

**YÜKSEK SICAKLIKLARDA KULLANILAN
Fe-3Cr-W ÇELİĞİNİN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

Fatih AYDIN

**YÜKSEK SICAKLIKLARDA KULLANILAN Fe-3Cr-W ÇELİĞİNİN
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Fatih AYDIN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2014**

Fatih AYDIN tarafından hazırlanan "YÜKSEK SICAKLIKLARDA KULLANILAN Fe-3Cr-W ÇELİĞİNİN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yavuz SUN

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Mustafa ACARER

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 25/06/2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan: Doç. Dr. Bilge DEMİR (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)

Üye : Doç. Dr. Hayrettin AHLATCI (KBÜ)

Üye : Yrd.Doç. Dr. Fatih HAYAT (KBÜ)

İmzası



12/08/2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Fatih AYDIN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK SICAKLIKLARDA KULLANILAN Fe-3Cr-W ÇELİĞİNİN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Fatih AYDIN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Yavuz SUN

Prof. Dr. Mustafa ACARER

Haziran 2014, 71 sayfa

Bu çalışmada, 3Cr-W çeliği 6 farklı bileşim olarak dökülmüştür. Orijinal döküm parçalarına sıcak haddeme işlemi uygulanmıştır. Haddelenmiş parçalara 1100°C/1saat normalleştirme ve 660/710/760/810°C-1/2/4saat temperleme işlemi yapılmıştır. Haddelenmiş numunelerin mikroyapı karakterizasyonu optik ışık mikroskobu, EDS donanımlı SEM ve XRD cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için haddelenmiş parçalara, oda sıcaklığında ve 550°C'de çekme testi uygulanmıştır.

Darbe enerjisini belirlemek için -50°C ve 25°C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta Charpy darbe testleri yapılmıştır. Yapılan sertlik testleri sonucunda, sertlik değerleri genelde artan Larson-Miller parametresine göre azalmıştır. LMP 20660 ve 21660

iken sertlik değerleri artış göstermiştir. Mikroyapı karakterizasyonu sonucunda, görülen fazlar ferrit, beynit ve martenzittir. SEM ve XRD karakterizasyonuna göre, gözlenen karbürler ve fazlar, Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, $V(C_{0.5}N_{0.5})$, ferrit, martenzittir. Çekme testi sonucuna göre, en yüksek çekme dayanımı 1.numune ve $760^{\circ}C/1$ saat temperleme parametresinde elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık çekme testi sonuçlarında göre, en yüksek değer 6.numune için elde edilmiştir. Darbe testi sonuçlarına göre, en yüksek değer 6.numune $710^{\circ}C/2$ saat temperleme parametresinde elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Cr-W çeliği, mikroyapı ve mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 915.1.092

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE INVESTIGATION OF PRODUCIBILITY Fe-3Cr-W STEEL THAT USED ELEVATED TEMPERATURE AND IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES

Fatih AYDIN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Yavuz SUN

Prof. Dr. Mustafa ACARER

June 2014, 71 pages

In this study, 3Cr-W steel was casted as six different compositions. Hot rolling was applied to original cast specimens. Rolled specimens were normalized 1100°C for 1h and tempered 660/710/760/810°C for 1/2/4 h. Microstructure characterization of rolled and heat treated samples were carried with optical light microscope, SEM with EDS equipment and XRD device. To determine mechanical properties, tensile tests and charpy impact tests were applied. While tensile tests were carried out at room temperature and 550°C, Charpy impact tests were done at -50°C and room temperature.

As a result of the hardness tests, hardness values generally decreased with increasing LMP. Hardness values increased when LMP 20660 and LMP 21660. As a result of

microstructure characterization, ferrite, bainite and martensite phases were observed. According to SEM and XRD characterization, Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , $\text{V}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$, ferrite, martensite, carbides and phases were observed. The tensile tests result showed that the highest tensile strength for sixth specimen. As a result of Charpy impact test results, the highest impact energy was obtained for sixth specimen and $710^\circ\text{C}/2\text{h}$ tempering parameter.

Key Words : Cr-W steel, microstructure and mechanical properties.

Science Code : 915.1.092

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocalarım Prof. Dr. Mustafa ACARER ve Doç. Dr. Yavuz SUN'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deneysel alıőmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde alıőan öğretim üyesi hocalarım ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bugüne kadar maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	2
YÜKSEK SICAKLIKLARDA KULLANILAN ÇELİKLER.....	2
2.1. Cr-Mo ÇELİKLERİ	4
2.1.1. 0.5 Mo Çeliği.....	8
2.1.2. Cr-0,5Mo Çeliği.....	8
2.1.3. 2.25Cr-1Mo Çeliği	8
2.1.4. %5, 7 ve 9Cr' lu Çelikler.....	8
2.1.5. Cr-Mo-V Çelikleri	9
2.1.6. Modifiye Edilmiş Cr-Mo Çelikleri	10
2.1.7. Yeni Nesil 3Cr Çelikleri	12
2.2. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN Cr-Mo ÇELİKLERİNE ETKİSİ	16
2.2.1. Karbon ve Azot.....	16
2.2.2. Krom	16
2.2.3. Tungsten ve Molibden	17
2.2.4. Vanadyum, Niyobyum ve Tantalyum.....	17
2.2.5. Bor ve Fosfor	18

	<u>Sayfa</u>
2.2.6. Nikel, Manganez, Kobalt.....	18
2.3. KROM-MOLİBDEN ÇELİKLERİNDE OLUŞAN YAPILAR	19
2.3.1. M_3C	19
2.3.2. M_2C	19
2.3.3. M_7C_3	19
2.3.4. $M_{23}C_6$	20
2.3.5. M_6C	20
2.3.6. MX.....	20
2.4. Cr-Mo ÇELİKLERİNİN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE UYGULANAN İŞLEMLER	21
2.4.1. Çelik Ergitme İşleminin Tarihi ve Isıya Dayanıklı Çeliklerin Saflaştırılması.....	21
2.4.2. Literatürde Bazı Cr-Mo ve Cr-W Çelikleri İçin Uygulanan İşlemler.....	22
 BÖLÜM 3	 25
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
3.1. DÖKÜM ÇALIŞMALARI.....	25
3.1.1. Mum Model ve Kalıbın Hazırlanması	25
3.1.2. Alaşımlama İşlemi	26
3.1.3. Ergitme ve Döküm İşlemi.....	26
3.2. ISIL İŞLEM.....	28
3.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU	30
3.3.1. Optik Mikroskop Çalışması.....	30
3.3.2. SEM Çalışması	30
3.3.3. XRD Çalışması	31
3.4. MEKANİK ÖZELLİKLERİN KARAKTERİZASYONU	32
3.4.1. Sertlik Testi.....	32
3.4.2. Çekme Testi	32
3.4.3. Yüksek Sıcaklık Çekme Testi.....	33
3.4.4. Darbe Testi.....	34
 BÖLÜM 4.	 35
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	35

	<u>Sayfa</u>
4.1. DÖKÜM SONUÇLARI	35
4.2. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU	35
4.3. SERTLİK TESTİ.....	47
4.4. ÇEKME TESTİ	48
4.5. YÜKSEK SICAKLIK ÇEKME TESTİ	50
4.6. DARBE TESTİ.....	51
4.7. SEM KARAKTERİZASYONU.....	53
4.8. XRD KARAKTERİZASYONU	61
BÖLÜM 5.	67
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Enerji ve petrokimya tesislerinde Cr-Mo çeliklerinin kullanıldığı bazı yerler	7
Şekil 2.2. Çeşitli çeliklerin sıcaklığın 10^5 saatteki sürünme-kopma mukavemetinin değişimine etkisi	9
Şekil 2.3. Bazı çeliklerin oda sıcaklığı ve kısa dönem yüksek sıcaklık çekme ve akma mukavemetleri	9
Şekil 2.4. 3Cr-1.5Mo çeliği için CCT diyagramı	10
Şekil 2.5. $1050^{\circ}\text{C}/0.5$ saat ostenitleme işlemi sonucu 9Cr-2WV ve 9Cr-2WVTa çeliğinin mikroyapısı	11
Şekil 2.6. Grade 24 çeliğinin mikroyapısı	11
Şekil 2.7. 2.25Cr-1Mo ve 2.25Cr-1Mo-V-Ti-B çeliklerinin CCT diyagramı	12
Şekil 2.8. Yeni 3Cr-3WV ve 3Cr-3WVTa çeliklerinin normalleştirilmiş ve normalleştirilmiş-temperlenmiş halde normalleştirilmiş ve temperlenmiş T23 ve T24 çelikleriyle karşılaştırılması	13
Şekil 2.9. Normalleştirilmiş ve normalleştirilmiş-temperlenmiş şartlarda sürünme kopma eğrilerinin 600°C 'de T23, T24, ve T91 çelikleriyle ve 650°C 'de T91 ile karşılaştırılması	14
Şekil 2.10. Normalleştirilmiş ve normalleştirilmiş-temperlenmiş durumdaki 3Cr-3WVTa çeliğinin T23 ve T22 çelikleriyle Larson-Miller parametrelerinin karşılaştırılması	14
Şekil 2.11. Tantalyum içeren çelikteki tane incelmeleri ve beynitik yapının 3Cr-3WV ve 3Cr-3WVTa çeliklerindeki optik mikroyapısı	15
Şekil 2.12. 3Cr-3WV ve 3Cr-3WVTa çelikleri için sürünme mukavemetini sağlayan ince iğnemsiz partiküller	15
Şekil 2.13. 3Cr-3WV ve 3Cr-3WVTa çeliklerinin 650°C 83 MPa'da sürünme-kopma testleri sonucu yapıları	15
Şekil 2.14. Grade A ve Grade B için CCT diyagramı	16
Şekil 2.15. Çelik üretim proseslerinin ve çelikteki S ve P oranlarına etkisinin tarihsel gelişimi	21
Şekil 3.1. Döküm işleminde kalıbı oluşturmak için kullanılan mum model ve kalıbı	25
Şekil 3.2. Kullanılacak olan döküm kalıbı	26
Şekil 3.3. Alaşımlama işleminde kullanılan bazı alaşım elementleri	27

Şekil 3.4. Alaşım ve ergitme işleminin yapıldığı induksiyon ocağı ve döküm öncesi kalıbın ön ısıtma yapıldığı fırın	27
Şekil 3.5. Döküm yapıldıktan sonra kalıbın üstünün örtülmesi ve döküm sonrası görüntüsü	28
Şekil 3.6. Döküm kalıbının bozulmasıyla elde edilen metalin görüntüsü.....	28
Şekil 3.7. Isıl işlemlerin yapıldığı Magma Therm marka sıcaklık kontrollü elektrik direnç fırını	29
Şekil 3.8. Numunelere uygulanan ısıl işlem çevrimi	29
Şekil 3.9. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik ışık mikroskobu	30
Şekil 3.10. Carl-Zeiss Ultra Plus SEM cihazı	31
Şekil 3.11. X-ray çekimlerinin yapıldığı Rigaku Ultima IV XRD cihazı.....	31
Şekil 3.12. Schimadzu HMV sertlik cihazı	32
Şekil 3.13. Schimadzu çekme cihazı.....	33
Şekil 3.14. Yüksek sıcaklık testlerinin yapıldığı Zwick/Roell çekme cihazı.....	33
Şekil 3.15. Darbe testlerinin yapıldığı Zwick/Roell darbe cihazı	34
Şekil 4.1. 1.ve 2.numunenin 1100 ⁰ C/1s normalleştirme ve 660/710/760/810 ⁰ C 1-2-4 s temperleme işlemi sonrası mikroyapıları.....	36
Şekil 4.2. 3.ve 4.numunenin 1100 ⁰ C/1s normalleştirme ve 660/710/760/810 ⁰ C 1-2-4 s temperleme işlemi sonrası mikroyapıları.....	39
Şekil 4.3. 5.ve 6.numunenin 1100 ⁰ C/1s normalleştirme ve 660/710/760/810 ⁰ C-1/2/4 s temperleme işlemi sonrası mikroyapıları.....	42
Şekil 4.4. 4.numunenin renkli metalografiyle elde edilen mikroyapıları.....	46
Şekil 4.5. 4.numuneye uygulanan 810 ⁰ C/4s temperleme sonucu elde edilen mikroyapıları.....	47
Şekil 4.6. Numunelere uygulanan 1100 ⁰ C/1 s normalleştirme işleminden sonra değişik süre ve sıcaklıklardaki temperleme işlemi sonundaki sertlik grafiği.....	48
Şekil 4.7. Numunelere uygulanan 1100 ⁰ C/1 s normalleştirme işleminden sonra değişik süre ve sıcaklıklardaki temperleme işlemi sonundaki çekme mukavemeti grafiği	50
Şekil 4.8. 550 ⁰ C’de uygulanan çekme testi sonucu elde edilen çekme mukavemeti grafiği	51
Şekil 4.9. Numunelere 1100 ⁰ C/1s normalleştirme ve değişik sıcaklık ve sürelerdeki temperleme işlemi sonrası -50 ⁰ C’de uygulanan darbe testi enerjileri grafiği.....	52
Şekil 4.10. Numunelere 1100 ⁰ C/1s normalleştirme ve değişik sıcaklık ve sürelerdeki temperleme işlemi sonrası 25 ⁰ C’ de uygulanan darbe testi enerjileri grafiği.....	53

Şekil 4.11. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 660°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü	54
Şekil 4.12. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 660°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	55
Şekil 4.13. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü.....	55
Şekil 4.14. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	56
Şekil 4.15. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü.....	57
Şekil 4.16. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	58
Şekil 4.17. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü.....	58
Şekil 4.18. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	59
Şekil 4.19. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü.....	60
Şekil 4.20. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	60
Şekil 4.21. 1.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ışını difraksiyon örneği	62
Şekil 4.22. 2.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ışını difraksiyon örneği	63
Şekil 4.23. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ışını difraksiyon örneği	63
Şekil 4.24. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ışını difraksiyon örneği	64
Şekil 4.25. 5.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ışını difraksiyon örneği	65
Şekil 4.26. 6.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ışını difraksiyon örneği	65
Şekil 4.27. Numunelerin toplu halde X-ışını difraksiyon örnekleri.....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Enerji santrallerinde kullanılan Ferritik/Martenzitik çeliklerin tarihsel gelişimi.....	2
Çizelge 2.2. Literatürde bazı Cr-Mo ve Cr-W çeliklerinin kimyasal bileşimleri	6
Çizelge 2.3. Literatürde bazı Cr-Mo ve Cr-W çeliklerine uygulanan ısı işlemler ...	23
Çizelge 3.1. Üretilmesi planlanan çeliğin kimyasal bileşimi.....	26
Çizelge 4.1. Dökümü yapılan çeliklerin kimyasal bileşimleri	35
Çizelge 4.2. Numunelere 1100°C/1saat normalleştirme işleminden sonra değişik süre ve sıcaklıklardaki temperleme işlemi sonundaki LMP'leri ve sertlik değerleri	47
Çizelge 4.3. Numunelere 1100°C/1saat normalleştirme ve ardından değişik sıcaklık ve sürelerde temperleme işlemi uygulanmış numunelerin akma, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri	49
Çizelge 4.4. 550°C'de uygulanan yüksek sıcaklık çekme testi sonucu elde edilen akma ve çekme mukavemeti değerleri.....	51
Çizelge 4.5. Numunelere 1100°C/1saat normalleştirme ve değişik sıcaklık ve sürelerdeki temperleme işlemi sonrasında uygulanan darbe testi enerjileri.....	52
Çizelge 4.6. Numunelere yapılan X-ışını çekimleri sonucu elde edilen fazlar.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Cr : Krom

Mo : Molibden

W : Tungsten

V : Vanadyum

Nb : Niobyum

Ti : Titanyum

Ta : Tantalum

N : Azot

Co : Kobalt

B : Bor

C : Karbon

Mn : Manganez

P : Fosfor

S : Kükürt

Si : Silisyum

Sn : Kalay

As : Arsenik

Sb : Antimon

J : Joule

s : saat

KISALTMALAR

- SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
- EDS : Electron Diffraction Scanning (Elektron Difraksiyon Taraması)
- TEM : Transmission Electron Microscope (Geçirimli Elektron Mikroskobu)
- PWHT : Post Weld Heat Treatment (Kaynak sonrası ısıl işlem)
- XRD : X-Ray Diffractometer (X-ışını Difraktometresi)
- ORNL : Oak Ridge National Laboratory
- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme Testleri Birliği)
- LMP : Larson Miller Parametresi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Petrol rafineleri, kimya endüstrisi ve elektrik santrallerinin imalatında Krom-Molibden alaşımlı (Cr-Mo) çelikler kullanılmaktadır. Düşük termal genleşme katsayısına sahip bu çelikler, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışarak daha yüksek sürünme ve korozyon direnci için tasarlanmaktadır. Bu çeliklerin özellikleri Cr, Mo, W, V, Ti ve Nb gibi güçlü karbür yapıcı elementlerin ilavesi ile kontrol edilir. Bütün metalik malzemelerde olduğu gibi, uzun süre servis sıcaklığında gerilmeye maruz kalması ile Cr-Mo çeliklerinin mekanik özellikleri bozunma sergiler. Yüksek sıcaklık uygulamalarındaki bu çeliklerin özelliklerindeki ana bozunma sebebi sürünme deformasyonu ile ilişkilidir.

CrMo ya da CrW çelikleri katma değeri yüksek olan malzemelerdir. Ülkemizde kendi kaynaklarımızla bu çelikleri üretebileceğimiz halde teknolojik bilgi eksikliği ve pazar payının öngörülememesi nedeniyle üretilmemektedir ve katma değeri yüksek olan diğer birçok ürün gibi bu ürünlerde de dışa bağımlılığımız söz konusudur. Bu çalışmada, yüksek katma değere sahip yeni nesil CrMo (CrW) çeliklerinden, uluslararası pazarda bulunan benzerlerine alternatif olabilecek daha yüksek sürünme ve darbe dayanımına sahip, özellikle nükleer santrallerde daha güvenilir olarak kullanılacak 3CrW çeliği üretilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, yeni nesil CrMo çeliği olarak bilinen ve yeni geliştirilen 3Cr-W çeliğinin ülkemizde üretilebilirliği incelenmiştir. Çalışmada 6 farklı döküm işlemi yapılmıştır. Döküm sonrası parçalara sıcak haddeleme ve ısıl işlem uygulanarak mikroyapı ve mekanik özelliklerin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2

YÜKSEK SICAKLIKLARDA KULLANILAN ÇELİKLER

Cr-Mo çelikleri ilk olarak 1920'lerde geleneksel enerji üretim tesislerinde kullanılmıştır. Bileşimi Fe-2.25Cr-1Mo-0.3Si-0.45Mn-0.12C'dan oluşan 2.25Cr-1Mo'li çelik ASTM tarafından Grade 22 olarak belirlenmiştir. 1940'larda tanınan çelik günümüzde hala geniş bir kullanım alanına sahiptir. Grade 22 ile beraber 9Cr-1Mo (T9) ve Fe-9.0Cr-1.0Mo-0.6Si-0.45Mn-0.12C bileşimi geliştirilmiştir. Daha sonra fosil yakıtlı enerji üretim tesislerinde, CO₂ emisyonunu azaltmak ve yüksek verim elde etmek için bu çeliklerin kullanılacağı çalışma sıcaklığı ve basıncı sürekli yükseltilmiştir. Bu gereksinim, yüksek sıcaklığa dayanıklılığı artırılmış farklı kalitelerde çelik türlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yüksek sıcaklıklarda çalışan CrMo çeliklerindeki bu gelişim Çizelge 2.1'de verilmiştir [1,2].

Çizelge 2.1. Enerji santrallerinde kullanılan Ferritik/Martenzitik çeliklerdeki tarihsel gelişim [1].

Nesil	Yıllar	Çelik modifikasyonları	600°C'de 10 ⁵ Saatteki Kopma Dayanımı(Mpa)	Çelikler	Max. Çalışma Sıcaklığı (°C)
0	1940-60	-	40	T22, T9	520-538
1	1960-70	Cr-Mo çeliklerine Mo, Nb, V ilavesi	60	EM12, HCM9M, HT9, HT91	565
2	1970-85	C, Nb, V, N'un optimizasyonu	100	HCM12, T91, HCM2S	593
3	1985-95	W'nin Mo ile kısmi yerdeğişimi ve Cu, B ilavesi	140	NF616, E911, HCM12A	620
4	Gelecekte	W'nin artırılması ve Co ilavesi	180	NF12, SAVE12	650

0. nesil çelikler; korozyon ve oksidasyon direncini geliştirmek için %9-12 Cr içermektedir. 1.nesilde kromla beraber, karbür yapıcı elementler olan V ve Nb, T22 ve T9 bileşimine çökelme sertleşmesi sağlamak için eklenmiştir. Bazı durumlarda; katı eriyik sertleşmesi için Mo ile yapıya W'de eklenmiştir. Bu çelikler 1960'larda uygulamaya alınmıştır [1].

Genellikle; 9 ve 12% Cr'lu çelikler ostenit ve ferriti dengelemek ve ostenitleme sırasında %100 ostenit ve normalleştirme ya da ostenitlemeden sonra su verme ya da normalleştirme işlemiyle %100 martenzit oluşturulması amaçlanmıştır. Fakat bazı durumlarda %1'den daha az delta ferrit , özellikle 12% Cr'lu çeliklerde kalabilmektedir [1].

İkinci jenerasyon çelikler; 1970-1985 yıllarında geliştirilmiştir, C, Nb ve V ile optimize edilmiş, N eklenmiştir (0.03-0.05%). Max. çalışma sıcaklığı 593°C'ye arttırılmıştır. Bu çelikler modifiye edilmiş 9Cr-1Mo, T91 ve HCM12 çelikleridir. Bu çelikler duplex yapılı çelikler olup yapısında temperlenmiş martenzit ve δ -ferrit içermektedir. T91, enerji üretim tesislerinde çok geniş miktarda hala kullanılmaktadır [1].

Üçüncü jenerasyon çelikler, temelde önceki jenerasyon çeliklerde, W ile Mo'nin yer değiştirilmesiyle üretilen çeliklerdir [1].

Son olarak, ileri jenerasyon çelikleri günümüzde geliştirilmektedir. Çalışma sıcaklığının 650 °C'ye ulaşılması için çalışılmaktadır. Önceki jenerasyon çeliklerden farklı olarak %3 Co kullanılmış ve 10⁵ saat sürünme kopma mukavemeti 600 °C'de 180 MPa olarak elde edilmiştir [1].

2000'li yıllarda Oak Ridge National Laboratuvarı'nda 3CrW çeliği geliştirilmiş ve istenen özellikler arasında daha yüksek sürünme mukavemeti, ekipman ağırlıklarının önemli ölçüde azaltılması, darbe özelliklerinin iyileştirilmesi ve Post Weld Heat Treatment'ı gerektirmemesi yer almaktadır [3].

2.1. Cr-Mo ÇELİKLERİ

Krom-Molibden çelikleri, petrol rafineleri, kimya endüstrisi, enerji santralleri için ısı değiştiriciler, ısıtma kazanları, basınçlı kazanlar, hidrokraking tüpleri ve boru imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çeliklerin en önemli avantajı krom ve molibden ilavesi ile geliştirilmiş sürünme dayanımı ve krom ilavesiyle arttırılmış korozyon direncine sahip olmalarıdır. Bu çelikler yüksek sıcaklık sürünmesine, temper gevrekliğine, hidrojen korozyonu ve gevrekliğine dirençlidir. Krom-molibden çeliklerinin sürünme dayanımı; ferrit matristeki karbon, molibden ve kromun oluşturduğu katı eriyik sertleşmesi ve karbürlerin neden olduğu çökeltme sertleşmesinden kaynaklanmaktadır [4-6].

Krom-Molibden çelikleri çeşitli şekillerde kullanılabilir. Kazan boruları tavllanmış halde , borular normalleştirilmiş ve temperlenmiş koşullarda kullanılmaktadır. Bu işlemler ile, krom-molibden çeliklerinin mikroyapıları, ferrit-perlitik yapıdan ferrit-beynit yapıya kadar değişebilmektedir. Beynitik yapılar, yüksek gerilme altında ve kısa zaman koşullarında daha iyi sürünme dayanımına sahiptir fakat yüksek sıcaklıklarda perlitik yapılardan daha hızlı bozulurlar. Sonuç olarak, ferrit-perlit malzeme, orta vadeli daha iyi ve düşük gerilme sürünme dayanımına sahiptir [4].

70'li yıllardan itibaren yüksek kromlu (9-12 %Cr) ferritik/martenzitik çelikler geliştirilmeye başlanmış, yüksek sıcaklık ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Bu çelikler ilk olarak sıvı metal reaktörlerinde iç bölge uygulamaları için düşünölmüştür. Ferritik çelikler ayrıca ticari hafif su reaktörlerinin basınç kaplarında bugün bile kullanılmaktadır. Basınç kapları ve diğer basınç ögeleri iç kısımda yüksek sıcaklıkta çalışamayacağı için, daha düşük alaşımlı çeliklerin kullanılması mümkün olmaktadır [1].

řu anki jenerasyon ticari basınçlı su reaktörlerinde, basınç kapları düşük alaşımlı çelikten yapılmaktadır. Reaktör basınç kapları 200-300 mm kalınlıktadır. Bir çoğu plakalardan üretilmiş olup bu da açılı ve çevresel kalın bölgelerde kaynak gerektirmektedir. Aynı dizayn basıncında, %50 daha yüksek mukavemetli çelik

kalınlıkta %30'dan daha fazla azalmaya izin verilebilmektedir. Bir elik fabrikasında, daha ince kesitler daha küçük ingotların dökümüne izin vermektedir; daha ince plakalar ya da dövme ürünleri ısıl işlem ve sıcak haddelemeye ya da dövmeye imkan vermekte ve bu da son üründe daha üniform kompozisyon elde edilmesini sağlamaktadır. Diğer yandan, geniş ingotların aynı boyutu daha geniş çaplı dövme ürünleri olsa bile aynı Jenerasyon IV reaktörleri için üretilmektedir [1].

Üretilen plakalara ısıl işlem yapılmak zorundadır. Daha ince plakalar ve dövme ürünlerinin ısıl işlemi, daha kolaydır (daha ekonomik) ve daha ince kesitler daha hızlı soğurlar, bu da mikroyapıda daha üniform bir yapı sağlamaktadır. Tesis retiminde, daha ince kesitler taşıma, kaynak, kaynak sonrası ısıl işlem, muayene ve gemi taşımacılığında avantaj sağlamaktadır [1].

