

**TOZ METAL ÇELİKLERDE MEKANİK
ALAŞIMLAMAMANIN MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2019
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Selim ERMAN

**TOZ METAL ÇELİKLERDE MEKANİK ALAŞIMLAMININ MİKROYAPI
VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Selim ERMAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Aralık 2019

Selim ERMAN tarafından hazırlanan “TOZ METAL ÇELİKLERDE MEKANİK ALAŞIMLAMAMININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

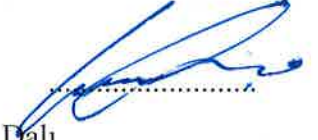
Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Dr. Hasan GÖKÇE

2. Tez Danışmanı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/12/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

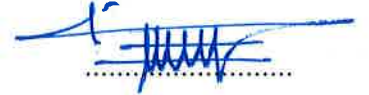
Başkan : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ (KÜ)



Üye : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)



20.12./2019

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü





“Bu çalışmadaki 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.”

Selim ERMAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METAL ÇELİKLERDE MEKANİK ALAŞIMLAMANNIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Selim ERMAN

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Aralık 2019, 77 sayfa

Bu çalışmada toz metalurjisi üretim yöntemlerinden olan mekanik alaşımlamanın çeliklerin mikroyapısı ve mekanik özelliklerine katkısının araştırılması ele alınmıştır. Öncelikle uygun toz- bilya oranı (1/5, 1/7, 1/10), bilya çapı (4mm, 5mm ve 6mm) ve mekanik alaşımlama süresi (15dk, 30dk, 1saat) belirlenmiştir. Uygun toz-bilya oranı 1/10, uygun bilya çapı 5mm ve uygun mekanik alaşımlama süresi 15dk olarak bulunmuştur. Bahsedilen uygunluklar mekanik alaşımlama yöntemi ile alaşımlı çelikler (0,55C+5Ni+Fe, 0,55C+10Ni+Fe) ve alaşımsız çelik (0,55C+Fe) üzerinden elde edilen numunelerin mekanik alaşımlamasız numuneler ile karşılaştırılması sonucu bulunmuştur.

Çalışmada uygun oranlarda elde edilen tozlar 1 saat turbula da karıştırılmıştır. Ardından MA işlemlerinden geçirilip, 700 Mpa presleme basıncı altında çekme numunesi formunda preslenmiştir. Sinterleme sıcaklığı 1400° C, argon atmosferinde

yapılmıştır. Çekme deneyi, sertlik deneyi, mikroyapı ve SEM incelemeleri ardından bulunan sonuçlar değerlendirmeye alınmıştır.

Anahtar Sözcükler: Mekanik alaşımlama, toz metalurjisi, alaşımlı çelikler, alaşımsız çelikler, nikel alaşımları.

Bilim Kodu : 91528



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MECHANICAL ALLOYS OF POWDER METAL STEELS ON MICRO STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

Selim ERMAN

Karabük University

Graduate Education Institute

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Asst. Prof. Mehmet Akif ERDEN

December 2019, 77 pages

In this study, the contribution of mechanical alloying, which is one of the production methods of powder metallurgy, to the microstructure and mechanical properties of steels was examined. Firstly, suitable powder-ball ratio (1/5, 1/7, 1/10), ball diameter (4mm, 5mm and 6mm) and mechanical alloying time (15min, 30min, 1h) were determined. The appropriate powder-ball ratio was 1/10, the appropriate ball diameter was 5mm and the appropriate mechanical alloying time was found to be 15min. Said conformities were obtained by comparison of the samples obtained from alloyed steels (0,55C + 5Ni + Fe, 0,55C + 10Ni + Fe) and unalloyed steel (0,55C + Fe) by mechanical alloying method with non-mechanical alloyed samples.

The powders obtained in the appropriate proportions were mixed in the turbula for 1 hour. It was then subjected to MA treatment and pressed in the form of a tensile

sample under a pressing pressure of 700 MPa. The sintering temperature was 1400° C, argon atmosphere. The results obtained after tensile test, hardness test, microstructure and SEM investigations were evaluated.

Key Word : Mechanical alloying, powder metallurgy, alloy steels, non-alloy steels, nickel alloys.

Science Code : 91528



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecimde, tez konumu belirlemede ve tez çalışmalarım süresince engin bilgi ve birikimini bana aktaran, ilgi, alaka ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN' e deneysel çalışmalarım boyunca daha önce kendi çalışmalarında edinmiş olduğu bilgi ve deneyimleri benden esirgemeyen İmalat Yüksek Mühendisi Fuat MEDİK' e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ayrıca yaptığım uygulamalar için laboratuvar ve teknik malzemelerini kullanmamda bana yardımcı olan Teknoloji Fakültesi Dekanlığı' na ve İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı' na teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini her an hissettiğim, maddi ve manevi anlamda yanımda olan, hayallerimin peşinden gitmemde en büyük destekçim sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmamız Karabük Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri KBÜBAP-18-YL-176 numarası altında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu çalışmayı destekleyen Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Müdürlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI	3
2.1. ÇELİKLERİN KARBON ORANINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI	3
2.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler.....	4
2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler	4
2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler	4
2.1.4. Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri.....	5
2.2. ÇELİKLERİN TÜRK STANDARTLARINA GÖRE GÖSTERİMİ	5
2.2.1. Mekanik Özellikleri Esas alınan Çelikler	5
2.2.2. Kimyasal Bileşimi Esas Alınan Çelikler	5
2.2.2.1. Alaşimsız Çelikler.....	5
2.2.2.2. Alaşımlı Çelikler.....	6
2.3. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİLERİ	7
2.3.1. Karbon (C).....	7
2.3.2. Manganez (Mn)	8
2.3.3. Silisyum (Si)	9

	<u>Sayfa</u>
2.3.4. Krom (Cr)	9
2.3.5. Nikel (Ni).....	10
2.3.6. Vanadyum (V)	11
2.3.7. Wolfram (W)	11
2.3.8. Niobyum (Nb).....	12
2.3.9. Titanyum (Ti).....	12
2.3.10. Kobalt (Co)	13
2.3.11. Molibden (Mo).....	13
2.3.12. Azot (N).....	13
2.3.13. Oksijen (O)	14
2.4. NİKEL ALAŞIMLARI	14
2.4.1. Saf Nikel	14
2.4.2. Nikel - Demir Alaşimleri	15
2.4.3. Nikel - Bakır Alaşimleri	15
2.4.4. Nikel - Molibden Alaşimleri.....	15
2.4.5. Nikel - Krom Alaşimleri.....	15
2.4.6. Nikel - Krom - Demir Alaşimleri	16
2.4.7. Nikel - Krom - Molibden Alaşimleri	16
2.4.8. Nikel - Krom - Kobalt Alaşimleri.....	17
2.4.9. Nikel - Titanyum Alaşimleri.....	17
2.5. ÇELİKLERDE MUKAVEMET ARTTIRMA MEKANİZMALARI	18
2.5.1. Alaşım Sertleşmesi	19
2.5.1.1. Katı Eriyik Sertleşmesi	19
2.5.1.2. İkinci Faz Sertleşmesi	20
2.5.2. Çökelme Sertleşmesi	21
2.5.3. Dispersiyon Sertleşmesi	22
2.5.4. Soğuk İşlem	23
2.5.5. Tane Boyutunu Küçültme.....	25
2.5.6. Deformasyon Yaşlanması.....	26
2.5.7. Martenzitik Dönüşüm	26
2.5.8. Radyasyonla Sertleştirme	28

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	30
ÇELİKLERİN MALZEME MUAYENE YÖNTEMLERİ	30
3.1. GİRİŞ.....	30
3.2. MALZEMELERDE TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ	31
3.2.1. Gözle Muayene Yöntemi.....	31
3.2.2. Mikroskopik Muayene Yöntemi.....	31
3.2.3. İç Yapı Deneyleri.....	32
3.2.4. Sıvı Penetrant Muayene Yöntemi.....	33
3.2.5. Ultrasonik Muayene Yöntemi.....	33
3.2.6. Radyografik Muayene Yöntemi	34
3.2.7. Manyetik Muayene Yöntemi	35
3.2.8. Basınç ile Muayene Yöntemi.....	36
3.3. MALZEMELERDE TAHRİBATLI MUAYENE YÖNTEMLERİ	37
3.3.1. Kırılma Deneyi.....	37
3.3.2. Çekme Deneyi	38
3.3.3. Basma Deneyi.....	40
3.3.4. Bükme Deneyi	42
3.3.5. Burulma Deneyi.....	42
3.3.6. Kesme Deneyi.....	43
3.3.7. Darbe Çentik Deneyi	44
3.3.8. Aşınma Deneyi	45
3.3.9. Sertlik Deneyi	46
BÖLÜM 4	48
TOZ METALURJİSİ VE MEKANİK ALAŞIMLAMA.....	48
4.1. GİRİŞ.....	48
4.2. TOZ METALURJİSİ	48
4.2.1. Toz Metalurjisi Aşamaları	50
4.2.1.1. Tozların Üretimi.....	50
4.2.1.2. Harmanlama ve Karıştırma	50
4.2.1.3. Presleme	50
4.2.1.4. Sinterleme	50

	<u>Sayfa</u>
4.2.1.5. Üretim Aşamaları.....	51
4.2.1.6. Bitirme İşlemleri	51
4.2.2. Toz Metalürjisi Avantajları	51
4.2.3. Toz Metalürjisi Dezavantajları	52
4.3. MEKANİK ALAŞIMLAMA	52
BÖLÜM 5	54
DENEYSEL METOD	54
5.1. GİRİŞ.....	54
5.2. ALAŞIM TOZLARININ HAZIRLANMASI	54
5.3. TOZLARIN SOĞUK PRESLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ	55
5.4. SİNERLEME	56
5.5. ÇEKME TESTİ	57
5.6. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	57
5.7. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ	57
5.8. OPTİK MİKROSKOP VE SEM İNCELEMELERİ	58
BÖLÜM 6	59
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	59
6.1. GİRİŞ.....	59
6.2. MİKROYAPI ANALİZİ	59
6.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ	64
6.4. ÇEKME DENEYİ SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI	66
6.5. SEM KIRIK YÜZEY GÖRÜNTÜLERİ.....	71
BÖLÜM 7	73
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKÇA.....	75
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bir metal malzemede bulunabilen yer alan ve ara yer yabancı atomu. ...	20
Şekil 2.2. Çökeltme sertleşmesinin yapılabildiği bir alaşım sisteminde çökeltme sertleşmesi işleminin safhaları	21
Şekil 2.3. Sabit sıcaklıkta yaşlanma süresine bağlı olarak alaşım dayanımındaki değişim.....	22
Şekil 2.4. Sıcaklık arttıkça alaşım sertliğindeki değişim	22
Şekil 2.5. Soğuk işlem oranına bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinin değişimi.....	23
Şekil 2.6. Soğuk işlenmiş malzemede tavlama sıcaklığına bağlı olarak malzemenin özelliklerinin değişimi	24
Şekil 2.7. Soğuk işlem, toparlanma ve sürünme sırasında oluşan hücre ve alt tane yapısı.....	26
Şekil 2.8. C miktarına göre çeşitli fa dönüşümü ürünlerinin sertliklerinin değişimi.....	27
Şekil 2.9. Bir alaşımlı çeliğin TTT diyagramında ausforming işleminin safhaları .	27
Şekil 2.10. 347 paslanmaz çeliğinde nötron radyasyonunun mekanik özelliklere (a) Isı ve elektrik direnci özelliklerine, (b) etkisi	28
Şekil 3.1. Mikroskopla muayene için kullanılan bir cihaz.....	32
Şekil 3.2. Sıvı penetrant muayenesi uygulama adımları	33
Şekil 3.3. Ultrasonik muayene cihazı	34
Şekil 3.4. Radyografi görüntü oluşumu	35
Şekil 3.5. Kırılma deneyi ve oluşan görüntüler.	38
Şekil 3.6. Dairesel kesitli çekme numunesi ölçüleri	39
Şekil 3.7. Ünlversal çekme deney cihazı	40
Şekil 3.8. Ünlversal basma cihazı.	41
Şekil 3.9. Basma deneyi uygulanması	41
Şekil 3.10. Bükme cihazı ve numune ölçüleri.....	42
Şekil 3.11. Burulma deneyi cihazı	43
Şekil 3.12. Kesme deneyi cihazı	44
Şekil 3.13. Darbe çentik deneyi uygulanışı.....	45
Şekil 3.14. Aşınma deney cihazı	46

Sayfa

Şekil 3.15. Sertlik deneyi ölçüm formülü.....	47
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan turbula karıştırıcı.....	55
Şekil 5.2. Üretilen çekme numuneleri.....	55
Şekil 5.3. 100 ton kapasiteli hidrolik pres.	56
Şekil 5.4. Boru tipi sinter fırını.	56
Şekil 5.5. Shimadzu Marka mikrosertlik ölçüm cihazı.....	57
Şekil 6.1. Bilya çapının mekanik alaşımlandırılan alaşımsız TM çeliklerin mikroyapısına etkisi. a) 4 mm, b) 5 mm ve c) 6 mm (200x büyütme)	60
Şekil 6.2. a) 15 dk ve b) 1 saat mekanik alaşımlandırılan alaşımsız çelik numunelerin 200x mikroyapı görüntüsü.....	61
Şekil 6.3. Toz- bilya oranı a) 1/5, b) 1/7, c) 1/10 olan alaşımsız çelik numunelerin 200x mikroyapı görüntüleri.	62
Şekil 6.4. 30 dk mekanik alaşımlandırılmış ağırlık olarak %5 Ni içeren çelik numunenin mikroyapı görüntüleri a) 100x, b) 200x ve c) 500x büyütme	63
Şekil 6.5. 30 dk mekanik alaşımlandırılmış ağırlık olarak %10 Ni içeren çelik numunenin mikroyapı görüntüleri a) 50x, b) 100x, c) 200x ve d) 500x büyütme.	63
Şekil 6.6. Bilya çapının alaşımsız TM çeliklerinde çekme dayanımına etkisi (Sırası ile 4 mm, 5 mm ve 6 mm bilya çapı).....	66
Şekil 6.7. Alaşımlama süresinin çekme dayanımı üzerine etkisi (Sırasıyla 15 dk., 1 saat, 2 saat ve 3 saat).....	67
Şekil 6.8. Toz- bilya oranı 1/10, 1/7, 1/5 olan numunelerin çekme dayanımı üzerine etkisi (Sırasıyla 1/10., 1/7 ve 1/5 Toz- bilya oranı).....	68
Şekil 6.9. 15dk. mekanik alaşımlandırılan % ağırlık olarak farklı oranlarda Ni içeren TM çelik numunelerin çekme eğrileri (sırasıyla Fe-C, Fe-C-5Ni ve Fe-C-10Ni).....	69
Şekil 6.10. Farklı sürelerde mekanik alaşımlandırılan ağırlık olarak % 10 Ni içeren TM çelik numunelerin çekme eğrileri (sırasıyla 0-15-30-60dk MA yapılan numuneler).	70
Şekil 6.11. Farklı sürelerde mekanik alaşımlandırılan ağırlık olarak % 10 Ni içeren TM çelik numunelerin SEM kırık yüzey görüntüsü (200x-1000x).	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Alaşım elementleri ve etkileri.....	6
Çizelge 2.2. Çeşitli Nikel Alaşımalarının Nominal Bileşimleri.	17
Çizelge 6.1. Numunelere ait yoğunluk ölçümleri.	65
Çizelge 6.2. Bilya çapının alaşımsız çeliklerin çekme dayanımına etkisi.	66
Çizelge 6.3. Alaşımlama süresinin çekme dayanımı üzerine etkisi.	67
Çizelge 6.4. Toz/Bilya oranının alaşımsız çeliklerin çekme dayanımına etkisi.....	68
Çizelge 6.5. 15dk. mekanik alaşımlandırılan farklı Ni içeren TM çelik numunelerin çekme eğrileri çekme (UTS), % uzama değerleri.	69
Çizelge 6.6. Farklı sürelerde mekanik alaşımlandırılan ağırlık olarak % 10 Ni içeren TM çelik numunelerin çekme eğrileri çekme (UTS), % uzama değerleri.	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- dk : Dakika
- f : Ferrit yada perlit fazının hacimsel oranı
- n : Ferrit yada perlit fazına karşılık gelen nokta sayısı
- N : Sayılan toplam nokta sayısı
- σ_n : Nokta sayım metodunun standart sapması
- $i\alpha$: Ferrit tane büyüklüğü
- L : Ölçüm çizgisinin toplam uzunluğu
- fp : % perlit miktarı
- $n\alpha$: Ölçüm çizgisi tarafından kesilen ferrit tanelerinin toplam sayısı
- σ_i : Ortalama doğrusal kesme metodunun standart sapması
- n_i : Ölçülen tane sınırı sayısı
- mm : Milimetre
- μm : Mikrometre
- MPa : Megapaskal
- s : Saniye
- T : Sıcaklık
- σ_y : Akma gerilmesi
- k : Malzeme sabiti (Hall-Petch sabiti)
- d : Ferrit tane boyutu
- D : Östenit tane çapı

- A : Malzeme sabiti
P : Çökelti çapı
 f_v : Çökelti partiküllerinin hacimsel oranı

KISALTMALAR

MA' lı: Mekanik Alaşımlamalı

MA'sız: Mekanik Alaşımlamasız

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çelik, demir elementi ile genellikle %0,2 ila %2,1 oranlarında değişen karbon miktarının bileşiminden meydana gelen bir alaşımdır. Çelik alaşımındaki karbon miktarları çeliğin sınıflandırılmasında etkin rol oynar. Karbon genel olarak demir'in alaşımlayıcı maddesi olsa da demir elementini alaşımlamada nikel, magnezyum, krom, vanadyum ve volfram gibi farklı elementler de kullanılabilir [1]. Karbon ve diğer elementler demir atomundaki kristal kafeslerin kayarak birbirini geçmesini engelleyerek sertleşme aracı rolü üstlenirler. Alaşımlayıcı elementlerin, çelik içerisindeki, değişen miktarları ve mevcut buldukları formlar (çözünen elementler, çökelti evresi) oluşan çelikte sertlik, süneklilik ve gerilme noktası gibi özellikleri kontrol eder. Karbon miktarı yüksek olan çelikler demirden daha sert ve güçlü olmasına rağmen daha az sünektirler.

