü gözlemlenmiştir.

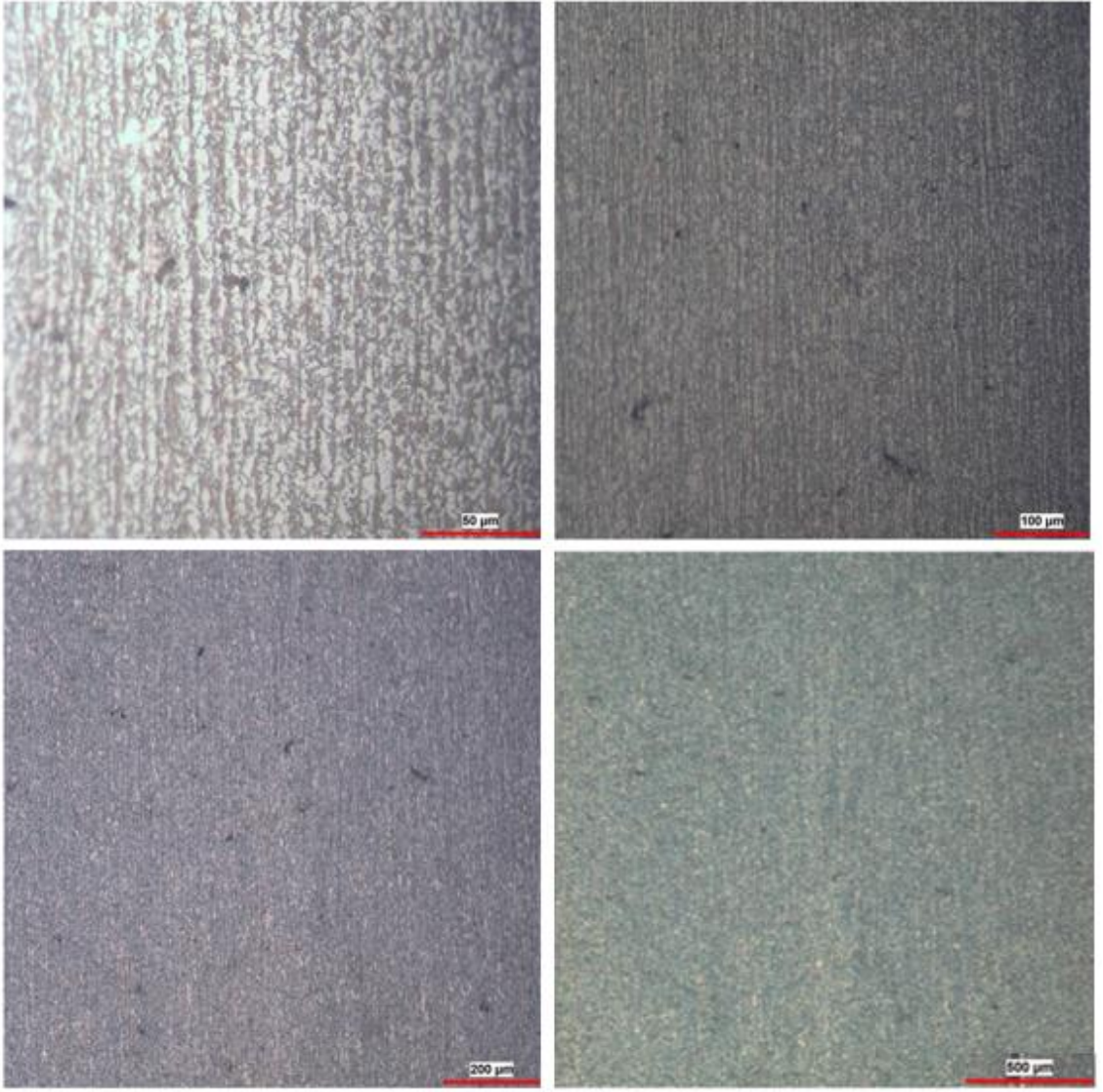
Tez çalışması kapsamında gözlemlenen mikroyapısal dönüşümlerin, literatür taramasında incelenen çalışmalar ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.



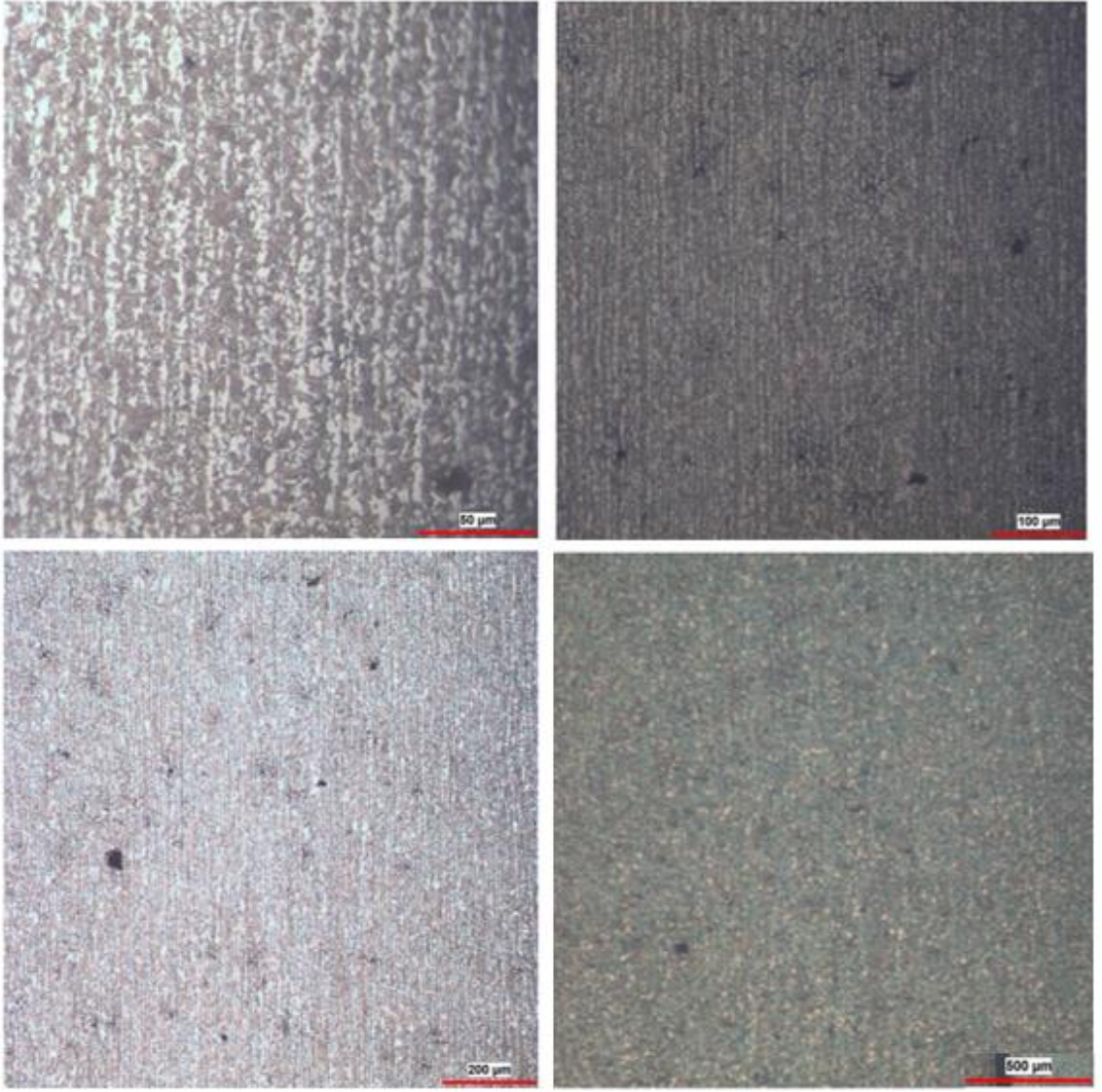
Şekil 4.1. Başlangıç malzemesine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (ferrit+perlit)