2005'te ORNL tarafından yapılan bir projede, 3Cr-W eliği üretilmiştir ve sağlanan avantajlar; fabrika bileşenlerinin ağırlığında yaklaşık %25-50 azalmayla enerji kullanımının azalması, kaynakta kullanılan enerjide azalma, PWHT işleminin ortadan kaldırılmasıyla enerji tasarrufudur [3].

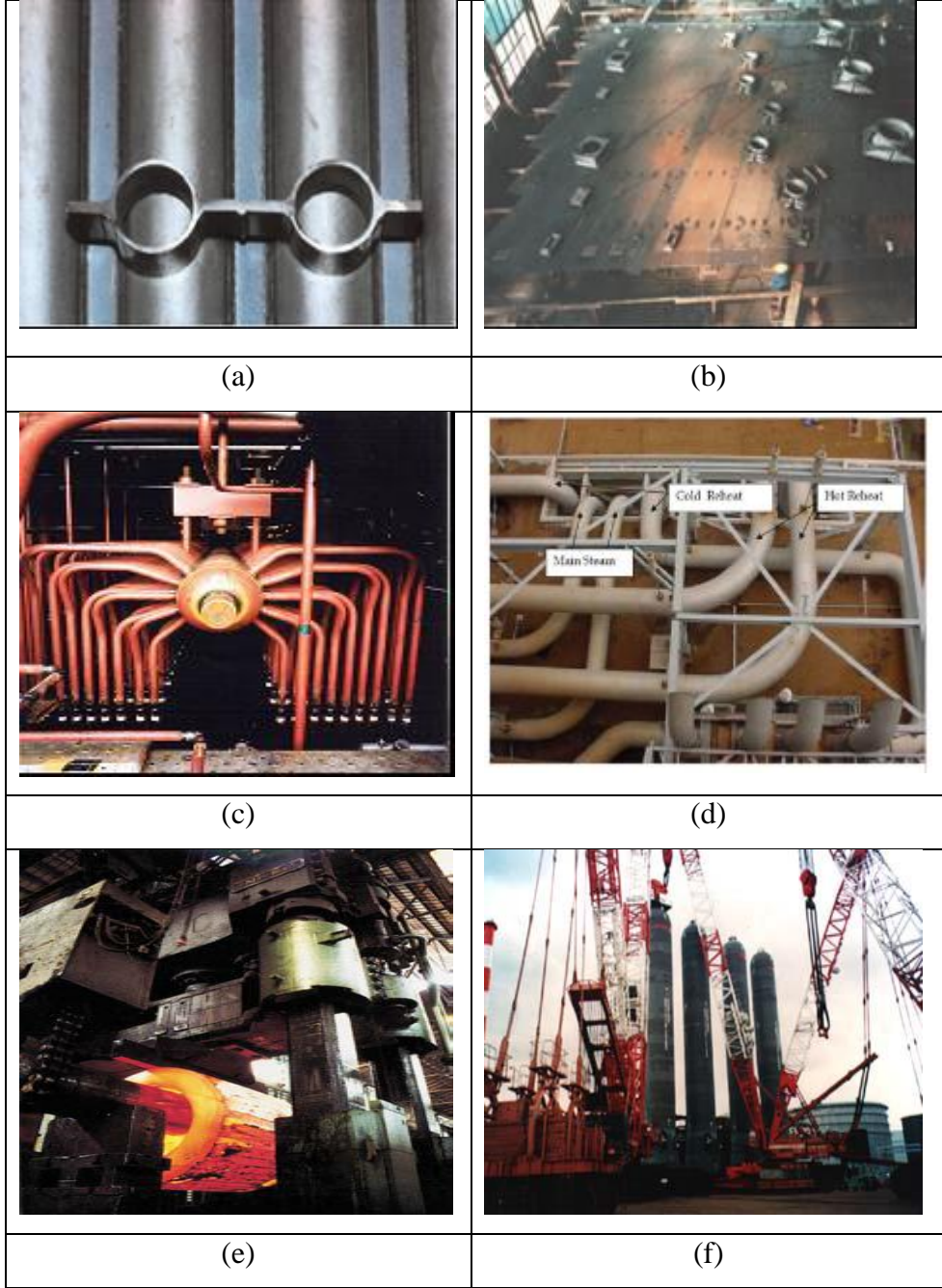
Literatürdeki bazı Cr-Mo ve Cr-W eliklerinin kimyasal bileşimleri izelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Literatürdeki bazı Cr-Mo ve Cr-W çeliklerinin kimyasal bileşimleri.

İSİM	Ref	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ti	Nb	W	B	Ta	N
T/P 22	[9]	0.05- 0.15	0.3- 0.6	0.5	1.9- 2.6	0.87 - 1.13	-	-	-	-	-	-	
T/P 23	[9]	0.04- 0.10	0.10 - 0.60	0.5	1.90 - 2.60	0.05 - 0.30	0.2	-	0.02- 0.08	1.45 - 1.75	0.000 5- 0.006	-	
T/P 24	[9]	0.05- 0.10	0.3- 0.70	0.15 - 0.45	2.2- 2.6	0.9- 1.1	0.2- 0.3	0.0 6- 0.1	0.07	-	0.001 5- 0.007	-	
T9	[1]	0.12	0.45	0.6	9.0	1.0	-	-	-	-	-	-	
T91	[1]	0.10	0.40	0.4	9.0	1.0	0.2	-	0.08	-	-	-	0.0 5
T92	[1]	0.07	0.45	0.06	9.0	0.5	0.2	-	0.05	1.8	0.004	-	0.0 6
3Cr- 3WV	[2]	0.1	0.39	0.16	3.04	-	0.21	-	0.00 3	3.05	-	-	
3Cr- 3WV Ta	[2]	0.1	0.41	0.16	3.02	-	0.21	-	0.00 4	3.07	-	0.0 9	
Grade A	[3]	0.08- 0.12	0.25 - 0.45	0.15 -0.4	2.8- 3.2	0.65 - 0.85	0.2- 0.3	-	-	1.35 - 1.65	0.001	-	
Grade B	[3]	0.08- 0.12	0.25 - 0.45	0.15 -0.4	2.8- 3.2	0.65 - 0.85	0.2- 0.3	-	-	1.35 - 1.65	0.001	0.0 7- 0.1 3	
3Cr- 2WM oV	[10]	0.10	0.49	0.26	2.99	0.48	0.24	-	0.00 2	2.02	0.001	0.0 01	
3Cr- 3WV TaB	[10]	0.10	0.50	0.23	3.35	0.01	0.25	0.0 05	0.00 1	2.91	0.004	0.1	
3Cr- 3WV Nb	[10]	0.095	0.53	0.01	2.90	0.01	0.21	0.0 02	0.04 5	2.24	0.001	0.0 1	

Şekil 2.1’de krom-molibden çeliklerinin kullanıldığı yerlere örnekler gösterilmektedir. Şekil 2.1(a) çeşitli tüpleri, (b) kazan duvarları, (c) ısı değiştiriciler

(d) buhar hatları, (e) kalın et kalınlığındaki duvarlar için dövülmüş parçalar, (f) petrokimya enerji santrali reaktörleri için basınç tankları görülmektedir.



Şekil 2.1. Enerji ve petrokimya tesislerinde Cr-Mo çeliklerinin kullanıldığı bazı yerler a) çeşitli tüpler, b) kazan duvarları, c) ısı değiştirciler d) buhar hatları e) dövülmüş parçalar f) basınç tankları [8].

Krom-molibden çelikleri 0,5Mo'li çelik, 1Cr-0,5Mo çeliği, 2,25Cr-1,0Mo çeliği, %5, 7 ve 9 Cr'lu çelikler, Krom-Molibden-Vanadyum çelikleri ve modifiye edilmiş Krom-Molibden çelikleri olarak gruplandırılır [4].

2.1.1. 0.5 Mo Çeliği

0,5Mo'li çelik, %0,15 C içerir ve 455 °C'ye kadar boru ve kızdırıcı tüp imalatında kullanılır. Bu çeliklerin daha yüksek sıcaklıklarda kullanımına grafitleşme probleminin dolayısı son verilmiştir [4].

2.1.2. Cr-0,5Mo Çeliği

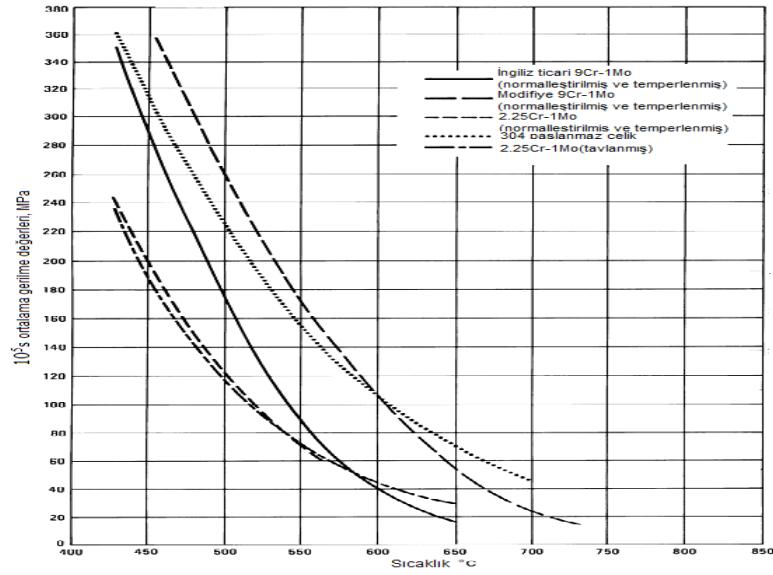
1Cr-0,5Mo çeliği, 510 °C veya 540 °C servis ortamında çalışacak borular, krakır ve kazan tüplerinin imalatı için kullanılmaktadır. Buna benzer olarak 1,25Cr-0,5Mo çeliği 590 °C'ye kadar kullanılır ve 1Cr-0,5Mo çeliğiyle karşılaştırılabilir gerilme-kopma ve sürünme özelliklerine sahiptir [4].

2.1.3. 2.25Cr-1Mo çeliği

2,25Cr-1,0Mo çeliği, yukarıda bahsedilen çeliklerden daha iyi oksidasyon ve sürünme direncine sahiptir. Hidrojen içermeyen ortamlarda 650 °C'ye kadar, hidrojen içeren ortamlarda ise 480 °C'ye kadar kullanılır [4].

2.1.4. %5, 7 ve 9Cr 'lu Çelikler

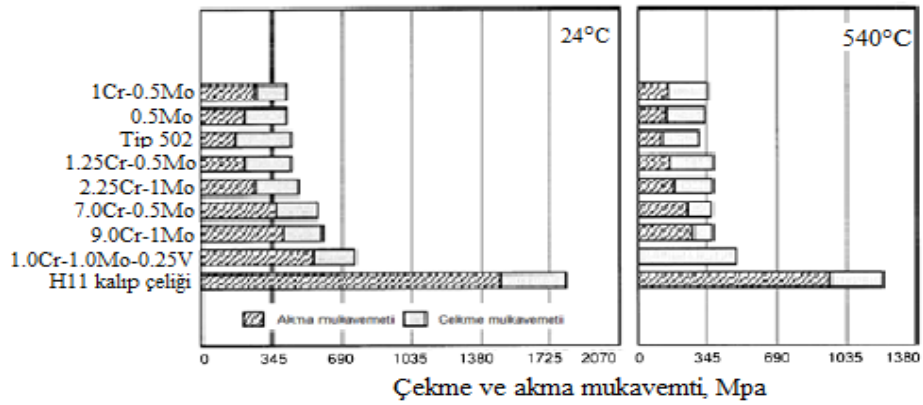
%5, 7 ve 9 Cr'lu çelikler, düşük krom içeren çeliklere göre daha düşük stres-kopma ve sürünme dayanımına sahiptir çünkü yüksek sıcaklıklarda mukavemet kromun artmasıyla düşmektedir. Bu durum ısıl işleme bağlıdır. Şekil 2.2.'de bazı çeliklerin sıcaklığa bağlı olarak sürünme-kopma mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Bu çeliklerin avantajı krom miktarının artmasıyla artan oksidasyon direncidir [4].



Şekil 2.2. Çeşitli çeliklerin sıcaklığın 10^5 saatteki sürünme-kopma mukavemetinin değişimine etkisi [4].

2.1.5. Cr-Mo-V Çelikleri

Krom-Molibden-Vanadyum çelikleri, daha yüksek karbon içerir (0.28-0.33% ve 0.40-0.50%) ve bu çelikler normalleştirilmiş ve temperlenmiş ya da su verilmiş ve temperlenmiş halde kullanılır. Yüksek akma ve sürünme dayanımından dolayı bu çelikler civata, gaz türbinlerindeki kompresör tekerleri, buhar türbin pervaneleri, ve 540 °C'ye kadar çalışacak diğer parçaların imalatında kullanılır. En yaygın düşük alaşım bileşimi %1Cr, %1Mo ve % 0,25V içermektedir [4].

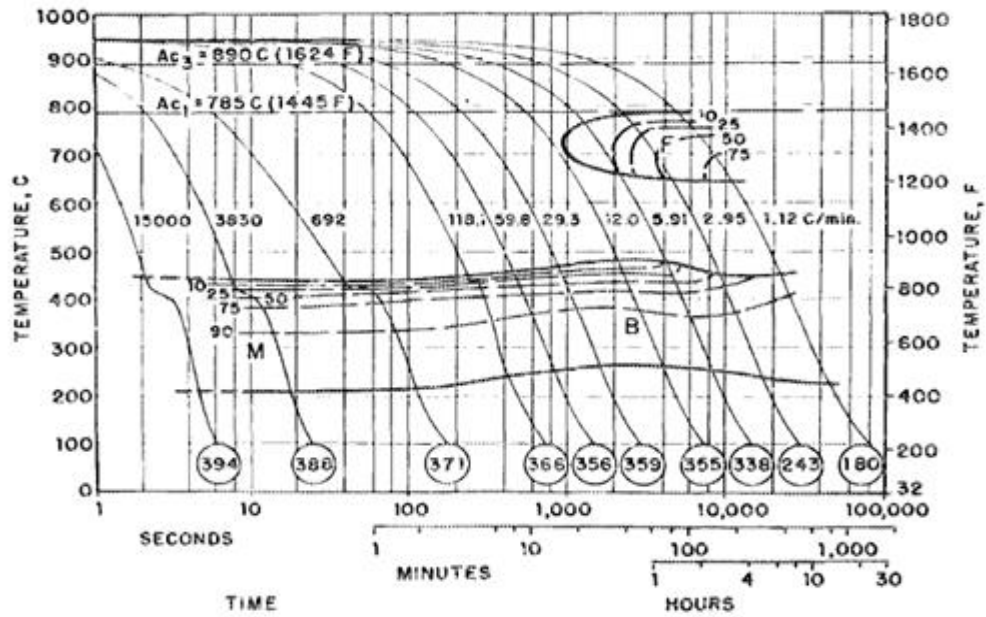


Şekil 2.3. Bazı çeliklerin oda sıcaklığı ve kısa dönem yüksek sıcaklık çekme ve akma mukavemetleri [4].

2.1.6. Modifiye Edilmiş Cr-Mo Çelikleri

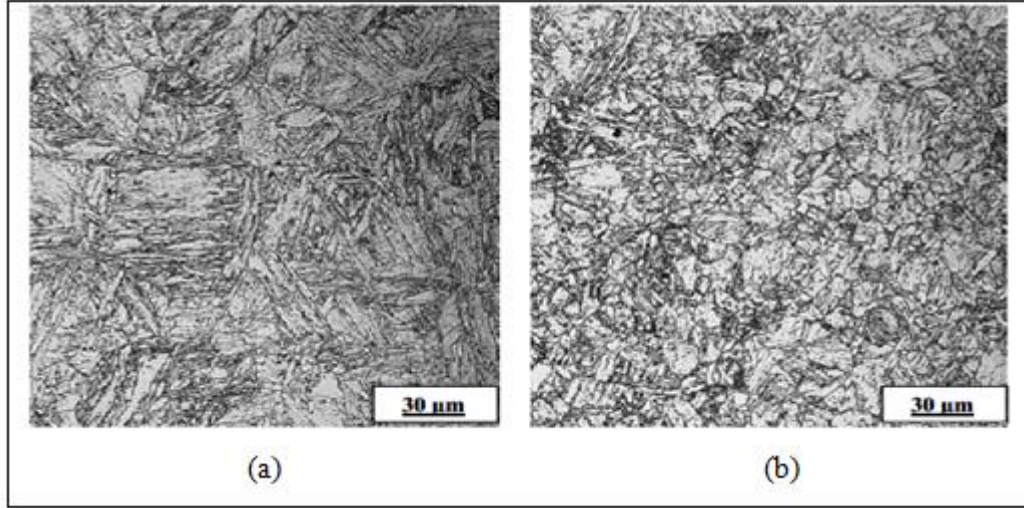
Bu çeliklere duyulan ihtiyaç, verimliliği artırmak için daha yüksek sıcaklıklarda kullanılacak olmasıyla başlamıştır. Modifiye edilmiş krom-molibden alaşımları V, Nb, Ti, B gibi mikroalaşım elementleri içermektedir. Bu çelikler 3'e ayrılabilir [4].

3Cr-1Mo: V, Ti ve B ile modifiye edilmiştir. Bu çelik 455 °C'ye kadar kullanılabilir, tamamen sertleşebilir, hidrojen atağına karşı dirençlidir [4].



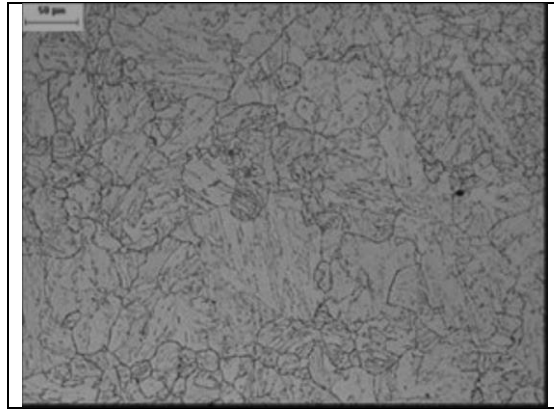
Şekil 2.4. 3Cr-1.5Mo çeliği için CCT diyagramı [7].

9Cr-1Mo: V ve Nb ile modifiye edilmiştir. Bu çelik 2.25Cr-1Mo çeliğini mekanik özellikler olarak geçmiştir ve buhar ve hidrojen ortamında 600°C'den yüksek sıcaklıkta kullanılabilir [4].



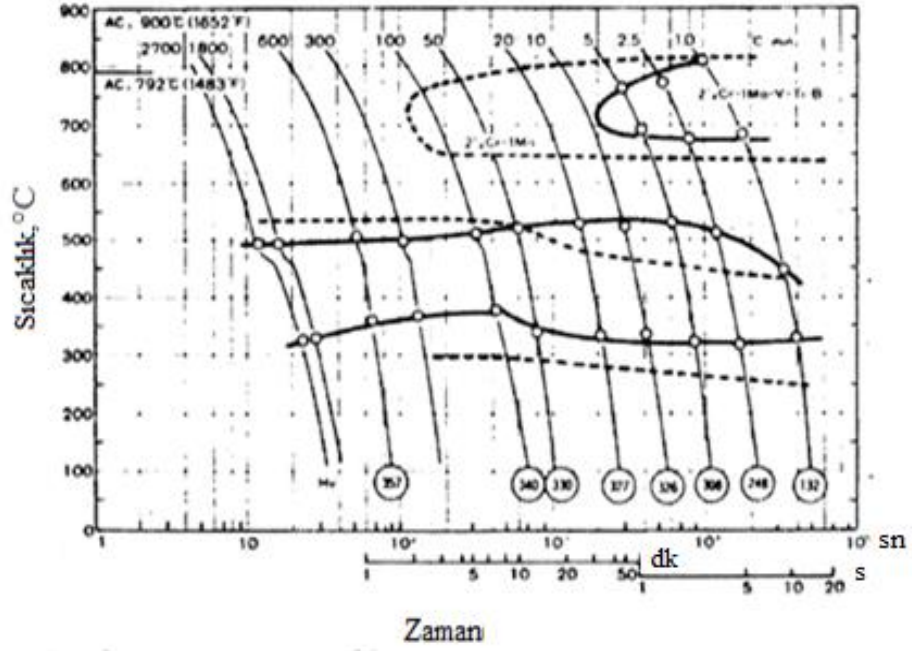
Şekil 2.5. 1050°C/0.5saat ostenitleme işlemi sonucu a) 9Cr-2WV b) 9Cr-2WVTa çeliğinin mikroyapısı [20].

2.25Cr-1Mo: V, Ti, B ile modifiye edilmiştir. V ile modifiye edilmiş 2.25Cr-1Mo çeliği tamamen sertleşebilir, hidrojen atağına dirençli, ve normalleştirilmiş ve temperlenmiş 2.25Cr-1Mo çeliğinin mukavemetini geçmiştir [4]. Şekil 2.6.'da Grade 24 çeliğinin mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.6. Grade 24 çeliğinin mikroyapısı [8].

Şekil 2.7'de 2.25Cr-1Mo ve 2.25Cr-1Mo-V-Ti-B çeliklerinin CCT diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.7. 2.25Cr-1Mo ve 2.25Cr-1Mo-V-Ti-B çeliklerinin CCT diyagramı [7].

2.1.7. Yeni Nesil 3Cr Çelikleri

Düşük alaşımlı, aktivasyonu azaltılmış çeliklerin tokluk ve mukavemetleri ORNL tarafından U.S. Füzyon Programı kapsamında farklı ısıl işlemler sırasında oluşan mikroyapılara bağlı olarak geliştirilmiştir. Bu çalışmalar sonunda, bileşimi 3Cr-3WV olan çelik üretilmiştir. Bu çeliğin %0.07 Ta ilavesiyle mukavemet ve tokluk özellikleri geliştirilmiştir [1,3].

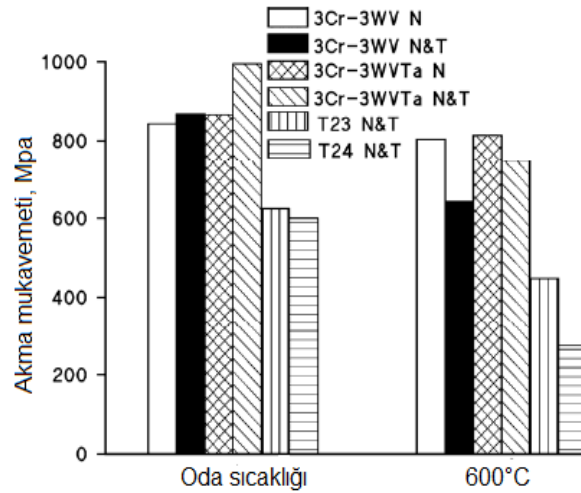
Generation IV programında bazı reaktör dizaynlarında, basınç kapları için öncelikle düşük alaşımlı çelikler düşünülmekteydi. 2.25 Cr-1Mo, T23 ve T24 bu uygulamalar için düşünülse de, 3Cr-3WV ve 3Cr-3WVTa çelikleri basınç kapları, borular ve diğer basınç bileşenleri için daha iyi adaylar olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ticari T23 ve T24 çeliklerinden avantajlıdır [1,3].

3Cr-3WV ve 3Cr-3WVTa çeliklerinin mükemmel mekanik özellikleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Benzer bir avantaj ise 600°C'de sürünme sırasında özellikle 3Cr-3WVTa için görülmüştür (Şekil 2.8). 650°C'deki sürünme (Şekil 2.9.) 3Cr-3WVTa

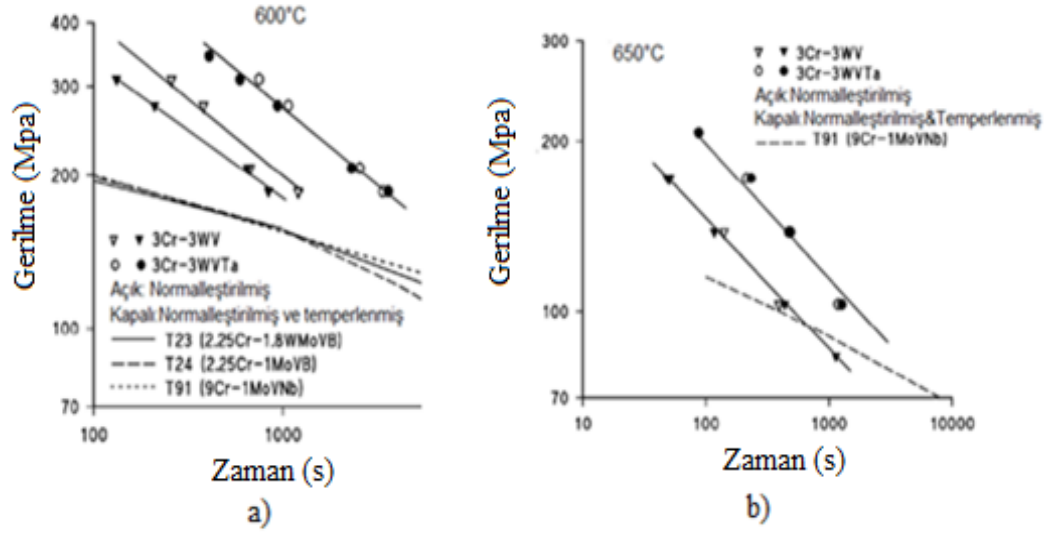
çeliğinin modifiye edilmiş 9Cr-1Mo (T91) ile karşılaştırılabilir olduğu gözlenmiştir. Bu test koşulları için, 3Cr-3WVTa çeliğinin modifiye edilmiş 9Cr-1Mo çeliğine avantajı vardır. Şekil 2.10.'da Larson-Miller parametresi karşılaştırılması, 3Cr-3WVTa için 2.25 Cr-1Mo (T22), 2.25Cr-1.6WVNb (T23) ile yapılmıştır ve T23'ün, T24'ten daha güçlü olduğu görülmektedir. [1].

Bu çeliklerin yüksek sıcaklıkta mukavemet özellikleri beynitik mikroyapıdan elde edilmiştir (Şekil 2.11) ve matristeki ince, yüksek yoğunluklu MX partikülleri gözlenmiştir (Şekil 2.12). Hem 3Cr-3WV hem 3Cr-3WVTa çeliği, iğnemesi partiküller içermektedir fakat çökeltiler ikinci çelik için önemli ölçüde daha incedir, bu da tantalyumun etkisinden kaynaklanmaktadır [1, 2].