Nikel ise östenit dengeleyicidir ve demir krom karbon alaşımlarında östenit alanını genişletir ve ferrit alanını daraltır. Nikel, yüksek sıcaklıkta korozyon ve oksitlenmeye karşı direnci artırır. Tane küçültme etkisine sahip olan nikel, malzemenin tokluğunu ve mukavemetini artırır. Ayrıca, malzemenin yüzeyinde tufal oluşumunu engelleyici özelliğe sahiptir. Krom ile birlikte kullanılması ile birlikte sertliğini, sünekliliğini yüksek yorulma direncini artırır ve kritik soğuma hızını düşürür. Literatürdeki bazı çalışmalar Ni ilavesinin perlit miktarını arttırdığı yönündedir. Örneğin, Kalathur ve Frederick (2007) yaptıkları çalışmada Fe-C-Ni alaşımlarında Ni miktarının artması ile kısmen perlitin içindeki karbon miktarının azaldığı ve ayrıca mikroyapıda perlit miktarının arttığı ferrit miktarının ise azaldığını belirtmişlerdir. Bunun sonucunda malzemenin dayanımı artarken sünekliliğin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Nikel elementi bir çok element ile (karbon, bakır ve molibden gibi) karşılaştırıldığında, sahip olduğu difüzyon katsayısı değeri daha düşük olduğundan demir içerisinde yavaş yayılım gösterir.

Bu çalışmada Fe tozlarının içerisinde % ağırlık olarak grafit ve farklı oranlarda (0-5 Ni, 10 Ni) Ni ilave edilerek MA yöntemi ile 4 mm, 5 mm, 6 mm bilya boyutları, 15 dk, 30 dk, 1 saat MA süresi ve 1/5, 1/7, 1/10 toz- bilya oranı ile istenilen bileşimde çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen blok numuneler için sinterleme işlemi 1400 °C'de 2 saat süre ile argon atmosferinde bekletilerek yapılmıştır. Numunelerin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ve SEM ile gerçekleştirilirken, mekanik özellikleri ise çekme testi ve sertlik ölçümleri yapılarak belirlenmiştir.



BÖLÜM 2

ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Çelikler alaşımlı çelikler ve alaşımsız çelikler olarak ikiye ayrılır. Alaşımsız çelikler demir ve karbon haricinde üst sınırları aşağıda örneklendirilen kimyasal elementler de içerebilirler. Bu üst sınırlar %0,5 Si, %1,0 Mn, %0,1 Al, %0,25 Cu, %0,09 P ve %0,006 S şeklinde sıralanabilir. Ötektoid altı alaşımsız çeliklerin karbon oranı %0,8'den az, ötektoid alaşımsız çeliklerin karbon oranı, ötektoid üstü alaşımsız çeliklerin karbon oranı ise %0,8'den fazladır. Alaşımlı çelikler ise düşük alaşımlı ile yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere ikiye ayrılır. Düşük alaşımlı çeliklerin alaşım elementlerinin oranları toplamı %5' den azdır. Yüksek alaşımlı çeliklerin alaşım elementlerinin oranları toplamı %5' den fazladır. Alaşım elementleri Fe-Fe₃C denge diyagramındaki ötektoid noktayı %0,8 C oranından daha düşük karbon oranlarına doğru kaydirdikleri gibi A_{c1}, A_{c3}, A_{cm} sembolleri ile gösterilen dönüşüm sıcaklıklarını da önemli ölçüde değiştirebilirler [2].

Çelikler genel yapım çelikleri, makine yapım çelikleri, sementasyon çelikleri, nitrürasyon çelikleri, otomat çelikleri, yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler, paslanmaz çelikler, rulman çelikleri ve takım çelikleri gibi pek çok sınıfa ayrılabilir [2].

2.1. ÇELİKLERİN KARBON ORANINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI

Çelikler içerdikleri karbon oranına göre az veya düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler, yüksek karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu takım çelikleri olmak üzere dört sınıfa ayrılabilirler [3]. Bu çelikler aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

2.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

Bu gruba dahil olan çelikler %0,25 oranlarında karbon içerirler. Çok yumuşak ve yumuşak çelikler olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

- a) Çok yumuşak çelikler: %0,007-0,15 arasındaki oranlarda karbon ihtiva eden soğuk şekillendirmeye elverişli olan çeliklerdir.
- b) Yumuşak çelikler: %0,15-%0,25 arasındaki oranlarda karbon içerirler. Bu çelikler oldukça yaygın olarak kullanılır. Çok iyi kaynak edilebilirler, fakat su verme yöntemi ile sertleştirilebilme yetenekleri düşüktür [3].

2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

Orta karbonlu çelikler %0,25-0,55 oranlarında karbon içerirler. Isıl işlem için oldukça uygun çeliklerdir. Başka bir deyişle orta karbonlu çeliklerin özellikleri ısıl işlemle büyük oranlarda değiştirilebilir. Orta karbonlu çelikler içerdikleri karbon oranlarına göre aşınmaya karşı mukavemetli çelikler, mil çelikleri ve genel dövme çelikleri olarak üçe ayrılmaktadır.

- a) Aşınmaya karşı mukavemetli çelikler: %0,45-0,55 arasındaki oranlarda karbon ihtiva etmektedirler. Ray, ray tekerleği, pres kalıpları ve hidrolik silindirlerin yapımında kullanılmaktadırlar.
- b) Mil çelikleri: %0,35-0,45 arasındaki oranlarda karbon içerirler. Mil, tel ve dingil yapımı gibi uygulamalarda kullanılırlar.
- c) Genel dövme çelikleri: %0,25-0,35 arasında karbon ihtiva ederler [3].

2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

Bu gruba dahil olan çelikler %0,55-0,9 aralığında karbon içerirler. Yüksek mukavemet ve yüksek aşınma dayanımı istenen yerlerde kullanılırlar. Kullanım alanına pres kalıp blokları örnek olarak gösterilebilir [3].

2.1.4. Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri

Bu çelikler %0,9-1,6 arasında karbon ihtiva eden çeliklerdir. Yüksek aşınma dayanımı ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Matkap uçları ve torna kalemleri bu çeliklerin kullanım yerlerine örnek olarak verilebilir [3]

2.2. ÇELİKLERİN TÜRK STANDARTLARINA GÖRE GÖSTERİMİ

Çelik ve dökme demirlerin kimyasal bileşim ve özelliklerine göre kısa gösterilişleri TS 1111 ve bu standardın güncelleştirilmiş formlarında ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Çelikler ergitme yöntemine göre T (Thomas konverteri), O (oksijen konverteri), M (Siemens-Martin ocağı), E (elektrik ark ocağı) ve I (endüksiyon ocağı); döküm şekline göre de S (sakinleştirilmiş), Sy (yarı sakınleştirilmiş) ve K (kaynar dökülmüş) işaretleri ile gösterilir [4].

2.2.1. Mekanik Özellikleri Esas alınan Çelikler

Bunlar ısıtım işlem için öngörülmemeyen çelikler olup, Fe işaretine ek olarak çekme dayanımlarının en düşük değerleri ile tanımlanırlar. Örneğin çekme dayanımının en düşük değeri 37 kgf/mm² olan genel yapı çeliği Fe 37 şeklinde gösterilir. Çekme dayanımlarının en düşük değerleri 42,60 ve 70 kgf/mm² olan genel yapı çelikleri sırasıyla Fe 42, Fe 60 ve Fe 70 şeklinde gösterilmektedir [4].

2.2.2. Kimyasal Bileşimi Esas Alınan Çelikler

Bunlar alaşımsız ve alaşımlı çeliklerdir. Isıtım işlem için uygunlardır.

2.2.2.1. Alaşımsız Çelikler

Bu çelikler ortalama karbon oranının 100 katı ve C harfi kullanılarak gösterilmektedirler. Örneğin içeriğinde %0,35 oranında karbon ihtiva eden alaşımsız ve normalize edilmiş oksijen konverter çeliği OS C 35 olarak gösterilmektedir.

Karbon oranı ortalama %0,45 olan alaşımsız çelik C 45 olarak gösterilmektedir. Karbon (C) işaretinden sonra gelen küçük harfler ise alaşımsız çeliğin türünü gösterir. Örneğin karbon oranı ortalama %0,45 olan alaşımsız çelik Ck 45 olarak, %0,53 oranında karbon ihtiva eden ve yüzeyi sertleştirilebilirliğe uygun alaşımsız çelik, Cf 53 olarak gösterilebilir. Buradaki asal çelik deyimini, kimyasal bileşimi esas alınan, kükürt, fosfor oranlarının toplamı %0,035' den daha az olan ve ısı işleme elverişli çelik anlamına gelmektedir [4].

2.2.2.2.Alaşımlı Çelikler

Düşük Alaşımlı Çelikler

Bu gruptaki çelikler C işareti ile gösterilmezler. Ortalama karbon yüzde oranının 100 katı yazılmasının ardından, oran sıralamasına göre alaşım elementlerinin simgeleri ile elementlerin katsayılarına çarpılıp bulunan sonuç tam sayıya yuvarlatılarak yüzde oranları belirtilmiş olur [5]. Aşağıda alaşım elementleri ve etkileri Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Alaşım elementleri ve etkileri.

Alaşım Elementi	Katsayı
Co, Cr, Mn, Si, Ni, W	4
Al, V, Pb, Cu, Nb, Mo, Ti, Ta, Be, Zr	10
S,C,Ce,P,N	100
B	1000

Örnek olarak içeriğinde %0,20 C ve %1,25 Mn olan düşük alaşımlı çelik 20Mn5, içeriğinde %0,15 C ve %0,75 Cr olan düşük alaşımlı çelik 15Cr3, içeriğinde %0,15 C, %1 Cr ve %0,40 Mo olan düşük alaşımlı çelik ise 15CrMo4-4 şeklinde gösterilmektedir.

Otomat Çelikleri

Karbon oranları düşük alaşımlı çeliklerdeki gibi yazılmaktadır. Çelikte Mn, Pb, S ve P elementlerinden hangilerini içeriyorsa bu sıraya göre gösterilmektedir. Yalnız kükürdün yüzde ortalama oranı 100 ile çarpılarak belirtilmektedir. Örneğin içeriğinde %0,45 C, %0,15-0,30 Pb ve %0,20 S olan otomat çeliği 45SPb20; aynı şekilde içeriğinde %0,09 C, %0,90-1,30 Mn, %0,15-0,30 S ve %0,15-0,30 Pb olan otomat çeliği 9SMnPb23 olarak gösterilmektedir [5].

Yüksek Alaşımlı Çelikler

Yüksek alaşımlı çeliklerin gösterimine X harfi ile başlanır, sonrasında karbon oranının 100 katı yazılır ve ardından alaşım elementlerinin simgeleri ile bunların gerçek yüzde oranları belirtilmektedir. İkinci derecede önemli olan alaşım elementinin oranı gösterilmeyebilir. Örneğin içeriğinde %0,08 C, %18 Cr ve %8 Ni olan yüksek alaşımlı çelik X8Cr18Ni8 şeklinde; bileşiminde %0,10 C, %18 Cr, %9 Ni ve %2 Ti bulunan yüksek alaşımlı çelik X10Cr18Ni9Ti2 şeklinde ve bileşiminde %0,10 C, %22 Cr, %5 Ni, %0,6 Mo ve %0,60 Cu bulunan yüksek alaşımlı çelik ise X10Cr22Ni5MoCu şeklinde gösterilir [6].

2.3. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİLERİ

2.3.1. Karbon (C)

Çelikte bulunan ana element karbondur ve ara yer katı çözültisi yapmaktadır. Fazla miktarda bulunduğu durumda demir ile sementit (Fe_3C) ve karbür yapıcı alaşım elementlerinin bileşikte olması durumunda alaşım karbürü oluşturmaktadır. Katı çözülti durumunda bulunan karbon elementi çeliğin sertliğini diğer elementlerden daha fazla arttırmaktadır. Yalnızca karbon içeren çeliklerde, normal şartlarda, %0,6 C' a kadar sertlik artar ve daha fazla karbon içerse dahi sabit kalır.

Karbon içeriği çeliklerde arttıkça, su verme yöntemi sonucunda dönüşmeden kalan östenitte yükseliş olduğu hatırlanması gerekirse, sertliğin neden belirli bir karbon

değerinden sonra yükselmediği anlaşılabilir. Sertlik ile birlikte dayanım da artar; ancak dövülebilirlik, süneklik ve kaynak kabiliyeti düşer (Kaynak özellikleri %0,25 C' dan sonra kötüleşir.)

Çeliklerdeki karbon oranı oldukça değişkendir; Paslanmaz çelik AISI 316L' de en yüksek %0,03 karbon içerirken, soğuk iş takım çeliği AISI D3' de %2,25 karbon içermektedir.

Demir ile karbon birbiri ile katı çözeltiler yapar ve dayanım ile sertliği artırdığı gibi, kuvvetli karbürler oluşturup aşınma dayanımını da artırır [7].

2.3.2. Manganez (Mn)

Manganez elementi bütün çeliklerde bulunmaktadır. Manganez miktarının üst sınırı karbon çeliklerinde %0,8-1,0 olarak gösterilir. Daha fazla olması durumunda ise, mangan alaşımli çelik olarak isimlendirilir. Manganezin karbür yapıcı özelliği düşüktür. Ancak manganez katı çözeltiler sertleştirici olarak uygulamalarda kullanıldığı da görülür. Bu sebeple, manganez çeliğin dayanımında önemli bir artışa sebebiyet vermektedir; süneklik bir miktar azalsa dahi göz ardı edilebilir. Manganezin çeliklerin dayanımındaki sağladığı artış, çeliğin içerdiği karbon ile orantılıdır.

Manganez, kaynak edilme özelliğini iyileştirir, sertleşme kabiliyetini artırır ve korozyona karşı direnci geliştirir. Manganez, çeliğe uygulanan sıcak şekillendirme operasyonları esnasında oluşan sıcak yırtılma eğilimini önler veya azaltır. İşlem sıcaklığında demir sülfürün sıvılaşması ile sıcak yırtılma meydana gelir. Manganezin kükürt bağlayıcılığı demirden daha etkili olduğundan, kükürtle birleşerek sıcak yırtılmayı engeller. Yüksek oranlarda kükürt ihtiva eden çeliklerde, genelde, manganez miktarı da yüksek tutulmaktadır.

Çeliklerdeki manganezin miktarı %10-12' ye kadar çıkarılabilir. Bu oranda yüksek manganez östenitik manganez çeliklerinde (Hadfield Mn çeliği) bulunmaktadır. Bu çelikler ise darbeye maruz kalan iş parçalarında kullanılmaktadır. Ayrıca, 200 serisi paslanmaz çeliklerde ise %6-8, diğer paslanmaz çeliklerde ise %1-2 dolaylarında manganez bulunmaktadır. Manganez içeren diğer çelik grupları ise yay çelikleri ve ray yapım çelikleridir [7].

2.3.3. Silisyum (Si)

Silisyumda aynı manganez gibi, çeliğin üretim aşamalarından itibaren çelikte bulunmaktadır. Alaşım elementi olarak adlandırılabilmesi için en az %0,4 Si içermesi gerekmektedir. Diğer alaşım elementlerinden farklı olarak grafit yapıcı özelliği vardır. Alaşım elementi olarak yay çeliklerinde ve silisyumlu saclarda kullanılmaktadır.

Çeliklerin dayanımı ile özgül ağırlığını artırır, çeliklerde iletkenliği arttırarak elektrik akışını kuvvetlendirir, kısaca manyetik ve elektriksel kayıpları azaltır. Bu sebepten dolayı, silisyumlu çelikler elektik trafolarında çekirdek olarak kullanılmaktadır. Katı çözültü sertleşmesi yaparak dayanımı oldukça arttırmaktadır. Düşük silisyum oranlarında dayanımdaki artış herhangi bir sorun teşkil etmez; ancak yüksek silisyum oranları çelikte gevrekleşmeye sebebiyet vermektedir.

Çeliğe silisyum ilavesi sertleşebilme derinliğini arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda tufallaşma direncini de yükselttiğinden, ısı dirençli çelikler silisyum içerir veya silisyum kaplamalı çelikler kullanılır. Silisyum, tek başına bir alaşım elementi olarak kullanılamayacağı için Mo, Mn, Cr vb. gibi alaşım elementleriyle beraber kullanıldığında derin sertleşebilirlik sağlamaktadır [7].

2.3.4. Krom (Cr)

Krom, çeliklerde kullanılan en yaygın alaşım elementidir. Çeliklerde krom %25'lere yakın kullanılabilir (Paslanmaz çelik AISI 446' da %27 Cr bulunur). Çelikteki krom, ferrit içerisinde çözünüp katı çözültü sertleşmesi yapar ve bunun yanında karbür yapıcı özelliği de oldukça kuvvetlidir. Alaşımli çeliklerde bulunduğu Cr₇C₃, Cr₂₃C₆ ve Cr₃C₂ şeklinde karbür oluşturur. Verilen örneklerden ilk ikisi kararlı karbürlerdir ve Cr₇C₃ aşınma dayanımını arttırmakta oldukça etkilidir. Tüm bunların yanı sıra, krom karbürlerinin varlığı temperleme esnasındaki sertlik düşüşünü geciktirmektedir hatta sertliğin bir miktar artışına dahi sebep olmaktadır.

Krom, çeliklerin dayanımlarını yükseltir; tokluklarında az da olsa düşmeye sebep olur. Çeliklerin oksidasyon dayanımını, korozyon dayanımını yükseltir; tufallaşmayı düşürür. Bu sebepten dolayı, krom oranı yüksek çelikler (ısıl direnç alaşımları ve paslanmaz çelikler) oksidasyon ve korozyona karşı mukavemet gerektiren yerlerde kullanılır. Birçok kez yüksek sıcaklıklarda kullanılacak olan metalik malzemeler krom kaplanmalarının ardından kullanıma uygun hale gelirler. Çeliğin içeriğindeki krom atmosferde bulunan oksijen ile krom oksit filmi oluşturmaktadır. Oluşan bu film, iş parçası yüzeyinin altında son derece sıkı bir şekilde bağlıdır. Bu durum oksidasyonun ilerlemesini engellemektedir. Bu duruma benzer bir etkiyi nikel (NiO) ve alüminyum da (Al_2O_3) yapmaktadır. Nikel tarafından oluşturulan film krom oksit kadar kararlı olmasa da yardımcı bir etki oluşturur. Fakat alüminyum tarafından oluşturulan alüminyum oksit filmi yüksek sıcaklıklardaki uygulamalar için oldukça uygundur [8].