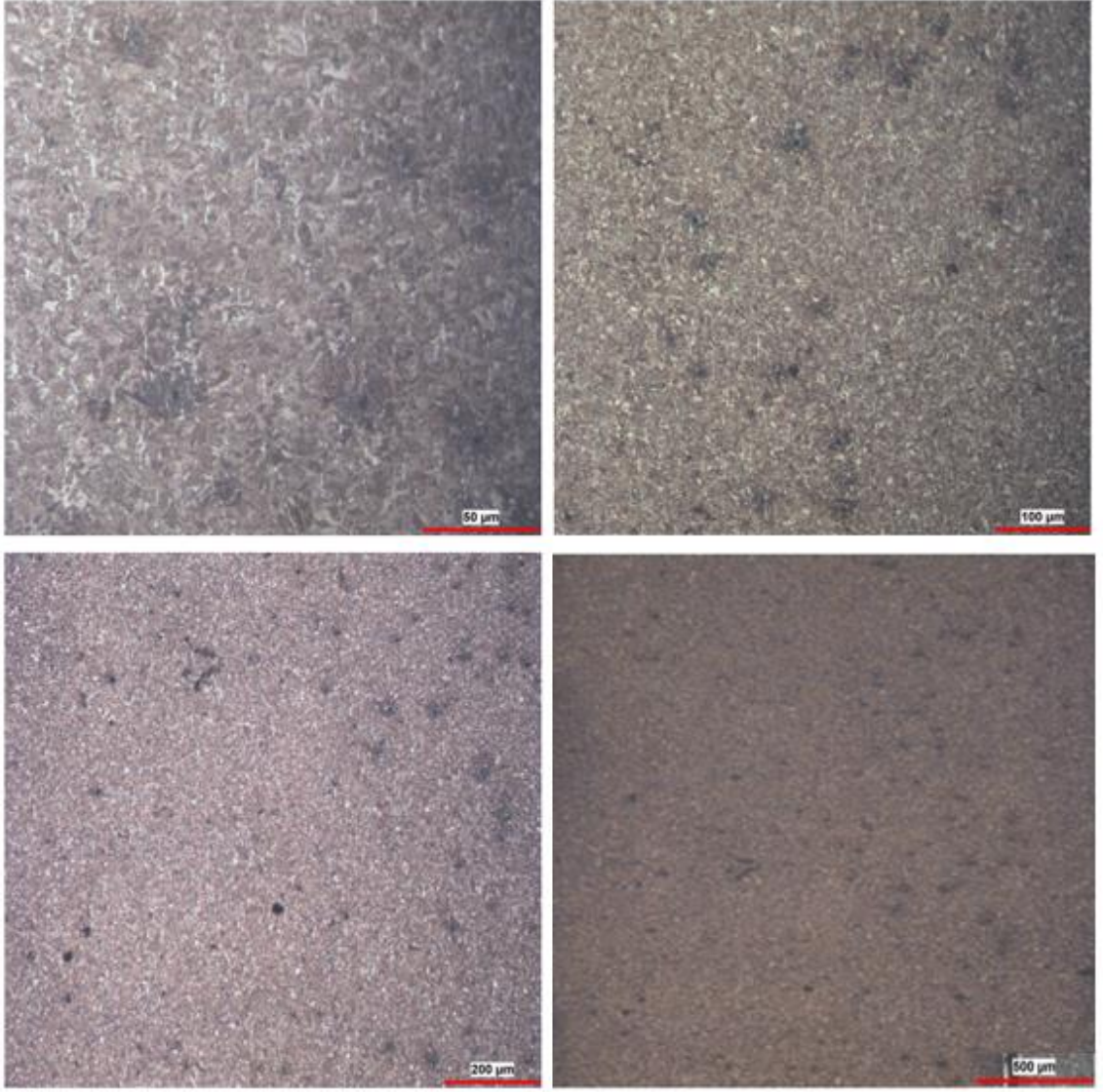
Şekil 4.2. 30 saniye ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (ferrit+perlit)



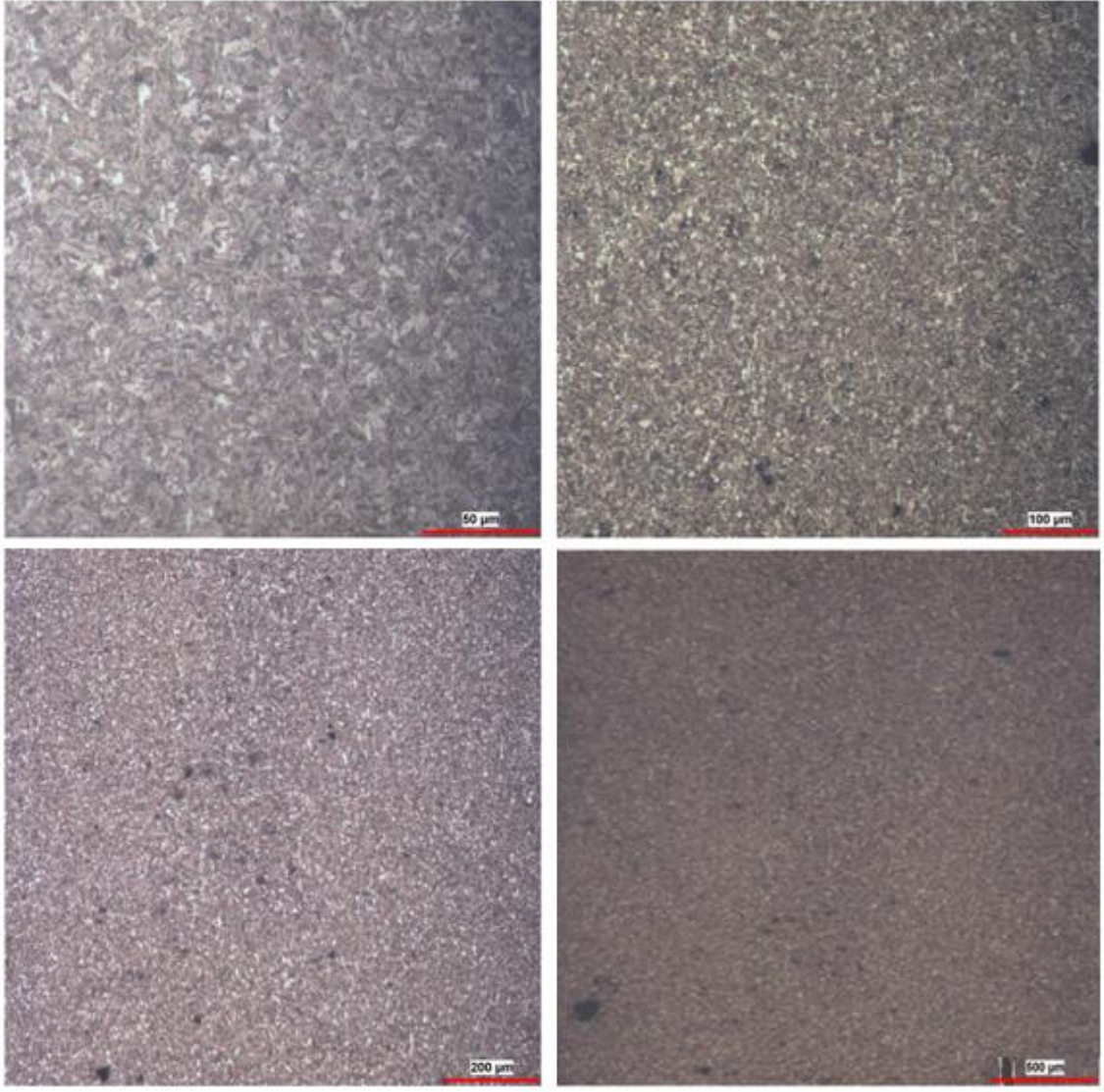
Şekil 4.3. 90 saniye ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (ferrit+perlit)