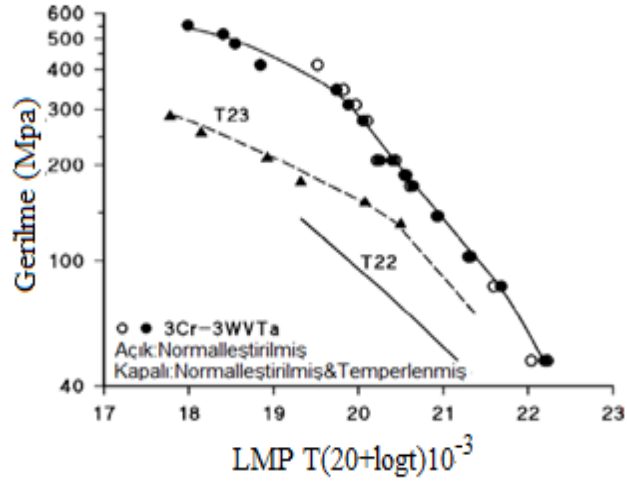
Sürünme sırasında, bu ince matris partiküllerinin irileşmesi, tantalyum içermeyen çeliğe göre çok daha hızlıdır (Şekil 2.13) [1,2].



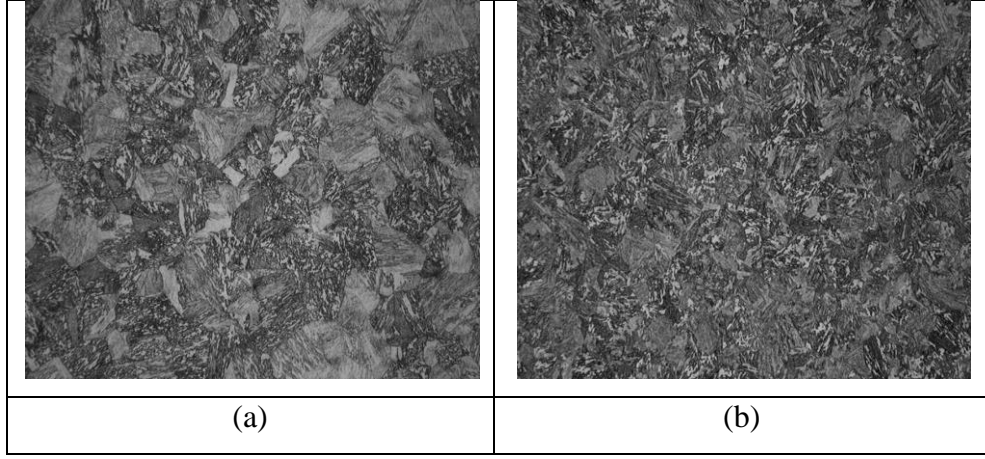
Şekil 2.8. Yeni 3Cr-3WV ve 3Cr-3WVTa çeliklerinin normalleştirilmiş ve normalleştirilmiş-temperlenmiş halde normalleştirilmiş ve temperlenmiş T23 ve T24 çelikleriyle karşılaştırılması [1].



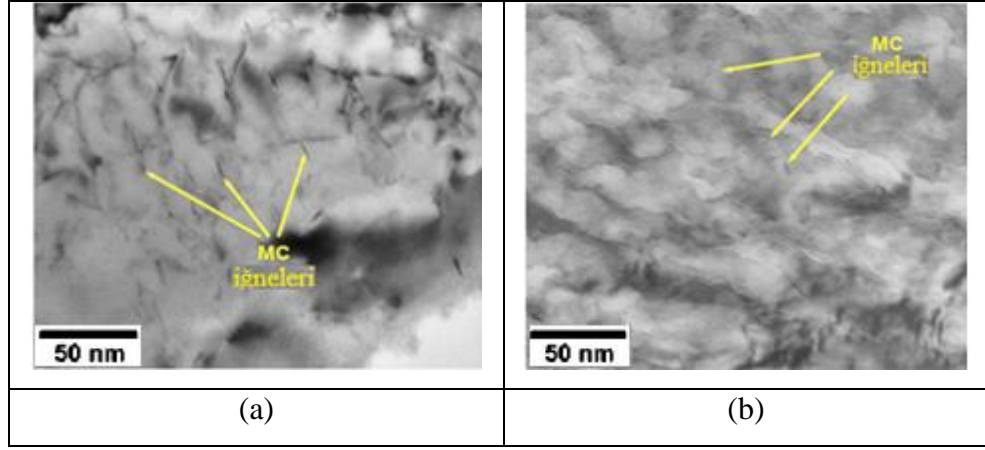
Şekil 2.9. Normalleştirilmiş ve normalleştirilmiş-temperlenmiş şartlarda sürünme-kopma eğrilerinin a) 600°C’de T23, T24, ve T91 çelikleriyle karşılaştırılması b) 650°C’de T91 ile karşılaştırılması [1].



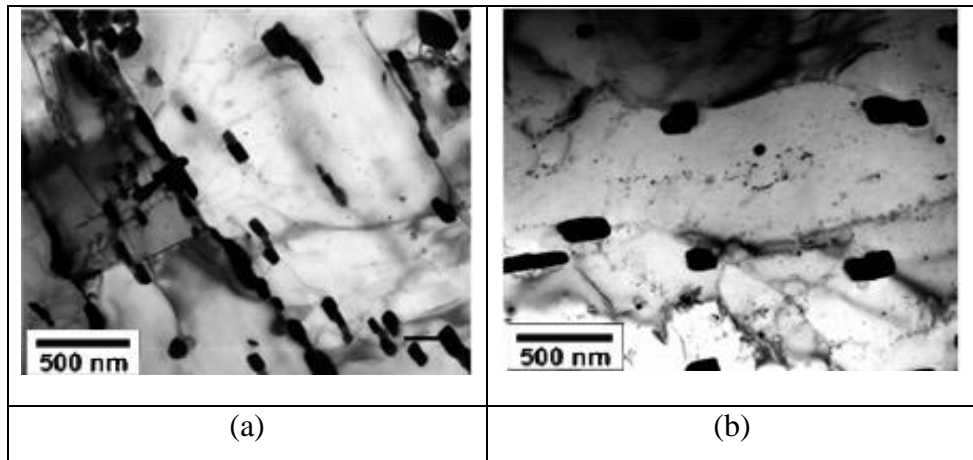
Şekil 2.10. Normalleştirilmiş ve normalleştirilmiş-temperlenmiş durumdaki 3Cr-3WVTa çeliğinin T23 ve T22 çelikleriyle Larson-Miller parametrelerinin karşılaştırılması [1,2].



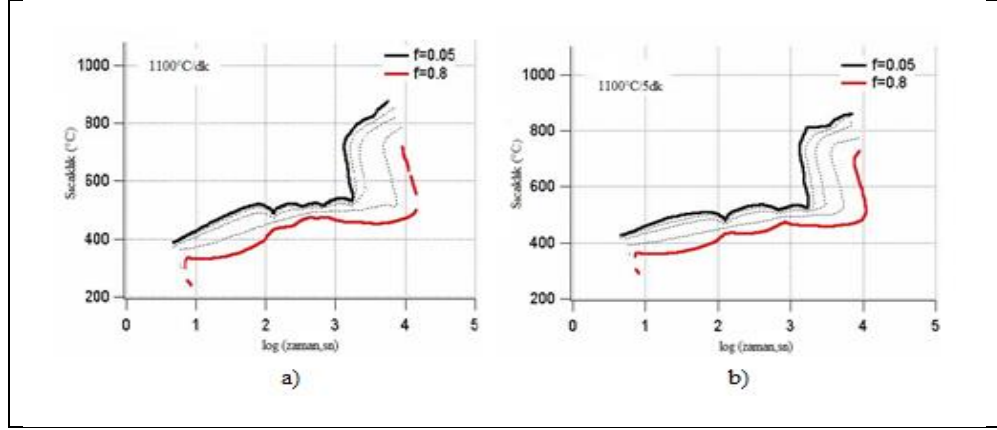
Şekil 2.11. Tantalum içeren çelikteki tane incelmesi ve beynitik yapının a) 3Cr-3WV b) 3Cr-3WVTa çeliklerindeki optik mikroyapısı [1].



Şekil 2.12. a) 3Cr-3WV ve (b) 3Cr-3WVTa çeliklerinde sürünme mukavemetini sağlayan ince iğnemsî partiküller [1].



Şekil 2.13. a) 3Cr-3WV ve (b) 3Cr-3WVTa çeliklerinin 650 °C'de 83 MPa'da sürünme-kopma testleri sonucu yapıları [1,2].



Şekil 2.14. a) Grade A ve b) Grade B için CCT diyagramı [3].

2.2. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN Cr-Mo ÇELİKLERİNE ETKİSİ

2.2.1. Karbon ve Azot

Karbon ve azot güçlü ostenit stabilize edici elementler olup ostenitte çözünürlüğü nispeten fazladır. Ferritteki çözünürlüğü çok azdır ve bu da karbürlerin, nitrürlerin ve karbonitrürlerin oluşumunu arttırmaktadır. Bu da çökeltme sertleşmesi ve sürünme dayanımı sağlamaktadır. Ayrıca düşük C oranı iyi işlenebilirlik sağlar ve ince ürünlerde PWHT işlemine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır [1,9,11].

2.2.2. Krom

Krom ferrit stabilize edici element olup çeliğe oksidasyon ve korozyon direncini arttırmak için eklenir. Sertleşebilirliği önemli ölçüde arttırmaktadır. Az bir katı eriyik sertleşmesi sağlar. Krom karbonla karbür oluşturur; kromca zengin karbürlere genellikle 2-12 %Cr'lu çeliklerde M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ olarak rastlanmaktadır. 9-12 %Cr'lu çeliklerde ikincil karbür; temperleme sırasında oluşur ve yüksek sıcaklığa maruz kaldığında bile mevcuttur. M_7C_3 karbürü daha düşük kromlu çeliklerde oluşur ($\leq 7\%$ Cr), $M_{23}C_6$ ise bu çeliklerde uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kaldığında oluşabilir. Azot içeren çeliklerde, kromca zengin M_2X (Cr_2N) oluşabilir [1,11].

2.2.3. Tungsten ve Molibden

Tungsten, füzyon uygulamaları için nükleer santrallerde aktivasyonu azaltılmış çeliklerin geliştirilmesi için molibdenin yerini almıştır. Molibden ve tungsten ferrit stabilize edici elementlerdir ve diğer ferrit yapıcı elementlere (Cr, V, Si, Nb) ve ostenit yapıcı elementlerin (C, N, Ni, Co ve Cu) bulunmasına bağlıdır, miktarı δ -ferritten kaçınmak için kısıtlanmalıdır. Temperlenmiş durumda, Mo ve W katı eriyik sertleşmesinde etkilidir ve $M_{23}C_6$ ve MX'te mevcuttur. Bu iki element demirde yüksek katı eriyik sertleşmesi sağlar. Tungsten molibdenden daha yavaş difuze olur, toparlanmayı ve Laves çökelme prosesini yavaşlatır. Elementler genellikle 9-12 %Cr'lu çeliklerde, karbür ya da nitrür oluşturmaz fakat M_2C (Mo_2C ya da W_2C) düşük kromlu çeliklerde oluşmaktadır. Bu da uyumlu partikül olup sürünme ömrünü arttırmaktadır (2.25Cr-1Mo de Mo_2C oluşumu). Tungsten yapıya $M_{23}C_6$ 'nın irileşme hızını azaltmak için de eklenmektedir. Tungstenin en önemli kullanım amacı sürünme mukavemetini arttırmasıdır [1,9,11,12].

2.2.4. Vanadyum, Niyobyum ve Tantalyum

Vanadyum ve niyobyum güçlü karbür, nitrür ve karbonitrür yapıcı elementler olup, MX tipi karbür oluşturur, M simgesi V ve Nb olup, X simgesi C, N ya da ikisinin birleşimidir ve karbür (MC), nitrür (MN) ya da karbonitrürlerin $[M(C,N)]$ oluşumuyla sonuçlanır. Vanadyumla mukavemetlendirme işlemi VC'ün oluşmasıyla ilgilidir. Yapılan son çalışmalar, vanadyumca zengin MX çökeltisinin azotça zengin olduğu gözlenmiştir [1].

Niyobyum karbürler, aşırı derecede kararlıdır ve tamamen çözebilmek için normal ostenitleme sıcaklığının altında ısıtma işlemi yapmak gereklidir. Bununla birlikte, çözünmeyen niyobyum karbürler ostenitleme sırasında tane boyutunu kısıtlar ve bu da ince ostenit tane boyutu oluşumunu sağlamaktadır [1].

Tantalyumun bazı çalışmalarda; normalleştirilmiş ve temperlenmiş 9Cr-2WVTa çeliğinde 75-90%'ı normalleştirme sonrasında eriyikte kalmıştır. Tantalyum ostenit

tane boyutunu inceltir. Ayrıca 5 Cr ve 9 Cr'lu çeliklerde mukavemet ve sünek gevrek geçiş sıcaklığı üzerinde olumlu etkisinin olduğu literatürden anlaşılmıştır [1,13].

2.2.5. Bor ve Fosfor

Bor ferritte düşük çözünürlüğe sahiptir ve genelde sertleşebilirliği arttırmak için kullanılmaktadır. 9-12 %Cr'lu çeliklerin çoğunda, yaklaşık 0.005-0.01%B eklenir. $M_{23}C_6$ 'nın yüzeyine segregeler olur ve karbürün kabalaşmasını yavaşlatmaktadır ve böylece mikroyapıyı stabilize eder. $M_{23}C_6$ alttane sınırlarını tutmaya yardımcı eder. Son çalışmalarda borun, ostenitleme sonrası soğuma sırasında ostenit tane sınırlarına segregeler olduğu görülmüştür ve sonra temperlemenin ilk birkaç dakikası boyunca $M_{23}C_6$ 'nın içine girmektedir. Bor yaşlanma ve 10000 saate kadar sürünme sırasında irileşme hızını yavaşlatmaktadır. Ayrıca borun 9Cr-2WVTa çeliğinde mukavemet ve darbe özelliklerine önemli etkisinin olduğu anlaşılmıştır [1,13]

Fosfor da $M_{23}C_6$ 'nın yüzeyine segregeler olur ve az bir miktarı Laves fazında görülmektedir [1,13].

2.2.6. Nikel, Manganez, Kobalt

Nikel, manganez ve kobalt ostenit stabilize edici elementlerdir. 12 Cr'lu çeliklere eklenmesinin ana sebebi ostenitleme işlemi sırasında 100% ostenit oluşumunu sağlamak ve böylece soğuma sırasında 100% martenzit oluşumunu gerçekleştirmektir [1].

Nikel ve kobalt ferritik/martenzitik çeliklerde tokluğu arttırmaktadır. Manganez, nikelden daha zayıf ostenit stabilize edicidir [1].

Yapılan bir araştırmada; kobaltın nikelden daha zayıf ostenit yapıcı olduğu görülmüştür ve 12 Cr'lu çeliklerde δ -ferrit oluşumunu önlemiştir. Kobalt katı eriyik sertleştiricisi olarak düşünülmüştür ve sürünme mukavemetine yararlı etkisi olduğu belirtilmiştir. Kobaltın nikel ve manganeze göre bir diğer önemli avantajı; Al

sıcaklığını düşürmüyor olmasıdır [1]. Kobaltın, tungstenle beraber sürünme mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı belirtilmektedir [14].

2.3. KROM-MOLİBDEN ÇELİKLERİNDE OLUŞAN YAPILAR

Alaşım karbürleri diğer alaşım elementlerinin önemli miktarda ferrit matriste çözünmesiyle, sitokiyometrik olmayan alaşım karbür fazlarına dönüşmesiyle oluşabilir. Servis sıcaklığına ısıtılmasıyla, karbürlerin bileşimi ve morfolojisi servis ömrü sırasında dengeye yaklaşır. Kararlı fazlar ilk mikroyapı ve bileşimsel segregasyon gibi birçok faktöre bağlı olarak oluşmaktadır. Karbürlerin özellikleri ve çökeltme mekanizmaları aşağıda özetlenmiştir [11].

2.3.1. M_3C

Bu karbür başlangıçta Fe_3C olarak oluşmaktadır ve Cr gibi diğer alaşım bileşenleri gibi Fe'in yaklaşık %20'siyle yer değiştirebilir. Mo karbür yapısında yaklaşık %4'e kadar barınabilir. Epsilon karbürden farklı olarak M_3C termodinamik olarak en az kararlı karbüdür ve ısıtma sırasında daha yüksek alaşım karbürleriyle hızlı bir şekilde yer değiştirebilir [11].

2.3.2. M_2C

Bu karbür temel olarak Mo_2C 'dir ve önemli miktarlarda Cr çözümlenebilir (ağırlığının %30'una kadar). Hem su verilmiş hem de normalleştirilmiş yapıda çökebilir. Bu karbür ferritten tanelerarası çekirdeklenmeyle çökebilir. Başlangıçta, Mo_2C 'nin matrisle uyumlu olduğu düşünülmekteydi, fakat daha sonra iğnemsî şekilli uyumsuz çökelti gözlenmiştir [11].

2.3.3. M_7C_3

Bu karbür Cr_7C_3 yapısıdır ve önemli miktarlarda Fe çözmektedir. Bu karbürün çökmesi Fe_3C 'nin oluşturduğu boşluklarda meydana gelir ve ferrit/ Fe_3C ara yüzlerinde çekirdeklenmektedir. Cr-C alaşımları çalışmalarında, Cr_7C_3 'ün diğer

alaşım karbürlerinden çökmesinin ve kabalaşmasının daha hızlı olduğu ve sonuç olarak ikincil sertleşmeye önemli bir katkısının olmadığı belirtilmiştir [11].

2.3.4. $M_{23}C_6$

Bu karbür $Cr_{23}C_6$ ya da $Fe_{21}Mo_2C_6$ olarak düşünölmekle beraber Fe_3C ve Mo_2C 'ye zıt olarak çökeler. Baker ve Nutting sadece su verilmiş yapılar da ya da bu alaşımların beynitik bölgelerinde oluştuğunu göstermiştir. Cr_7C_3 'ün çözünmesine gerek yoktur ve Cr_7C_3 'ün meydana geldiği bölgelerde gözlenilmez. Bu karbürün çekirdeklenmesi ve büyümesi plaka şeklindedir [11].

2.3.5. M_6C

Bu karbür Qu ve Kuo tarafından Fe_3Mo_3C olarak tarif edilmektedir ve Olsen ve North tarafından Fe_3Mo_3C ve Fe_4Mo_2C arasında değiştiği söylenilmektedir. Yapı ayrıca önemli miktarda Cr çözebilmektedir. Bu sistemde gözlenen karbürlerin en çok alaşımlı olanıdır. Tane sınırlarında geniş yönlü partiküller olarak oluşmaktadır. Baker ve Nutting bu karbürlerin hem beynit hem de ferritte normalleştirilmiş yapıda oluştuğunu göstermişlerdir. M_6C 'nin diğer karbürler arasında en az dispersiyon sertleşmesi sağladığı düşünölmektedir [11].

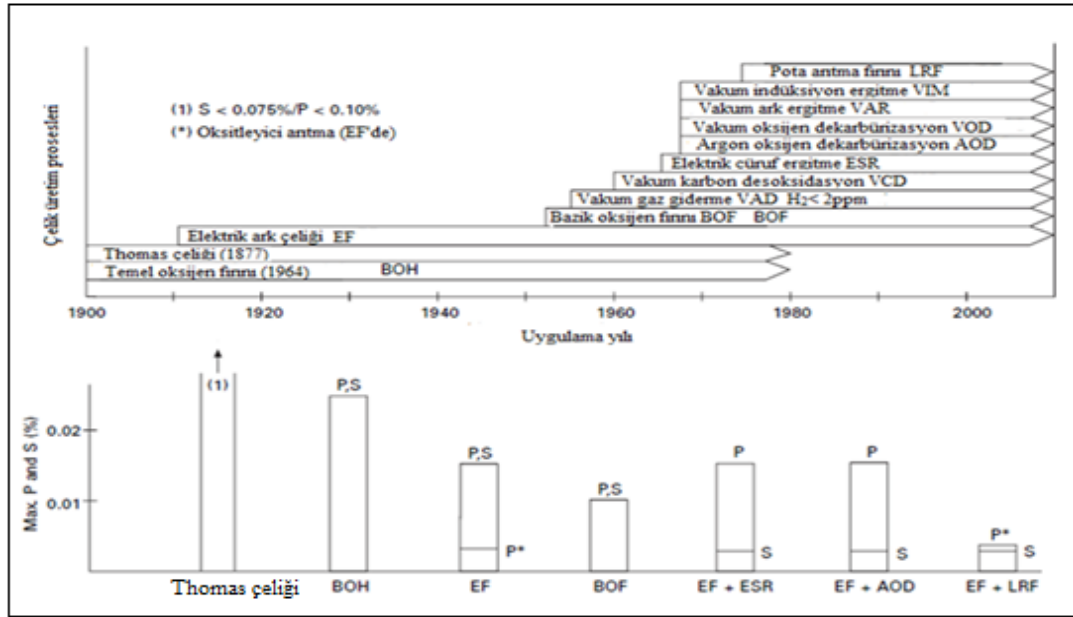
2.3.6. MX

3Cr-3WVTa'lu yapılan çalışmada tantalyumun varlığına bağlı olarak ince MX çökeltilerine rastlanılmıştır. MX çökeltisinin sürünme boyunca daha kararlı kaldığı belirtilmiştir. TEM çalışmalarında mükemmel sürünme dayanımının yüksek yoğunluklu ince nano-boyutlu vanadyumca zengin MX çökeltilerine bağlı olduğu söylenmektedir [2].

2.4. Cr-Mo ÇELİKLERİNİN ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI VE UYGULANAN İŞLEMLER

2.4.1. Çelik Ergitme İşleminin Tarihi ve Isıya Dayanıklı Çeliklerin Saflaştırılması

Son yıllarda türbin rotor dövme ürünleri üreticilerine gelen yüksek süneklik, temizlik ve tokluk talepleri, ısıya dayanıklı çelikler için çelik üretim proseslerinin gelişmesine katkı sağlamıştır. Şekil 2.14'te çelik üretim tarihi gelişimiyle ilgili bilgi verilmektedir. Ayrıca P ve S içeriğinin azaltılmasının nasıl başarıldığı ve çelik üretiminde prosteki etkinliği vurgulanmaktadır [15].



Şekil 2.15. Çelik üretim proseslerinin ve çelikteki S ve P oranlarına etkisinin tarihsel gelişimi [15].

Elektrik ark fırını çeliği, düşük maliyetli ve daha düşük seviyelerde S ve P içeriği sağlamasına rağmen daha büyük dövme ürünlerinde hidrojen pullanması sorun oluşturmaktaydı. Bu problem vakum gaz alma yönteminin 1950'li yıllarda kullanılmasıyla çözülmüştür. Oksijen üfleli çeliklerin üretimi 1952'de başlamıştır. Bu temel oksijen üretim konvertör prosesi, çelikte daha düşük P ve S oranlarında üretilmesi başarılmış ve As, Sb ve Sn gibi kalıntı elementleri düşük miktarda tutmayı

başarmıştır. Daha sonraki ilerleme vakum işleminin 1961'de vakum karbon deoksidasyon işlemine uyumuyla sağlanmıştır. Bu işlem oksijeni karbonla reaksiyona sokarak CO şeklinde çıkarılması işlemidir [15].

Daha temiz ve üniform kimyasal homojenite ikincil ergitme yöntemleriyle sağlanmıştır. Bu yöntemler elektocuruf ergitme ve vakum ark ergitmedir. Elektocuruf ergitmenin avantajı; Si içeriğinin %0.002 gibi düşük bir değerde elde edilebilmesidir. Vakum ark ergitmede ise kalıntı elementler azaltılamamış fakat düşük gaz içeriği elde edilmiştir [15].

Çok etkili ikincil çelik üretim prosesleri argon-oksijen dekarbürizasyon ve vakum-oksijen dekarbürizasyon teknolojileridir. AOD'un avantajı; düşük S, N₂ ve H₂ miktarlarının yakalanmasıdır. Vakum indüksiyon ergitme çok düşük gaz bileşimi sağlamaktadır. VIM'deki çekilme riski procesten sonra tekrar ergitmeyi gerektirmektedir (ESR ya da VAR) [15].

1970'lerde ise nükleer ve fosil yakıtlı santrallerde daha geniş dövme ürünleri kullanılmaktaydı. Bu değişim pota metalürjisinin gelişimi ve elektrik ark fırınının ergitmede kullanılmasıyla ilerlemiştir. Bu da, ısıtma, gaz giderme, desülfirizasyon gibi metotlarla daha geniş ürünlerin yüksek kalitede üretilmesine imkan sağlamıştır [15].

2.4.2. Literatürde Bazı Cr-Mo ve Cr-W Çelikleri İçin Uygulanan İşlemler

Cr-Mo ve Cr-W çelikleri değişik ergitme yöntemleriyle üretilmekte , değişik son ürünler halinde (plaka, boru) elde edilebilmekte ve değişik işlemler uygulanabilmektedir (haddeme veya dövme). Aşağıda literatürde yapılan işlemlere örnekler verilecektir.

3Cr-1.5Mo-0.25V-0.1C çeliği için yapılan çalışmada, argon oksijen dekarbürize (AOD) yöntemiyle 100 mm kalınlığında plaka olarak üretilmiş daha sonra 1.6x1.4x0.1m ölçülerinde ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Numunelere haddeme işlemi uygulanmış ve numuneler hadde yönünün tersine alınmıştır [16]. 2.25Cr-2W, 3Cr-

2W, 3Cr-3W, 2.25Cr-2WV, 3Cr-2WV, 3Cr-3W çelikleri, 450 gr'lık küçük vakum ark ergitme ünitesiyle üretilmiştir [16]. 3Cr-3WV, 3Cr-3WVTa çelikleri, Carpenter Technology Corporation'da 132 kg'lık vakum indüksiyon ergitme (VIM/VAR) ingotlar şeklinde üretilip, 102x152 mm'lik kalıplara preslenerek dövülmüştür [2]. 3Cr-1.5W-0.75Mo, 3Cr-1.5W-0.75Mo-0.1Ta ergitilip plakalar haline getirilmiştir. Her ikisi de sıcak dövülmüş ve haddelenmiştir. Yuvarlak ve levha ürünlere, dövme uygulanmıştır, sıcak haddelenmiş levha, tüp haline getirilmiştir [3].

3Cr-3WV, 3Cr-3WVTa, 3Cr-2WMoV çelikleri, döküm yöntemiyle üretilmiştir [10].

4.5Cr-2W-0.25V çeliği, sıcak haddelenmiş olarak kullanılmaktadır [17].

Aşağıda verilen tabloda, literatürde yapılan çalışmalarda bazı çeliklere uygulanan ısı işlemler verilmiştir.