2.3.5. Nikel (Ni)

Çeliklerde, nikel, kromla beraber en yaygın olarak kullanılan alaşım elementidir. Nikelin ilavesi çelik yapımı esnasında gerçekleşir. Nikel, Ms sıcaklığını azaltır ve östenit fazının alanını genişletir. Nikel aynı zamanda, katı çözelti sertleşmesi yapar böylece çeliğin dayanımını artırır; karbür yapıcı özelliği yoktur. Krom ile beraber kullanıldıklarında ise sertleşme derinliğini yükseltir ve tufallaşma dayanımına olumlu bir etki yapar. Düşük sıcaklıklarda, çeliğin çentik darbe dayanımını arttırmaktadır. A_3 (ötektoid) sıcaklığını östenit yapıcı bir element olduğundan dolayı azaltmaktadır. Sonuç olarak ise çeliklerin nisbeten düşük sıcaklıklarda östenitlenmesini ve tane boyutlarının incelmesine katkı sağlamaktadır.

Nikel, çeliklerin sertleşme ısılarını düşürüp, çatlama riskini azalttığından dolayı takım çeliklerinin yağda soğutulmasına olanak sağlamaktadır. Nikel ihtiva eden çeliklerin mikroyapısının küçük taneli olmaları, nikelli çeliklerin sementasyon işlemi için uygun olmalarına sebebiyet verir. Zira, sementasyon işlemi 9-11 saatlik bir işlemdir ve östenitleme sıcaklığı yüksek olması durumunda, bu süre zarfında tanelerde büyümenin meydana gelmesi olasıdır. Fakat, nikel içeren çeliklerin östenitleme sıcaklığı düşük olduğundan sementasyon işlem süresi uzun olsa dahi

tanelerde büyüme görülmez. Bu tür çelikler az nikel ve karbon içermelilerdir. Nikel, çeliklerde %37 oranlarına kadar kullanılabilen alaşım elementidir (paslanmaz çelik AISI 330) [8].

2.3.6. Vanadyum (V)

Karbür yapıcı özelliği kuvvetli olan bir başka alaşım elementi ise vanadyumdur. Genelde, çeliğe düşük oranda eklenmektedir. Genellikle takım çeliklerine ilave edilmektedir (AISI T15’de %5 ve AISI A7’de %4,75 V içerir).

Vanadyum, genellikle, Cr ile birlikte kullanılarak yüksek alaşımlı sıcak iş takım çeliklerinde ve W ile beraber ise yüksek hız takım çeliklerinde kullanılmaktadır. Kararlı martenzitin sağlanmasında vanadyum elementinin etkisi büyüktür. Bu etki, elde ettiği kararlı karbürden dolayıdır. Oluşan karbür temperleme işlemi sırasında bozunmaya karşı direnç gösterir; bundan dolayı, vanadyum içeren çeliklerin sertliğinde temperleme sonrası sertlikteki düşüş azdır. Ayrıca, ikincil sertleşme sebebiyle, sertlikte artış olmaktadır. Östenitleme esnasında, vanadyum karbürlerinin çözünmesi oldukça zordur. Östenitlenme sıcaklığı daha yüksek seçilerek vanadyum karbürlerinin çözünmesi sağlanmalıdır. Vanadyum içeren çeliklerin östenitleme sıcaklık süresi diğer çeliklere göre daha fazla olmalıdır (yaklaşık 1,5 kat) [9].

2.3.7. Wolfram (W)

Wolfram çeliğin mukavemetini artmasına katkı sağlayan alaşım elementidir. Takım çeliklerinde, kesici bölgenin sertliğini korumasını, takımın daha uzun süre kullanılmasını ve yüksek sıcaklıklara karşı mukavemeti sağlamaktadır. Bundan dolayı özellikle yüksek hız çeliklerinde, ıslah çeliklerinde ve hız çeliklerinde alaşım elementi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda, çeliğin menevişlenerek sertliğinin kaybolmasını engellediğinden, sıcağa karşı mukavim çeliklerin üretiminde kullanılmaktadır.

Değerli bir ilave elementidir. Demir ile birleşip Fe_3WC karbürünü oluşturmaktadır. Basit wolfram karbürü WC çelikte istenmez. Çelikte sertliğin artırılmasına katkı

sağlayan wolfram demir karbürdür. Aynı zamanda bu karbür, çeliğin yüksek kesme kabiliyetini oluşturmaktadır. Wolfram içeren çeliklerin soğuma hızı oldukça düşüktür. Böylece yapıdaki dönüşme oldukça yavaşlar. Bundan dolayı wolfram içeren çeliklerin sertleşebilme kabiliyeti düşüktür. Çelikte bulunan wolfram oranıyla ilişkili olarak karbon oranının da arttırılması gerekmektedir. Aksi durumda çeliğin içerisindeki wolfram, karbonla birleşip demirin karbonsuz kalmasına sebep olmaktadır. İçeriğinde %0,50,8 karbon ve %47 wolfram olan çelikler mknatis üretiminde kullanılmaktadır. Çeliğin tava karşı mukavemetli olmasını sağlayan bir elementtir. Bu nedenden dolayı, kesici takımların üretiminde kullanılmaktadırlar. Bileşiminde %0,7 karbon, %4 krom, %1 vanadyum ve %18 wolfram olan çelikler hava çelikleri olarak isimlendirilmektedir. Genelde takım çelikleri %11 W, %2 V ve %0,5 Cr içermektedirler. İçeriğinde %4- 9 aralığında wolfram olan çelikler sıcak iş kalıplarının üretiminde kullanılmaktadırlar [9].

2.3.8. Niobyum (Nb)

Niobyumun çeliğe etkileri vanadyum ile benzerdir. NbC şeklinde kübik karbür yaparak aşınma dayanımını arttırmaktadır. Paslanmaz çeliklerde ve ısıl dirençli alaşımlarda kullanılır. Vanadyum gibi yaygın olarak kullanılmasa da ısıl dirençli alaşımlarda ve paslanmaz çeliklerde kullanılmaktadır. Tane inceltme özelliği vardır [9].

2.3.9. Titanyum (Ti)

Yüksek sıcaklığa karşı yüksek dirençli alaşımlar ile bazı paslanmaz çeliklerle karbür yapıcı ve katı çözültü sertleştirici olarak kullanılmaktadır (TiC). Maraging çeliklerinde ve çökelme sertleşmesi ile sertleştirilmiş paslanmaz çeliklerde sertleştirici partiküllerin meydana gelmesinde etkin bir rol oynamaktadır [10].

2.3.10. Kobalt (Co)

Kobaltın karbür yapıcı özelliği yoktur. Katı çözeltili sertleşmesiyle dayanımda artışa sebep olmaktadır. Bu element yüksek sıcaklık kabiliyetinin geliştirilmesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yüksek hız çelikleri ve sıcak iş takım çeliklerinin bileşimlerinde mevcuttur [10].

2.3.11. Molibden (Mo)

Düşük krom ve düşük nikel bulunan çeliklerde temper gevrekliğindeki eğilimi engellemek amacı ile kullanılan bir elementtir. %0,4 oranlarında molibden ilavesi bahsedilen özelliği sağlamaktadır. Krom ve nikel çeliklerine yapılan molibden ilavesi temperleme işlemi sonrasında darbe mukavemetinde de büyük ölçüde yükselme sağlamaktadır. Ayrıca molibden ilavesi çekme ve akma mukavemetini arttırmaktadır [10].

2.3.12. Azot (N)

Azot, çeliğe karşı olumsuz etki yapmaktadır. Çeliğin aşırı sertleşmesine ve gevrekleşmesine sebebiyet vermektedir. Döküm esnasında çelikte azot gazı boşlukları oluşturarak istenilmeyen etki yaratan alaşım elementidir. Bu nedenle üretim sırasında sıvı çeliğin havada bulunan azottan etkilenmemesine özen gösterilmektedir. Atomik ve katı durumdaki azot hızlı soğuma sonrasında çelik içerisinde aşırı doymuş şekilde kalır. Bu eriyik uzun süre bekletilme sırasında, tavlama ve soğuk şekillendirme sırasında demir nitür olarak ayrılarak çelikte gevrekleşmeye sebebiyet vermektedir. Bu duruma yaşlanma denilir. Çelikte bulunan azotun bu etkisi özellikle kaynaklı üretim esnasında fazlaca zararlı olmaktadır. Kullanım yerine uygun olarak bazı çeliklerin yüzeyine azot emdirilerek yüzey sertleştirme işlemi yapılması mümkündür. Bu işleme ise azotlama veya nitürasyon denilmektedir. Son haline getirilmiş ve tüm işlemleri bitirilmiş parçalar özel bir ocakta 500° C'ye kadar ısıtılır. Bu ısıda ocağa amonyak gazı verilerek özel bir atmosfer oluşturulur ve bu gaz ortamında 14 gün boyunca parça bekletilir. Azot ve hidrojen gazları amonyak gazını oluşturur. Belirtilen sıcaklıkta azot ve hidrojen

gazları birbirinden ayrılarak serbest kalan azot gazının sertleştirilecek olan parçanın yüzeyine yayınması ve emdirilmesi sağlanır. Bu işlemin ardından ocaktan çıkarılan parçaların yüzeyleri sertleştirilmiştir. Nitrürasyonun faydalarının yanında kusurları da vardır. Öncelikle 1 mm' den fazla sertlik derinliği sağlanamaz. Bütün çelik gruplarının nitrürasyon işlemine elverişli olmaması da bu yöntemin bir başka kusurudur. Bu yönden azotla ilişkili (silisyum, alüminyum, krom) ve azotun çelik yüzeyine emdirilmesini kolaylaştıran elementlerin eklendiği özel çeliklerin üretilmesi gerekir. [10].

2.3.13. Oksijen (O)

Çeliğin içerisinde bulunan oksijen çelikte FeO olarak bulunmaktadır. Demir oksit çelik için istenmez. Çelik üretimi sırasında çelikte oksijenin teması elbette olacaktır. Üretim sırasında çeliğe Al, V, Mn vb. elementler ilave edilerek oksijenin çeliğe karşı zararlı etkileri engellenmiş olur. Azot gibi oksijen de çeliğin gevrek ve sert olmasına sebebiyet vererek sünekliğin azalmasına neden olur. Bazen oksijenden dolayı meydana gelen sertlik uzun zaman geçtikten sonra görülmektedir. Bu olaya ise yaşlanma yada zamanla sertleşme denilmektedir [10].

2.4. NİKEL ALAŞIMLARI

Nikel; krom, demir, molibden ve bakır dahil olmak üzere birçok metal ile kolayca alaşımlanabilir. Bu alaşımlanabilirlik, korozyona, yüksek sıcaklıkta şekillendirmeye, olağanüstü yüksek sıcaklık dayanımına, şekil hafızası ve düşük genleşme katsayısı gibi diğer benzersiz özelliklere karşı olağanüstü direnç gösteren çok çeşitli alaşımlara izin verir. Aşağıda, çeşitli nikel alaşımlama tiplerinin genel bir sınıflandırması yapılmıştır [11].

2.4.1. Saf Nikel

Saf nikel UNS N02200, kimya endüstrisinde korozyon direnci nedeniyle, özellikle alkalilere karşı kullanılır. Ayrıca, elektromanyetik girişime karşı koruma ve transdüserlerde iyi manyetik özellikleri için kullanılır [11].

2.4.2. Nikel - Demir Alaşımları

Bunlar yumuşak manyetik malzemeler, camdan metale contalar ve tanımlı termal genleşme özelliklerine sahip malzemeler olarak kullanılır. %36 nikel ve geri kalan demir ile Invar® (UNS K93600) oda sıcaklığında neredeyse sıfır termal genleşme katsayısına sahip olması bakımından benzersizdir. Bu, hassas ölçüm cihazları ve termostat çubukları gibi yüksek boyutsal kararlılığın gerektiği yerlerde onu değerli kılar. Ayrıca, düşük termal genleşme oranlarından dolayı kriyojenik sıcaklıklarda kullanılır.

%72-83 nikel içeren alaşımlar en iyi yumuşak manyetik özelliklere sahiptir ve transformatörlerde, indüktörlerde, manyetik amplifikatörlerde, manyetik kalkanlarda ve bellek depolama cihazlarında kullanılır [11].

2.4.3. Nikel - Bakır Alaşımları

Bunlar alkali çözeltiler, oksitleyici olmayan tuzlar ve deniz suyu ile korozyona karşı oldukça dirençlidir. En bilinenleri Alaşım 400' dür [11].

2.4.4. Nikel - Molibden Alaşımları

Bunlar, ferrit ve kübik veya çözünmüş oksijen gibi oksitleyici iyonların yokluğunda, asitleri indirgemeye karşı oldukça dirençlidir. En bilinenleri B-2 alaşımıdır [11].

2.4.5. Nikel - Krom Alaşımları

Bunlar hem normal hem de yüksek sıcaklıklarda (şekillendirmeye karşı direnç) korozyona karşı yüksek dirençleri, iyi yüksek sıcaklık mukavemeti ve yüksek elektrik direnci ile karakterize edilir. Üç ana alaşım grubu vardır:

- a) Ni- Cr (ve ayrıca Ni-Cr-Fe), 70-30 (UNS N06008) ve C sınıfı (UNS N06004) gibi ısıtma elemanları için yüksek elektrik direncine sahip alaşımlar.

- b) İyi korozyon direncine sahip Ni-Cr alaşımları (Fe ve diğer alaşım elementleri ile birlikte). En bilinenleri Alaşım 600 (UNS N06600) ve Alaşım 601'dir (UNS N06601).
- c) Alaşım X-750 (UNS N07750) gibi, yaşlanmaya karşı dayanıklı, yüksek sıcaklık dayanımı ve sũrũnme direnci olan Ni-Cr alaşımları [11].

2.4.6. Nikel - Krom - Demir Alaşımları

Temel olarak iki alaşım grubu vardır:

- a) Ni - Cr - Fe yüksek sıcaklıkta mũkemmел mukavemete sahip alaşımlardır. Oksidasyon, karbũrizasyon ve diğer yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı direnç gũsterme kabiliyetine sahiptirler. En yaygın bilinenler alaşım 800 (UNS N08800) ve varyantları 800H (UNS N08810) ve 800HT'dir (UNS N08811). (Son zamanlarda, bu alaşımlar yüksek Fe içeriğini yansıtan paslanmaz çelikler olarak sınıflandırılmıştır)
- b) Özel uygulamalarda mũkemmел korozyon direncine sahip Ni - Cr - Fe (Mo ve Cu ile birlikte) alaşımları. Muhtemelen en iyi bilinen, sũlfũrik aside olađanũstũ direnç sağlayan alaşım 825'dir (UNS N08825). Alaşımlı G-3 (UNS N06985), yüksek oranda oksitleyici asitler içeren birçok karmaşık çözeltinin yanı sıra ticari fosforik asitlere olađanũstũ korozyon direnci sunar [11].

2.4.7. Nikel - Krom - Molibden Alaşımları

Bunlar korozyona karşı oldukça dirençlidir ve alaşım C-276 (N10276) en iyi bilinenlerdir. Hidroklorik ve sũlfũrik gibi indirgen asitlere karşı olađanũstũ direnç sunarlar. Bu bileşime dayanarak, Cr ve Mo seviyelerini değiştiren ve bazı durumlarda korozyon direncini daha oksitleyici veya daha fazla indirgeyici koşullara genişletmek için Cu veya W ekleyen çeşitli varyasyonlar vardır. Bunlar arasında Alaşım C-22 (N06022), Alaşım 59 (N08059), Alaşım C-2000 (UNS N06200) ve Alaşım 686 (N06686) bulunur [11].

2.4.8. Nikel - Krom - Kobalt Alaşımaları

Kobalt ve molibden ilavesi, alaşım 617'ye (UNS N06617) katı çözelti kuvvetlendirmesi ve yüksek sürünme kopma mukavemeti verir. Kobaltın HR-160'a (N12160) eklenmesi, hem indirgeyici hem de oksitleyici atmosferlerde sülfürlenme ve klorür atağı gibi çeşitli yüksek sıcaklıktaki korozyon ataklarına karşı olağanüstü direnç sağlar [11].

2.4.9. Nikel - Titanyum Alaşımaları

%55 nikel-titanyum alaşımı (UNS N01555) (Nitinol olarak da bilinir) şekil hafızasına sahiptir. Bir sıcaklıkta oluşturulduğunda ve daha düşük bir sıcaklıkta deforme olduğunda, yeniden ısıtıldığında orijinal halini geri kazanır. Geçiş sıcaklıkları, bileşimin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle ayarlanabilir. Tıbbi cihazlar ve özel konektörler özel uygulamalardan ikisidir. Aynı alaşım önemli ölçüde elastik deformasyona uğrayabilir ve yine de orijinal şekline dönebilir (süper elastik özellik). Bu özellik, tarihi taş binalarda depreme dayanıklılık sağladığından ve amortisörler gibi çeşitli uygulamalar için kullanılmıştır. Çizelge 2.2.' de nikel alaşımlarının nominal bileşimleri verilmiştir [11].

Çizelge 2.2. Çeşitli nikel alaşımlarının nominal bileşimleri.

Alaşım Adı	UNS Adı	% Ni	% Cr	% Fe	% Mo	% Cu	% Co	% Diğer
200	N02200	99 min						
Invar	K93600	36		64				
400	N04400	65	32					
B-2	N10665	68		2	28			
70-30	N06008	70	30					
C-Grade	N06006	60	16	bal				

Çizelge 2.2. (devam ediyor).

600	N06600	76	16	8				
601	N06601	60	23	bal				Al - 1.3
X-750	N07750	70	15	7				Ti - 2.5 Al - 0.7 Nb - 1.0
825	N08825	42	21	25	3	2		
G-3	N06985	bal	22	20	7	2		
800	N08800	32	21	45				W - 3.5
C-276	N10276	bal	15	5	16			
C-22	N06022	bal	21	4	13			
59	N06059	bal	23	1.5 max	16			
C-2000	N06200	bal	23	3 max	16	1.6		
686	N06686	bal	21	2 max	16			W - 3.7
617	N06617	44.5 min	22	3 max	9		12	
HR-160	N12160	bal	28	3.5 max			30	Si - 2.75
Nitinol	N01555	55						Ti - 45

2.5. ÇELİKLERDE MUKAVEMET ARTTIRMA MEKANİZMALARI

Malzemelerin mekanik özellikleri büyük ölçüde metalürjik yapılarına bağlıdır. Metalürjik yapı ise kimyasal bileşim ile malzemeye uygulanan mekanik ve ısı işlemlerle değiştiğinden, dolaylı olarak malzemenin mekanik özelliklerinin bu

faktörlere de bağılı olduğu söylenebilir. Mukavemet en önemli malzeme özelliklerinden biridir ve diğer özellikler de buna bağılı olarak değişir. Malzeme biliminde dayanım, malzemenin plastik şekil değiştirmeye olan direnci şeklinde tanımlanır. Metallerin plastik şekil değiştirmesi ise asıl olarak dislokasyon adı verilen çizgisel hataların kristal kafes içerisinde ilerlemesiyle oluşmaktadır. Bu sebeple sertlik, süneklik, mukavemet vb. mekanik özellikler, metalin iç yapısında bulunan dislokasyonların yoğunluğu, kendileri ve diğer kusurlarla olan ilişkisiyle açıklanmıştır [14].