Şekil 4.4. 3 dakika ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (ferrit+perlit)



Şekil 4.5. 5 dakika ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (martensit)



Şekil 4.6. 10 dakika ostenitleme süresine ait farklı büyütme oranlarında mikroyapı incelemesi (martensit)

4.2. Sertlik Ölçüm Sonuçlarının Yorumlanması

Isıl işlem ve su verme işlemi sonrası sertlik testi için hazırlanan numunelerin, 1 kg yük altında her bir deney numunesinin 6 farklı noktasından sertlik ölçümleri alınmıştır. Vickers Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sonucunda sertlik değerlerindeki değişim Çizelge 4.1’de; sertlik değerlerinin istatistiki hesaplamaları Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Sertlik ölçüm sonuçları

	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	4. Ölçüm	5. Ölçüm	6. Ölçüm
Başlangıç Malzemesi	190 HV	206 HV	195 HV	197 HV	201 HV	197 HV
30 Saniye	257 HV	276 HV	287 HV	255 HV	254 HV	250 HV
90 Saniye	302 HV	305 HV	314 HV	308 HV	315 HV	305 HV
3 Dakika	356 HV	371 HV	399 HV	392 HV	371 HV	370 HV
5 Dakika	503 HV	502 HV	494 HV	502 HV	529 HV	490 HV
10 Dakika	497 HV	482 HV	467 HV	485 HV	457 HV	470 HV

Çizelge 4.2. Sertlik ölçümlerinin istatistiki hesaplamaları

	Aritmetik Ort.	Standart Sapma	Range	Varyasyon	Standart Hata
Başlangıç Malzemesi	198	5,4406	16	2,7478	2,2211
30 Saniye	263	14,7986	37	5,6268	6,0415
90 Saniye	308	5,2726	13	1,7119	2,1525
3 Dakika	377	15,9437	43	4,2291	6,5089
5 Dakika	503	13,6235	39	2,7084	5,5618
10 Dakika	476	14,3944	40	3,0241	5,8765

Sertlik ölçüm sonuçları incelendiğinde, 198 HV sertliğine sahip başlangıç malzemesinin sertliğinin ostenitleme süresi ile orantılı olarak arttığı görülmektedir. 30 saniye ostenitleme süresi sonrası 263 HV'ye yükselen sertlik değeri, 90 saniye sonrası 308 HV'ye ulaşmıştır. 3 dakika ostenitleme süresinde 377 HV seviyelerine çıkan sertlik değerinin 5 dakika ostenitleme süresi sonrası 500 HV seviyelerine çıktığı ve bu ostenitleme süresinden sonra çok fazla değişmeyerek 500 HV seviyesinde seyrettiği görülmektedir. Sonuçlarından görülebileceği gibi ultra yüksek dayanımlı Usibor 1500 çeliğinin sertliği, ısıtma işlem fırınında ostenitleme süresine bağlı olarak artış göstermektedir. Sertliğin, 5 dakika ostenitleme süresine kadar düzenli olarak arttığı, daha sonra tane yapısında meydana gelen büyüme sebebiyle sertlik değerinin bir miktar düştüğü görülmektedir. Sertlikte meydana gelen bu artışın asıl nedeni, ısıtma işlem görmüş malzemenin hızlı soğutmanın da etkisiyle iç yapısının ferritik-perlitik yapıdan tamamen martensitik yapıya dönüşmesidir.

Bardelcik ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, soğutma hızının sertleştirilmiş bor çeliklerinin sertliği üzerindeki etkiyi incelemiştir. Malzemeler 25 ve 45 °C/s ile havada, 250 °C/s ile yağda ve 2250 °C/s ile suda soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işlemi sonrasındaki ortalama sertlik değerleri sırasıyla 420 HV, 472 HV, 480 HV ve 516 HV olarak elde edilmiştir. Güler (2013) yaptığı çalışmada, su soğutmalı prototip kalıplar kullanarak Usibor 1500 çeliğinin sıcak şekillendirme prosesini incelemiştir. Sıcak şekillendirme ile birlikte çeliğin sertliği 492 HV seviyelerine yükseldiği gözlemlenmiştir. Kurumahmut (2009), Al-Si kaplamalı 22MnB5 çeliğinin sıcak şekillendirilmesi üzerine gerçekleştirdiği çalışmada, fırında 950°C sıcaklıkta 3 dakika östenitleme ve 50 °C/s soğuma hızı ile sertleştirme işlemini gerçekleştirmiş ve yaklaşık 500 HV sertlik değerine ulaşıldığı görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında incelenen sertlik değerlerinin, literatür taramasında incelenen çalışmalar ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

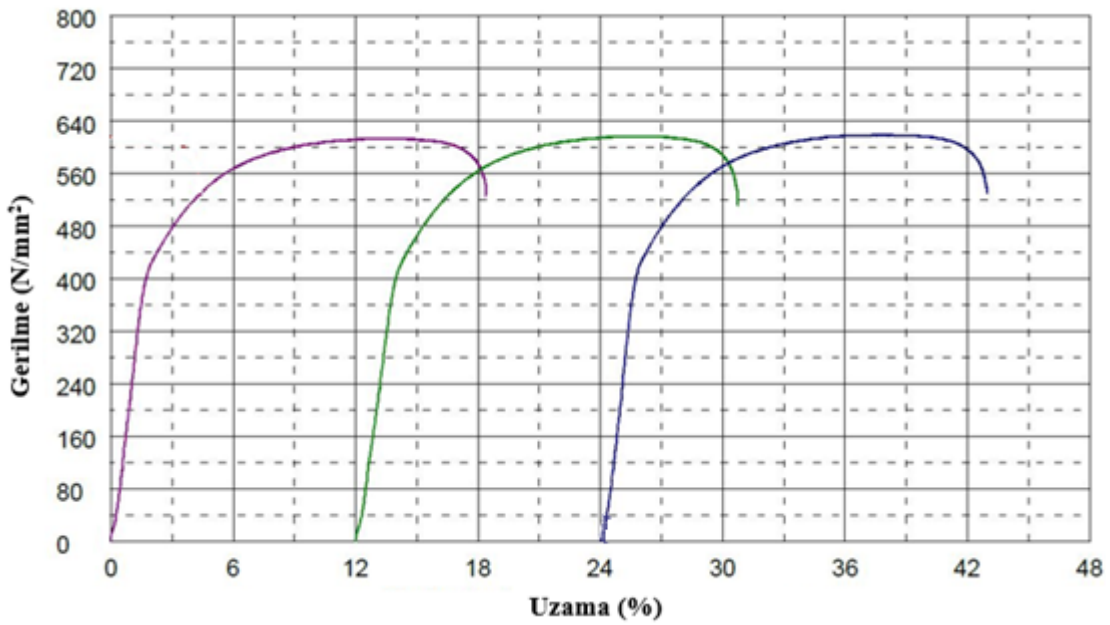
4.3. Çekme Testi Sonuçlarının Yorumlanması