Çizelge 2.3. Literatürde Cr-Mo ve Cr-W çeliklerine uygulanan ısı işlemler.

Bileşim	Ref.	Normalleştirme	Su verme	Gerilim giderme	Temperleme
3Cr-1.5Mo-0.25V-0.1 C	[16]	955°C-2s	-	565°C-2s	663-704°C ve 1-30s
		955°C-2s	Evet	565°C-2s	663-704°C ve 1-30s
2.25Cr-2W, 3Cr2W,3Cr-3W	[16]	900°C-1s	-	-	700C-750°C ve 1s
2.25Cr-2WV, 3Cr2WV,3Cr-3W		1050°C-1s	-	-	700C-750°C ve 1s
3Cr-3WV, 3Cr-3WVTa	[2]	1100°C-1s	-	-	700°C-1s
3Cr-1.5W-0.75Mo		1100°C-1s	-	-	663-749° C ve 1s

Çizelge 2.3 (devam ediyor).

3Cr-1.5W-0.75Mo-0.1Ta	[3]	1100°C-1s			663-749°C ve 1s
3Cr-3WV, 3Cr-3WVTa, 3Cr-2WMoV, 3Cr-3WVTaB	[10]	1100°C-1s	-	-	675,700, 725,750 °C ve 3, 6, 12, 24s
4.5Cr-2W-0.25V	[17]	1000°C-0.5s	Evet	-	600-700°C,0.5-100s
	[17]	1000°C-0.5s	-	-	600-700°C, 0.5-100s

BÖLÜM 3

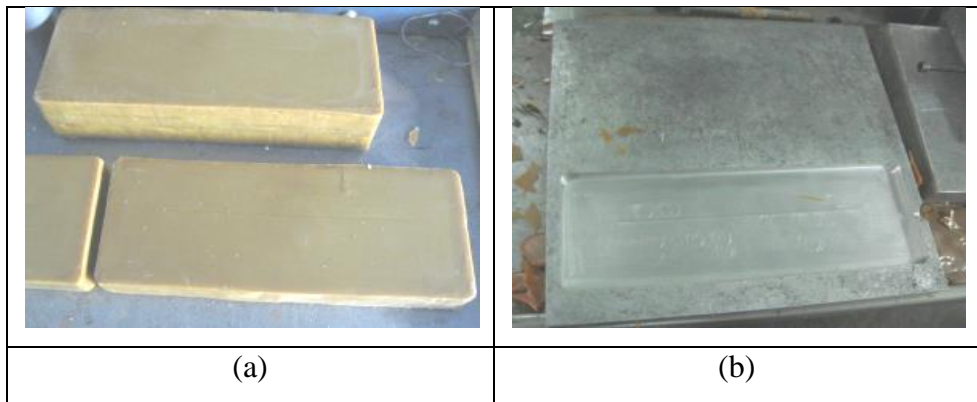
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalara özgün bileşim olan 3Cr-W çeliğinin bileşiminin belirlenmesiyle başlanmıştır. Çizelge 3.1’de üretilecek çeliğin kimyasal bileşimi verilmiştir.

3.1. DÖKÜM ÇALIŞMALARI

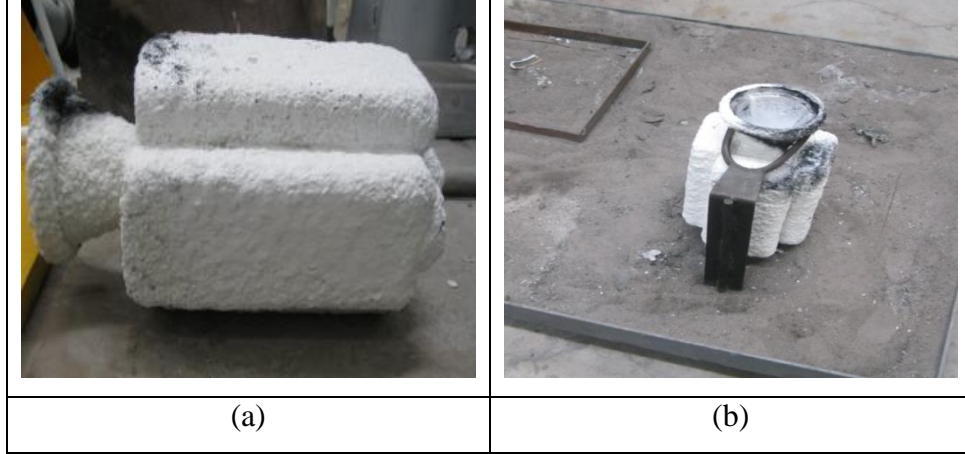
3.1.1. Mum Model ve Kalıbın Hazırlanması

Üretim sırasında sadece ergitme, döküm işlemleri sırasında bulunulduğu için kalıp hazırlama, mum model hazırlanması, döküm kalıbının hazırlanması kısaca anlatılmıştır. Ergitme ve döküm işlemleri aşağıda sırasıyla anlatılmıştır. Üretime Şekil 3.1’de görüldüğü gibi dökülecek olan plakaların boyutlarında olan metal kalıplar hazırlanmıştır. Daha sonra bu kalıpların şeklini alacak olan mum model hazırlanmıştır. Burada mum model döküm sonrası elde edilecek olan çelik plakaları temsil etmektedir.



Şekil 3.1. Döküm işleminde kalıbı oluşturmak için kullanılan a) mum model ve b) kalıbı.

Mum modeller üretildikten sonra döküm kalıbı oluşturulmak üzere mum modeller belli şekilde sabitlenip üzerleri fused silika ile kaplanmıştır. Sonraki aşama pişirme işlemi olup, bu işlemde mumlar eridikten sonra kalıp boşlukları oluşturulmuştur. Dökümü yapılacak olan kalıplar Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Kullanılacak olan döküm kalıbı.

3.1.2. Alaşımlama İşlemi

Üretilecek çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kullanılan ilave alaşım elementleri ve katkıları: C, metalik Si, FeMn, FeCr, FeV, FeTi, FeW, TaW, CrN, FeB, Co’tır. Burada yapılan ek işlem bileşimdeki azotu elde etmek için Cr elementinin 1000°C/3 saat nitrülenmesidir.

Çizelge 3.1. Üretilmesi planlanan çeliğin kimyasal bileşimi.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ti	W	Ta	N	B	Co
0.1	0.16	0.4	0.001	0.005	3.0	-	0.2	0.001	3.0	0.1	0.005	0.001	1,0

3.1.3. Ergitme ve Döküm İşlemi

Alaşımlama ve ergitme işlemi 23 kg kapasiteli indüksiyon ocağında yapılmıştır. Şekil 3.3’te alaşımlama işlemi için bazı elementler görülmektedir. Şekil 3.4’te alaşımlama ve ergitme işleminin yapıldığı indüksiyon ocağı ve döküm öncesi kalıbın ön ısıtmaya tabi tutulduğu fırın görülmektedir.



Şekil 3.3. Alaşım işlemine kullanılan bazı alaşım elementleri.

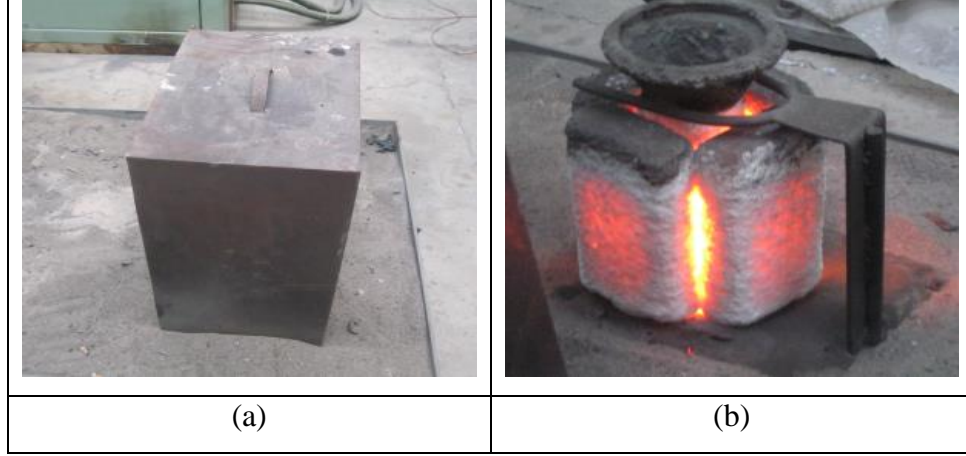
Alaşım işlemine geçilmeden önce daha önceki işlemde kalmış olabilecek olan kalıntıları gidermek için fırın yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem fırının ısıtılıp çelik levhaların ergitilip başka bir yere dökülmesi işlemidir. Bu işlemden sonra alaşım işlemine geçilmiştir. Alaşım işlemi belli sırayı takiben yapılmıştır. Sırasıyla Co, TaW, çelik levhalar, FeCr, CrN, Mn, Si, FeV, FeB ve C ilaveleri yapılmıştır. İlaveler sırasında cüruf alma işlemi yapılmıştır. Döküm kalıbı yaklaşık 800°C’de ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Sıcaklık belli aralıklarla ölçülmüş olup dökümden önceki sıcaklık yaklaşık 1570°C olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.4. Alaşım ve ergitme işleminin yapıldığı a) indüksiyon ocağı ve b) döküm öncesi kalıbın ön ısıtma yapıldığı fırın.

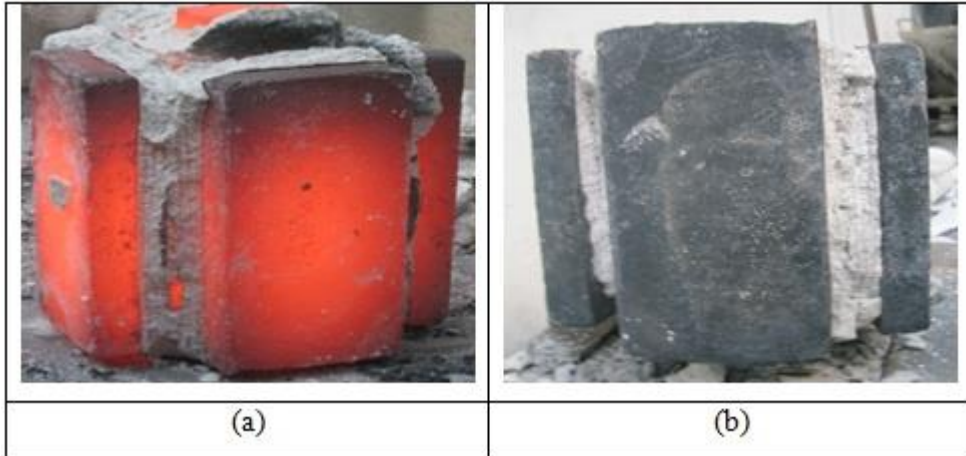
Alaşım işlemi yapıldıktan sonra döküm işlemi yapılmıştır. Burada döküm sonrasında kalıbın üzerine ısıyı korumak için egzotermik adı verilen katkı maddesi

konulmuştur ve dökümden sonra kalıbın üzeri örtülmüştür. Döküm sonrası kalıbın örtülmesi ve katılaşma sırasındaki kalıptaki metal Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Döküm yapıldıktan sonra a) kalıbın üstünün örtülmesi ve b) döküm sonrası görüntüsü.

Döküm sonrası seramik kalıbın bozulması ve metalin tamamen katılaşması şekil 3.6.'da görülmektedir.



Şekil 3.6. Döküm sonrası kalıbın bozulmasıyla elde edilen metalin görüntüsü.

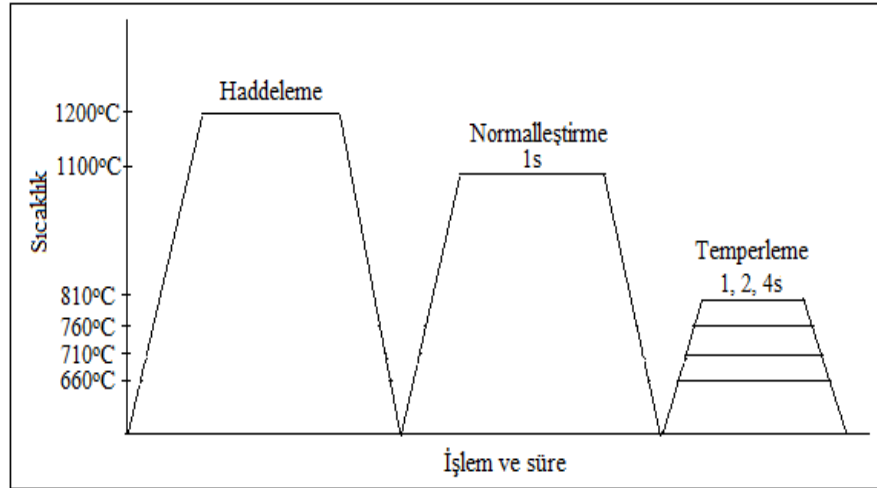
3.2. ISIL İŞLEM

Döküm plakalarına sıcak haddeleme uygulanmıştır. Sıcak haddeleme işlemi 1200°C'de uygulanmıştır. Numunelerin hadde işleminden önceki boyutları;

225x20x20mm, haddeleme işleminden sonra; 510x50x3mm olarak ölçülmüştür. Haddelenmiş numunelere önce 1100°C/1saat normalleştirme uygulanmıştır. Ardından 660-710-760-810°C'de 1-2-4 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Isıl işlemlerin yapıldığı ısıl işlem fırını Şekil 3.7.'de görülmektedir. Uygulanan ısıl işlem çevrimi Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Isıl işlemlerin yapıldığı Magma Therm marka sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırını.



Şekil 3.8. Numunelere uygulanan ısıl işlem çevrimi.

3.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

3.3.1. Optik Mikroskop Çalışması

Mikroyapı çalışmaları, metalografik prosedüre göre yapılmış olup, mikroyapı fotoğrafları optik ışık mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Metalografik prosedür, numuneleri 180, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh zımparalarla zımparalama ve ardından elmas solüsyonla parlatma işlemini içermektedir. Kullanılan dağlayıcılar vilella reaktifi ve renkli dağlayıcı için sodyum metabisüfit ve %4'lük pikral çözeltisidir. Mikroyapı resimleri Nikon Eclipse MA 100 optik ışık mikroskobunda 100X büyütmede çekilmiştir. Şekil 3.9.'da kullanılan optik ışık mikroskobu görülmektedir.



Şekil 3.9. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik ışık mikroskobu.

3.3.2. SEM Çalışması

SEM çalışması Carl-Zeiss Ultra Plus cihazında gerçekleştirilmiştir. SEM cihazında yapılan incelemeler sırasında matrise ve karbürlere EDS analizleri yapılmıştır. Kullanılan SEM cihazı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Carl-Zeiss Ultra Plus SEM cihazı.

3.3.3. XRD Çalışması

XRD ölçümleri Rigaku Ultima IV Marka XRD Cihazında $20-90^{\circ}$ aralığında 5 derece/dk tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11’de XRD cihazı görülmektedir.

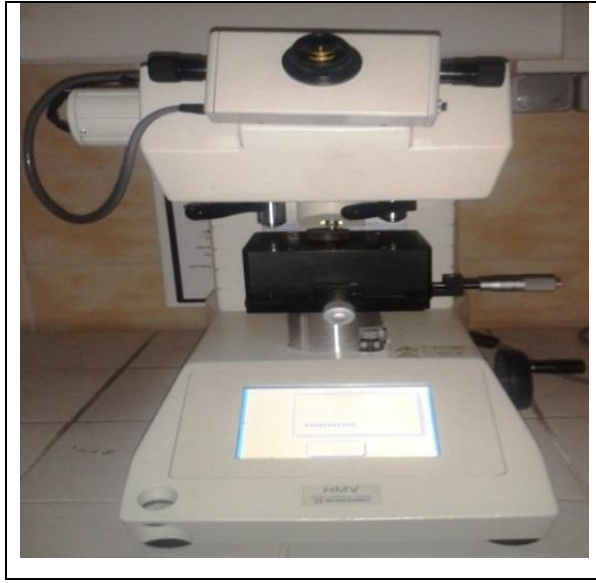


Şekil 3.11. X-ray çekimlerinin yapıldığı Rigaku Ultima IV XRD cihazı.

3.4. MEKANİK ÖZELLİKLERİN KARAKTERİZASYONU

3.4.1. Sertlik Testi

Sertlik ölçümleri tüm numunelere Vickers yöntemiyle (HV) Schimadzu marka HMV model mikrosertlik cihazında 2 kg yük altında gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri en az 5 ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Şekil 3.12.'de sertlik cihazı görülmektedir.



Şekil 3.12. Schimadzu HMV sertlik cihazı.

3.4.2. Çekme Testi

Çekme testleri bütün numunelerin, 1100°C/1s normalleştirme ve ardından sırasıyla 710°/2s ve 760°C/1s temperleme işlemi uygulanmış numuneler için Schimadzu marka 50 kN kapasiteli cihazda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.13.'te çekme cihazı görülmektedir. Çekme deneyleri 1 mm/dk hızda oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 3.13. Schimadzu çekme cihazı.

3.4.3. Yüksek Sıcaklık Çekme Testi

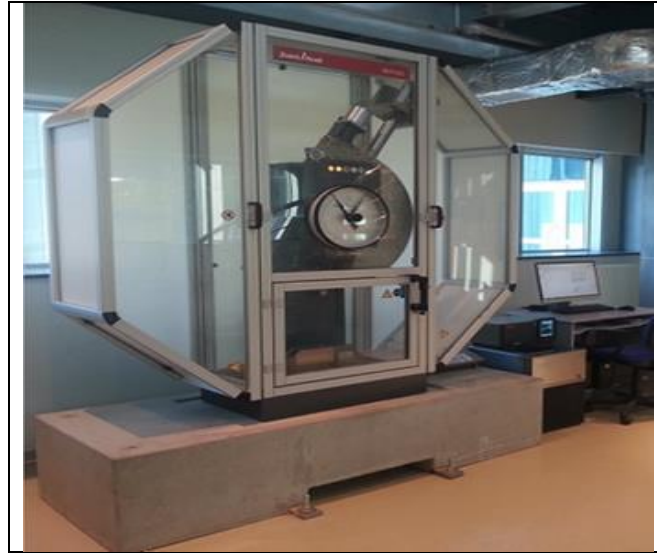
Yüksek sıcaklık çekme testleri 760°C/1saat temperlenmiş numunelere ZWICK/ROELL marka çekme cihazında TS EN ISO6892-2 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14'te yüksek sıcaklık çekme testlerinin yapıldığı çekme cihazı görülmektedir. Yüksek sıcaklık çekme testi 550 °C'de 0.005 1/sn hızda uygulanmıştır.



Şekil 3.14. Yüksek sıcaklık çekme testinin yapıldığı Zwick/Roell çekme cihazı.

3.4.4. Darbe Testi

Çentik darbe testleri tüm numunelerin 1100 °C/1s normalleştirme ve 710 °C/2s ve 760°C/1s temperleme işlemi uygulanmış hallerine Zwick/Roell marka 450 Joule kapasiteli darbe cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri 55x10x3(mm) ölçülerindedir. Deneyler -50 °C ve oda sıcaklığında uygulanmıştır. Çentik darbe testlerinin yapıldığı Zwick/Roell 450 Joule kapasiteli cihaz Şekil 3.15'te görülmektedir.



Şekil 3.15. Darbe testlerinin gerçekleştirildiği Zwick/Roell darbe cihazı.

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. DÖKÜM SONUÇLARI

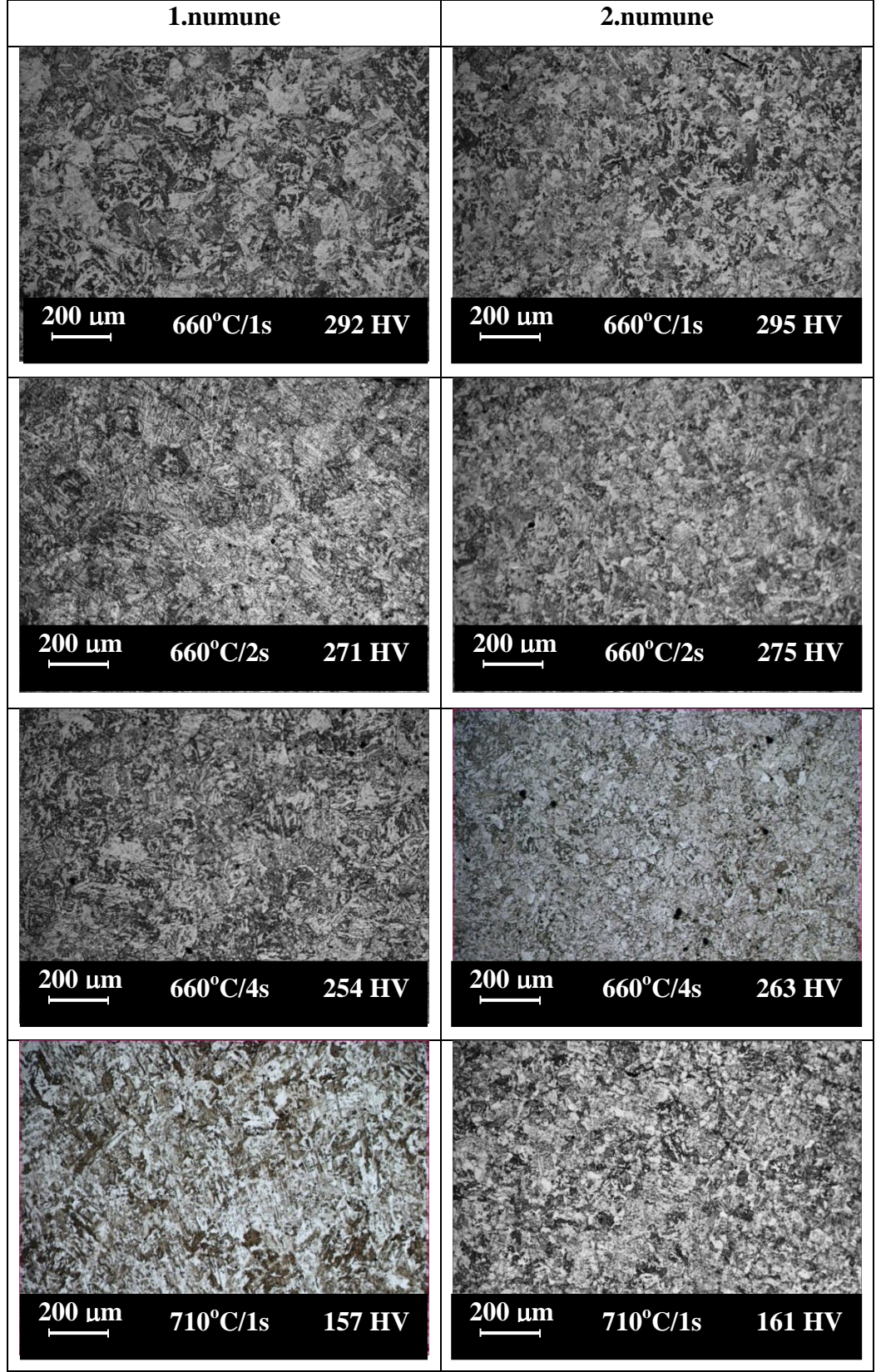
Dökümü yapılan 6 farklı çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Dökümü yapılan çeliklerin kimyasal bileşimleri.