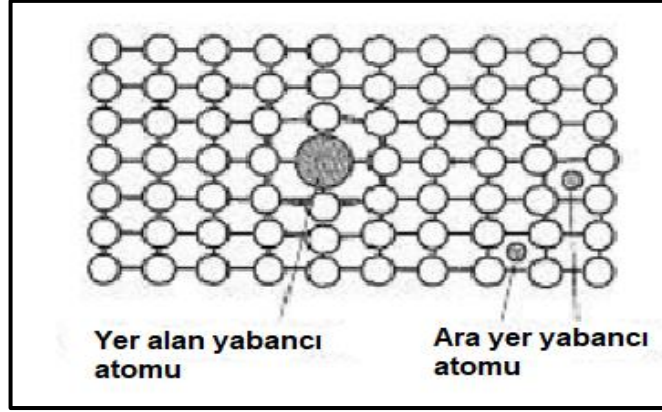
Metal iç yapısında olan dislokasyon hareketlerini zorlaştıracak ya da durduracak bütün etkenler malzeme dayanımında artışa neden olacaktır. Dislokasyon hareketlerinin kolaylaşması ise plastik şekil değişimini oldukça kolay şekilde gerçekleşmesine sebep olacaktır. Dislokasyonlar kristal yapıda plastik şekil değişimini çok küçük gerilmeler yardımıyla gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Ancak bu durumda gerçek kristallerin, dislokasyon hareketi için gereken gerilmelere oranla neden daha yüksek dayanımlara sahip olduğunun açıklanması gereği ortaya çıkmaktadır [14].

2.5.1. Alaşım Sertleşmesi

Alaşım sertleşmesi kimyasal bileşimin değiştirilmesi ile mukavemet artırılması işlemidir. Alaşım elementi saf metal içerisinde eriyerek, tek fazlı bir yapının meydana gelmesi halinde katı eriyik sertleşmesi, ikinci faz meydana getirmesi halinde ise ikinci faz sertleşmesi olarak isimlendirilir [14].

2.5.1.1. Katı Eriyik Sertleşmesi

Herhangi bir saf metale, matris yapısı içinde eriyen atomların ilavesiyle elde edilen katı eriyikler iki çeşittir. Bunlar; ara yer katı eriyiği ve yer alan katı eriyiği olarak adlandırılır [14]. Şekil 2.1.' de metal malzemede bulunabilen yer alan ve ara yer yabancı atomları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Bir metal malzemede bulunabilen yer alan ve ara yer yabancı atomu [14].

Saf metal (eritilen) atomları ile ilave edilen alaşım element (eriyen) atomlarının boyutları birbirine uygunsa, eriyen atomlar eriten atomların yerini alabilirler. Bu çeşit katı eriyiğe; yer alan katı eriyiği denir. Eğer eriyen atomlar eriten atomlardan çok küçükse; Eriten atomların oluşturduğu kristalin, matris içinde atomlar arası boşluklara yerleşir. Metal iç yapısında mevcut olan dislokasyon hareketlerini zorlaştıracak veya durduracak bütün etkenler malzemedeki dayanım artışına katkı sağlayacaktır [14].

2.5.1.2. İkinci Faz Sertleşmesi

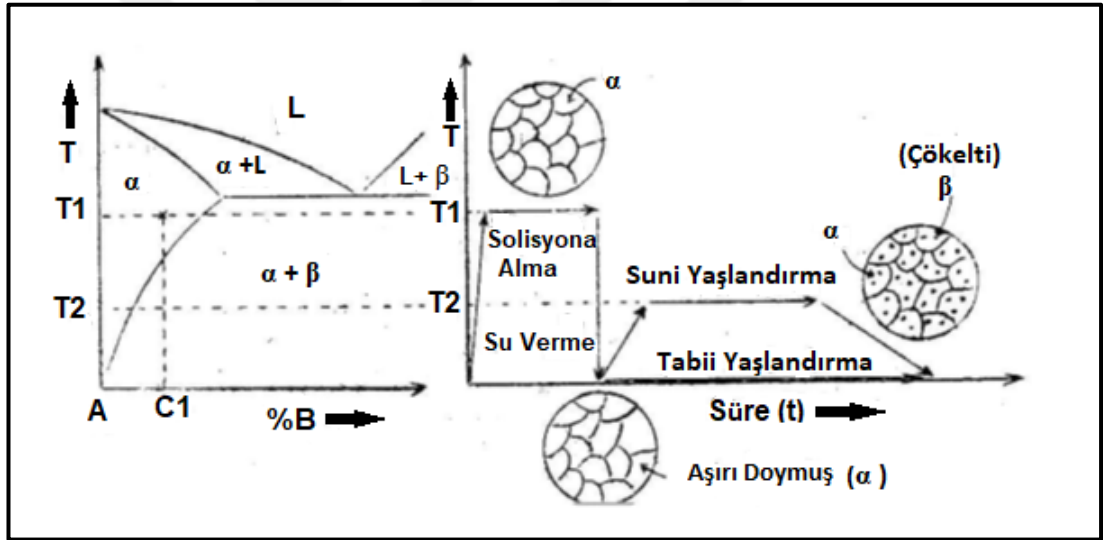
Katı eriyik durumda olan metal alaşımlar sınırlıdır. Ticari amaçlı kullanılan alaşımlar genelde heterojen yapıdadırlar. İki fazlı alaşımların mikro yapıları farklı iki grupta toplanabilir. Alaşımın yapısında fazların kütleli olarak dağıldığı durumda, ikinci fazdaki tanelerin boyutları matris fazdaki tane boyutuna yakındır. Bu tür alaşımlara örnek vermek gerekir ise, α ve β fazlarının bulunduğu pirinç alaşımlarıyla ferrit ve perlit fazlarının bulunduğu çelikler verilebilir. İki fazlı alaşımların bir diğer mikro yapısı “Dispersiyon Yapısı”dır.

Bu yapıda çok küçük taneler halinde bulunan ikinci faz, matris faz içinde dağılmıştır. Böylece alaşımın dayanımı disperse olmuş fazın mekanik ve fiziksel özelliklerine bağlı olur ve dispersiyon sertleşmesi olarak adlandırılabilir. İkinci faz sertleşmesi, genellikle katı eriyik sertleşmesine eklenebilen bir sertleşme oluşturur [14].

2.5.2. Çökeltme Sertleşmesi

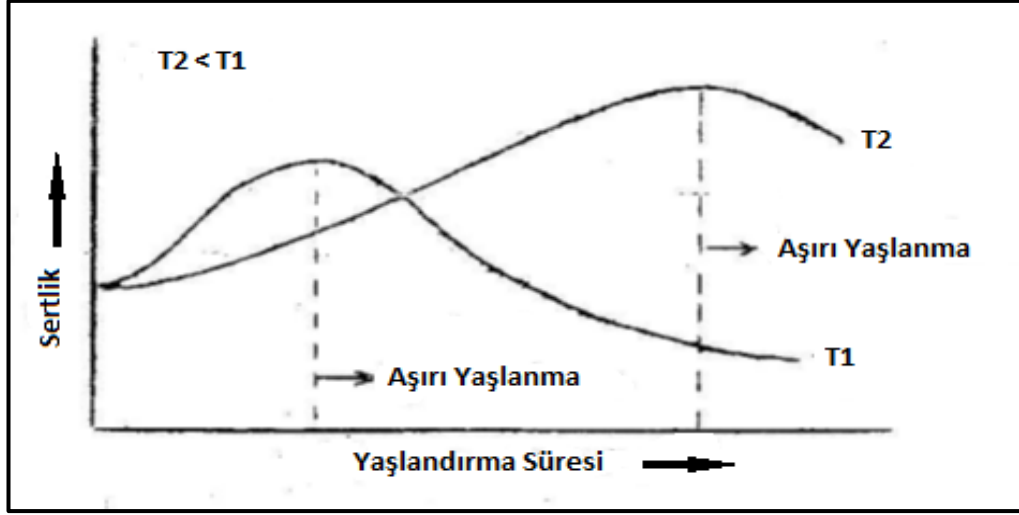
İkinci fazın oldukça küçük taneler olarak matris fazının içerisinde çökeltmesinin sağlandığı alaşım sistemlerinde dayanımı arttırmada kullanılan en yaygın yöntemler arasındadır [14].

Genelde demir dışı metal alaşımları (Ti, Mg, Al alaşımları) ve dayanımları oldukça yüksek olan çelikler bu yöntem ile sertleştirilmektedirler. Bu alaşımlar çökelmeye karşı duyarlıdır ve aşırı doymuş katı eriyik oluşturabilirler. Aşırı doymuş olan katı fazdan sıcaklık ve zaman etkisiyle yeni fazın çökeltmesi neticesinde malzemenin sertlik dayanımı artış gösterir [14]. Çökeltme işleminin safhaları Şekil 2.2.' de gösterilmiştir.

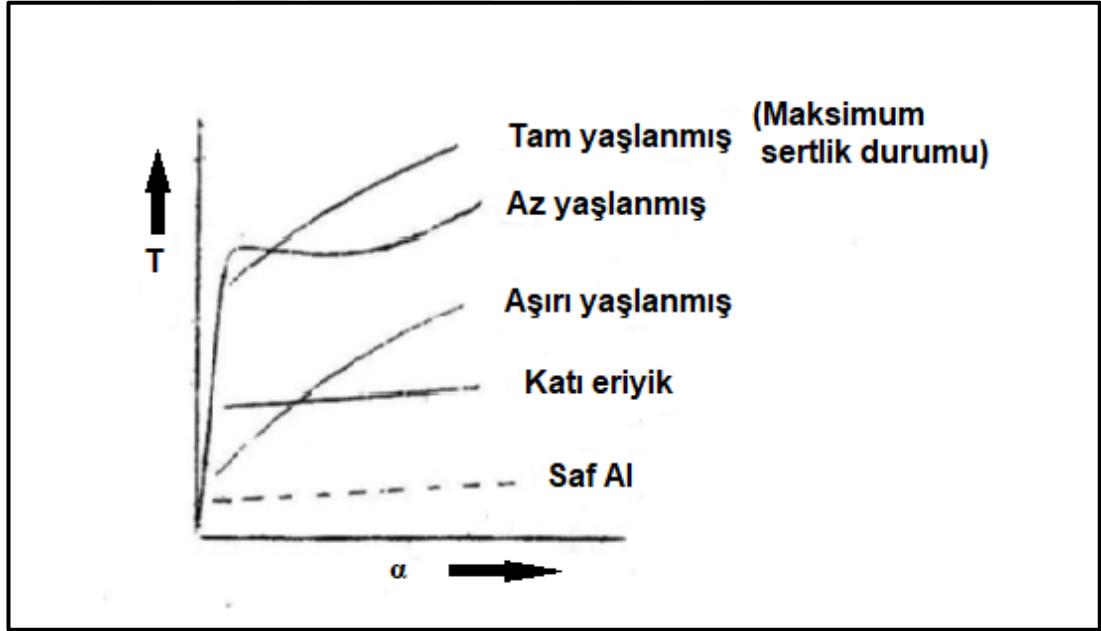


Şekil 2.2. Çökeltme sertleşmesinin yapılabildiği bir alaşım sisteminde çökeltme sertleşmesi işleminin safhaları [14].

Çökeltme sertleşmesi işlemi 3 aşamada yapılmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla; solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma aşamalarıdır [14]. Yaşlanma süresine bağlı olarak bir alaşımın dayanımındaki değişim Şekil 2.3.' de gösterilmiştir. Sıcaklığın artışıyla bir alaşımdaki sertlik değişimi Şekil 2.4.' de verilmiştir.



Şekil 2.3. Sabit sıcaklıkta yaşlanma süresine bağlı olarak alaşım dayanımındaki değişim [14].



Şekil 2.4. Sıcaklık arttıkça alaşım sertliğindeki değişim [14].

2.5.3. Dispersiyon Sertleşmesi

Bu sertleştirme işlemi genel olarak çökeltme sertleşmesinin aynısıdır. Çökeltme sertleşmesinin dispersiyon sertleşmesinde farkı; çökeltme sertleşmesinde ikinci faz katı eriyikte çökerek doğal olarak oluşmuştur, dispersiyon sertleşmesinde ise ikinci

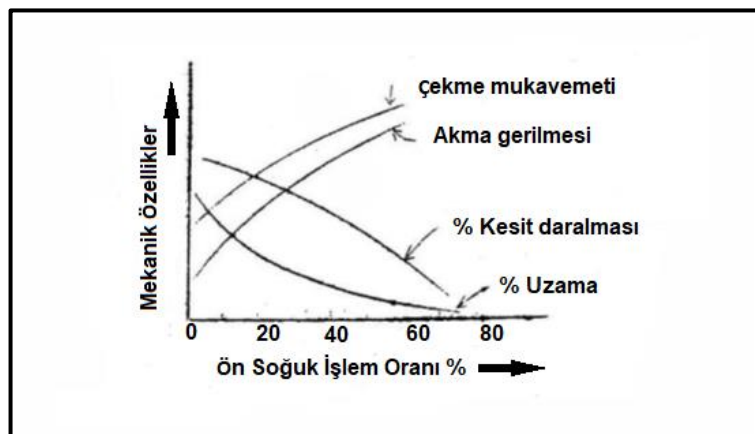
faz ince tanecikler halinde matris fazı oluşturan malzeme içinde fiziksel olarak dağıtılmıştır.

Dispersiyon sertleştirme ikinci fazın matris fazı içinde erirliğinin bütün sıcaklıklarda hemen hemen sabit ve sınırlı olduğu alaşımlarda meydana gelir. Buna karşılık çökeltme sertleştirme ise ikinci fazın erirliğinin artan sıcaklıkla arttığı alaşım sistemlerinde meydana gelir [15].

2.5.4. Soğuk İşlem

Deformasyon sertleşmesi, soğuk işlem sonunda dayanımın artması nedeni ile meydana gelmektedir. Soğuk işlem, malzemeye plastik şekillendirme yöntemleri ile uygulanmaktadır [15].

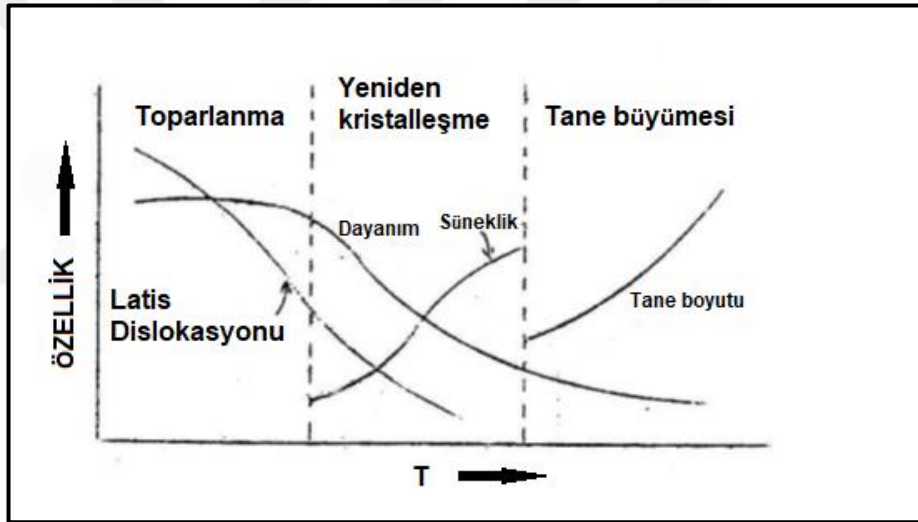
Plastik şekillendirme hem dislokasyonların oluşumuna sebep olur hem de dislokasyon hareketinin sağlanmasına katkı sağlar. Deformasyon sertleşmesi, dislokasyonların hareketlerini zorlaştıran çeşitli engellerle ve dislokasyonların birbirleri ile etkileşimi sonucunda meydana gelir. Soğuk işleme malzeme dayanımındaki yükseliş, soğuk işlem miktarıyla paralel doğrudur [15]. Aşağıda soğuk işlemin artmasıyla mekanik özelliklerdeki artış Şekil 2.5.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Soğuk işlem oranına bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinin değişimi [15].

Soğuk işlem sırasında kullanılan enerjinin bir kısmı ısı halinde kaybolurken, diğer bir kısmı ise dislokasyon enerjisine çevrilir. Metal esaslı malzemelerde uygulanan soğuk işlem sınırlı orandadır, çünkü belirli bir soğuk işlem miktarının üzerinde malzemenin şekil alabilme kabiliyeti sıfıra iner bu da istenilmeyen bir durumdur [15].

Soğuk işlem esnasında atom boşlukları oluşması ve bunların oranlarının soğuk işlem miktarının arttıkça artması malzemenin çatlamasına sebebiyet verir. Çatlak oluşmasını engellemek ve soğuk işlem esnasında azalan sünekliği arttırabilmek amacı ile malzeme soğuk işlem uygulaması esnasında zaman zaman tavllanır [15]. Soğuk işlem görmüş malzemenin tavlama sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişim Şekil 2.6.' da verilmiştir.



Şekil 2.6. Soğuk işlenmiş malzemede tavlama sıcaklığına bağlı olarak malzemenin özelliklerinin değişimi [15].