Isıl işlem ve su verme işlemi sonrası, çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzama değerleri gibi çekme özelliklerindeki değişimin incelenmesi için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde 3'er adet numune kullanılmıştır.

Sıcak şekillendirme teknolojisi, geri yaylanma ve şekillendirme problemlerini ortadan kaldıran, mukavemet değerlerinin 1500 MPa seviyelerine çıkmasını sağlayan alternatif bir şekillendirme yöntemi olarak günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır (Liu ve ark. 2011a). Sıcak şekillendirme öncesi çekme mukavemeti 500-700 MPa, akma mukavemeti 300-550 MPa ve uzama miktarı %10'un üzerinde olan Usibor 1500 çeliğinin sıcak şekillendirme sonrası çekme mukavemeti 1500 MPa, akma mukavemeti 1100 MPa ve uzama miktarı %6 seviyelerinde olması beklenmektedir (Önal 2012). Güler (2013), Usibor 1500 çeliğinin sıcak şekillendirme prosesi sonrası gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda çekme mukavemetinin 1485 MPa seviyelerine yükseldiğini gözlemlenmiştir. Sıcak şekillendirilmiş parçalar soğuk şekillendirilmiş parçalardan daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir. Akbaş (2011), 22MnB5 çeliğinin sıcak

şekillendirme parametrelerini incelemek amacıyla yaptığı çalışmada ideal mukavemet ve uzama değerlerinin suda soğutma için 950 °C’de 1506 MPa ve %5 uzama; havada soğutma için 950 °C’de 735 MPa ve %4% uzama olduğunu gözlemlemiştir.

Başlangıç malzemesinin, çekme testi sonrası elde edilen çekme diyagramı Şekil 4.7’de; çekme testinden elde edilen veriler Çizelge 4.3’te görülmektedir. Gerçekleştirilen testler sonrası ortalama olarak; çekme mukavemeti 616,73 MPa, akma mukavemeti 420 MPa ve uzama değeri %21,60 olarak elde edilmiştir.

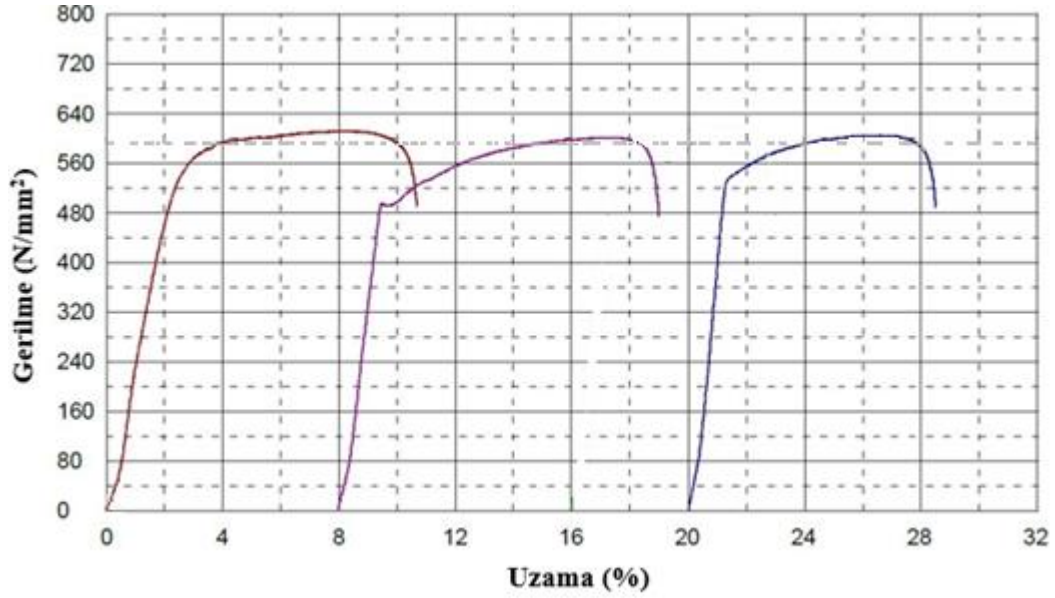


Şekil 4.7. Başlangıç malzemesine ait çekme testi sonuçları

Çizelge 4.3. Başlangıç malzemesine ait çekme özellikleri

	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama
1. Numune	613,85 MPa	415 MPa	22,50%
2. Numune	616,93 MPa	420 MPa	19,60%
3. Numune	619,41 MPa	425 MPa	22,70%
Ortalama	616,73 MPa	420 MPa	21,60%

30 saniye ostenitleme süresi sonrası elde edilen çekme özelliklerinde, çekme mukavemetinin başlangıç malzemesi ile hemen hemen aynı olduğu, akma mukavemetinin arttığı ve uzama miktarının düştüğü Şekil 4.8 ve Çizelge 4.4'te görülmektedir. Elde edilen ortalama 618,31 MPa çekme mukavemeti, sıcak şekillendirme prosesinde istenen 1500 MPa çekme mukavemeti değerinden oldukça uzaktır (Liu ve ark. 2011a, Önal 2012, Güler 2013).