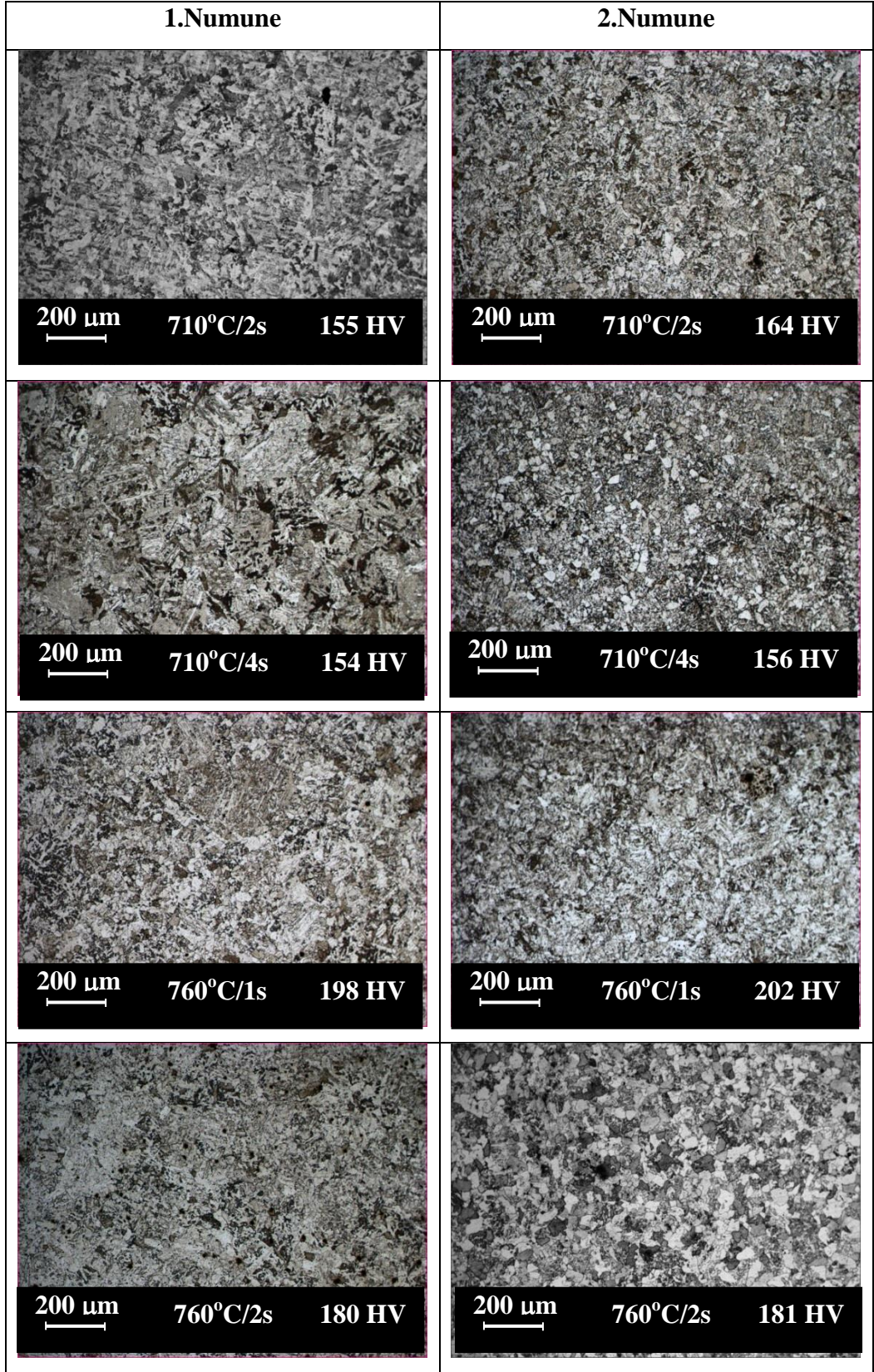
%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ti	W	Ta	N	B	Co
1	0.11	0.1	0.3	0.01	0.01	2.45	0.05	0.16	0.001	2.1	0.03	0.01	0.001	1
2	0.08	0.1	0.26	0.02	0.01	2.28	0.06	0.16	0.006	2.9	0.08	0.01	0.009	1
3	0.12	0.08	0.19	0.02	0.01	2.03	0.06	0.12	0.001	3	0.08	0.03	0.001	1
4	0.11	0.08	0.14	0.02	0.01	2.5	0.04	0.15	0.002	3.6	0.02	0.02	0.005	1
5	0,12	0,14	0,3	0,02	0,01	2,75	0,04	0,20	0,002	3,1	0,02	0,02	0,008	1,1
6	0,11	0,10	0,23	0,02	0,01	2,5	0,07	0,18	0,001	2,8	0,02	0,02	0,001	1,1

4.2. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

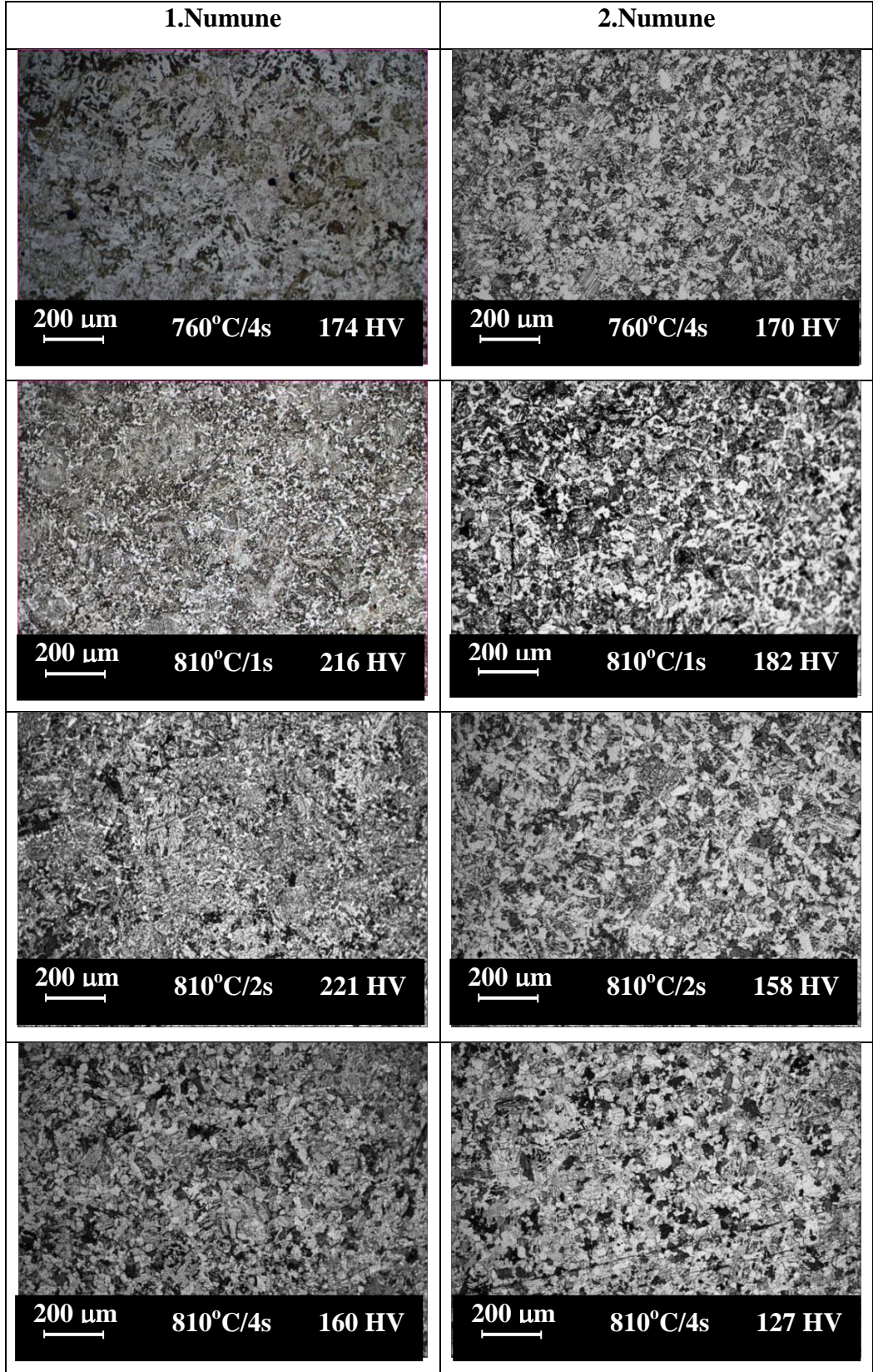
Dökümü yapılan Cr-W çeliklerinin sıcak haddeleme işleminden sonra 1100⁰C/1s normalleştirme ve 660-710-760-810⁰C/1-2-4s temperleme işlemleri sonrası mikroyapıları Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te görülmektedir. Mikroyapı bileşenleri hakkında ferrit, beynit, martenzit olup olmadığı hakkında kesin bir yargıya varılamamakla beraber literatürdeki bazı çalışmalardan yararlanılarak 1.numune incelendiğinde yapının ferrit, beynit içerdiği söylenebilir. 2.numunenin mikroyapıları incelendiğinde yapının ferrit ve beynit içerdiği söylenebilir [7]. Burada 1.numuneden farklı olarak ferrit taneleri artan temperleme sıcaklık ve süresine bağlı olarak ciddi şekilde belirgin halde olmasıdır.



Şekil 4.1. 1 ve 2. numunenin 1100°C/1s normalleştirme ve 660/710/760/810°C-1/2/4 s temperleme işlemi sonrası mikroyapıları.

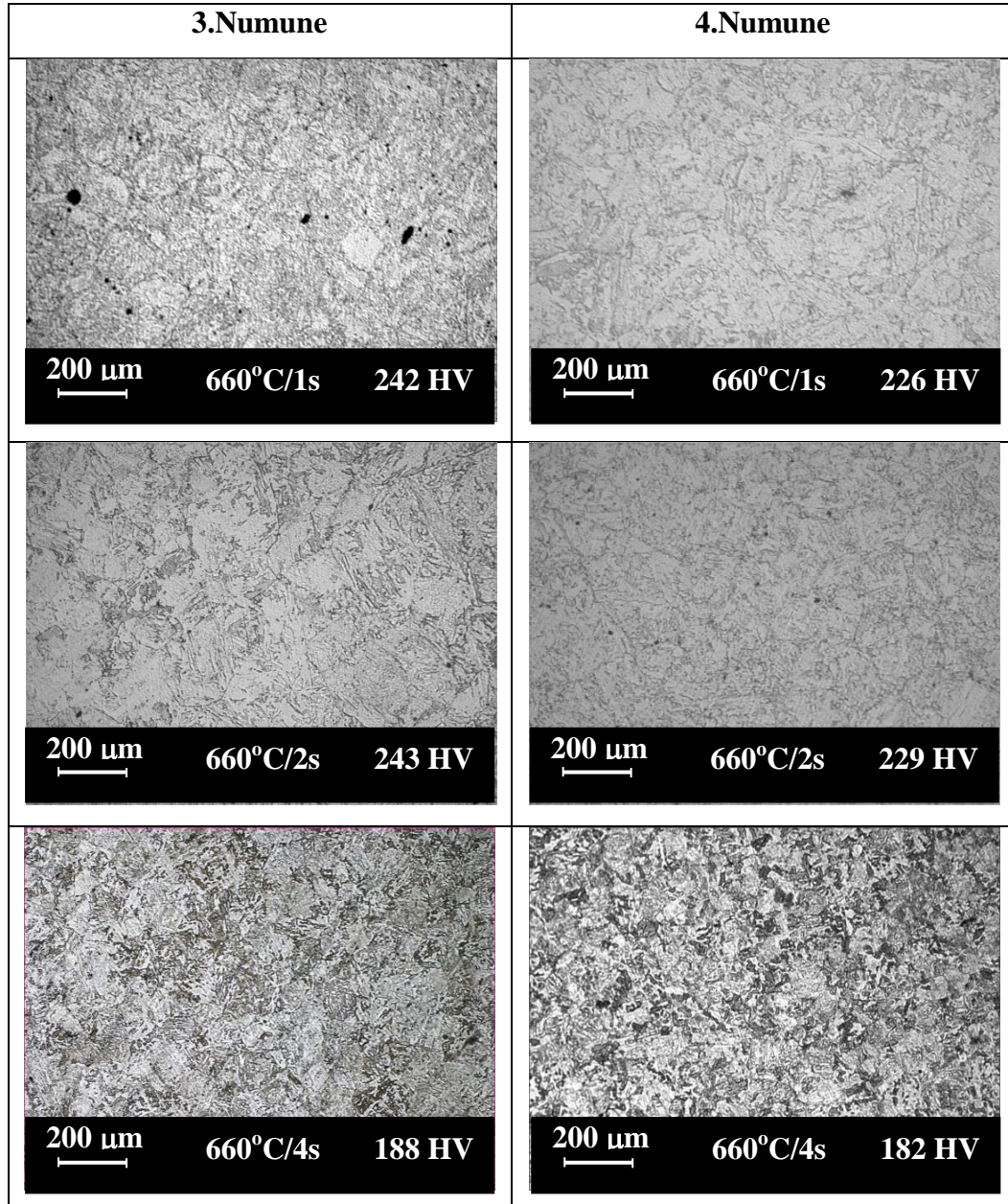


Şekil 4.1. (devam ediyor).

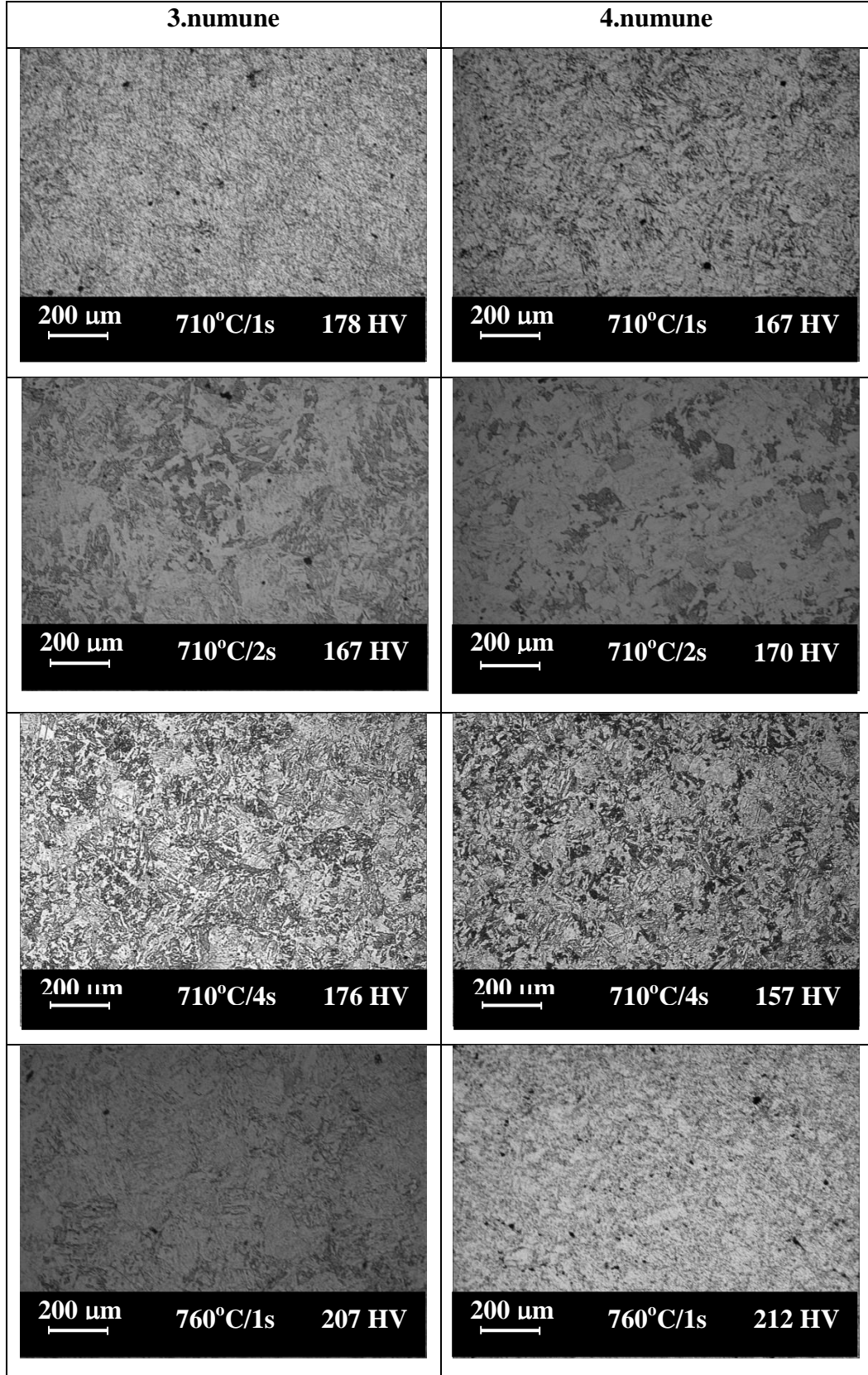


Şekil 4.1. (devam ediyor).

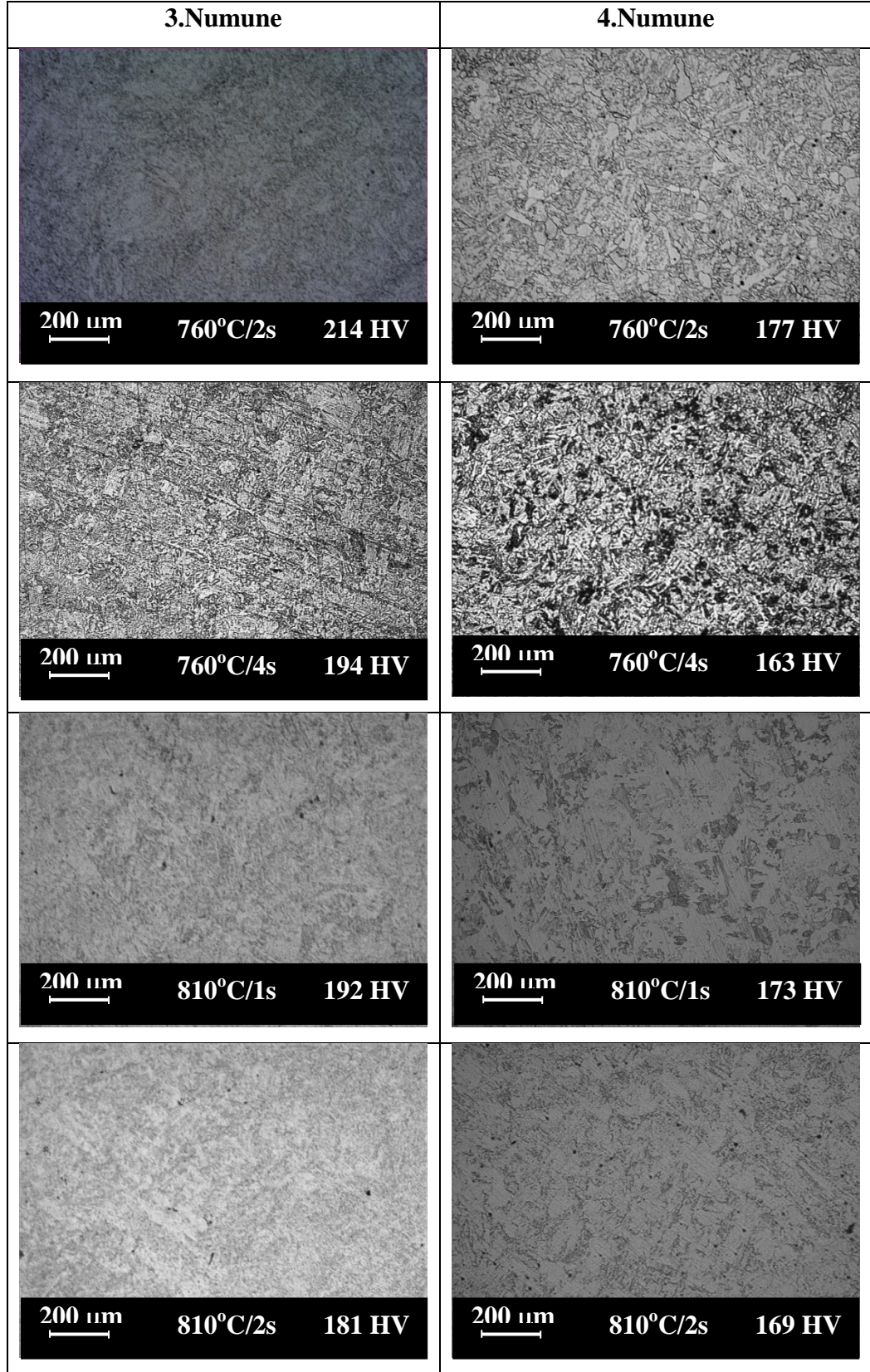
Şekil 4.2.'de 3.ve 4.numunelere 1100⁰C/1saat normalleştirme ve 660/710/760/810⁰C-1/2/4 saat temperleme işlemi sonrası mikroyapıları görülmektedir. 3.numunenin mikroyapıları incelendiğinde yapıda ferrit ve beynit oluştuğu söylenebilir. 4.numune incelendiğinde 3.numuneye benzer olduğu görülmektedir. Yapıda ferrit ve beynit olduğu söylenebilir. Ancak 4.numunenin bazı parametrelerine renkli metalografi uygulanmış olup aşağıda verilecektir.



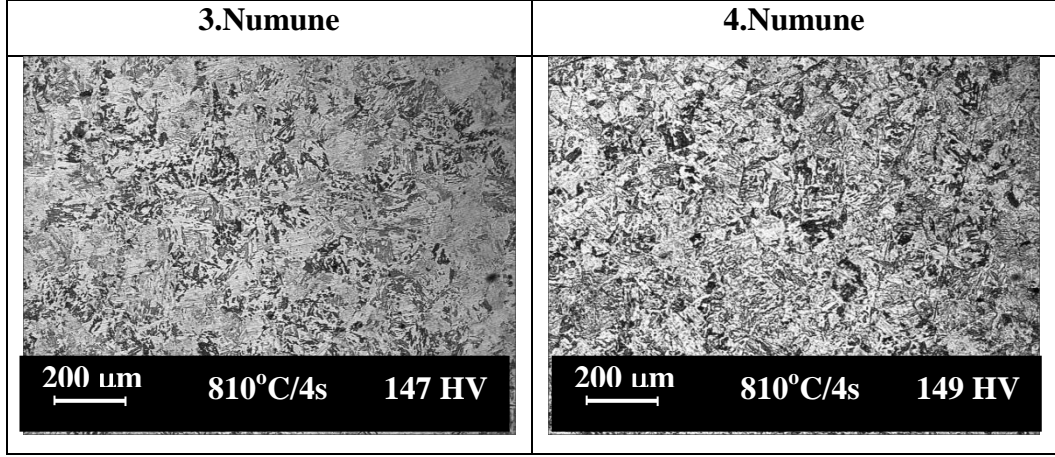
Şekil 4.2. 3 ve 4. numunenin 1100⁰C/1s normalleştirme ve 660/710/760/810⁰C-1-2-4 s temperleme sonrası mikroyapıları.



Şekil 4.2. (devam ediyor).

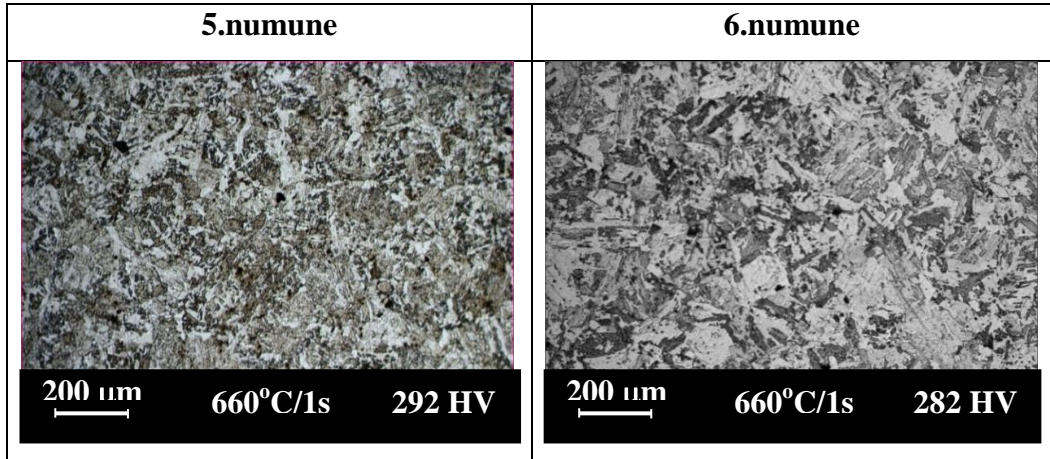


Şekil 4.2. (devam ediyor).

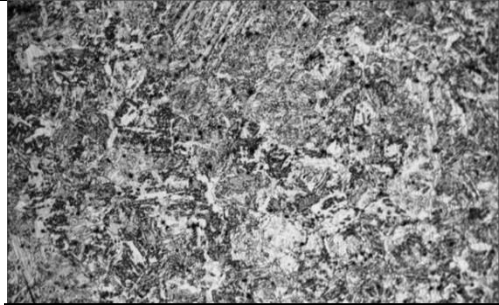






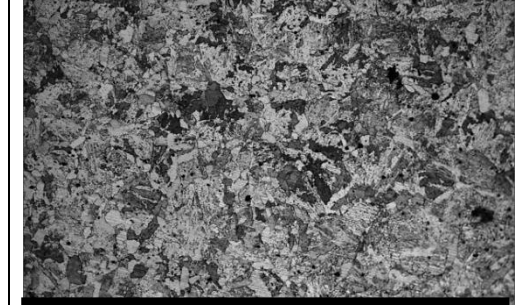


Şekil 4.2. (devam ediyor).

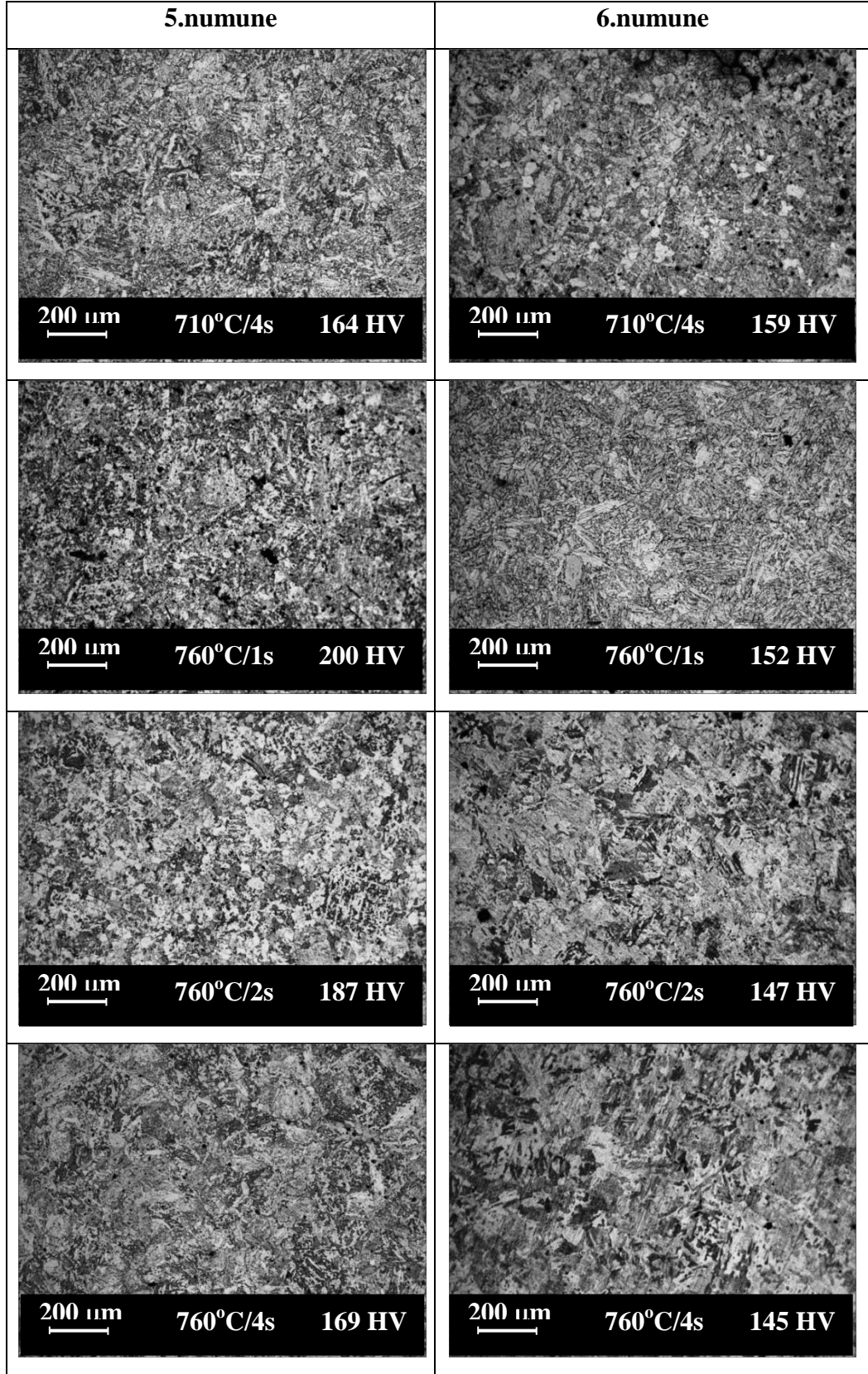
Şekil 4.3.'te 5 ve 6. numunelerin 1100⁰C/1saat normalleştirme ve 660/710/760/810⁰C-1/2/4saat temperleme işlemi sonrası mikroyapıları görülmektedir. 5.numune incelendiğinde artan temperleme sıcaklık ve süresine bağlı olarak yapıda beyaz renkli ağ yapısına benzer bir yapı gözlenmiştir. Bu yapının literatürden de faydalanılarak delta ferrit olabileceği düşünülmektedir [10]. 5 numaralı numunenin yapısının ayrıca genel olarak ferrit ve beynitten oluştuğu söylenebilir. 6.numune incelendiğinde beynitik bir yapı görülmektedir.