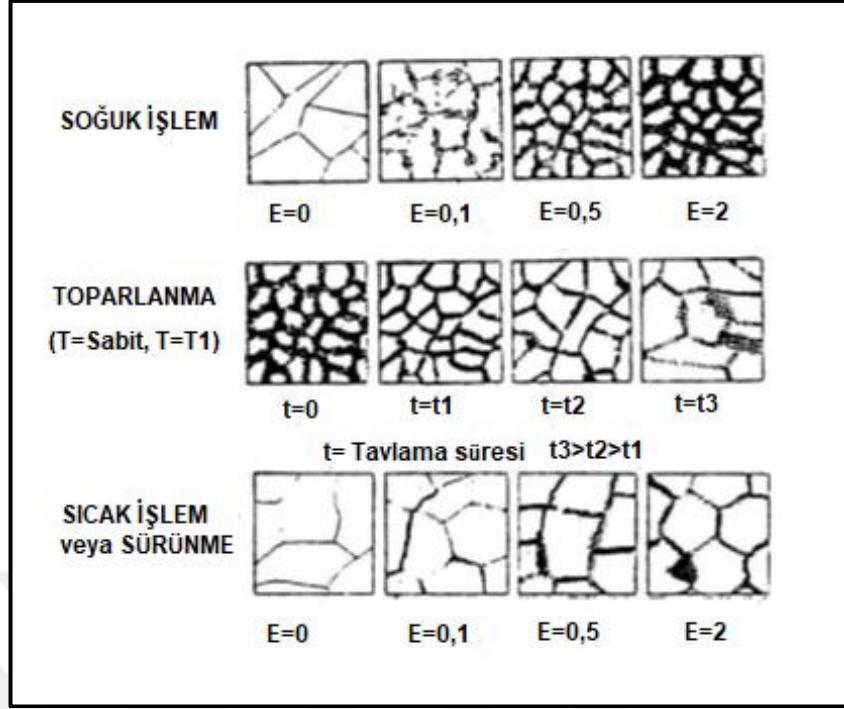
- Toparlanma (Recovery): Bu aşamada işlenmiş malzemedeki dislokasyonlar yeni bir düzen oluştururlar. Bu düzen, dislokasyonların düşük enerji sahibi olduğu durumdur.
- Yeniden Kristalleşme: Bu aşamada dislokasyon barındıran toparlanmış taneler kaybolur ve bunların yerine yeni taneler çekirdeklenir.
- Tane Büyümesi: Tanelerin yeniden kristalleşmesinin ardından, tavlama sıcaklığında uzun süre bekletilirse ya da yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda tavlınırsa yayınma ile zaman içerisinde büyürler [15].

2.5.5. Tane Boyutunu Küçültme

Tane sınırı sertleşmesidir. Tane boyutunu küçültmek de malzemenin mukavemetini arttırmak mümkündür. Tane boyutu hızlı soğutma veya çeşitli termo- mekanik işlemlerle küçültülebilir. Tane boyutunu küçültme ile malzemenin mukavemetinin artması şu sebeplerle olur. Tane sınırları kaymayı önlerler. Herhangi bir tane içerisinde oluşan kayma bandı tane sınırlarında kalır. Bunun sebebi tane sınırlarının hareket halindeki dislokasyonların hareketini engellemesidir. Dislokasyonlar tane sınırlarında engel ile karşılaştıklarında hareket edemezler ve böylece tane sınırlarında dislokasyon yığılmaları meydana gelir [15].

Deformasyon esnasında tanelerin arasındaki uyumu oluşturmak, yani bir tanede meydana gelen şekil değişimine paralel olarak diğer komşu tanelerin de şekil değişimine zorlanması, her bir tane içerisinde karmaşık deformasyon gerilmeleri meydana getirir. Yani birden fazla kayma sisteminin çok kristalli malzemelerde çabucak oluşması tane sınırlarından dolayı olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı çok kristalli bir malzemenin dayanımı, aynı malzemenin tek kristalinden genelde daha yüksek dayanımdadır [15].

Diğer sertleşme mekanizmaları içinde mukavemetle birlikte tokluğu da arttıran tek mekanizmadır. Tane küçültmenin tokluğu arttırmasının nedeni; darbe geçiş sıcaklığını düşürmesidir [15]. Şekil 2.7.' de soğuk işlem, toparlanma ve sürünme aşamaları sırasında meydana gelen hücre ve alt hücreler gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Soğuk işlem, toparlanma ve sürünme sırasında oluşan hücre ve alt tane yapısı [15].

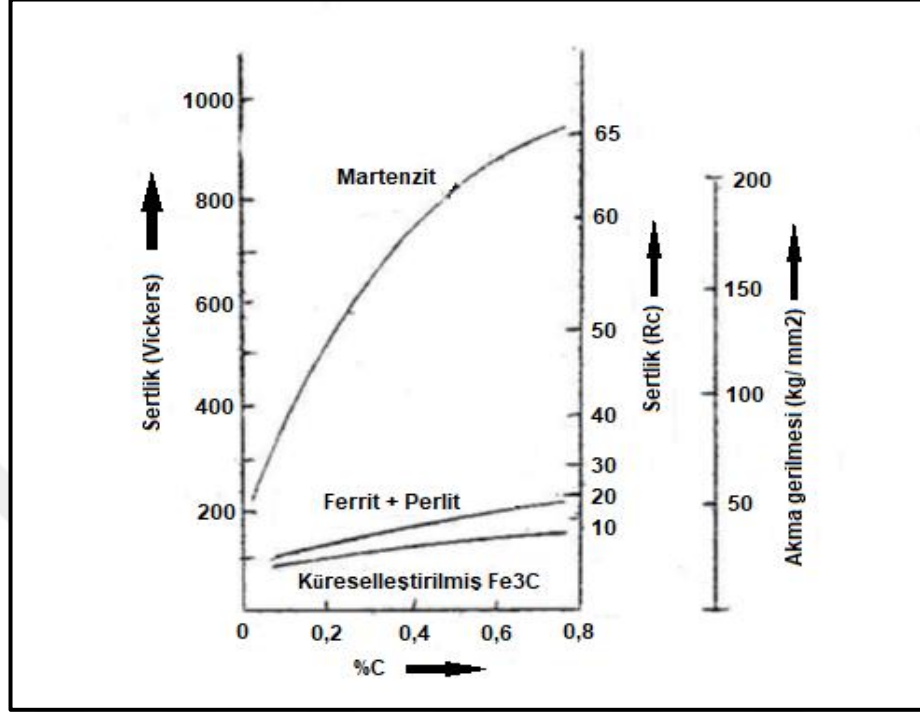
2.5.6. Deformasyon Yaşlanması

Metalik malzemelerde akma olayı ile ilgili bir olay olan deformasyon yaşlanması, malzemenin soğuk deformasyondan sonra genellikle oda sıcaklığında uzun süre bekletilmesi yada düşük sıcaklıklarda tavlama neticesinde çekme ve akma dayanımlarının artması, sünekliliğinin ise azalması olayıdır. Soğuk deformasyon sonunda giderilmiş olan akma olayı, yaşlanma sonunda tekrar görülür [15].

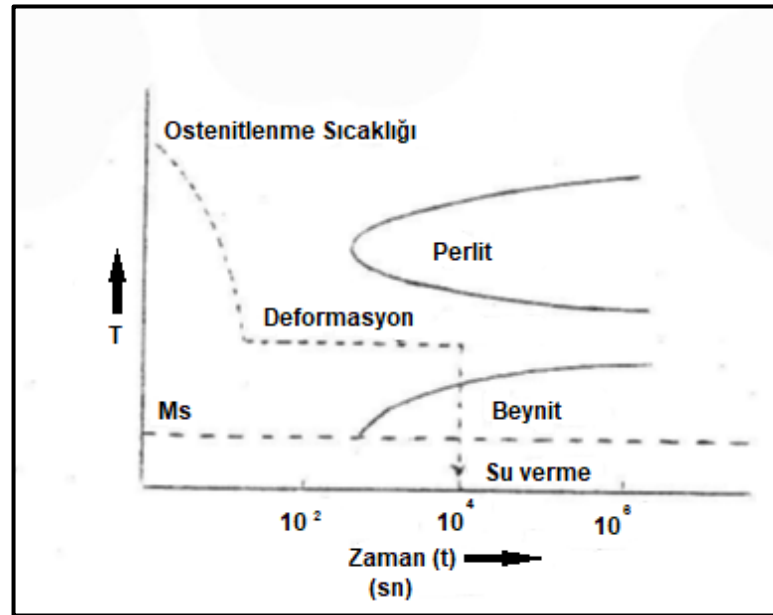
2.5.7. Martenzitik Dönüşüm

Martenzitik dönüşüm, genellikle mühendislik malzemelerinden çeliklere uygulanan sertleştirme işlemlerinden birisidir. Martenzitik dönüşüm belirli sayıdaki metalurjik sistemlerde görülür. Martenzitik dönüşümün mukavemet artırma etkisi en belirgin olarak Fe-C esaslı alaşımlarda görülür. Çeliğe ısı verme ile östenitten (YMK) yayınsız kayma tipi bir dönüşüm ile martenzit (hacim merkezli tetragonal) oluşur [15]. Şekil 2.8.' de ferrit dönüşüm ürünlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 2.9.' da

ise bir alaşımlı çeliğin TTT diyagramı üzerinde ausforming işleminin safhaları verilmiştir.



Şekil 2.8. C miktarına göre çeşitli fa dönüşümü ürünlerinin sertliklerinin değişimi [15].



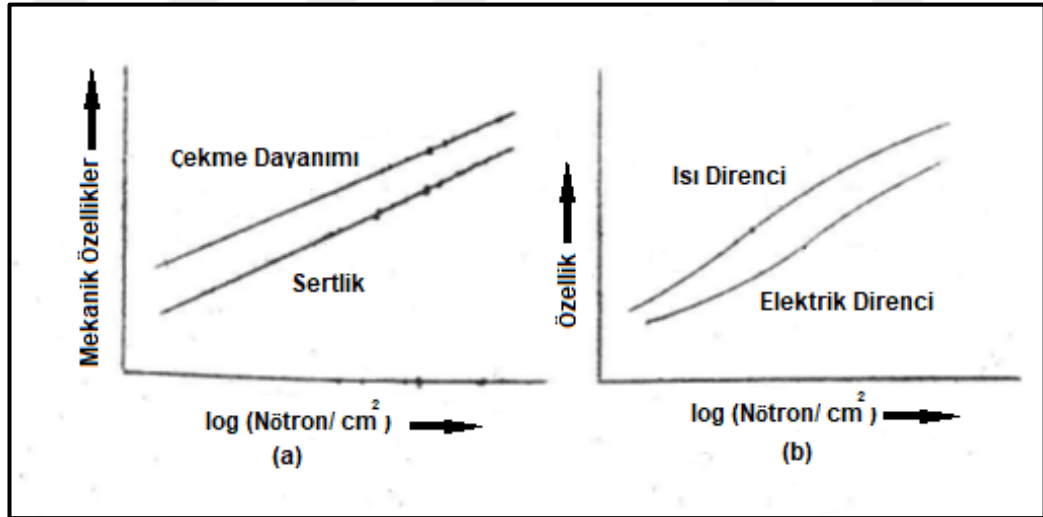
Şekil 2.9. Bir alaşımlı çeliğin TTT diyagramında ausforming işleminin safhaları [15].

2.5.8. Radyasyonla Sertleştirme

Radyasyonla sertleştirme, çok hızlı hareket eden atomik parçacıkların metalik malzemenin atomları ile çarpışarak atom boşlukları ve ara yer atomları oluşturması esasına dayanır. Radyasyonla sertleştirme;

- Nötron radyasyonu
- α taneleri (iyonları) radyasyonu
- β ışınları (yüksek enerjili elektronlar) radyasyonu
- γ (gama) ışınları radyasyonu ile yapılabilir.

Nötron radyasyonu ile malzemenin özelliklerinden ısı ve elektrik dirençlerinde de artma olur. Bunun sebebi radyasyona uğramış yapıda, nokta hatalarının artması sonucunda elektron hareketlerinin daha zor olmasıdır [15]. Şekil 2.10.' da 347 paslanmaz çeliğinde nötron radyasyonunun mekanik, ısı ve elektrik özelliklerine etkisi verilmiştir.



Şekil 2.10. 347 paslanmaz çeliğinde nötron radyasyonunun mekanik özelliklere (a) Isı ve elektrik direnci özelliklerine, (b) etkisi [15].

Radyasyon etkisi bu sakıncaları sebebi ile radyasyon hasarı olarak da adlandırılır. Radyasyon hasarı yüksek sıcaklıklarda yapılan ısı işlemlerle giderilebilir.

Radyasyon hasarının ısı ile işleme giderilmesi, malzemenin yeniden kristalleşme olayına benzer şekilde özellikleri etkiler [15].

Burada önemli fark yeniden kristalleşme için gereken sıcaklığa göre çok daha düşük sıcaklıklarda radyasyon etkisinin giderilebilmesidir. Çünkü nokta hatalarının giderilmesi, yani atomların ara yer konumundan kendi konumuna atom boşluğu ile yer değiştirerek geçmesi için gerekli enerji çok daha azdır [15].



BÖLÜM 3

ÇELİKLERİN MALZEME MUAYENE YÖNTEMLERİ

3.1. GİRİŞ

Malzeme seçimi, malzeme muayenesi ve seçilen malzemenin kullanılacağı yerde görevini yerine getirip getiremeyeceğini anlayabilmek ya da malzemenin karakteristik özelliklerini öğrenebilmek amacı ile yapılan deneylerin tümüdür. İki ana amaç ile malzeme muayenesi uygulanır. Amaçlardan birisi malzemenin satışa sunulmadan önceki hatalarının tespitidir. İkinci amacı ise üretimi yapılan parçanın, çalışma şartlarında karşılaşılabileceği kuvvetlere karşı göstereceği davranışın önceden görülebmesidir.

Malzemelerin muayenesinde ele alınan önemli noktalar şunlardır:

- a) Ham haldeki parçalar ile hazır haldeki parçaların iç kusurlarının muayenesi
- b) Kimyevi bileşenlerin ve iç yapının muayenesi
- c) Malzemelerin işlenme özelliklerine yönelik muayene
- d) Malzemelerin garanti altına alınmış özelliklerinin muayenesi

Malzemelerin muayenesinde kullanılan yöntemlerin çoğunluğu, bunların arasında seçimler yapılmasını kolaylaştırır. Seçim yaparken öncelikle muayene yönteminin istenilenleri karşılıyor olup olmadığı, ardından ise maliyeti göz önüne alınmalıdır. Çünkü bazı yöntemler ciddi donanımlar ve eğitimli personeller tarafından yapılacağından maliyet oldukça yüksek olacaktır [16].

3.2. MALZEMELERDE TAHRİBATSIZ MUAYENE YÖNTEMLERİ

Tahríbatsız malzeme muayene yöntemlerinde, parçanın bütününden bir numunenin alınmasına ihtiyaç yoktur. İşlem genellikle parçanın bütünü üzerinde ve parçaya herhangi bir zarar verilmeden yapılmaktadır. Bu tip muayeneler genellikle, yarı mamul veya bitmiş iş parçalarında herhangi bir hatanın meydana gelip gelmediğinin tespiti için yapılmaktadır. Parçanın veya ürünün müşteriye teslim edilmeden önce bu muayenenin yapılması son derece elzemdir [16].

3.2.1. Gözle Muayene Yöntemi

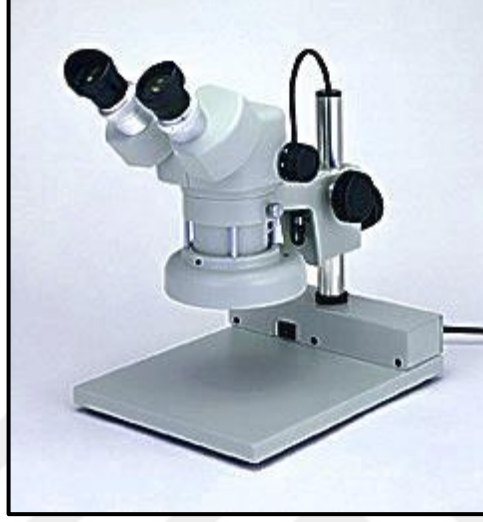
Maliyet açısından en düşük olan yöntem gözle yapılan malzeme muayenesidir. Muayeneyi yapan kişinin deneyimli, tecrübeli ve konusunda eğitimli olması gerekmektedir. Muayene sonunda malzemenin dış yüzeyindeki hataların tespiti sağlanır. Böylece tespit edilen hatalar giderilebilir.

Boyut olarak küçük olan iş parçalarına gözle yapılan muayeneye hafif bir çekiç darbesi yardımı ile çınlama deneyi yapılabilir. Bu deneyin hazırlanışı oldukça basittir. İş parçası ip yardımı ile serbestçe asılarak çekiçle iş parçasına hafifçe vurulur. İş parçasından çıkan sese göre yumuşak, sert ya da çatlak olup olmadığı belirlenebilir [16].

3.2.2. Mikroskopik Muayene Yöntemi

Parlatma işleminin ardından dağlanan (asitle temizleme) metal yüzeyleri, metal mikroskobu yardımı ile incelendiğinde iç yapıları meydana getiren dokular gözlemlenir. Mikroskop yardımı ile muayene yapılabilmesi için iş parçasını temsil eden örnek numuneler alınıp parlatılır, ardından kısa süreli dağlama işlemi yapılarak numune incelemeye hazır hale getirilir. Dağlamada kullanılan tuz ya da asit çözeltisinin numune yüzeyinde yaptığı etkiyle, bazı kristal doku çeşitleri reaksiyona girerken bazıları dağlayıcıdan etkilenmez. Böylece farklı görseller oluşur. Dağlayıcının etkisi ile, bazı kristal yapı çeşitlerinde, kısmen renkli ayrılmalar oluşur. Taşlanan parçaların yakınlaştırılmış şekilleri, mevcut dokunun kontrolünü ve iş

parçasının istenilene uygun bir şekilde ısıl işlem görmesini sağlamaktadır. Elektron mikroskobu ile ise pekte düzgün olmayan yüzeylere 10.000 kez yakınlaştırılmış derinlik boyutuna sahip olan resimler alınabilir [16]. Mikroskop ile muayene için kullanılan cihaz görseli Şekil 3.1.' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Mikroskopla muayene için kullanılan bir cihaz [16].