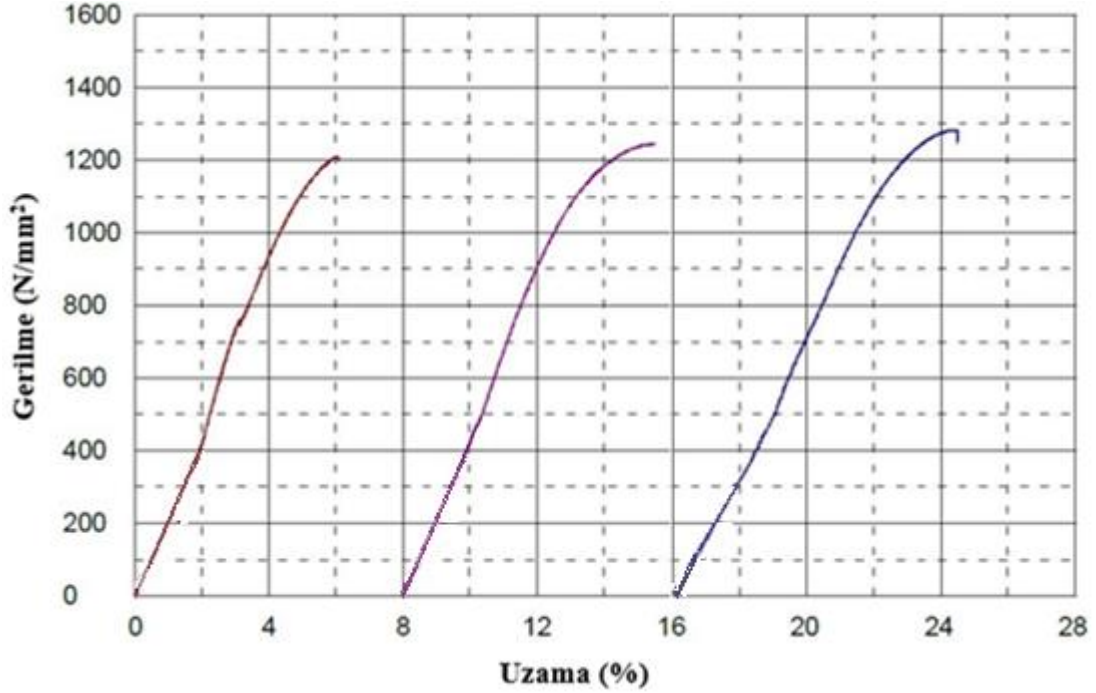
Şekil 4.8. 30 saniye ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları

Çizelge 4.4. 30 saniye ostenitleme süresine ait çekme özellikleri

	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama
1. Numune	628,51 MPa	530 MPa	12,70%
2. Numune	611,36 MPa	495 MPa	13,10%
3. Numune	615,06 MPa	535 MPa	10,50%
Ortalama	618,31 MPa	520 MPa	12,10%

Ostenitleme süresinin artmasıyla birlikte mukavemet değerleri artmaya, uzama değerleri azalma başlamıştır. 90 saniye ostenitleme süresi sonrası mukavemet değerleri artarak çekme mukavemeti ortalama 1245,86 MPa, akma mukavemeti ortalama 920 MPa ve uzama değeri ortalama %3,77 olarak elde edilmiştir. Elde edilen ortalama 1245,86 MPa

çekme mukavemetinin, sıcak şekillendirme prosesinde istenen 1500 MPa çekme mukavemeti değerinden bir miktar düşük olduğu görülmektedir (Liu ve ark. 2011a, Önal 2012, Güler 2013).



Şekil 4.9. 90 saniye ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları

Çizelge 4.5. 90 saniye ostenitleme süresine ait çekme özellikleri

	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama
1. Numune	1209,23 MPa	785 MPa	3,50%
2. Numune	1244,74 MPa	890 MPa	4,10%
3. Numune	1283,61 MPa	1085 MPa	3,70%
Ortalama	1245,86 MPa	920 MPa	3,77%

Şekil 4.10 ve çizelge 4.6'da görüldüğü gibi, 3 dakika ostenitleme süresi sonrasında mukavemet değerlerinde bir miktar artış gözlemlenmiştir. Ortalama çekme mukavemeti 1388,44 MPa, ortalama akma mukavemeti 1115 MPa ve ortalama uzama değeri %3,40 olarak elde edilmiştir. Sıcak şekillendirme prosesinde hedeflenen 1500 MPa çekme mukavemeti değerine 3 dakika ostenitleme süresinde de ulaşamamıştır (Liu ve ark. 2011a, Önal 2012, Güler 2013).

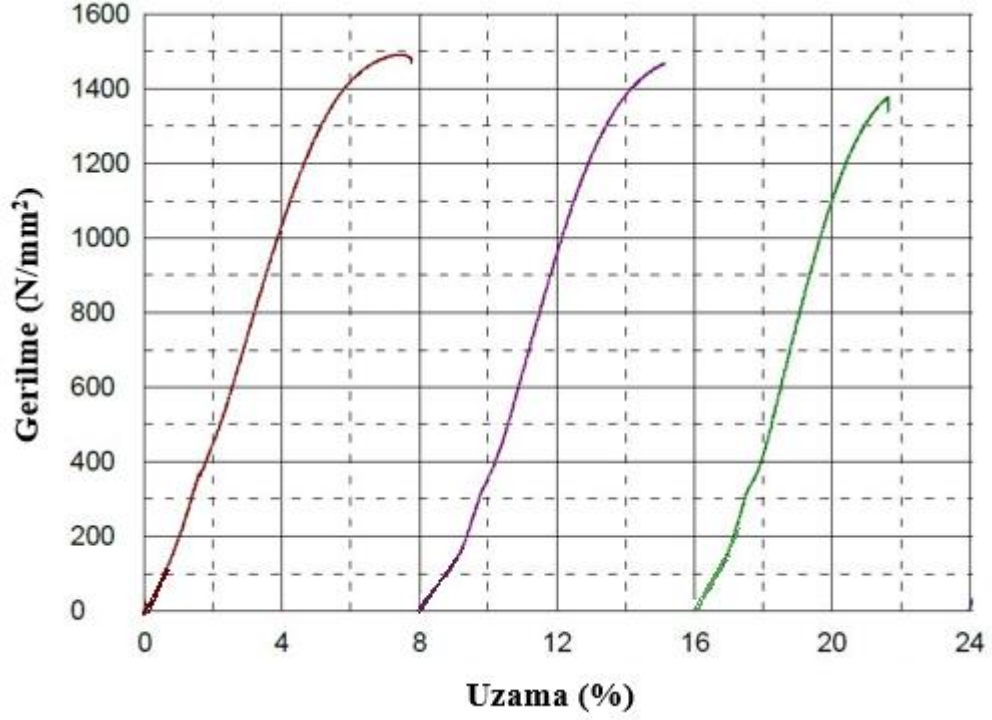


Şekil 4.10. 3 dakika ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları

Çizelge 4.6. 3 dakika ostenitleme süresine ait çekme özellikleri

	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama
1. Numune	1401,28 MPa	1005 MPa	4,90%
2. Numune	1382,30 MPa	1195 MPa	4,50%
3. Numune	1378,75 MPa	1145 MPa	3,80%
Ortalama	1388,44 MPa	1115 MPa	3,40%

1450 MPa çekme mukavemeti seviyelerine 5 dakika ostenitleme süresi sonrası ulaşılmıştır. Akma mukavemeti yaklaşık 1205 MPa ve uzama değeri yaklaşık %4,40 olarak elde edilmiştir. Sıcak şekillendirme prosesinde, literatürdeki çalışmalarda beklendiği gibi 1500 MPa seviyesine 5 dakika ostenitleme süresi sonrası ulaşılmıştır. Uzama miktarının %10'un altında istenen seviyede olduğu ve aynı zamanda akma mukavemetinin de istenen 1100 MPa seviyesine yakın olduğu görülmektedir (Liu ve ark. 2011a, Önal 2012, Güler 2013).