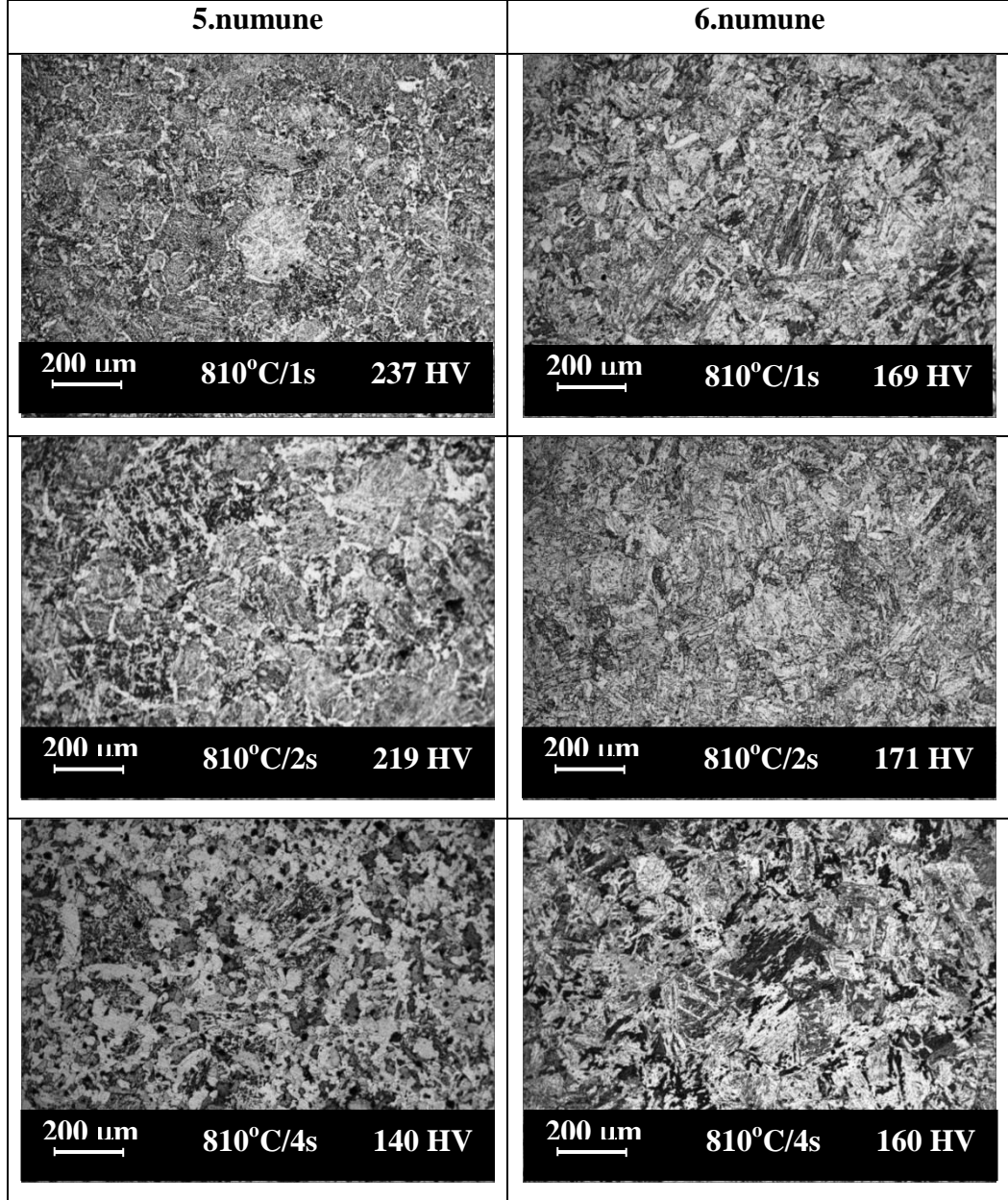
Şekil 4.3. 5 ve 6. numunenin 1100⁰C/1s normalleştirme ve 660/710/760/810⁰C-1-2-4 s temperleme işlemi sonrası mikroyapıları.

5.numune	6.numune
 <p data-bbox="339 589 839 667">200 μm 660°C/2s 277 HV</p>	 <p data-bbox="847 589 1367 667">200 μm 660°C/2s 284 HV</p>
 <p data-bbox="339 987 839 1066">200 μm 660°C/4s 261 HV</p>	 <p data-bbox="847 987 1367 1066">200 μm 660°C/4s 258 HV</p>
 <p data-bbox="339 1386 839 1464">200 μm 710°C/1s 172 HV</p>	 <p data-bbox="847 1386 1367 1464">200 μm 710°C/1s 166 HV</p>
 <p data-bbox="339 1839 839 1917">200 μm 710°C/2s 163 HV</p>	 <p data-bbox="847 1839 1367 1917">200 μm 710°C/2s 159 HV</p>

Şekil 4.3. (devam ediyor).

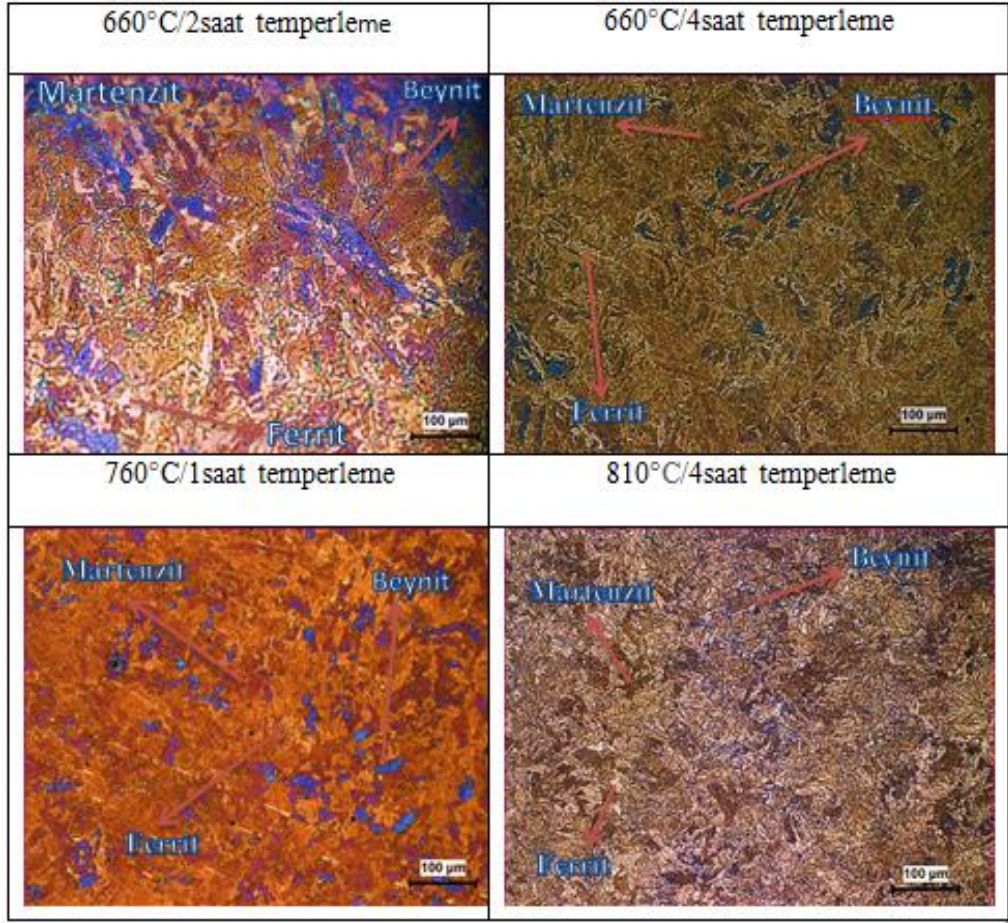


Şekil 4.3. (devam ediyor).



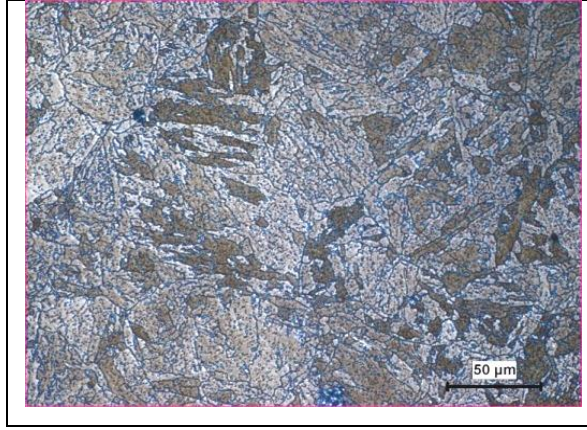
Şekil 4.3. (devam ediyor).

Yukarıda da belirtildiği gibi bazı numunelere renkli metalografi uygulanmış olup mikroyapılar Şekil 4.4'te görülmektedir. Mikroyapılarda görülmekte olan beyaz renkli bölgeler ferrit, kahverengi bölgeler martenzit ve mavi renkli bölgeler beynit olarak anlaşılmaktadır. Literatürde aynı dağlayıcı kullanılarak elde edilen mikroyapılarda beyaz renkli bölgeler ferrit, kahverengi bölgeler martenzit ve mavi renkli bölgeler beynit olarak belirtilmektedir [18].



Şekil 4.4. 4.numuneye uygulanan renkli metalografiyle elde edilen mikroyapıları.

Şekil 4.5.'te 4.numuneye 810°C/4saat temperleme sonucu elde edilen mikroyapı daha büyük büyütme ile verilmiştir. Burada ayrıca Image Analysis yazılımı kullanılarak faz oranları % olarak; 57 ferrit, 43 martenzit olarak bulunmuştur. Ancak beynit bölgelerinin çok küçük bir alanda olması sebebiyle beynit yüzdesi bulunamamıştır. Bu oranlar kesin olmamakla birlikte bilgi vermesi için yazılmıştır. Ayrıca numunelere normalleştirme işleminden sonra temperleme işlemi uygulandığı için mikroyapı temperlenmiş beynit ve temperlenmiş martenzit olarak adlandırılabilir.



Şekil 4.5. 4.numuneye uygulanan 810°C/4saat temperleme sonucu elde edilen mikroyapı.

4.3.SERTLİK TESTİ

Çizelge 4.2.'de bütün numuneler için elde edilen sertlik değerleri verilmiştir. Sertlik değerleri verilirken temperleme sıcaklık ve süresine bağlı olarak değişmekte olan Larson-Miller parametresi kullanılmıştır.

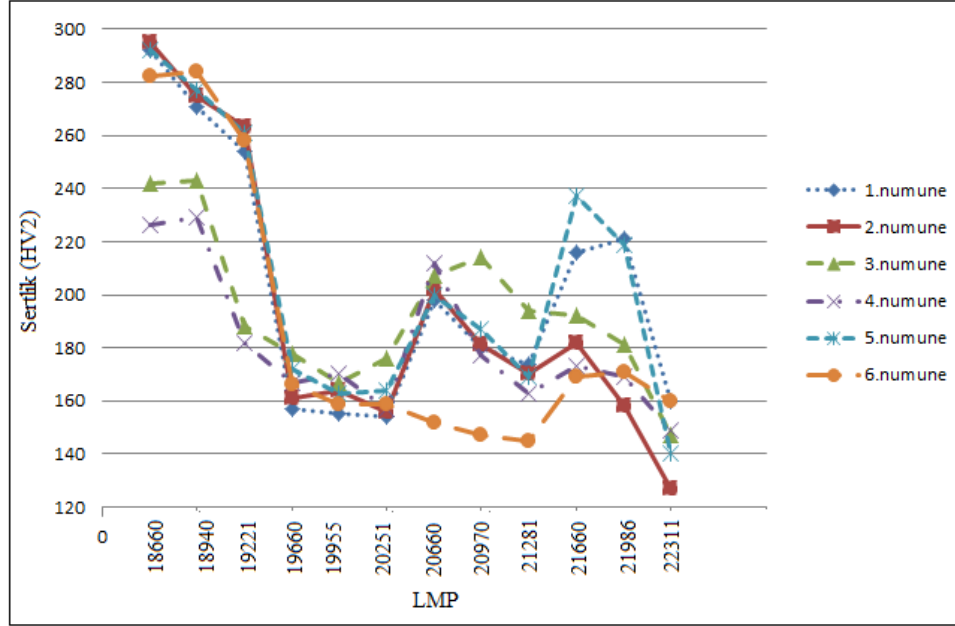
$$LMP=T(C + \log t) \quad [C:20 \quad T:Sıcaklık(K) \quad t:süre(saat)] \quad [19].$$

Çizelge 4.2. Numunelere 1100°C/1 saat normalizasyon işleminden sonra değişik süre ve sıcaklıklardaki temperleme işlemi sonundaki sertlik değerleri.

Süre- Sıcaklık	660°C / 1s	660°C / 2s	660°C / 4s	710°C / 1s	710°C / 2s	710°C / 4s	760°C / 1s	760°C / 2s	760°C / 4s	810°C / 1s	810°C / 2s	810°C / 4s
LMP	18660	18940	19221	19660	19955	20251	20660	20970	21281	21660	21986	22311
1	292	271	254	157	155	154	198	180	174	216	221	160
2	295	275	263	161	164	156	202	181	170	182	158	127
3	242	243	188	178	167	176	207	214	194	192	181	147
4	226	229	182	167	170	157	212	177	163	173	169	149
5	292	277	261	172	163	164	200	187	169	237	219	140
6	282	284	258	166	159	159	152	147	145	169	171	160

Sertlik değerleri incelendiğinde bütün numunelerde artan LMP'sine bağlı olarak azalmıştır. LMP 20660 değerindeyken sertlikte artış gözlenmiştir. LMP'si 21660

değerine kadar tekrar azalma ve bu değerde tekrar artma gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak karbürlerin belli sıcaklık ve sürelerde irileşmesi ve daha sonra yeni karbürlerle dönüşümü olarak söylenebilir. Bu değerden sonra sertlik değeri bütün numunelerde azalmıştır. Sertlik değerleri 4.6’da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.6. Numunelere uygulanan 1100°C/1 saat normalleştirme işleminden sonra değişik süre ve sıcaklıklardaki temperleme işlemi sonundaki grafiği.

4.4. ÇEKME TESTİ

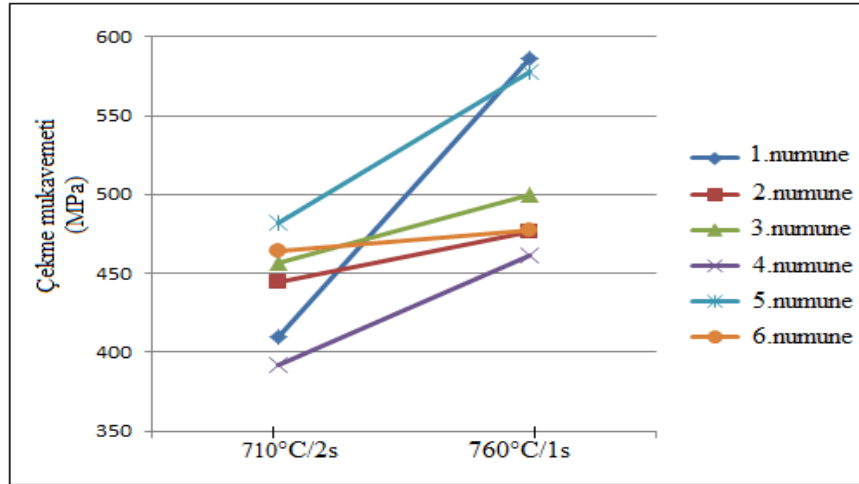
Haddelenmiş döküm parçalarına öncelikle 1100°C/1saat normalleştirme ve ardından sırasıyla 710°C/2 saat ve 760°C/1 saat sürelerle temperleme işlemi uygulandıktan sonra elde edilen akma, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri Çizelge 4.3’te toplu halde ve Şekil 4.7’de çekme mukavemetleri değerinden oluşan grafik verilmiştir. Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde değerlerin 392-586 MPa aralığında değiştiği görülmektedir. Elde edilen en yüksek değer 1. numunenin 760°C/1 saat ısıtılmış hali ve en küçük değer 4. numunenin 710°C/2 saatli ısıtılmış halidir.

Çizelge 4.3. Numunelere 1100°C/1s normalleştirme ve ardından değişik sıcaklık ve sürelerde temperleme işlemi uygulanmış numunelerin akma mukavemeti çekme mukavemeti ve %uzama değerleri.

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	%Uzama
1-710°C/2saat	365	410	16
1-760°C/1saat	513	586	22
2-710°C 2saat	380	444	17
2-760°C 1saat	400	476	18
3-710°C/2saat	400	457	26
3-760°C/1saat	440	500	20
4-710°C/2saat	262	392	31
4-760°C/1saat	381	461	19
5-710°C/2saat	435	482	22
5-760°C/1saat	440	578	16
6-710°C/2saat	318	464	20
6-760°C/1saat	358	477	16

Buradaki değerlerin literatürdeki 3Cr-W çeliklerinden düşük çıkma sebepleri arasında dökümde istenilen bileşimin elde edilememesi, dökümdeki hatalar, çekme deneyi numunelerinin standarda uygun olarak hazırlanamamasıdır. Literatürde düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı Cr-Mo çelikleri için akma mukavemeti aralığı 300-600 MPa aralığında çekme mukavemetleri 350-700 MPa aralığında değişmektedir [4]. Bu çalışmada yapılan çalışmalar bu sonuçlarla karşılaştırıldığında yakın gözükmektedir. Fakat literatürde 3Cr-3W çeliği için akma mukavemeti 600-940 MPa arası ve çekme mukavemeti değerleri, 800-1050 MPa arası değişmektedir [3,10].

Çıkan sonuçlar literatürdeki değerlerle karşılaştırıldığında düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı Cr-Mo çelikler ile yakın çıkmıştır. Cr-W çelikleriyle karşılaştırıldığında akma ve çekme mukavemeti düşük çıkmıştır. Bunun sebebi olarak bileşimdeki büyük farklılıklar olarak söylenebilir.



Şekil 4.7. Numunelere uygulanan 1100°C/1saat normalleştirme işleminden sonra değişik sıcaklık ve sürelerdeki temperleme işlemi sonundaki çekme mukavemeti grafiği.

4.5. YÜKSEK SICAKLIK ÇEKME TESTİ

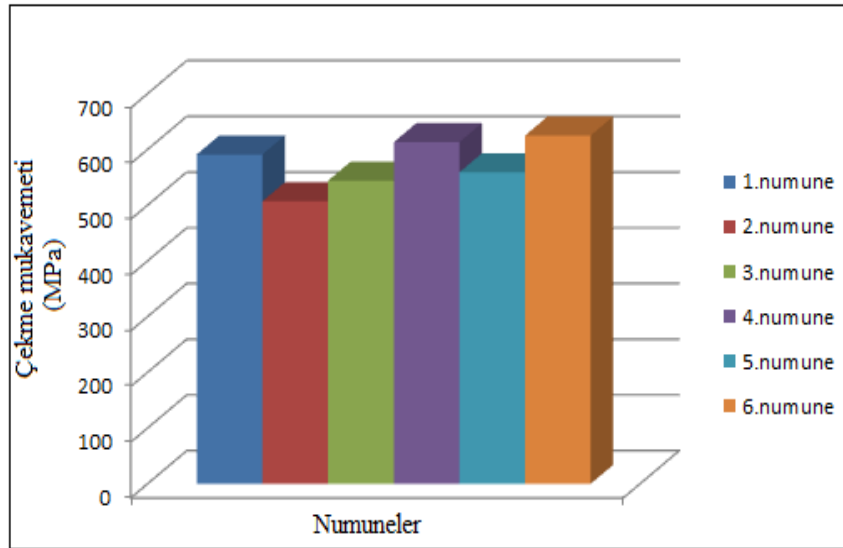
Yüksek sıcaklık numuneleri 760°C/1saat temperlenmiş numunelere 550°C'de uygulanmış olup elde edilen çekme mukavemeti değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda düşük alaşımlı Cr-Mo ve yüksek alaşımlı Cr-Mo çelikleri için 540°C için akma mukavemeti değerleri 180-330 MPa arasında değişmektedir. Çekme mukavemeti değerleri 320-350 MPa arasında değişmektedir [4]. Cr-W çeliklerinin değişik bileşimleri için 600°C'de yapılan yüksek sıcaklık çekme testi sonunda akma mukavemeti değerleri 480-615 MPa arasında , çekme mukavemeti değeri 530-725 MPa arasında değişmektedir [3].

Literatürdeki Cr-Mo çelikleriyle karşılaştırıldığında akma ve çekme mukavemeti için değerler daha yüksek çıkmıştır. Cr-W çelikleriyle karşılaştırıldığında, akma mukavemeti değeri literatürdekine yakın, çekme mukavemeti değerleri literatürdeki aralıkta olarak anlaşılmıştır.

Çizelge 4.4. 550°C’de uygulanan yüksek sıcaklık çekme testi sonucu elde edilen akma ve çekme mukavemeti değerleri.

	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1.numune	495	591
2.numune	489	507
3.numune	420	544
4.numune	487	613
5.numune	461	559
6.numune	495	625



Şekil 4.8. 550°C’de uygulanan çekme testi sonucu elde edilen çekme mukavemeti grafiği.

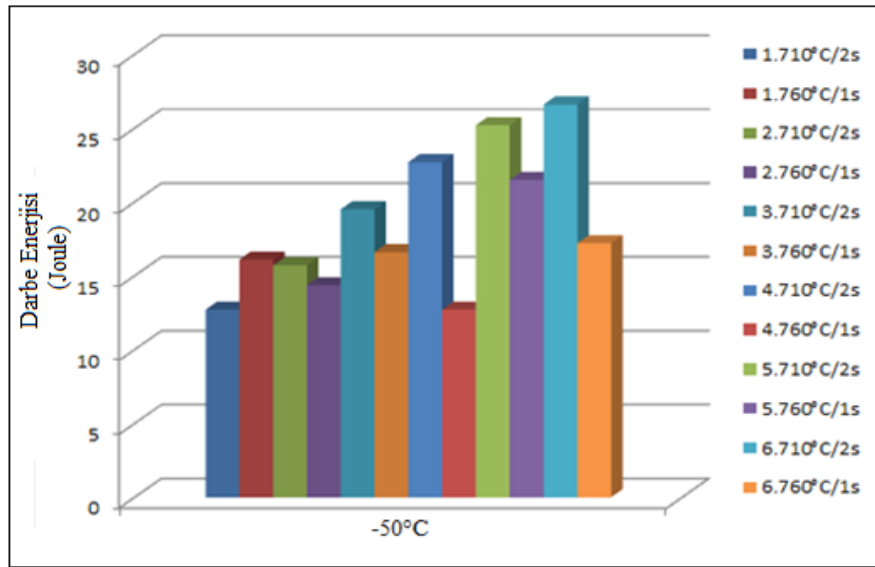
4.6. DARBE TESTİ

Darbe deneyleri standarda uygun şekilde 3x10x55 mm numuneler çıkarılarak iki farklı sıcaklıkta Zwick/Roell Marka 450 J kapasiteli cihazda yapılmıştır. Çizelge 4.5.’te numunelere 1100°C/1saat normalleştirme ve 710°C/2saat ve 760°C/1saat temperleme işlemi sonrasında elde edilen darbe enerjileri verilmiştir. Şekil 4.9’da -50°C ve Şekil 4.10’da 25°C’de elde edilen değerler grafik olarak verilmiştir. Darbe enerjisi beklenildiği üzere tüm numuneler için -50°C’de 25°C’deki değerlerden

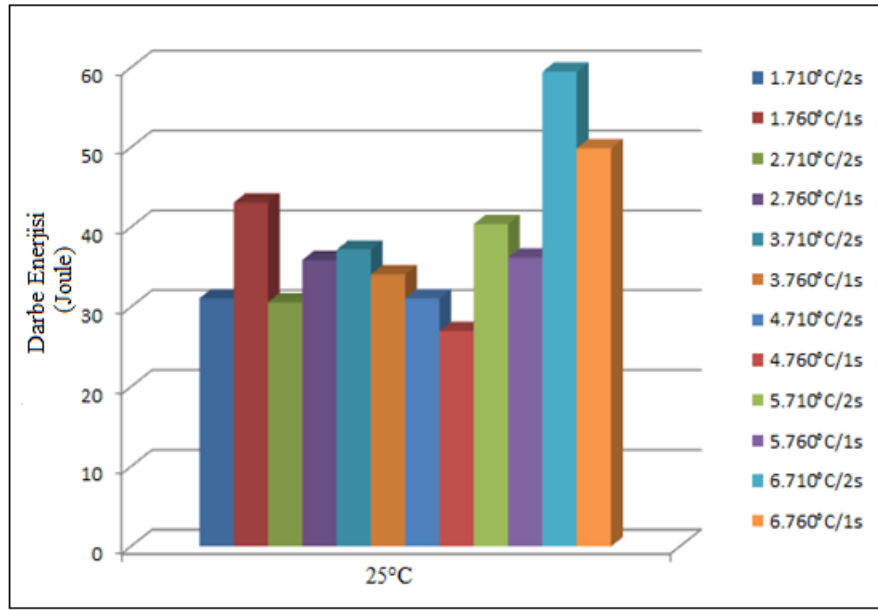
düşük çıkmıştır. En düşük değer -50°C için 1.numune için $710^{\circ}\text{C}/2\text{s}$ ve en yüksek değer 25°C 'de 6.numune için $710^{\circ}\text{C}/\text{saat}$ ısıtım işlem parametrelerinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. Numunelere $1100^{\circ}\text{C}/1\text{saat}$ normalleştirme ve değişik sıcaklık ve sürelerdeki temperleme işlemi sonrasında uygulanan darbe testi enerjileri.