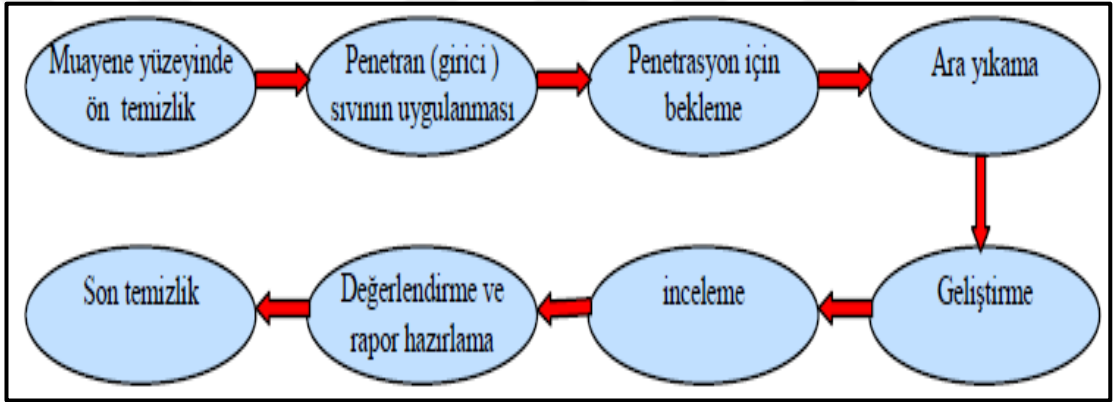
3.2.3. İç Yapı Deneyleri

Tahribatsız malzeme muayene yöntemleri malzemenin dış yüzeylerine uygulanan yöntemlerdir. Malzemenin iç yapısı ile alakalı sonuçlar elde edilemez. Fakat malzemenin iç yapısında, üretim aşamaları sırasında meydana gelen hataların da oluşabileceği gerçeği her zaman düşünülmesi gereken bir durumdur. Bu hatalar; çatlaklar, yabancı madde kalıntıları, gaz boşlukları vb. kusurlar olabilir. İç yapıda meydana gelen hatalar malzeme hataları içerisinde en tehlikeli olan hatalardır. Zira malzemenin iç yapısında kaldıklarından hangi noktada ne gibi hataların mevcut olduğunu tespit etmek oldukça zordur.

Gerekli görülen muayeneler ve önlemlerin alınmadığı durumda hatalı bir şekilde üretilen parçanın satışı yapılması halinde kullanım yerinde bir iş kazasına ya da maddi hasara sebebiyet verebileceği göz önüne alınması gerekmektedir. Belirtilen sebepler düşünüldüğünde malzemenin iç yapı muayenesinin önemi daha iyi anlaşılmaktadır [16].

3.2.4. Sıvı Penetrant Muayene Yöntemi

Bu yöntem yüzey kusurlarının tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Muayene yüzeyinde bulunan kusurlar, içerisine kapiler olarak ile işlemiş olan penetrant sıvısı geliştirici ile tekrar malzeme yüzeyine doğru çekilerek mevcut kusur belirtilerinin görülmesi sağlanmaktadır. Malzemedeki mevcut kusurlar çatlak türlerinden ise çizgisel olarak, gözenek türlerinden ise yuvarlak olarak görülmektedir. Sanayideki metalik ya da metalik olmayan tüm malzemelerdeki olası yüzey kusurlarının görülebilmesi için kullanılabilir [17]. Sıvı penetrant muayene yöntemi aşamaları Şekil 3.2.' de verilmiştir.

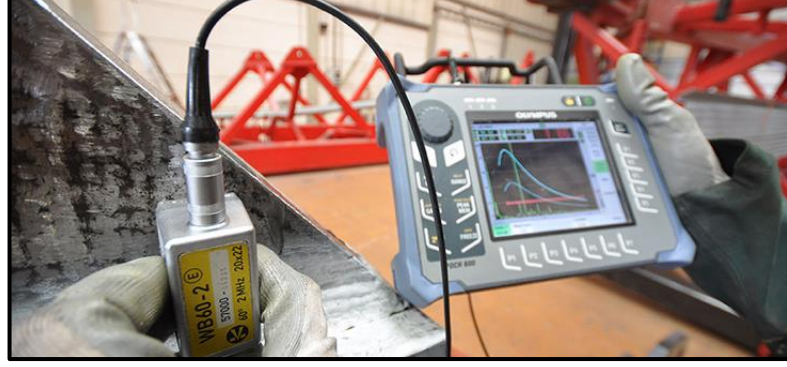


Şekil 3.2. Sıvı penetrant muayenesi uygulama adımları [17].

3.2.5. Ultrasonik Muayene Yöntemi

Malzemeye gönderilen yüksek frekanslı ses dalgalarıyla aracılığı ile yapılan kontrol yöntemidir. Yüksek frekanslı ses dalgaları malzemeye ulaşırken ses yolu üzerinde bir engel ile karşılaşırsa yansıma yapar. Yansıyan sinyal; sinyal alıcı başlık üzerine, çarpma açısına göre ulaşabilir ya da ulaşmayabilir. Sinyal alıcı başlığa yansıyan sinyal, ultrasonik muayene cihazı ekranında eko (dalga çizgileri) meydana getirir. Yankının açısına bağlı olarak yansıtıcının muayene edilen parçanın içerisindeki kusurların hangi bölgede olduğu tespit edilebilir. Aynı zamanda yankının yükseklik durumu da yansıtıcının ne kadar büyük olduğu hakkında muayeneyi yapan kişiye bilgi verebilir. Yankıdaki sinyalinin şekline bakarak yansıtıcının tipi ile ilgili

yorumda bulunmak mümkün olabilir [17]. Şekil 3.3.' de ultrasonik muayene cihazı gösterilmiştir.



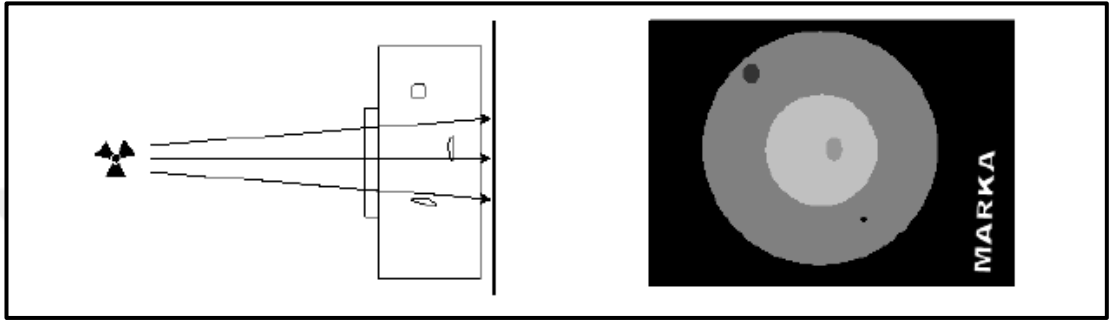
Şekil 3.3. Ultrasonik muayene cihazı [17].

Ultrasonik muayene yöntemi metal veya metal olmayan malzemelerdeki hacimsel kusurlar ve çatlak türü yüzeysel kusurların tespit edilmesi amacı ile kullanılır. Yüksek frekansa sahip olan ses dalgaları piezo elektrik özelliğinde olan kuartz kristallerine değişken elektrik akımı uygulandığında kuartz kristallerinde mekanik halde titreşimler oluşmaktadır. Piezo elektrik özelliğindeki malzemelere mekanik halde titreşimler verilir ise malzemede elektrik akımı oluşur. Piezo elektrik özelliği, malzemeye uygulanan elektrik akımına karşı malzemede oluşan boyutsal değişim durumudur [17].

3.2.6. Radyografik Muayene Yöntemi

Enerjisi yüksek elektromanyetik dalgalar çoğu malzemeye işleyebilmektedir. Bu kuvvetli elektromanyetik dalgalar malzeme üzerine nüfuz ettirildiğinde malzemenin içerisinden geçerek arkasına konulan ve elektromanyetik dalgalara karşı duyarlı filmleri etkilerler. Elektromanyetik dalgalardan etkilenen filmler banyolama işlemine tabii tutularak malzeme içerisinden geçen elektromanyetik dalgaların film üzerinde görüntüleri oluşur. Bu görüntüler malzemenin iç yapısında üretim esnasında veya sonradan meydana gelmiş olan yoğunluk değişimlerini ve boşlukları göstermektedir. Malzeme yapısının bu biçimde görüntülenebilme olayına radyografi adı verilir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda ise radyografik muayene gerçekleştirilmiş olur. Malzemenin arkasına film değil de dedektör yerleştirilmesi ve malzemedan geçen

elektromanyetik dalgalar monitöre yansıtılması yöntemine radyoskopi adı verilir. Bu muayenelerin güvenilir ve sağlıklı sonuçlar elde edilebilmesi için belirli standartlara uygun olarak yapılması gerekmektedir. Bahsedilen standartlar malzemenin türüne veya cinsine uygun olarak hazırlanmıştır. Bunun dışında muayenenin uygulanışına yönelik uygulama standartlarında kabul edilmiş olan belirli bir uygulama standartları mevcuttur [17]. Radyografi oluşumu Şekil 3.4.' de verilmiştir.



Şekil 3.4. Radyografi görüntü oluşumu [17].

Muayene edilecek olan malzemenin özelliklerine göre uygun standartlar belirlenir ve muayene bu standartlara uygun olarak yapılır. Hacimsel kusur ve yüzeysel kusurlara sahip olan tüm metalik veya metalik olmayan malzemelerdeki kusurları tespit etmek amacı ile kullanılabilen bir yöntemdir [17].

3.2.7. Manyetik Muayene Yöntemi

Bu muayene yöntemi, manyetik malzemelerden yapılan parçaların yüzeylerinde ya da yüzeylerine yakın olan yerlerdeki boşluk, çatlak, damar, katmer ve metalik özellik taşımayan yabancı maddelerin tespit edilmesi üzere kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerindedir. Manyetik muayene yöntemi ile sadece mıknatıslanma özelliği olan metal malzemelerin muayenelerinin yapılması mümkündür. Mıknatıslanma özelliği gösterebilen metaller periyodik sistemde bulunan üç kıymetli kobalt (Co), nikel (Ni) ve demir (Fe) elementleridir. Bu elementler manyetikleşebilme yeteneğine sahiptirler [17].

Manyetik muayene yöntemi kullanılarak manyetiklikleri kontrol edilecek olan malzemeler öncelikle özel bir sistem ile mıknatıslandırılmaktadır. Mıknatıslandırılmış malzemelerin yüzeylerine küçük taneli toz halindeki manyetik malzeme püskürtülmektedir ya da ince yağın içinde emülsiyon işlemine tabi tutularak yapılan demir tozu, manyetik malzemenin üzerine dökülür. Manyetik malzeme üzerine serpilmiş demir tozları malzemedeki manyetiklik çizgileri boyunca sıralanır. Malzeme yüzeyinde herhangi bir kusur var ise manyetik tozlar kusurların bulunduğu bölgelerde kümelenerek kusur tespitinin yapılabilmesini sağlar [17].

Manyetikleme işlemi doğru ve dalgalı akım olarak kullanılabilir. Yüzeylerin altındaki çatlakların muayenesi dalgalı akım kullanılarak yapılamaz. Bu sebeple yüzeylerdeki ve yüzeylerin altındaki çatlakların her ikisini de doğru akım tespit edebildiğinden doğru akım kullanılarak yapılan muayene tercih edilmektedir. Manyetik muayene yönteminde çoğunlukla demir tozu tercih edilir. Malzeme yüzeyine dağılan toz parçaları çatlakların üzerlerinde köprü şeklinde izler bırakır ve kusurların tespit edilmesi sağlanır [17].

3.2.8. Basınç ile Muayene Yöntemi

Vana, kazan ve boru benzeri yüksek basınçlarda çalışan ürünlerin üretimlerini yapan firmalarda malzemeyi tahrip etmeden yapılan basınç ile muayene yöntemi kullanılmaktadır. Üretimi gerçekleştiren her bir parçaya çalışma basıncının en az 1,5 katı kadar gaz ya da sıvı basıncı belli sürelerde uygulanarak yapılan işlemler basınç ile muayene yöntemi olarak adlandırılır. Boruların et kalınlıkları, kaliteleri ve çaplarına göre uygulanan hidrostatik test basınç formülü aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P = 2000.S.t/D$$

P = Hidrostatik test basıncı (KPa)

D = Dış çap (mm)

S = Minimum gerilme kuvveti (MPa)

t = Malzemenin et kalınlığı (mm)

Basınçlı hava kullanılarak kazanlar, içi boş malzemeler ve küçük çaplı çelik borulara basınç ile muayene yöntemi uygulanabilir [17].

3.3. MALZEMELERDE TAHRİBATLI MUAYENE YÖNTEMLERİ

Malzemeleri tahribata uğratarak yapılan muayeneler, malzemelerin çalışma şartlarında karşılaşacakları kuvvetlere karşı verecekleri tepkilerin önceden tespit edilebilmesi amacı ile gerçekleştirilmektedir. Çoğunlukla malzemeler çalışma ortamlarında ne tür kuvvetlere maruz kalacaklar ise o tür test makinelerinde muayeneleri yapılmaktadır. Bu şekilde malzemelerin maruz kalacakları kuvvetlerin benzerleri oluşturularak sağlıklı bir rapor elde edilmesi sağlanmaktadır. Malzemeler tüm bu deneyler sonucunda çalışma şartlarında maruz kalacağı benzer kuvvetlere dayanabileceği tanısına varılır ise kullanımları esnasında da herhangi bir sorun ile karşılaşılmayacağı önceden bilinmiş olur.

Malzemelerin çalışma şartları sırasında hangi kuvvetler altında kalırlarsa kesilecekleri, bükülecekleri veya kopacaklarının tespitinin bilinmesi gerektiğinden malzemelerin benzer şartlar oluşturularak bu kuvvetlere maruz bırakılması gerekmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı muayene sonrasında malzemelerde tahribat oluşacağından bu gruptaki muayene yöntemleri tahribatlı muayene yöntemleri olarak bilinmektedir [18].

3.3.1. Kıvılcım Deneyi

1400 devir/ dakika hızında dönen zımpara taşına çelik parça tutularak zımparanın yüzeyindeki aşındırıcı maddelerin üzerlerinden parçaları kopması ile yapılan deneye kıvılcım deneyi denilmektedir. Isınarak akkor haline gelen bu parçacıklar, kıvılcım olarak adlandırılmaktadır. Çelik içerisinde bulunan karbon patlamalara sebep olurken, alaşımdaki diğer elementler ise farklı şekiller ve renklerin oluşumuna sebebiyet verir. Kıvılcımların bu durumlarına bakılarak muayenesi yapılan çeliğin yapısındaki alaşım elemanları ve hangi oranda karbon içerdiği tecrübeli teknik

elemanlarla yaklaşık olarak tespit edilebilir [18]. Kıvılcım deneyi sonucunda oluşan görüntüler Şekil 3.5.' de verilmiştir.

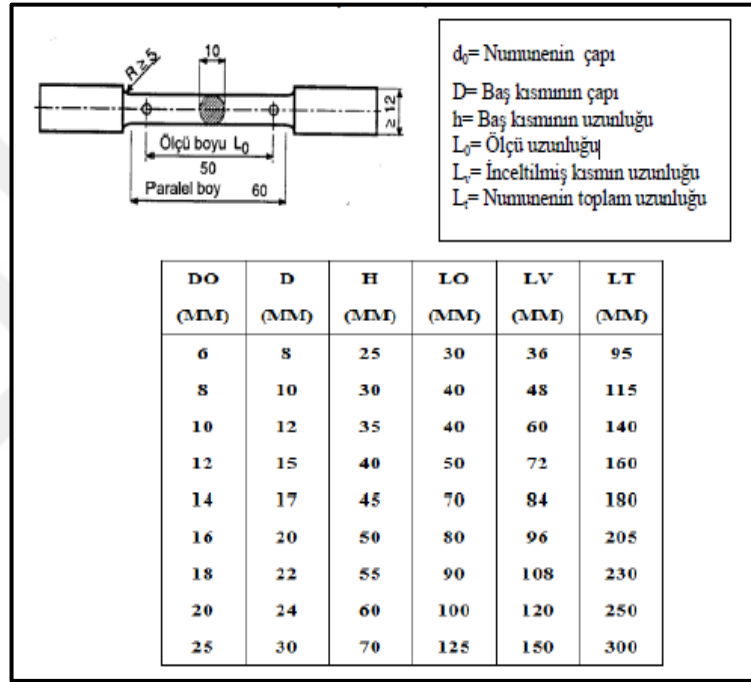
Kıvılcım Deneyi	
Çelik Cinsleri % cinsinden alaşım payları	Kıvılcım Şekli
Sementasyon çeliği 21 Mn cr 5 0,21C/1,25 Mn/1,15 Cr Düzdün ışın (hüzme), az dikenli C- (Karbon) Patlamaları	
İslah Çeliği 42 Cr Mo 4 0,42 C/1,1 Cr/0,2 Mo Mızrak uçlu kırmızı ince demetli dikenler şeklinde kıvılcım	
Alaşımsız İslah Çeliği C 45 0,45 C/0,3 Si/0,7 Mn Düzdün ışın (hüzme), birçok diken şeklinde C-Patlamaları	
Alaşımsız Takım Çeliği C 105 W1 1,05 C/0,2 Si/0,2 Mn Kıvılcım boyunda birçok C- patlamaları, kalın dallanma	
Alaşımlı Takım Çeliği 60 Mn Si Cr 4 0,60 C/1,0 Si /1,1 Mn/0,3 Cr Birçok C- Patlamalarından önce temel ışında kabarma	
Alaşımlı Takım Çeliği 105 WCr 6 1,05C/1,2 W /1,0 Cr/1,0 Mn İnce hüzmeler, alt tarafından kırılan hüzme uçları olan canlı kıvılcım şekli	
Yüksek alaşımlı sıcak iş çeliği X 38 5Cr MoV51 0,38 C/1,1 Si/0,4 Mn/5 Cr/1,0 Mn Düzdün ışın, dağınık C-patlamaları, hüzme uçları portakal renginde	
Hız çelikleri S-10-4-3-10 1,23 C/4,1 Cr/3,8 Mo/3,3V/10W/10,5 Co Koyu kırmızı, çizgi şeklinde hüzme, hüzme uçlarında renk açılması	
Paslanmaz Çelik X 5 Cr Ni 18 10 0,07 C/18,5 Cr/ 10Ni C-Patlamaları olmayan Düzdün hüzmeler	

Şekil 3.5. Kıvılcım deneyi ve oluşan görüntüler [18].