Şekil 4.11. 5 dakika ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları

Çizelge 4.7. 5 dakika ostenitleme süresine ait çekme özellikleri

	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama
1. Numune	1492,65 MPa	1250 MPa	4,70%
2. Numune	1470,58 MPa	1245 MPa	4,60%
3. Numune	1377,03 MPa	1120 MPa	3,90%
Ortalama	1446,75 MPa	1205 MPa	4,40%

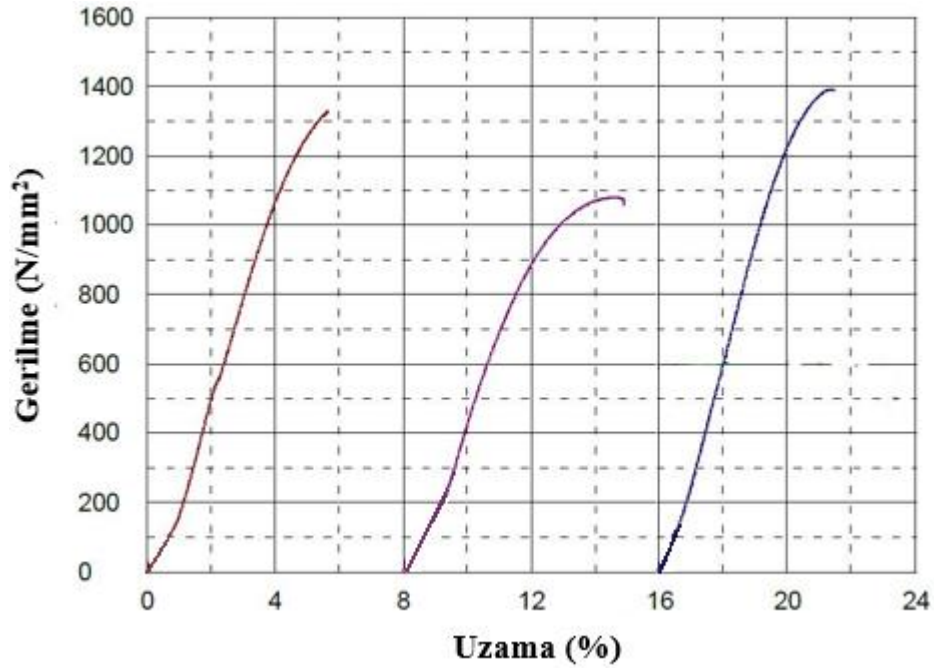
Ostenitleme süresi 10 dakikaya çıkarıldığında, mukavemet değerlerinde bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Ortalama olarak; çekme mukavemeti 1267,91 MPa, akma mukavemeti 1090 MPa ve uzama değeri %3,63 olarak elde edilmiştir.

10 dakika ostenitleme süresi sonrası elde edilen çekme değerleri göz önünde bulundurulduğunda, malzemen ostenitleme sıcaklığında uzun süre kalması sebebiyle tane boyutunda meydana gelen büyüme mukavemet değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Tane boyutu ile akma mukavemeti arasındaki ilişki Hall-Petch bağıntısı ile açıklanmaktadır (Bhansali ve ark. 2020).

$$\sigma_y = \sigma_0 + K_y / (d)^{1/2} \quad (4.1)$$

σ_y akma mukavemetini, σ_0 ve K_y malzeme sabitini, d tane boyutunu temsil etmektedir. Tane boyutunun küçülmesi akma mukavemetinin artmasına; büyümesi ise akma mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır (Bhansali ve ark. 2020).

10 dakika ostenitleme süresi sonunda elde edilen 1267,91 MPa çekme mukavemeti değerinin, sıcak şekillendirme prosesinde hedeflenen 1500 MPa çekme mukavemeti değerine bir miktar uzak olduğu görülmektedir (Liu ve ark. 2011a, Önal 2012, Güler 2013).

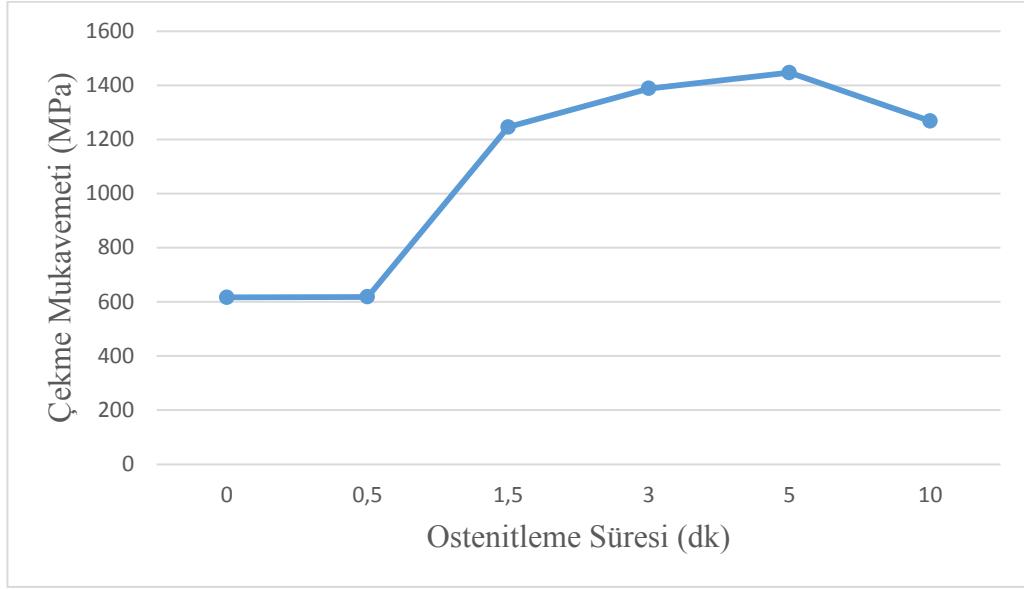


Şekil 4.12. 10 dakika ostenitleme süresine ait çekme testi sonuçları

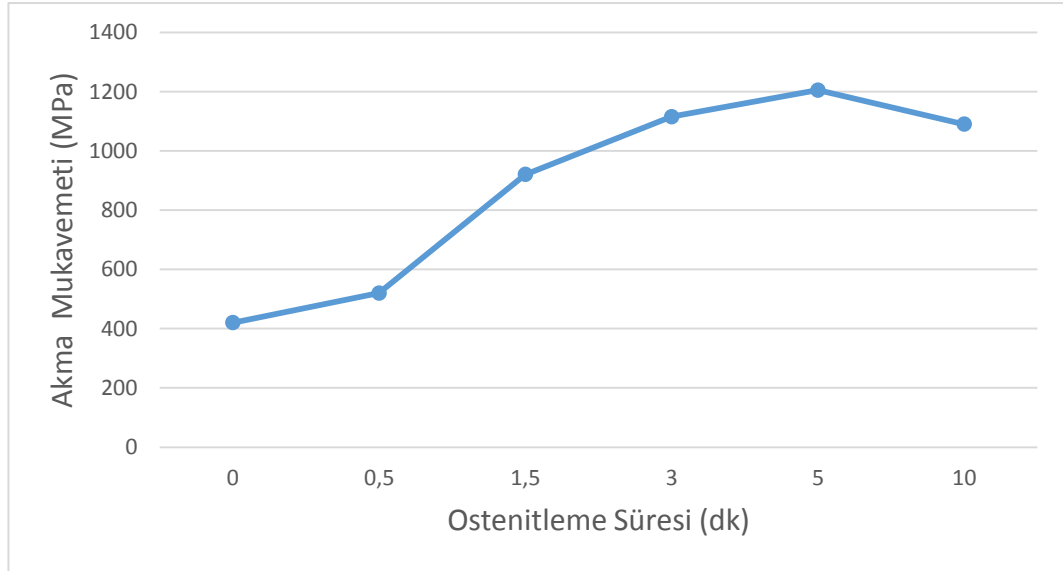
Çizelge 4.8. 10 dakika ostenitleme süresine ait çekme özellikleri