Numune-Sıcaklık ve Süre	Darbe Enerjisi (J)	
	-50°C	25°C
1.710 $^{\circ}\text{C}/2\text{s}$	12,7	31,1
1.760 $^{\circ}\text{C}/1\text{s}$	16,1	43,1
2.710 $^{\circ}\text{C}/2\text{s}$	15,7	30,6
2.760 $^{\circ}\text{C}/1\text{s}$	14,3	35,9
3.710 $^{\circ}\text{C}/2\text{s}$	19,5	37,2
3.760 $^{\circ}\text{C}/1\text{s}$	16,6	34,1
4.710 $^{\circ}\text{C}/2\text{s}$	22,7	31,1
4.760 $^{\circ}\text{C}/1\text{s}$	12,7	27,0
5.710 $^{\circ}\text{C}/2\text{s}$	25,2	40,4
5.760 $^{\circ}\text{C}/1\text{s}$	21,5	36,2
6.710 $^{\circ}\text{C}/2\text{s}$	26,6	59,5
6.760 $^{\circ}\text{C}/1\text{s}$	17,2	49,9



Şekil 4.9. Numunelere $1100^{\circ}\text{C}/1\text{saat}$ normalleştirme ve ardından değişik sıcaklık ve sürelerdeki temperleme işlemi sonrasında -50°C 'de uygulanan darbe testi enerjileri.

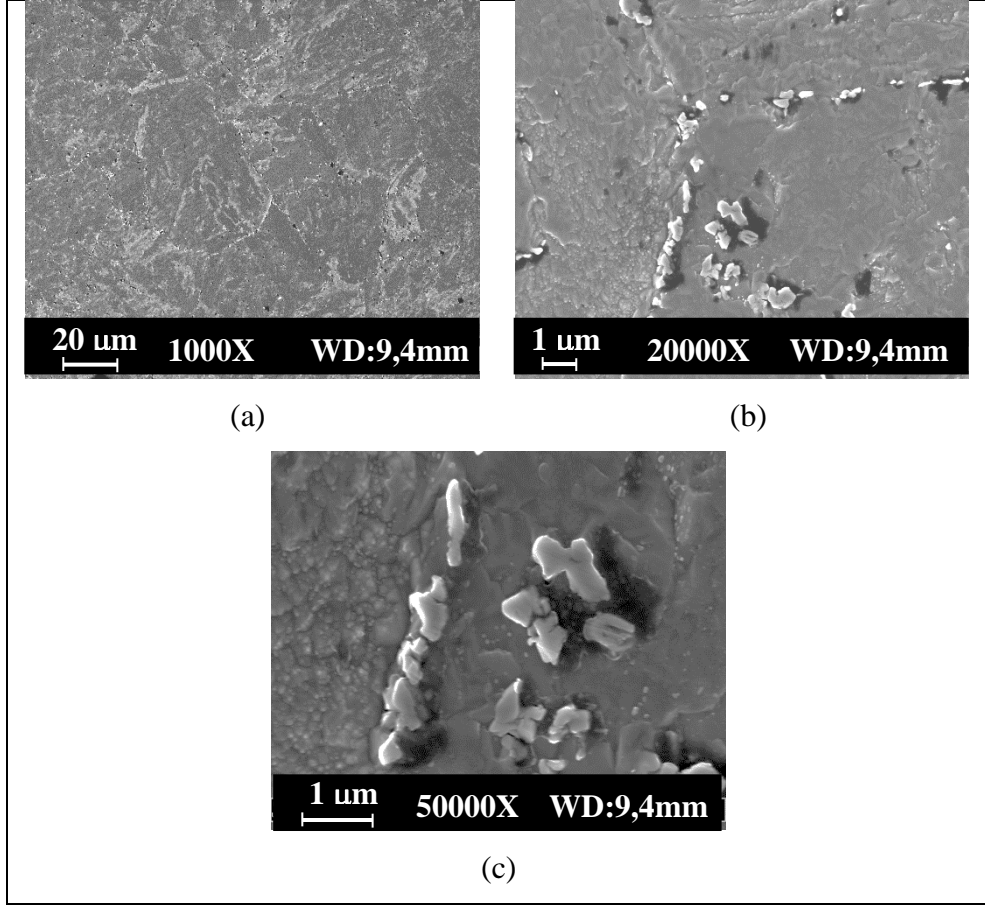


Şekil 4.10. Numunelere önce 1100°C/1saat normalleştirme ve ardından değişik sıcaklık ve sürelerdeki temperleme işlemi sonrasında 25°C'deki darbe testi enerjileri.

4.7. SEM KARAKTERİZASYONU

SEM karakterizasyonu için bazı numuneler analiz edilmiş SEM görüntüleri ve EDS analizleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Şekil 4.11'de 3.numunenin farklı büyütmelemlerdeki SEM görüntüsü ve Şekil 4.12'de EDS analizi görülmektedir. Marinkovic ve arkadaşları 2.25Cr-1Mo'li çeliklerde yaptıkları SEM incelemelerinde tane sınırlarındaki ve tane içindeki silindirik karbürlere M_7C_3 ve tane içindeki yuvarlak karbürlere $M_{23}C_6$ olarak belirtmişlerdir [6]. Şekil 4.12'de görülen karbürlerin M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ olabileceği düşünülmektedir.

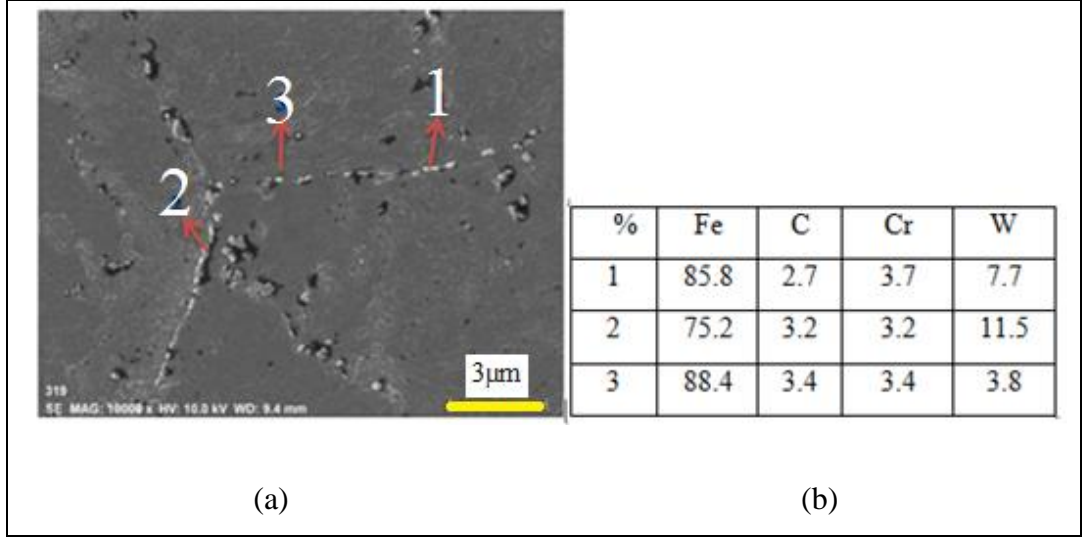
Literatürde bu malzemelere yapılan fazla sayıda SEM çalışması yoktur. Bu malzemelere genelde TEM çalışması uygulanmaktadır. Bu sebeple çalışmada görülen yapılar (karbür, nitrür, karbonitrür) hakkında kesin ve net olarak bir sonuca ulaşamamıştır.



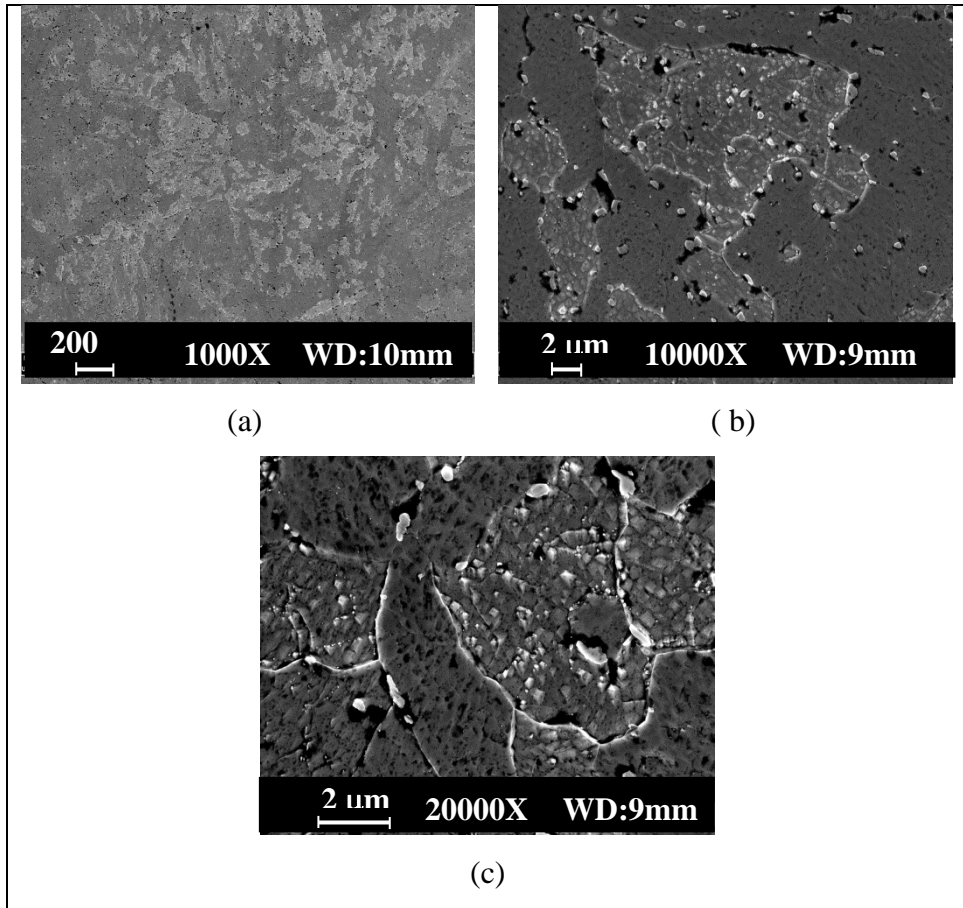
Şekil 4.11. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 660°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki farklı büyütmeledeki SEM görüntüsü.

Şekil 4.12’de 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 660°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki EDS analizi görülmektedir. EDS analizi sonuçları incelendiğinde Cr, W miktarının yüksek olması Cr içeren karbür ve W içeren karbür olduğu düşünülmektedir. Yapıda farklı karbür türleri gözlenmemiştir.

Şekil 4.13’te 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmeledeki SEM görüntüsü görülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ olabileceği düşünülmektedir.

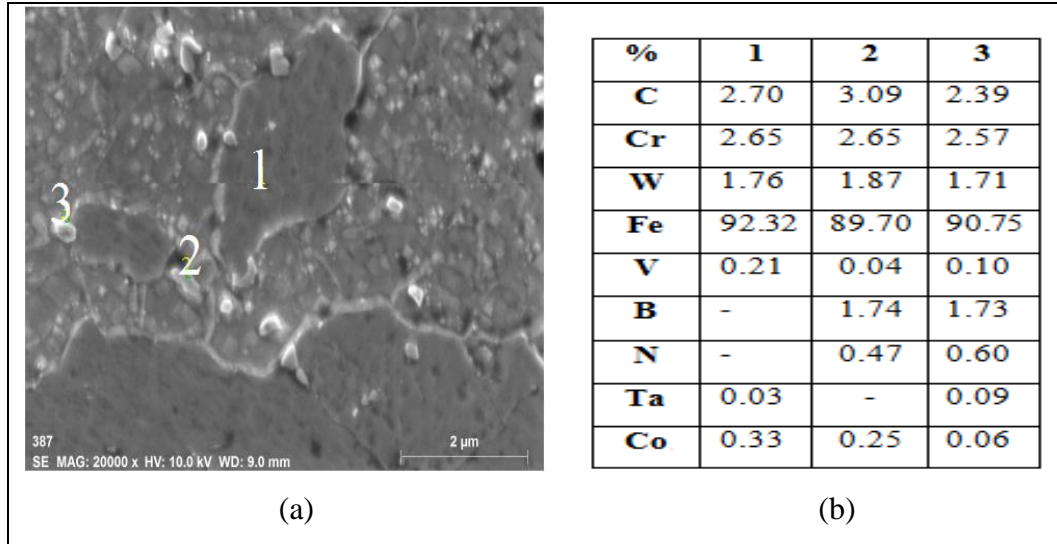


Şekil 4.12. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 660°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki a) SEM görüntüsü b) EDS analizi.



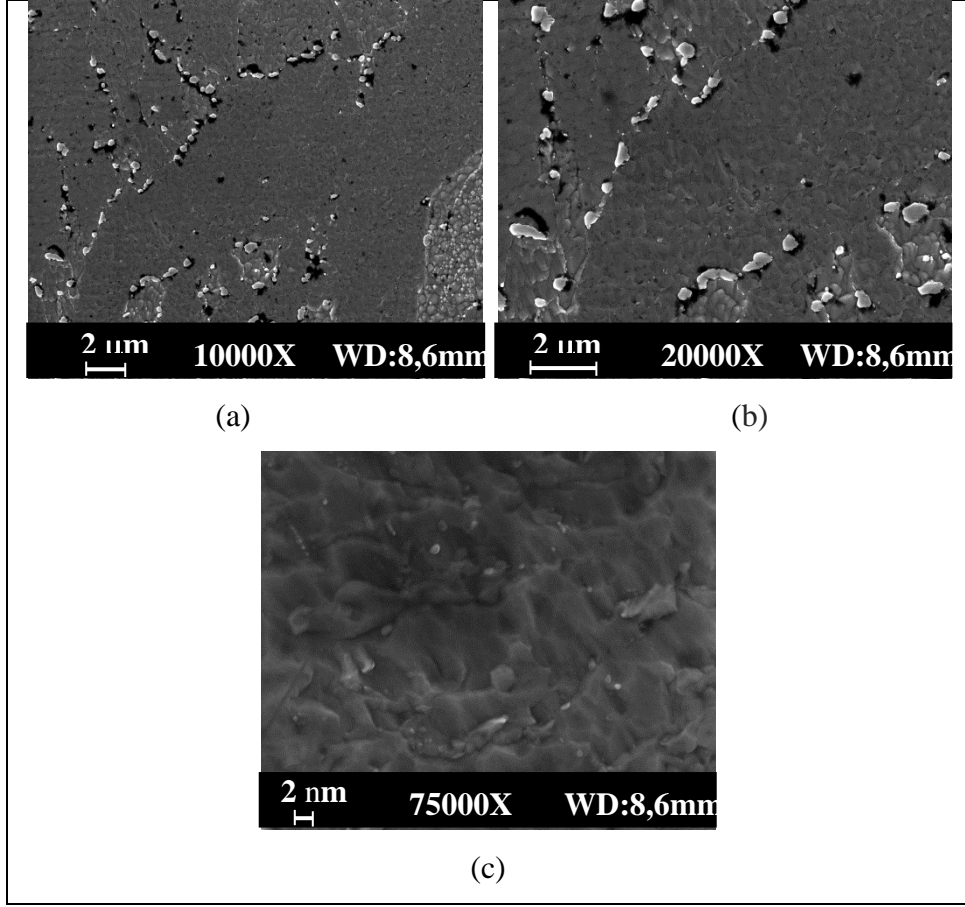
Şekil 4.13. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü.

Şekil 4.14.'te aynı numuneye uygulanan EDS analizi sonuçları görülmektedir. 2 ve 3 nolu bölgeden alınan sonuçlara bakıldığında Cr karbür, W karbür olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.14. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki a) SEM görüntüsü b) EDS analizi.

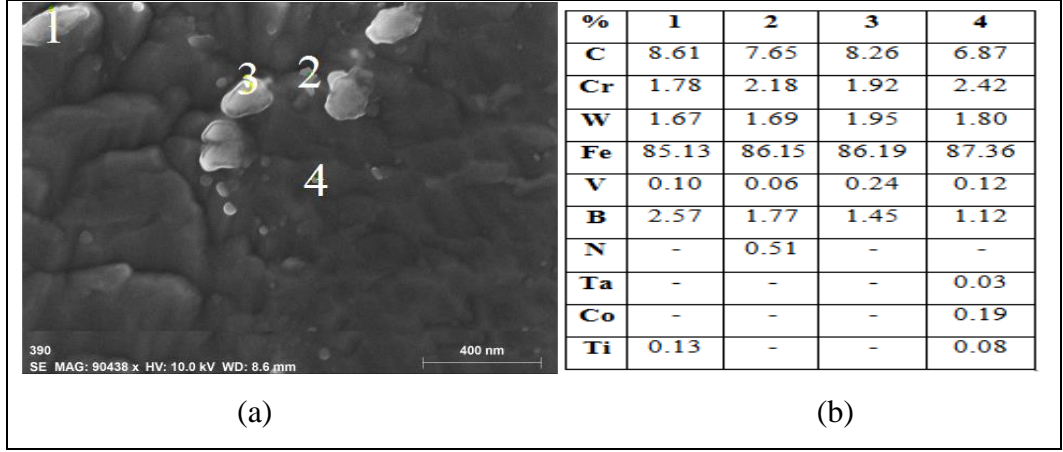
Şekil 4.15'te 4.numuneye 1100°C/1saat normalleştirme ve 710°C/2saat temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü görülmektedir. Oluşan karbürlerin tane sınırında yoğunlaştığı görülmektedir. Çok farklı karbür tipi gözlenmemiştir. Literatürdeki SEM çalışmasından bu karbürlerin M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ olabileceği düşünülmektedir [6].



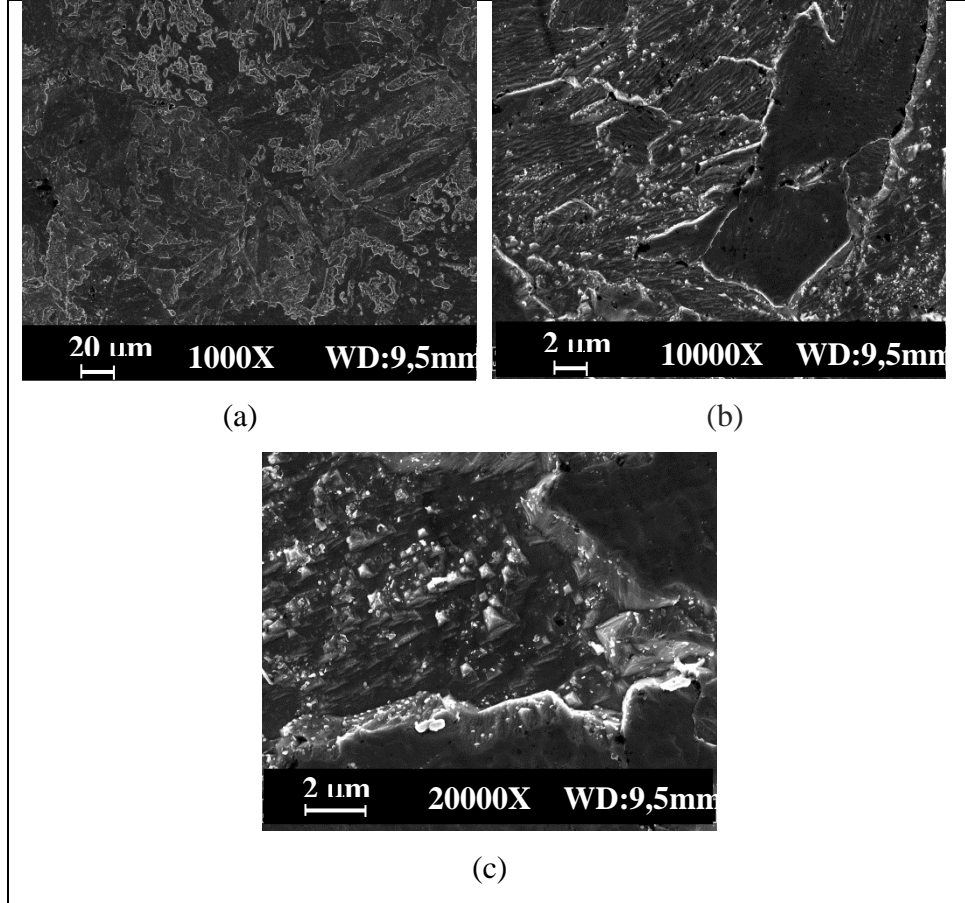
Şekil 4.15. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü.

Şekil 4.16'da aynı numuneden alınan EDS sonucu görülmektedir. EDS analiz sonuçlarının bütün noktalar için birbirine yakın olduğu görülmektedir. Oluşan karbürlerin Cr karbür, W karbür olacağı düşünülmektedir.

Şekil 4.17.'de 3.numuneye 1100°C/1saat normalleştirme ve 810°C/2saat temperleme işlemi uygulandıktan sonraki farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü görülmektedir. Tane sınırlarında ve tane içinde karbürler görülmekte olup net olarak bir yargıya varılamamıştır.



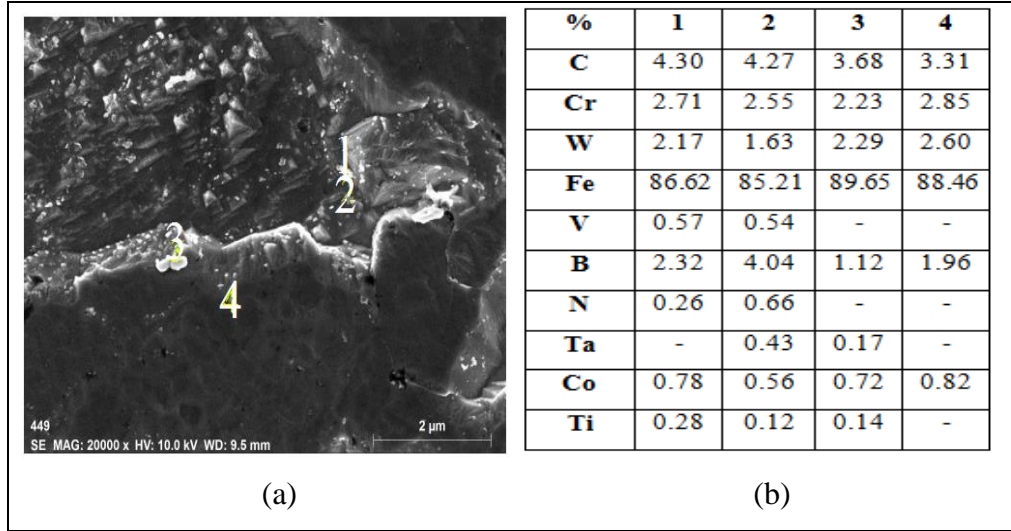
Şekil 4.16. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki a)SEM görüntüsü b)EDS analizi.



Şekil 4.17. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki farklı büyütmelerdeki SEM görüntüsü.

Şekil 4.18.'de 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra a) SEM görüntüsü b) EDS analizi verilmiştir. EDS

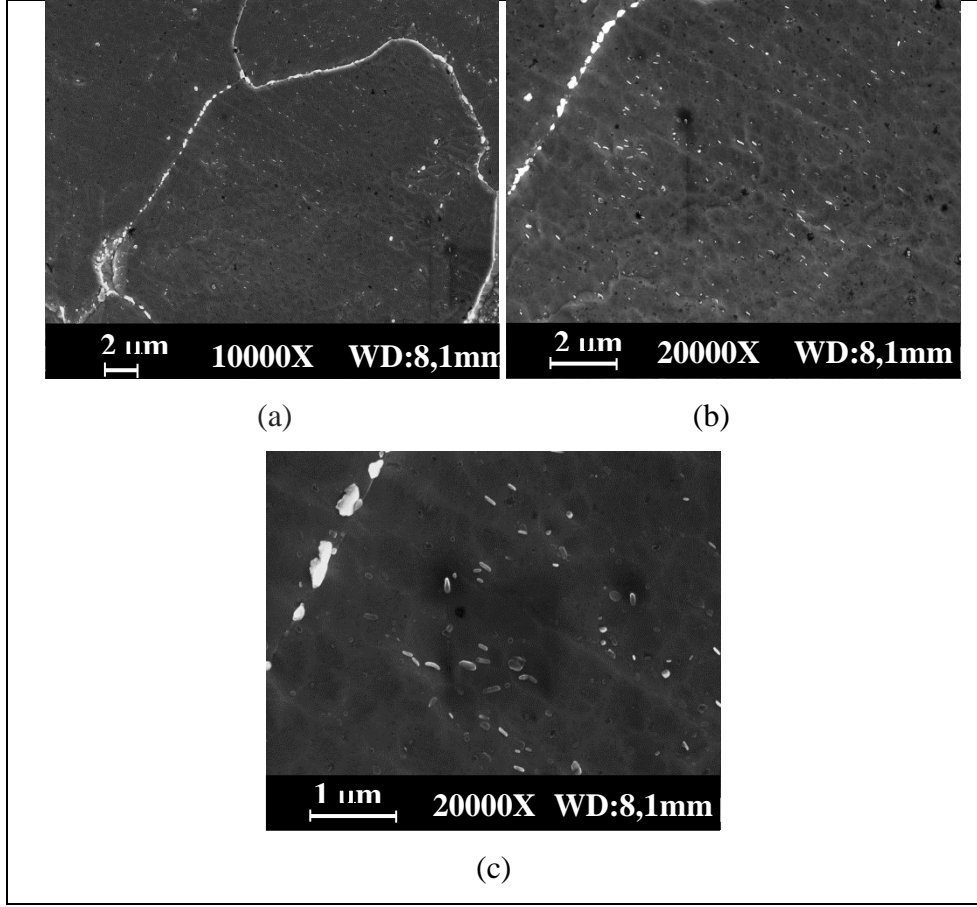
sonuçlarından, oluşan karbürlerin Cr karbür, W karbür olacağı düşünülmektedir. Oluşan karbürlerin hangi tip karbür olabileceği hakkında kesin bir yargıya varılamamıştır.



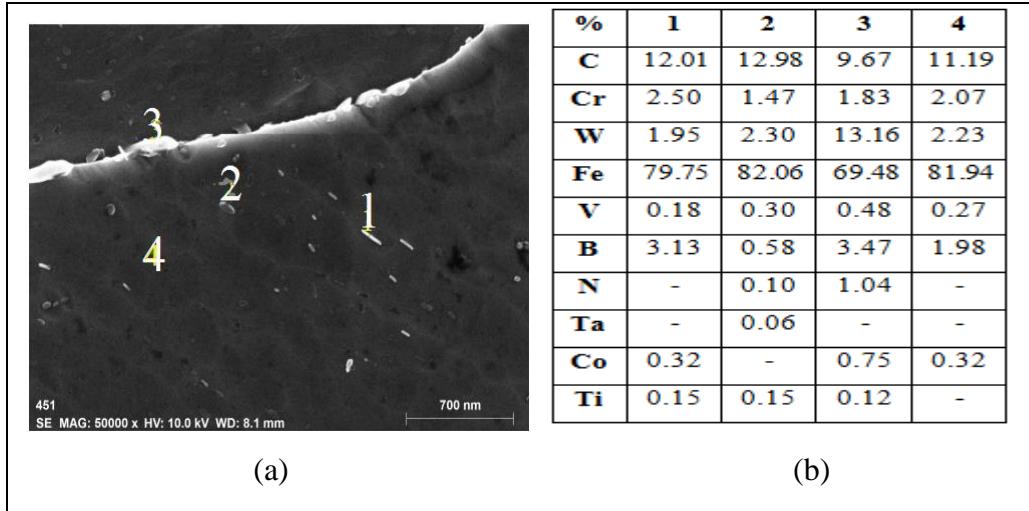
Şekil 4.18. 3.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki farklı büyütmelelerdeki a) SEM görüntüsü ve b) EDS analizi.