3.3.2. Çekme Deneyi

Çalışma şartlarında çelikler farklı etkenler altında kalmaktadırlar. Bu etkenler dış etkenler ve iç etkenler olarak sıralanır. Dış etkenler malzemenin etrafında oluşan

yüklerin malzeme üzerine verdikleri harici kuvvetlerdir. Bu kuvvetler kimi zaman kesilmeye, kimi zamansa basılmaya karşı malzemeyi zorlamaktadır. Malzemelerin dış etkenlere karşı göstermiş olduğu mukavemetin önemli bir ölçüde belirlenmesine yardımcı olan kuvvet ise çekme kuvvetlerine karşı gösterdiği dayanımdır. İç etkenler ise, kimi zaman malzemenin çalışma şartlarında (boru, profil vb.) ya da malzemenin kendi yapısından dolayı malzemeyi şekil değiştirmeye zorlamaktadır [18]. Dairesel kesitli çekme numunesinin belirli standartlardaki ölçüleri Şekil 3.6.' da verilmiştir.



Şekil 3.6. Dairesel kesitli çekme numunesi ölçüleri [18].

Malzemelerin çekme kuvvetlerine karşı gösterdiği mukavemeti tayin etmek amacı ile yapılan muayene yöntemine çekme deneyi (muayenesi) denilmektedir [18]. Şekil 3.7.' de çekme cihazının görseli verilmiştir.



Şekil 3.7. Üniversal çekme deney cihazı [18].

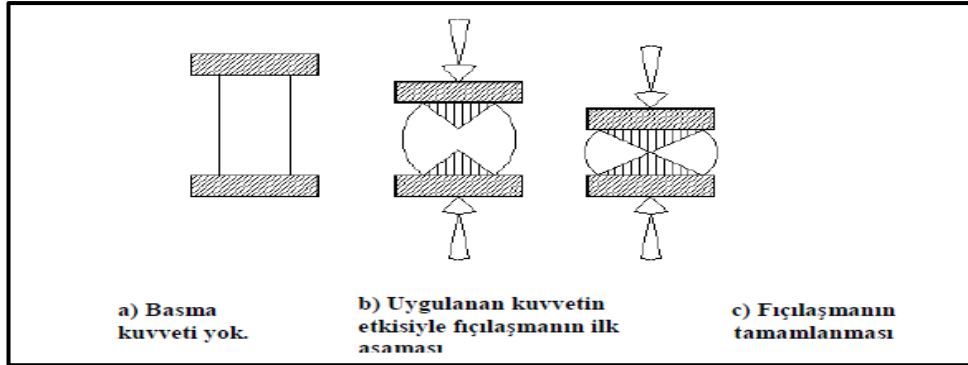
3.3.3. Basma Deneyi

Bu deneyin malzemeye uygulanabilmesi için öncelikle malzemedен belirli standartlara uygun olarak numune parça temin edilmektedir. Genellikle bu numune parçaların ölçüleri 30 mm veya 10 mm çapında ve seçilecek boy numune çapının 1,5 katıdır ve silindiriktir. Numune parça üzerine uygulanan basma kuvveti devamlıdır fakat azar azar arttırılır. Basma kuvvetinin uygulanmasında belirli bir süre yoktur, numunenin çatlamasına veya yırtılmasına kadar devam ettirilir. Baskı kuvveti ilk önce numuneyi fıçıya benzer bir görünüme kavuşturur [18]. Basma cihaz görseli Şekil 3.8.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Üniversal basma cihazı.

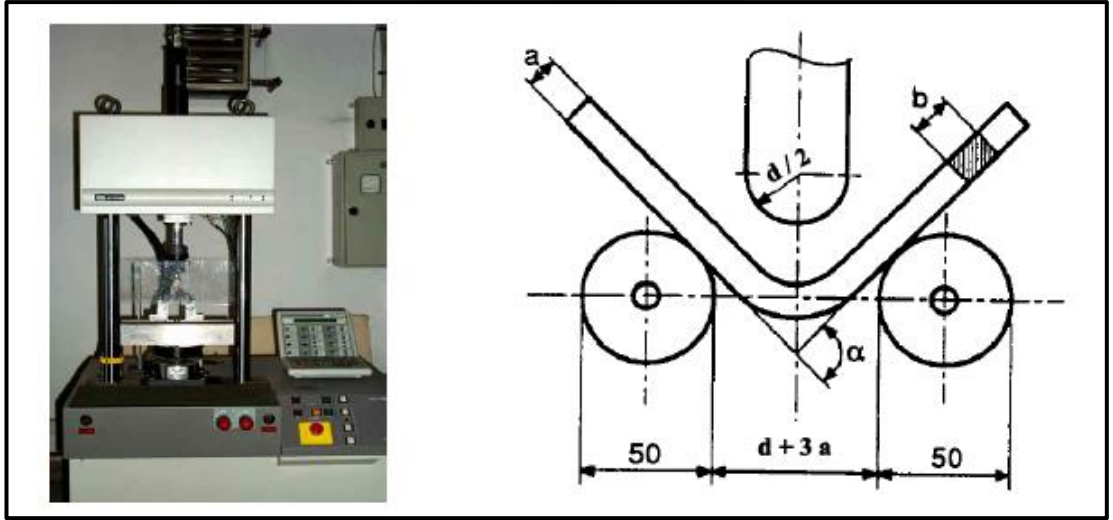
Deney sırasında numune parçanın görüntüsü malzemedan malzemeye farklılık göstermektedir. Sert ve gevrek olan malzemeler (dökme demirler vb.) büyük parçalar şeklinde çatlaklar ve ardından parçalanırlar. Yoğrulma özelliği gösteren malzemeler ise (çelik türleri vb.), uygulanan kuvvetin yönünde olan çatlakları gösteren düz bir plaka şekline gelinceye dek ezilirler. Numune parça üzerinde en yüksek elde edilen basma gerilmesi malzemenin basma dayanımını oluşturur [18]. Basma deneyinin uygulanişı Şekil 3.9.' da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Basma deneyi uygulanması [18].

3.3.4. Bükme Deneyi

Bükme deneyindeki amaç, malzemelerin soğuk halde çatlama ne kadar katlandığını ya da katlanmadığını test etmektir. Malzemedan alınan numune parça, standartlara uygun çaptaki bükme parçası ile iki yuvarlak dayanak arasından basma kuvveti uygulanarak katlanır. Numune parçada oluşan alt kenarlarda çekme gerilmelerinin meydana geldiği görülür. Bu kenarların üzerindeki çatlama belirli bir bükme açısının üzerindeki açılardan sonra meydana gelmektedir. Bükme- eğme parçasının çapları değiştirilerek malzemenin zorlanma miktarı artırılabilir ya da azaltılabilir. Bükme- eğme parçasının çapı küçüldükçe numunede meydana gelen çekme çatlaklarının oluşumu kolaylaşmaktadır [19]. Şekil 3.10.' da bükme cihazı ve numune ölçülerinin görselleri verilmiştir.



Şekil 3.10. Bükme cihazı ve numune ölçüleri [19].

3.3.5. Burulma Deneyi

Deneyde kullanılacak olan numune silindirik olarak hazırlanır. Numunenin bir ucu sabit çeneye bağlanır. Numunenin diğer ucu ise kendi eksenini etrafında döndürülür. Bu şekilde malzeme molekülleri birbirlerinin yüzeylerinde kaymaya ve hareket etmeye zorlanır.

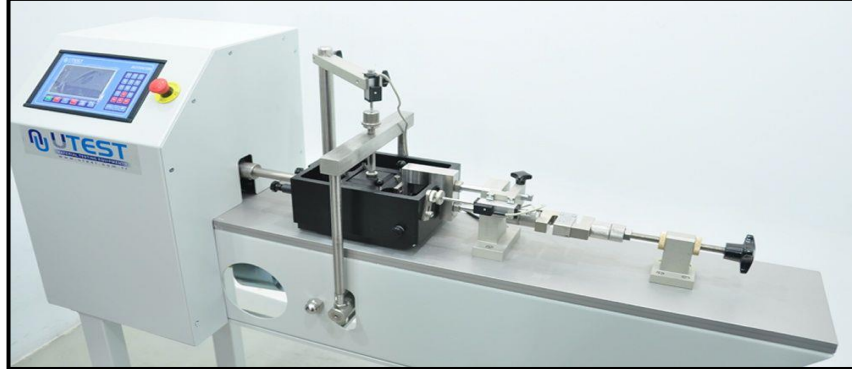
Numune çekme deneyindeki gibi belirli bir yere kadar elastik özellik göstermektedir. Numune üzerine uygulanan kuvvetin artması ile elastiklik sınırı aşılır ve numune burularak şekil değişimine uğratılır. Burulma sonunda oluşan kalıcı şekil değişiminin engellenmesi için malzemedeki moleküllerin dayanım göstermeleri gerekmektedir. Moleküllerin gösterdiği dayanım ölçüsüne, kayma modülü denilmektedir (G harfi ile gösterilir). Burulma deneyi sonunda burulmaya karşı gösterilen dayanım burulma cihazı üzerinde N/mm^2 cinsinden okunmaktadır. Kayma modülü, makine üretiminde $80000 N/mm^2$ olarak, dökme demirlerde ise 30000 ila $68000 N/mm^2$ olarak standartlaştırılmıştır [19]. Burulma deney cihazının görseli Şekil 3.11.' de verilmiştir.



Şekil 3.11. Burulma deneyi cihazı [19].

3.3.6. Kesme Deneyi

Silindir şeklinde hazırlanan numune, oluşturulan kesme tertibatında azar azar artan bir kesme kuvvetine maruz bırakılıp kesilinceye kadar zorlanması ile sonlandırılan deneye kesme deneyi denilmektedir. En yüksek kuvvete bakılarak kesme dayanımı hesaplanmaktadır [19]. Kesme deneyi cihazı Şekil 3.12.' de verilmiştir.



Şekil 3.12. Kesme deneyi cihazı [19].

3.3.7. Darbe Çentik Deneyi

Gevrek kırılmalara sebebiyet verecek şartlarda çalışan malzemelerin mekanik davranışlarının tespitinde darbe- çentik deneyi kullanılmaktadır. Darbe- çentik deneyindeki genel amaç, sünek- gevrek geçiş sıcaklığının tespiti ve metalik malzemelerin maruz kaldığı dinamik zorlanmalar sonucu kırılmasına neden olacak enerji miktarının önceden bilinmesini sağlamaktır. “h” yüksekliğine çıkarılan “G” ağırlığına sahip bir sarkaç bu konumunda “h.G” enerjisine sahiptir. Sarkaç numune üzerine serbest düşerek çarpar ve numuneyi kırar ardından “h₁” yüksekliğine ulaşır. Bu konumdayken enerjisi “G.h₁” olur. Başlangıçta ve sonda meydana gelen iki potansiyel enerji arasında meydana gelen fark deney numunesinin kırılabilmesi için gerekli olan enerjiyi vermektedir. Darbe dayanımı olarak bilinen bu değer şu şekilde hesaplanır:

$$E = G (h-h_1) = G.L (\cos \beta - \cos \alpha)$$

L: Sarkaç ağırlık merkezinin sarkacın merkezine olan uzaklığı (m)

G: Sarkaç ağırlığı (kg)

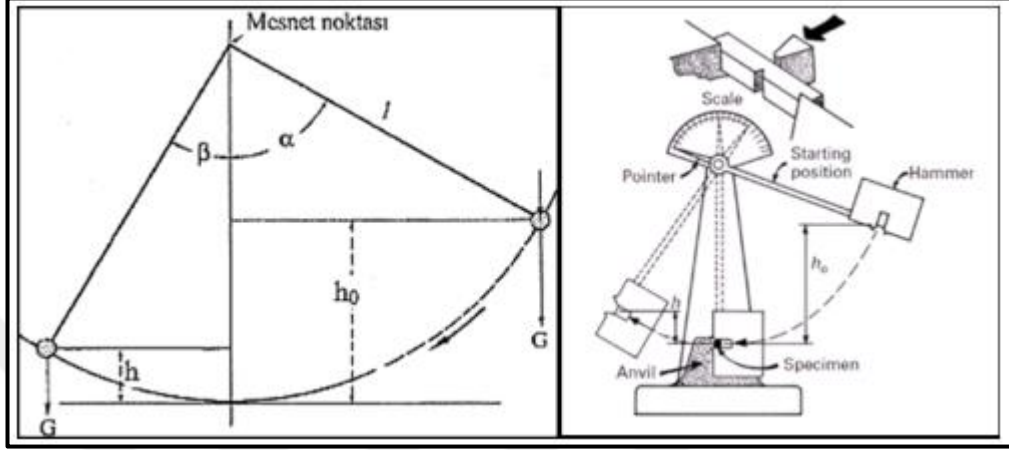
h: Sarkaç ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m)

h₁: Sarkaç ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m)

β: Yükseliş açısı (derece)

α: Düşme açısı (derece)

Genellikle darbe direnci Joule (J) verilir. Fakat, kimi şartlarda Nm, J/m^2 ya da Nm/m^2 olarak da verildiği görülür. Kırılma toklukları yüksek olan malzemelerin kırılma enerjileri de yüksek olur [19]. Şekil 3.13.' de darbe çentik deneyinin uygulanışı gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Darbe çentik deneyi uygulanışı [19].

3.3.8. Aşınma Deneyi

Birbirlerine temas halinde çalışan malzemelerin, birbirlerine sürtünmeleri sonucunda oluşan aşınma, muhtelif teçhizat ve makinenin kullanılması esnasında oldukça büyük ekonomik masraflara sebebiyet vermektedir. Aşınma olayı, bir yüzeyin diğer yüzeyden malzeme koparması veya yüzeyde aşınma parçası oluşması sonucunda malzemede meydana gelen maddesel kayıp olarak tanımlanabilir. DIN 50320' ye göre aşınmanın tanımı; malzemenin yüzeyinde kullanım şartlarına bağlı olarak mekanik nedenlerden dolayı küçük parçaların ayrılarak oluşan kalıcı şekil değişikliği şeklinde tanımlanmıştır. Birbirlerine temas eden katı yüzeylerdeki malzeme kaybı üç farklı yol ile gerçekleşir. Bunlar kimyasal çözünme, bölgesel erimeler ve yüzeyden fiziksel olarak meydana gelen ayrılmalardır. Genellikle uygulamalarda aşınma kapsamına yüzeylerden fiziksel olarak kopan malzemelerin sebep olduğu kalıcı hasarlar ele alınmaktadır. Genel bir aşınma; aşındıran (karşı) malzeme, aşınan (ana), yük, hareket ve ara malzeme aşınma olayının temelini meydana getirir. Tüm bu şartların meydana geldiği sistem teknik olarak tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır [19]. Şekil 3.14.' de aşınma cihazı gösterilmiştir.



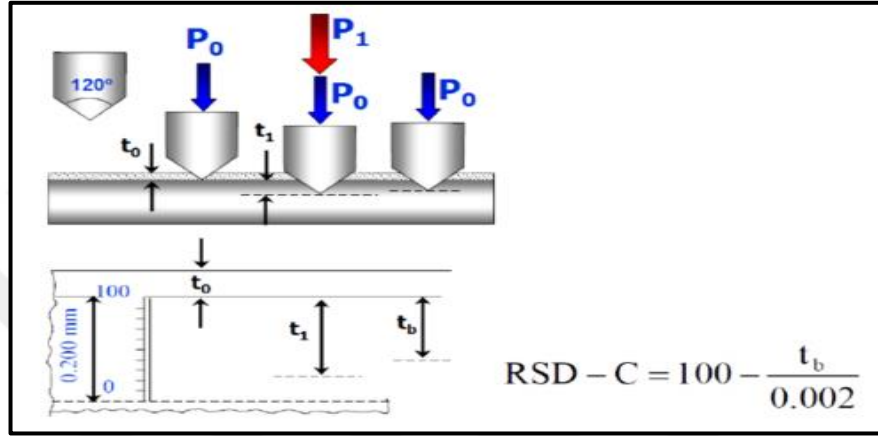
Şekil 3.14. Aşınma deney cihazı [19].

Abrasif aşınma deneylerinde kullanılan aşınma numuneleri, ASTM G 99 standardına uygun olarak hazırlanır. Abrasif aşınma deneyleri uygun numuneler kullanılarak zımpara üzerinde aşınan pim (Pin On Disk) yöntemine göre yapılır. Bu yöntemde numune sabit hız ile dönen zımparanın üzerine önceden belirlenen bir kuvvet ile bastırılmasıyla aşınma gerçekleştirilir. Aşınma deneyinden önce ve sonra her numunenin ağırlığı 0,1 mg hassasiyetle hassas terazide ölçülür ve numunelerin ağırlık kayıpları hesaplanır [19].

3.3.9. Sertlik Deneyi

Malzemelerin sertliklerinin ölçülmesi, malzeme deneyleri arasında en genel kullanılan yöntemlerdendir. Bunun nedeni ise, deneyin diğer deneylere nazaran oldukça kolay olması ve yine diğer deneylere oranla numunedeki tahribatın oldukça az olmasıdır. Farklı bir avantajıysa, malzemelerin sertliklerinin ölçülmesi, malzemenin mekanik özelliklerinin yorumlanmasında oldukça kolaylık sağlıyor olmasıdır. Örnek vermek gerekirse çeliklerde, çekme dayanımı sertlik ile doğrudan orantılıdır; bu nedenle, sertlik deneyi yapılan malzemenin deney sonuçlarının

yorumlanması ile malzemenin dayanımı hakkında fikir sahibi olunması sağlanmaktadır. Sertlik malzemelerin kesilmeye, delinmeye, aşınmaya ve çizmeye karşı gösterdiği dayanıma denir. Laboratuvarlarda özel cihazlar aracılığı ile yapılan sertlik ölçümlerinden elde edilen değer, malzemelerin plastik deformasyona karşı dayanımını göstermektedir [19]. Şekil 3.15.' de sertlik deneyinde kullanılan formül verilmiştir.



Şekil 3.15. Sertlik deneyi ölçüm formülü.

Sertlik ölçümlerinde iz bırakacak olan batıcı ucun yüzeye ne derece battığı hesaplanacağı için yüzey pürüzlülüğü oldukça önemlidir. Bu yüzden öncelikle batıcı uç düşük bir ön yükü (P_0) malzemeye daldırılarak cihaz sıfırlanır. Ardından toplam yüke tamamlanarak ana yük (P_1) malzemeye uygulanır. Sonrasında ise ana yük (P_1) kaldırılır. Oluşumu sağlanan kalıcı izin derinliğindeki artışı bulunarak mevcut ekrandan sertlik değeri görülür [19].