	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama
1. Numune	1330,10 MPa	1195 MPa	3,90%
2. Numune	1081,04 MPa	890 MPa	4,20%
3. Numune	1392,60 MPa	1185 MPa	2,78%
Ortalama	1267,91 MPa	1090 MPa	3,63%

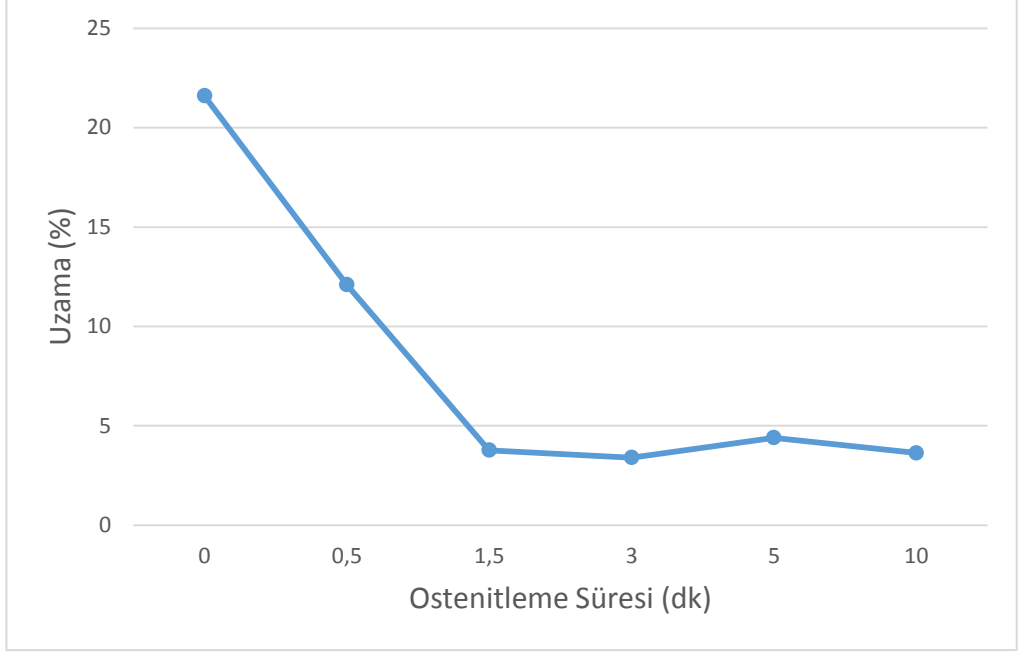
Çekme testi sonrası elde edilen değerler göz önüne alındığında, çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzama değerlerinde meydana gelen değişimler, grafiksel olarak sırasıyla Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.13. Ostenitleme süresi ve müteakiben su verme işlemi sonucunda çekme mukavemetinin değişimi



Şekil 4.14. Ostenitleme süresi ve müteakiben su verme işlemi sonucunda akma mukavemetinin değişimi



Şekil 4.15. Ostenitleme süresi ve müteakiben su verme işlemi sonucunda uzama miktarının değişimi

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, ultra yüksek dayanımlı Usibor 1500 olarak adlandırılan Al-Si kaplamalı 22MnB5 çeliği çekme özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi amacıyla ısıtılma işlem fırınında ostenitlenmiştir. Numuneler, 910 °C'de (ostenitleme sıcaklığı) 30 saniye, 90 saniye, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika fırında tutulup ostenitlenmiştir. Çekme özelliklerindeki değişimin incelenmesi amacıyla kullanılacak olan deney numuneleri, ısıtılma işlem sonrasında suda su verilerek sertleştirilmiştir. Su verme işlemi gerçekleştirilen numunelerin, ostenitleme sürelerine göre çekme özelliklerindeki değişimin incelenmesi amacıyla mikroyapı görüntülemeleri ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ardından çekme testleri ile birlikte mukavemet ve uzama değerlerindeki değişim incelenmiştir.

Sıcak şekillendirme işleminde, ısıtılma işlem sonrası su verme işleminin etkisiyle hızlı bir şekilde soğuması sağlanan numunelerin martensitik içyapıda olması beklenmektedir. Mikroyapı incelemesi sonucu, ısıtılma işlem fırınında 910 °C'de 30 saniye ostenitleme süresinde elde edilen içyapının tıpkı başlangıç malzemesinde olduğu gibi ferritik-perlitik yapıda olduğu görülmüştür. 90 saniye ve 3 dakika ostenitleme ve ardından hızlı soğutma işlemlerinde meydana gelen içyapılarda, ferritik ve perlitik yapı ile birlikte optik mikroskopun ayırma gücünün dışında kalan ara yapıların olduğu düşünülmektedir ki 90 saniye ve 3 dakika ostenitleme sürelerinde meydana gelen sertlik ve mukavemet artışı bu durumu doğrulamaktadır. Martensitik yapı 5 dakika ostenitleme ve hızlı soğutma işlemi ile birlikte elde edilmiştir. Aynı şekilde 10 dakika ostenitleme süresi ve hızlı soğutma işlemi sonrasında da martensitik içyapı elde edilmiştir.

198 HV civarında başlangıç sertliğine sahip olan malzemenin sertliği; 30 saniye sonunda 263 HV, 90 saniye sonunda 308 HV, 3 dakika sonunda 377 HV, 5 dakika sonunda 503 HV ve 10 dakika sonunda 476 HV olarak ölçülmüştür (ortalama olarak). Sertlik ölçüm sonuçları göz önüne alındığında ultra yüksek dayanımlı Usibor 1500 çeliği için, 910 °C'de ve 5 dakika ostenitleme süresinde sıcak şekillendirme prosesinde hedeflenen sertlik değerine ulaşıldığı görülmektedir.

Gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda çekme mukavemeti 617 MPa, akma mukavemeti 420 MPa ve uzama miktarı % 21,60 civarında olan Usibor 1500 çeliğinin, 30 saniye ostenitleme süresi sonrası çekme mukavemeti 618 MPa, akma mukavemeti 520 MPa ve uzama miktarı % 12,10 seviyelerinde elde edilmiştir. 30 saniye ostenitleme süresi sonucu elde edilen çekme özelliklerinin, başlangıç malzemesine yakın seviyede olduğu görülmektedir. 90 saniye ostenitleme süresi sonrası mukavemet değerlerinde belirgin bir artışa karşılık uzama değerinde belirgin bir düşüş görülerek, çekme mukavemeti 1246 MPa, akma mukavemeti 920 MPa ve uzama miktarı % 3,77 olarak elde edilmiştir. 3 dakikalık ostenitleme süresi sonucunda çekme mukavemeti 1388 MPa, akma mukavemeti 1115 MPa ve uzama miktarı % 3,40 olarak belirlenmiştir. Usibor 1500 çeliği, 5 dakikanın sonunda 1447 MPa çekme mukavemeti, 1205 MPa akma mukavemeti ve % 4,40 uzama miktarı gözlemlenmiştir. Sıcak şekillendirme prosesinde hedeflenen 1500 MPa çekme mukavemeti seviyesine 5 dakika ostenitleme süresi sonucunda ulaşmıştır. 10 dakika ostenitleme süresinde malzemenin ostenitleme sıcaklığında uzun süre kalmasından dolayı tane boyutunda meydana gelen büyüme sebebiyle çekme özelliklerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Çekme mukavemeti 1268 MPa, akma mukavemeti 1090 MPa ve uzama miktarı % 3,63 olarak belirlenmiştir.