Şekil 4.19'da 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü görülmektedir. Tane içindeki iğnemsî ince karbürlerin MX tipi karbür olduğu düşünülmektedir. Bu karbürlerin yaklaşık boyutu 60-80 nm arasında ölçülmüştür. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında aynı tip karbürlerin MX tipi karbür olduğu söylenmiştir [2,13]

Şekil 4.20.'de 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki a) SEM görüntüsü b) EDS analizi verilmiştir. EDS analizi sonunda yapıda Cr karbür, W karbür ve V karbür olabileceği söylenebilmektedir.



Şekil 4.19. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonra farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüsü.



Şekil 4.20. 4.numuneye 1100°C/1s normalleştirme ve 810°C/2s temperleme işlemi uygulandıktan sonraki a) SEM görüntüsü b) EDS analizi.

4.8. XRD KARAKTERİZASYONU

XRD karakterizasyonu tüm numuneler için 1100°C/1saat normalleştirme ve 710°C/2saat temperlenmiş numunelerden alınmış olup çıkan fazlar toplu olarak Çizelge 4.6'da verilmiştir. Faz analizleri Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26'da ve Şekil 4.27'de toplu olarak görülmektedir.

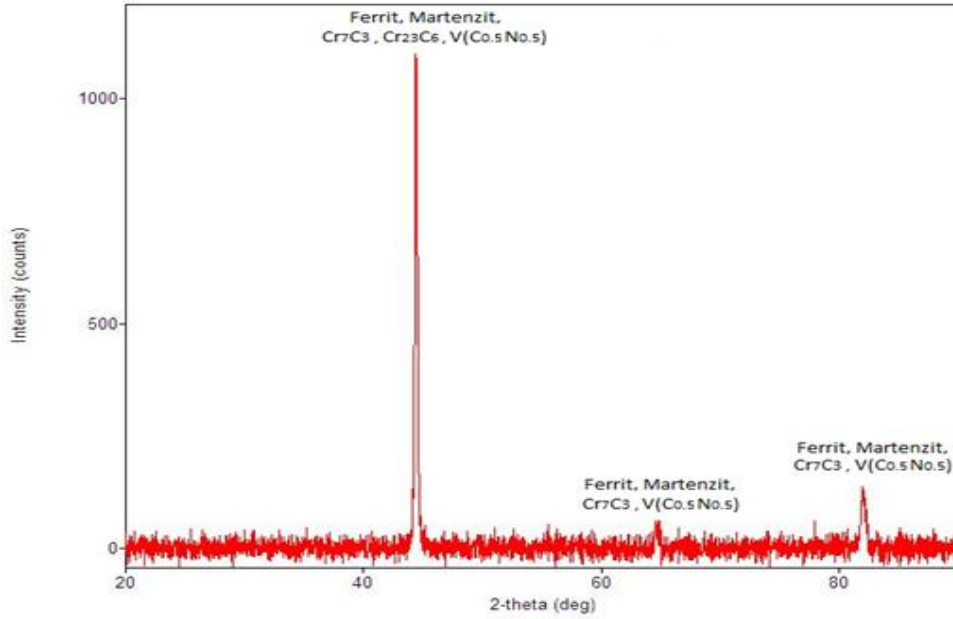
Çizelge 4.6. Numunelere yapılan X-ışını çekimleri sonucu elde edilen fazlar.

Numuneler	44°	63°	83°
1.numune	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₆ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})
2.numune	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₆ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})
3.numune	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₆ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})
4.numune	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₆ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})
5.numune	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₆ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})
6.numune	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂₃ C ₆ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})	Ferrit, Martenzit, Cr ₇ C ₃ , V(C _{0.5} N _{0.5})

Tüm sonuçlardan da görüleceği gibi tüm numunelerden 44, 63, 83 2θ açılarında aynı pikler elde edilmiş olup, şiddetleri farklıdır. Başlıca elde edilen fazlar; ferrit, martenzit, Cr₇C₃, Cr₂₃C₆, V(C_{0.5}N_{0.5}) fazlarıdır.

Literatürdeki benzer bileşime sahip çeliklere yapılan çalışmalarda yapıda M_7C_3 , $V(C,N)$, M_6C bulunduğu belirtilmiştir [3]. Başka bir çalışmada 4.5Cr-2W-0.25V çeliği için yapılan çalışmada yapıda M_7C_3 ve $M_{23}C_6$ bulunmuştur [17]. Hesaplamalı termodinamik analizlerinde 3Cr-3WV çeliği için $M(C,N)$, M_6C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, Laves fazları bulunmuştur [10]. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında bu çalışmada literatürdeki bazı yapılar bulunmuştur.

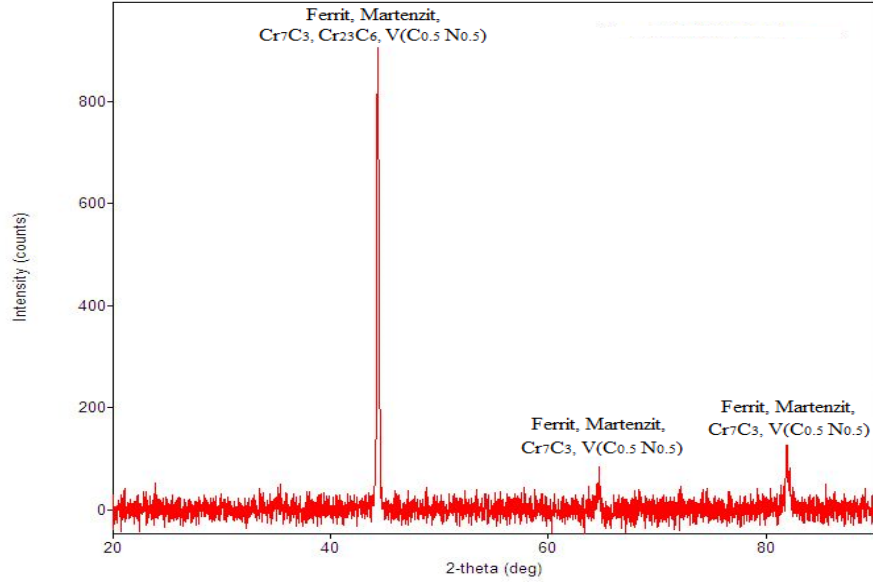
Şekil 4.21’de 1.numuneye uygulanan 1100°C/1saat normalleştirme ve 710°C/2saat temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği görülmektedir. Elde edilen fazlar; Ferrit, Martenzit, Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, $V(C_{0.5}N_{0.5})$ fazlarıdır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta yapıda martenzitin bulunduğu X-ışını çekiminde görülmüş olmasıdır.



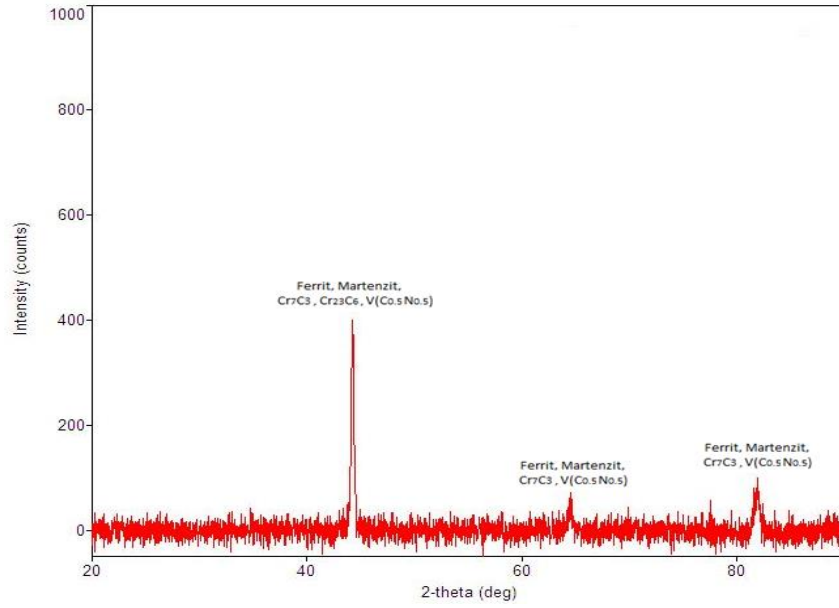
Şekil 4.21. 1.numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği.

Şekil 4.22.’de 2. numuneye uygulanan 1100°C/1saat normalleştirme ve 710°C/2saat temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği görülmektedir. Burada 1.numunede olduğu gibi yapıda Ferrit, Martenzit, Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, $V(C_{0.5}N_{0.5})$ fazları görülmüştür.

Şekil 4.23.'de 3. numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği görülmektedir. Burada 1 ve 2.numunede olduğu gibi yapıda Ferrit, Martenzit, Cr₇C₃, Cr₂₃C₆, V(Co_{0.5}N_{0.5}) fazları görülmüştür.

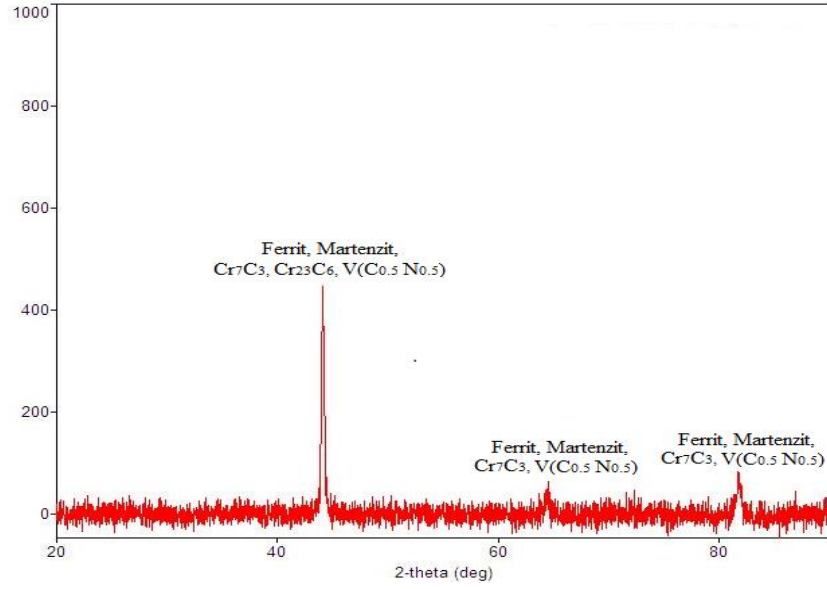


Şekil 4.22. 2.numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonrası elde edilen X-ray difraksiyon örneği.



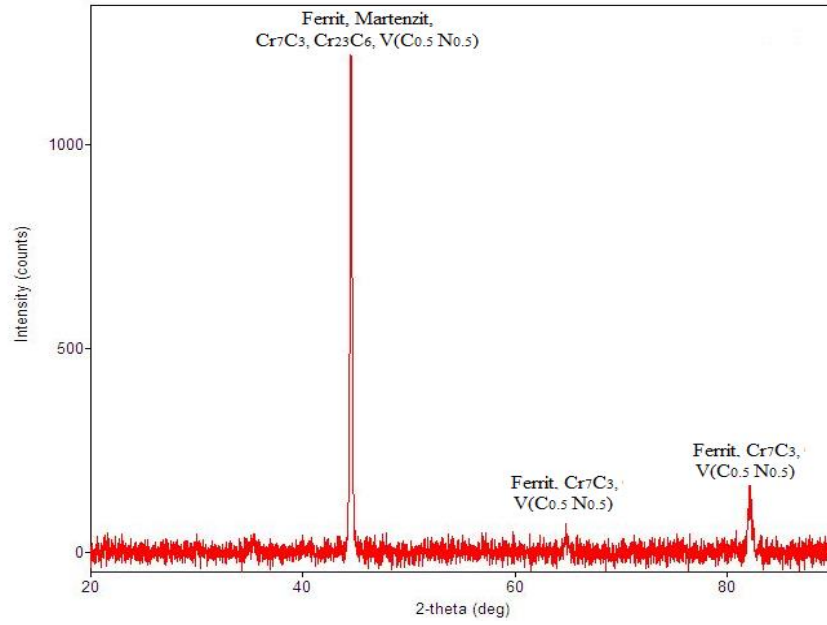
Şekil 4.23. 3.numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği.

Şekil 4.24.'te 4. numuneye uygulanan 1100°C/1saat normalleştirme ve 710°C/2 saat temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği görülmektedir. Burada 1, 2 ve 3. numunede olduğu gibi yapıda Ferrit, Martenzit, Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, $V(C_{0.5}N_{0.5})$ fazları görülmüştür.



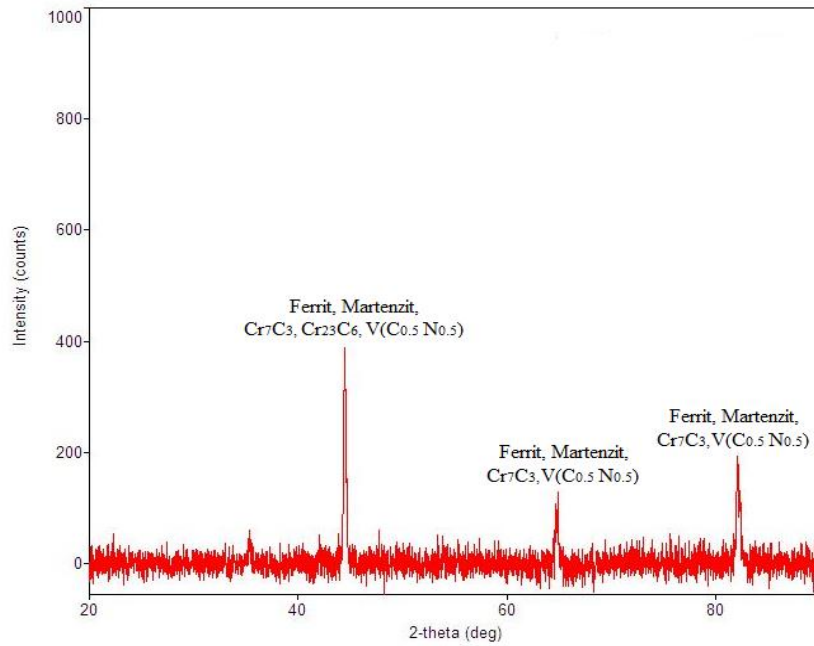
Şekil 4.24. 4.numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği.

Şekil 4.25'te 5. numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği görülmektedir. Burada 1, 2, 3. ve 4. numunede olduğu gibi yapıda Ferrit, Martenzit, Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, $V(C_{0.5}N_{0.5})$ fazları görülmüştür. Tek fark 63°'de martenzit fazı görülemediği.



Şekil 4.25. 5.numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonuncu elde edilen X-ray difraksiyon örneği.

Şekil 4.26'da 6. numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonucu elde edilen X-ray difraksiyon örneği görülmektedir. Burada 1, 2, 3, 4 ve 5. numunede olduğu gibi yapıda Ferrit, Martenzit, Cr₇C₃, Cr₂₃C₆, V(C_{0.5}N_{0.5}) fazları görülmüştür.

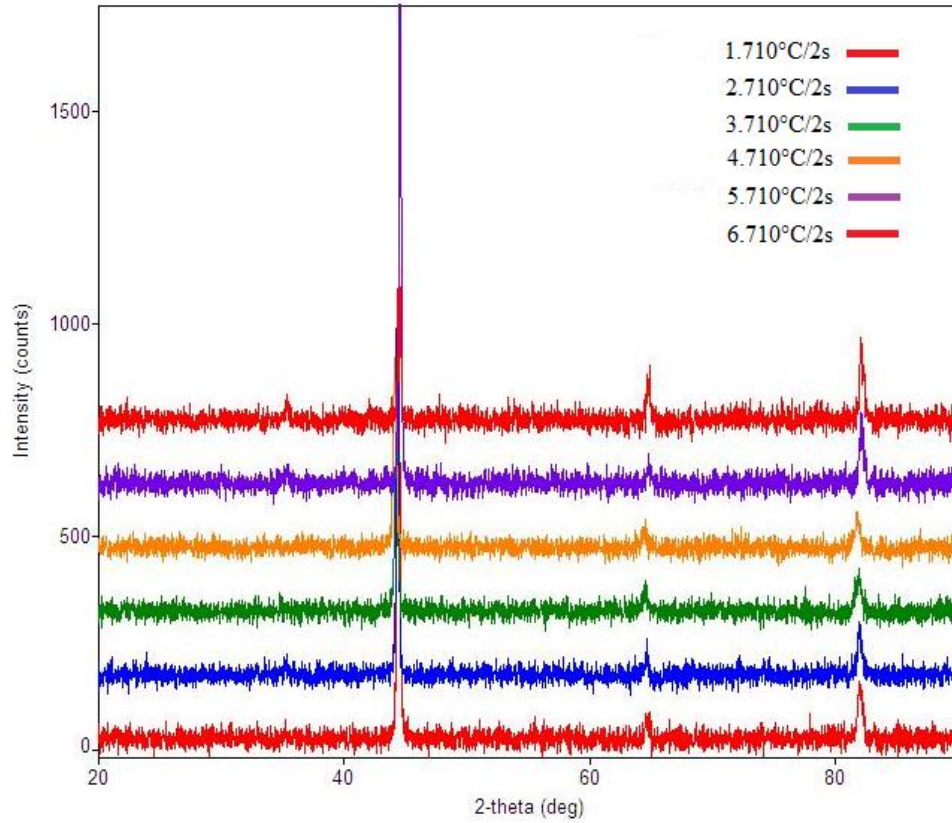


Şekil 4.26. 6.numuneye uygulanan 1100°C/1s normalleştirme ve 710°C/2s temperleme sonuncu elde edilen X-ray difraksiyon örneği.

Şekil 4.26.'da numunelerin toplu halde X-ray difraksiyon grafiği görülmektedir. Farklı numunelere yapılan X-ışını çekimleri sonunda 3 ana pik elde edilmiş olup bulunan fazlar aynıdır. Değişim sadece piklerin şiddetlerinde görülmüştür. Bunun sebebi numunelerin farklı kimyasal bileşimde olmasıdır.

Yapılacak önemli bir çalışma elektrokimyasal çıkarım tekniği (electrochemical extraction technique) ile numunelerde oluşan farklı karbürler daha hassas ve doğru bir şekilde karakterize edilebilir.

Şekil 4.27'de Numunelerin toplu halde X-ray difraksiyon örneği görülmektedir.



Şekil 4.27. Numunelerin toplu halde X-ray difraksiyon örneği.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 3Cr-W çeliği 6 farklı bileşim olarak dökülmüştür. Çeliklere uygulanan sıcak haddeleme işleminden sonra numunelere 1100°C/1saat normalleştirme ve 660/710/760/810°C-1/2/4 saat temperleme işlemi yapılmıştır. Mikroyapı karakterizasyonu optik ışık mikroskobu, SEM ve XRD cihazında gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellikleri belirleme için sertlik, oda sıcaklığında çekme, yüksek sıcaklıkta çekme ve -50°C ve 25°C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta Charpy darbe testleri yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda;

1. Sertlik test sonuçlarına göre, artan LMP'ne göre sertlik tüm numunelerde azalmıştır. LMP 20660 ve 21660 iken sertlik değerleri artış göstermiştir.
2. Mikroyapı karakterizasyonu sonucu genel olarak görülen fazlar ferrit, beyrit ve martenzittir.
3. Çekme testleri sonrası, en yüksek değer 1.numune ve 760°C/1s temperleme parametresinde elde edilmiştir.
4. Yüksek sıcaklık çekme testleri sonucunda, en yüksek değer 6.numunede elde edilmiştir. Bu değer literatürdeki diğer düşük alaşımli Cr-Mo çeliklerinden iyi ve diğer Cr-W çeliklerine yakındır.
5. Darbe testleri sonunda, en yüksek değer 6.numune 710°C/2saat parametresinde elde edilmiştir.
6. SEM karakterizasyonu incelendiğinde, numunelerde görülen çökelti türleri M_7C_3 , $M_{23}C_6$, MX çökeltileridir.

7. XRD karakterizasyonu incelendiğinde, elde edilen fazlar ferrit, martenzit, Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , $\text{V}(\text{C}_{0.5}\text{N}_{0.5})$ fazlarıdır.

Bu çalışma sonrası yapılacak çalışmalar sıralandığında;

1. Numunede oluşan karbürleri belirlemek için elektrokimyasal karbür çıkarma yöntemi kullanılabilir.
2. Ayrıca yüksek sıcaklıkta oluşan karbürleri belirlemek için yüksek sıcaklık X-ışını çekimi yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Klueh, R. L., “Elevated-temperature ferritic and martensitic steels and their application to future nuclear reactors”, *Metals and Ceramics Division*, 10-19: 34-41 (2004).
2. Klueh, R. L., Evans, N. D., Maziasz, P. J. and Sikka, V. K., “Creep rupture behaviour of 3Cr-3W-V bainitic steels”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 84: 29-36 (2007).
3. Jawad, M. and Sikka, V. K., “Development of a new class of Fe-3Cr-W(V) ferritic steels for industrial process applications”, Final Technical Report, *U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*, Oak Ridge, 19-22 (2005).
4. Metals Handbook, “Properties and Selection of Metals, 8th Edition”, *American Society for Metals*, 1: 1439-1444 (1961).
5. Fu, R. D., Wang, T. S., Zhou W. H., Zhang, W. H. and Zhang, F. C., “Characterization of precipitates in a 2.25Cr-1Mo-0.25V steel for large-scale cast-forged products”, *Materials Characterization*, 58: 968-973 (2007).
6. Bojan, A. M., Roberto, R. de A., Simone, K. B. and Fernando, C. R. A., “Thermodynamic evaluation of carbide precipitates in 2.25Cr-1.0Mo steel for determination of service degradation”, *Materials Research*, 5 (4): 491-495 (2002).
7. Swindeman, R. W., Nasreldin, A. M., Klueh, R. L. and King J. F., “Metallographic examination of response of 3Cr-1.5Mo steel to heat treatment”, *Metals and Ceramics Division*, Oak Ridge, 7-14 (1985).
8. Gianfrancesco, A. Di., Venditti, D., Allen, D. J., Morris, A., Caminada, S., Pilot, S., Rodriguez, M. M., Friedman, V., Hartrott, P.von., Siegele, D., Holmström, S., Rantala, J., Salonen, J., Nevasmaa, P., Calonius, K. and Junninen, P., “Applications of advanced low-alloy steels for new high-temperature components”, Final Report, *European Commission*, Brussels, 4-5 (2007).
9. Vaillant, J. C., Vandenberghe, B., Hahn, B., Heuser, H. and Jochum, C., “T/P23, 24, 911 and 92: New grades for advanced coal-fired power plants-properties and experience”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85: 38-46 (2008).
10. Klueh, R. L., Maziasz, P. J., Vitek, J. M., Evans, N. D. and Hashimoto, N., “Alloy design and development of cast Cr-W-V ferritic steels for improved high

temperature strength for power generation applications”, Crada, ORNL02-0648, *Oak Ridge*, 4-9, 62-64 (2006).

11. King, B., “Welding and postweld heat treatment of 2.25%Cr-1%Mo steel”, Master Thesis, *University of Wollongong*, Wollongong, 31-33 (2005).
12. Sadhan, G., “ The role of tungsten in the coarsening behaviour of $M_{23}C_6$ carbide in 9Cr–W steels at 600°C”, *J Matter Sci*, 45: 1823-1829 (2010).
13. Klueh, R. L., Alexander, D. J. and Sokolov M. A., “Effect of chromium, tungsten, tantalum, and boron on mechanical properties of 5–9Cr–WVTaB steels”, *Journal of Nuclear Materials*, 304: 139–152 (2002).
14. Yoshiaki, T., Kazuhiro, S., Kazuhiro, K. and Fujio, A., “ Effects of W and Co on long-term creep strength of precipitation strengthened 15Cr ferritic heat resistant steel”, *ISIJ International*, 43: 112-118 (2003).
15. Abe, F., Kern, T-U. and Viswanathan, R., “Creep-resistant steels” ,*Woodhead Publishing in Materials*, New York, 64-67 (2008).
16. Klueh, R. L., Alexander D. J. and Maziasz P. J., “Fracture behavior of bainitic chromium-tungsten and chromium molybdenum steels”, *Metals and Ceramics Division*, Oak Ridge National Laboratory, TN 37931-6376 (1994).
17. Asadabad, M. A., Kheirandih, S., and Novinrooz, A. J., “Tempering behavior of 4.5Cr-2W-0.25V steel”, *Journal of Iron and Steel Research, International.*, 17 (10): 57-62 (2010).
18. Zakerinia, H., Kermanpur, A. and Najafizadeh A., “Color metallography; a suitable method for characterization of martensite and bainite in multiphase steels”, *International Journal of ISSI*, 1: 14-18 (2009).
19. Larson, F. R. and Miller. J., “A Time-temperature relationship for rupture and creep stresses”, *Transactions ASME*, 74: 765-771 (1952).
20. Klueh, R. L., Hashimoto, N. and Sokolov, M. A., “Effect of heat treatment and tantalum on microstructure and mechanical properties of Fe-9Cr-2W-0.25V Steel”, *The Effects of Radiation on Materials: 21st International Symposium*, ASTM STP 1447, West Conshohocken, PA (2003).
21. Salemia, A., Abdollah-Zadeh, A., Mirzaei, M. and Assadi, H., “A study on fracture properties of multiphase microstructures of a CrMo steel”, *Materials Science and Engineering A*, 492:45–48 (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Fatih AYDIN 1990 yılında Bilecik'te doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Bilecik Anadolu Öğretmen Lisesi'nden 2008 yılında mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde öğrenimine başlayıp 2012 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını tamamladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Demir Çelik Enstitüsü
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel : (506) 8466852

E-posta : fatih.aydin@karabuk.edu.tr