5 dakika ostenitleme süresi sonrası elde edilen çekme özelliklerinin sıcak şekillendirme prosesi sonrası hedeflenen çekme özelliklerini karşıladığı yapılan çalışma sonucu gözlemlenmiştir. Seri imalat şartları göz önünde bulundurulduğunda; 910 °C'de 5 dakika ostenitleme süresinin hem maliyet hem de zaman açısından üretici firmalar için avantaj sağlayacağı görülmektedir.

KAYNAKLAR

Akbaş, F. 2011. 22MnB5 Metallerin Sıcak Şekillendirme Parametrelerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Anonim, 2012. Temel Benzerlik Teoremi. <http://bilimhayattir.blogspot.com/2012/05/temel-benzerlik-teoremi.html> (Erişim Tarihi: 26.02.2020).

Anonim, 2015. Demir Karbon Denge Diyagramı <https://marstanadam.blogspot.com/2015/07/demir-karbon-denge-diyagram.html> (Erişim Tarihi: 26.02.2020).

Aslan, Y., Karaağaç, İ. 2014. V Bükmede Geri Esneme Davranışları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Part:C, Tasarım Ve Teknoloji GU J Sci Part:C 2(3):255-263.

Aydın, M. 2017. Çelik malzemeler, AYBİTAK Bilim ve Teknolojiler Araştırma Geliştirme, İstanbul, 650 s.

Bardelcik, A., Salisbury, C. P., Winkler, S., Wells, M. A., Worswick, M. J. 2010. Effect of cooling rate on the high strain rate properties of boron steel. *International Journal of Impact Engineering*, 37 694–702.

Bariani P.F., Bruschi S., Ghiotti A., Turetta A. 2008. Testing Formability in The Hot Stamping of HSS. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 265–268.

Bhansali, K., Keche, A.J., Gogte, C.L., Chopra, S. 2020. Effect of grain size on Hall-Petch relationship during rolling process of reinforcement bar. *Materials Today: Proceedings* 26, 3173–3178.

Ece, R. E., Öztürk, F. 2010. Elektrik Akımı İle Isıtma Yönteminin Sıcak Sac Şekillendirme Uygulamalarında Kullanımının İncelenmesi. 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir.

El-Shennawy, M., Farahat, A. I., Masoud, M. I., Abdel-Aziz, A. I. 2016. Effect of Boron Content on Metallurgical and Mechanical Characteristics of Low Carbon Steel. *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, ISSN(P): 2319-2240; ISSN(E): 2319-2259 5, Issue 2, 1-14.

George, R., Bardelcik, A., Worswick, M.J. 2012. Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11): 2386-2399.

Golem, L., Cho, L., Speer, J. G., Findley, K. O. 2019. Influence of austenitizing parameters on microstructure and mechanical properties of Al-Si coated press hardened steel. *Materials and Design*, 172, 107707.

Güler, H. 2013. Investigation of Usibor 1500 Formability in a Hot Forming Operation. ISSN 1392-1320 *Material Science (Medziagotyra)*, 19, No. 2. 2013.

Güler, H. 2013a. Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Yüksek Sıcaklıktaki Şekillendirme Parametrelerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Güler, H., Ertan, R., Özcan, R. 2012. Influence of Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Boron-Alloyed Steels. *Materials Testing*, 9: 619-624.

Güler, M. A. 2015. Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Sıcak Şekillendirme Tekniğinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, cilt 56, sayı 660, s. 41-51.

Karbasian, H., Tekkaya, A. E. 2010. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology* 210, 2103–2118.

Kurumahmut, O. 2009. 22MnB5 Çelik Sacların Elektrikli Isıtma İle Sıcak Şekillendirilmesinin Deneysel Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Liu, H., Jin, X., Dong, H., Shi, J. 2011. Martensitic microstructural transformations from the hot stamping, quenching and partitioning process. *Materials Characterization*, 62(2):223-227.

Liu, H., Liu, W., Bao, J., Xing, Z., Song, B., Lei, C. 2011a. Numerical and Experimental Investigation into Hot Forming of Ultra High Strength Steel Sheet. *JMEPEG*, 20:1–10.

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.

Merklein, M., Lechler, J., Geiger, M. 2006a. Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1):229-232.

Mori, K., Maki, S., Tanaka, Y. 2005. Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(1): 209-212.

Önal, A. S. 2012. Sıcak Şekillendirme Prosesi. *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 53, sayı 626, s. 66-70.

Özcan, İ. 2009. 22MnB5 Çelik Sacların Elektrikli Isıtma İle Preste Sertleştirilme İşleminin Metalurjik Analizi ve Mekanik Davranışlara Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

So, H., Faßmann, D., Hoffmann, H., Golle, R., Schaper, M. 2012. An investigation of the blanking process of the quenched boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2): 437–449.

Steinbeiss, H., So, H., Michelitsch, T., Hoffmann, H. 2007. Method for optimizing the cooling design of hot stamping tools. *Production Engineering*, 1:149-155.

Turetta, A., Bruschi, S., Ghiotti, A. 2006. Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, 396–400.

Ünlü, B. S., Yılmaz, S. S. 2006. Bor ve Borlamanın Kullanım Alanları. *Mühendis ve Makine*, Cilt: 47, Sayı: 552.

Veit, R., Hofmann, H., Kolleck, R., Sikora, S. 2011. Investigation of the Phase Formation of AlSi-Coatings for Hot Stamping of Boron Alloyed Steel. *AIP Conference Proceedings* 1315, 769. <https://doi.org/10.1063/1.3552543>.

Yanagimoto, J., Oyamada, K. 2007. Mechanism of Springback-Free Bending of High-Strength Steel Sheets under Warm Forming Conditions. *Annals of the CIRP*, Vol. 56, 265-268. doi:10.1016/j.cirp.2007.05.099.

Yao, Y., Meng, J., Ma, L., Zhao, G., Wang, L. 2013. Study on Hot Stamping and Usibor 1500P. *Applied Mechanics and Materials*, 320, 419-425.

Zhang, P., Zhu, L., Xi, C., Luo, J. 2019. Study on Phase Transformation in Hot Stamping Process of Usibor 1500 High-Strength Steel. *Metals*, 9(10), 1119. <https://doi.org/10.3390/met9101119>.

Zhang, P., Zhu, L., Luo, S., Luo, J. 2019a. Hot stamping forming and finite element simulation of USIBOR 1500 high-strength steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 3187–3197.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Turan BABUROĞLU
Doğum Yeri ve Tarihi : Mersin / 1995
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Abdulkerim Bengi Anadolu Lisesi / 2013
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi / 2017
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi / 2020

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Martur Fompak International / 2018 – Halen
DTA Mühendislik / 2017 – 2018

İletişim (e-posta) : turanbaburoglu30@gmail.com