BÖLÜM 4

TOZ METALURJİSİ VE MEKANİK ALAŞIMLAMA

4.1. GİRİŞ

Tozların kombinasyonlarının istenilen şekilde ayarlandığı üretim yöntemidir. Saf metallerin ve alaşımların toz haline getirilmesinden çeşitli makine parçalarının belirli yöntemlerle üretilmesini kapsar. Tozların yüzey alanı / hacim oranının çok yüksek olması karakteristik özelliklerindedir. Tozlar sadece küresel şekillerde değildir. Köşeli, damla, yumru, silindirik, düzensiz, levhasal, poligonal, dentritik şekillerde de olabilir.

Toz üretiminde tercih edilen mekanik yöntemler, genellikle sert metal ve seramik tozların üretimi için geçerlidir. Ayrı veya kombinasyon halinde dört farklı yöntemle (darbe, aşındırma, kesme ve sıkıştırma) toz üretimi yapılmaktadır [22,23]. Darbe ile toz üretiminde, yüksek ve hızlı bir kuvvet uygulanarak malzemenin kırılması sağlanmaktadır. Aşındırma, iki cisim arasındaki sürtünme hareketi ile parçacıkların üretimidir. Kesme, parçacıkları kesme düzlemleri boyunca (örneğin, bölünme) oluşan kırma işlemlerinden oluşmaktadır. Sıkıştırma, parçacıkların sıkıştırma kuvvetleri altında üretilmesidir. Kırma işleminde parçacık büyüklüğünün küçültmesi (öğütme veya karıştırma), katı hal alaşımlama (mekanik alaşımlama) ve polimorfik dönüşümü (mekanik öğütme) ile sonuçlanmaktadır [21,22].

4.2. TOZ METALURJİSİ

Malzemelerin üretildiği yöntemler ve özellikleri, büyük ölçüde kullanılan elementlerin özelliklerine bağlıdır. Modern toz malzemeler, kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılmaktadır. Günümüzde, hemen hemen tüm metal ve alaşımların tozları üretilmektedir. Boyutları 1-200 µm aralığındaki parçacıklar, toz olarak

tanımlanmaktadır [21]. Tozların özellikleri arasında parçacık bileşimi, büyüklüğü, şekli ve yapısı, spesifik yüzey, gözeneklilik ve hacim özellikleri, akışkanlık, kuvvet, sertlik, sıvı ve gazlara karşı geçirgenlik, elektrik iletkenliği, sıkıştırılabilirlik ve parçalanabilirlik gösterilmektedir [21].

Tozların çoğunda parçacık büyüklüğü birkaç mikrondan 0,5 mm ye kadar değişmektedir. Parçacıklar genellikle iç gözeneklere, çatlaklara ve safsızlıklara sahiptir. Parçacık şekli, çok çeşitlidir ve üretim yöntemlerine bağlıdır. İstenen özellikler, üretim parametreleri kontrol edilerek sağlanabilmektedir [20]. Tozlar, şekillerine göre üç temel gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- a) Saç veya iğne şeklinde,
- b) Yassı (ince tabakalar veya yapraklar),
- c) Küresel [21].

Toz metalurjisi (TM) yılda yaklaşık sekiz milyar dolarlık bir pazarı ve bir milyon tonu aşan bir üretimi temsil etmektedir. TM, geleneksel döküm, dövme veya işleme yöntemlerine göre daha rekabetçi ve iyi özellikleri birleştirilmiş (malzeme tasarrufu anlamına gelen net şekilli) bileşenlerin üretiminde kolaylık sağlamaktadır. TM parçalar enerji, otomotiv, havacılık, tıp endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. İlave olarak, toz metalurjisi ile üretilen malzemeler, geleneksel metalurjik yöntemle üretilen parçalarda elde edilen iri taneli alaşımlara nazaran, daha ince taneli mikro yapıya sahiptir [21].

Tozların farklı özelliklere (bileşim, boyut, boyut dağılımı, şekil, mikro yapı ve saflık) sahip olması, üretildikleri yöntem ile ilişkilidir. Buna bağlı olarak tozlar, soğuk presleme yerine termal püskürtme, gevşek toz sinterleme veya sıcak birleştirme (ekstrüzyon, izostatik presleme) için kullanıldığında, küresel (atomize) tozlara ihtiyaç duyulmaktadır. Düzensiz tozların kullanımında, yüksek şekillendirme kuvvetlerine ihtiyaç duyulmaktadır [20]. Toz kirliliği, birçok uygulama için önemli bir kriterdir. Kirlenmenin miktarı ve türü (kapanımlar, yüzeysel oksidasyon, vb.), toz üretimine bağlıdır. Bu kirlenmeler, üretim sırasında kontrol dışı meydana gelen bir

olaydır. Toz üretim işlemleri mekanik, atomizasyon, fiziksel, kimyasal ve plazma gibi farklı yöntemlerle yapılmaktadır.

4.2.1. Toz Metalurjisi Aşamaları

Toz Metalurjisi aşamalarını 6 başlık altında inceleyebiliriz.

4.2.1.1. Tozların Üretimi

Bu aşamada çeşitli alaşımlar veya saf malzemeler mekanik, elektrolitik, kimyasal ve atomizasyon yöntemleriyle toz haline getirilir. Bu yöntemlerinde kendi başlıkları altında çeşitli işlem farklılıkları vardır. Bu da doğal olarak toz elde etme yöntemlerinin çok çeşitli yolları olduğunu gösterir [20].

4.2.1.2. Harmanlama ve Karıştırma

Harmanlama, aynı kompozisyona sahip tozların karıştırılması işlemidir. Karıştırma, farklı kompozisyondaki tozların veya element halindeki tozların karıştırılması işlemidir. Elde edilen tozlar çeşitli yöntemlerle karıştırılarak homojen bir yapı elde etmeye çalışılır [20].

4.2.1.3. Presleme

Tozların bir kalıp içerisinde sıkıştırılarak istenilen şekle sokulması işlemidir. Bu işlem sonrasında tozlar istenilen mukavemete ulaşmış olur. Presleme sıcak veya soğuk gibi çeşitli yöntemlerle uygulanabilir [20].

4.2.1.4. Sinterleme

Prenlenmiş parçaları oluşturan tozlar arasında koherant (uyumlu, bitişik) yapılar oluşturmak amacıyla koruyucu atmosfer veya vakum altında ve malzemenin ergime sıcaklığı altında gerçekleştirilen ısı işlemidir. Bu işlem presleme sonrası oluşan

mikro boşlukları gidermek için uygulanır. Bir diğer amacı da kompaktın fiziksel özelliklerini geliştirmektir [20].

4.2.1.5. Üretim Aşamaları

Bu aşamada isteğe bağlı olarak malzemenin üretimi sonrası malzemenin durumuna göre tekrar işleme tabi tutulabilir. Bunlar tekrar presleme ve tekrar sinterleme bu aşamada yapılabilir. Bu işlemler uygun görülürse bu aşamada uygulanır [22].

4.2.1.6. Bitirme İşlemleri

Malzemeyi kullanıma hazırlamak için kullanılan son aşamasıdır. Bu aşamada ısıtma işlemi, talaşlı imalat, temizleme, markalama ve paketlenme gibi işlemler gösterilebilir [22].

4.2.2. Toz Metalürjisi Avantajları

- a) Ergitme kayıpları azdır.
- b) Talaş kaldırma işlemi gerektiğinde ve çok az olduğundan hurda kaybı azdır.
- c) Konveksiyonel yöntemlere üretilmeyen alaşımların üretilmesine imkan verir.
Bu maddede anlatılmak istenen şudur; Bazı metaller alaşım olarak döküm yoluyla elde edilemez bunlara çinko ve titanyum örnek verilebilir. Titanyum 1668 °C de erirken çinko (buharlaştırma sıcaklığı 907 °C) o sıcaklıkta buharlaşmaktadır. Bu yüzden bazı alaşımlar sadece bu yöntemle üretilir.
- d) Metal olmayan malzemeler metal malzemeler içerisine homojen olarak yayılabilir.
- e) Uygun toleransta ve yüzey kalitesinde parçalar üretilir.
- f) Sinterlenmiş parçalarda gözeneklilik veya tam dokuluk sağlanabilir.
- g) Seri üretim yapılabilir [21].

4.2.3. Toz Metalürjisi Dezavantajları

- a) Toleranslar talaşlı imalata göre daha kabadır.
- b) Tozların kalıp içerisinde akışkanlıkları sınırlıdır.
- c) Grift (çok karışmış olan parçalar) parçaların üretimi sınırlıdır.
- d) Seri üretim yapılmazsa ekonomik değildir.
- e) Tozların maliyeti ingot malzemeye göre daha yüksektir.
- f) Mekanik özellikler bazı işlemler yapılmadığı takdirde iyileştirilemez [21].

4.3. MEKANİK ALAŞIMLAMA

Mekanik alaşımlama (MA) yöntemi, yüksek enerjili bir bilyalı öğütme yöntemidir. Bu yöntem metaller, seramikler ve kompozitler (sermetler ve metal matris kompozitler) gibi birçok farklı malzeme sisteminin üretiminde kullanılmaktadır. Sünek sünek veya sünek kırılğan malzeme sistemleri MA ile üretilebilmektedir [21,22].

MA işleminde farklı tip öğütme değirmenleri kullanılmaktadır. Bu değirmenlerden biride artritör tipi değirmenlerdir. Bu işlem ile metal matristeki ikinci fazın kontrollü ve homojen dağılımı sağlanabilmektedir. İşlem, uygun mekanik özelliklerin elde edilmesi için önemli olan mikro yapıların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Örneğin, oksitlerle sertleştirilmiş malzemeler) [21]. MA işleminde kullanılan bilyalar ve toz arasındaki yüksek enerjili etkileşim, tozların istenen şekilde alaşımlanmasını sağlamaktadır. MA işlemi tozların soğuk kaynaklanması, sürekli plastik deformasyon ve kırılma döngüsünden oluşmaktadır. Bu durum, sürekli soğuk kaynaklanma ve tekrar eden kırılmanın bir sonucudur. Bu işlem ile, nano boyutlu metalik alaşımlar ve amorf tozlar elde edilebilmektedir [24].

MA işlemleri sırasında, sürekli olarak toz parçacıklarında yeni yüzeyler oluşmaktadır. Parçacıkların küçülmesini veya diğer bir ifade ile, soğuk kaynaklanmayı azaltmak için genellikle bir işlem kontrol kimyasalı (İKK) (ağırlıkça %0,5- 4) kullanılmaktadır. Bu yöntemle üretilen parçacıklar, farklı başlangıç tozlarından (malzeme aktarımı) oluşan, karakteristik katmanlı bir yapıya sahiptir.

MA süresinin artmasıyla parçacıklar, ön deformasyon sertleşmesine uğrayarak ve kırılmaktadır. MA işlemi ilerledikçe, parçacıkların iç yapısı da (tane büyüklüğü, tabaka açıklığı, vb.) değişmektedir. MA ilk olarak 1960'lerde ODS (oksit dispersiyonu ile güçlendirilmiş) malzemelerin üretiminde kullanılmıştır. Bu malzemeler oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dayanımına ve sıcak korozyon direncine sahiptir. Bu malzemelerin yüksek sıcaklık mukavemeti, nikel veya demir bazlı bir süper alaşımlarda homojen bir dağılım (yaklaşık 100 nm) çok ince (5-50 nm) oksit parçacıklarından (Y_2O_3 , ThO_2 ve La_2O_3) kaynaklanmaktadır. Ayrıca MA, aşırı doymuş katı eriyiklerin (katı çözünürlük sınırlarının uzatılması), veya yarı-kristalimsi ara fazların (şekilsiz, camsı alaşımlar) ve alaşımlanması kolay olmayan elementlerin alaşımlandırılmasında kolaylık sağlamaktadır [22].

BÖLÜM 5

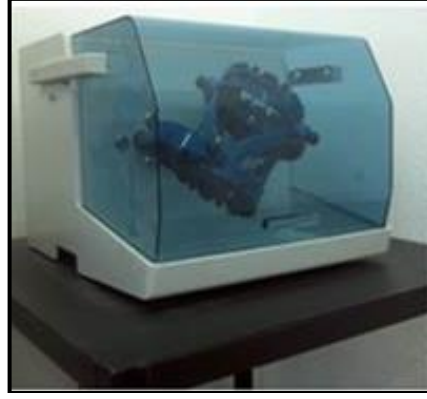
DENEYSEL METOD

5.1. GİRİŞ

Bu çalışmada 0.55C +Fe, 0.55C Fe +5Ni, 0.55C Fe +10Ni alaşımlarına 1/5, 1/7, 1/10 bilya- toz oranı, 4 mm, 5 mm, 6 mm bilya çapı, 15 dk., 30 dk., 1 saat mekanik alaşımlama süresi uygulanarak uygun bilya- toz oranı, bilya çapı ve mekanik alaşımlama süresi bulunması amacı ile mekanik alaşımla yapılarak üretilmiştir. Ayrıca aynı numunelerin MA ile kıyaslanabilmesi için MASIZ olarak üretimleri de gerçekleştirilmiştir. MA ve MASIZ üretilen tozlar soğuk preslenerek çekme numuneleri elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler 1400°C' de argon atmosferinde iki saat sinterlenmiştir. Üretilen numuneler çekme deneyi yapılarak koparılmıştır. Numunelerin sertlik ölçümleri vickers Hv1- 10sn olarak yapılmıştır. SEM' de kırık yüzey incelemeleri için çekme numunesinin kopan bölgesinden numuneler diskaton cihazında kesilerek SEM için hazırlanmıştır. Mikro yapı incelemeleri için numune hazırlanıp bakalite alınarak zımparalama, parlatma işlemleri yapılmıştır. 50x, 100x, 200x, 500x ve 1000x görüntüleri alınmıştır. Parça numuneler kesilip yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Bütün bu deneyler neticesinde mekanik alaşımlamanın malzemenin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkileri gözlemlenebilmiştir.

5.2. ALAŞIM TOZLARININ HAZIRLANMASI

Çalışmada, 0.55C +Fe, 0.55C Fe +5Ni, 0.55C Fe +10Ni alaşımlarının üretiminde Sintek firmasından temin edilen demir (<180µm), grafit (<20 µm) ve nikel (<5 µm) tozları kullanılmıştır. Tozlar, 0,0001 gr. hassasiyetle çalışan Radwag marka hassas terazide tartılmıştır. Hazırlanan bileşimler turbula cihazında 1 saat karıştırılmıştır. Tez uygulama aşamasında kullanılan turbula cihazı Şekil 5.1.' da verilmiştir.

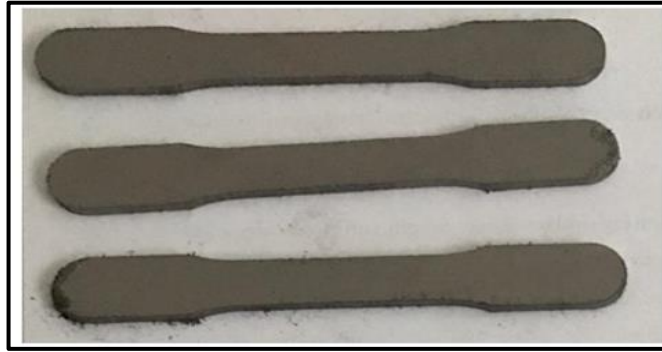


Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan turbula karıştırıcı.

Ardından mekanik alaşımlama cihazında 4mm, 5mm ve 6mm bilya çapları, 1/5, 1/7, 1/10 bilya- toz oranları ve 15 dk., 30 dk. ve 1 saatlik mekanik alaşımlama süreleri ile mekanik alaşımlama yapılmıştır. Değirmen hızı 300 dev/ dk. olarak belirlenmiştir. Bekleme süreleri ise 15 dk. için 5 dk., 30 dk. için 10 dk., 1 saat için ise 15 dk.' dır.

5.3. TOZLARIN SOĞUK PRESLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ

Mekanik alaşımlamalı ve mekanik alaşımlamasız olarak hazırlanan tozlar 96 ton kapasiteli Hidroliksan Marka hidrolik presle 700 Mpa presleme basıncında tek yönlü olarak yapılmıştır. Çekme numunesi formunda üretilen parçalar ASTM 8M toz metal çekme numunesi standartlarına uygun kalıpta sıkıştırılarak blok haline getirilmiştir. Çekme numunesi formunda elde edilen parçaların görseli Şekil 5.2. ile Şekil 5.3. hidrolik pres görseli aşağıdadır.



Şekil 5.2. Üretilen çekme numuneleri.



Şekil 5.3. 100 ton kapasiteli hidrolik pres.

5.4. SİNERLEME

Preslenen numuneler atmosfer kontrollü sinter fırınında argon ortamında 1400⁰C’ de sıcaklıkta argon atmosferinde 2 saat süreyle sinterlendikten sonra fırın içerisinde oda sıcaklığına soğutulmuştur. Sinter fırını görseli Şekil 5.4.’ da verilmiştir.



Şekil 5.4. Boru tipi sinter fırını.

5.5. ÇEKME TESTİ

Çekme numunesi formunda preslenen numuneler sinterleme işleminin ardından çekme testleri 50 KN kapasiteli Shimadzu marka çekme cihazında 1 mm/dk. çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

5.6. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Üretilen parçaların sertlikleri, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarındaki SHIMADZU marka mikro sertlik cihazında HV-1 10sn olarak ölçülmüştür. Her bir numuneden 5 adet sertlik ölçümü yapılarak ortalaması genel sertlik değeri olarak alınmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı SHIMADZU mikro sertlik ölçüm cihazının görüntüsü Şekil 5.5.' de verilmiştir.



Şekil 5.5. Shimadzu Marka mikrosertlik ölçüm cihazı.

5.7. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Deney numunelerinin yoğunlukları, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarındaki, maksimum 220 g ağırlık ölçebilen 1/10000 g hassasiyetindeki RADWAG AS-60-220 C/2 marka hassas terazinin yoğunluk

ölçme kiti ile Arşimet prensibine uygun şekilde yapılmıştır. Deney numunelerinin her birinin yoğunluk ölçümleri yapıp, sonuç değerlerinin ortalaması alınmıştır.

5.8. OPTİK MİKROSKOP VE SEM İNCELEMELERİ

Mikroyapı incelemeleri, Karabük Üniversitesi, Demir- Çelik Enstitüsü, MARGEM laboratuvarlarında bulunan X50-X2000 büyütme yeterliliğindeki Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin farklı kısımlarımdan değişik büyütmelerde görüntüler alınarak bu görüntülerin mikroyapının genelini temsil edebilir nitelikte olmasına özen gösterilmiştir. SEM incelemeleri ise Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, MARGEM laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 6

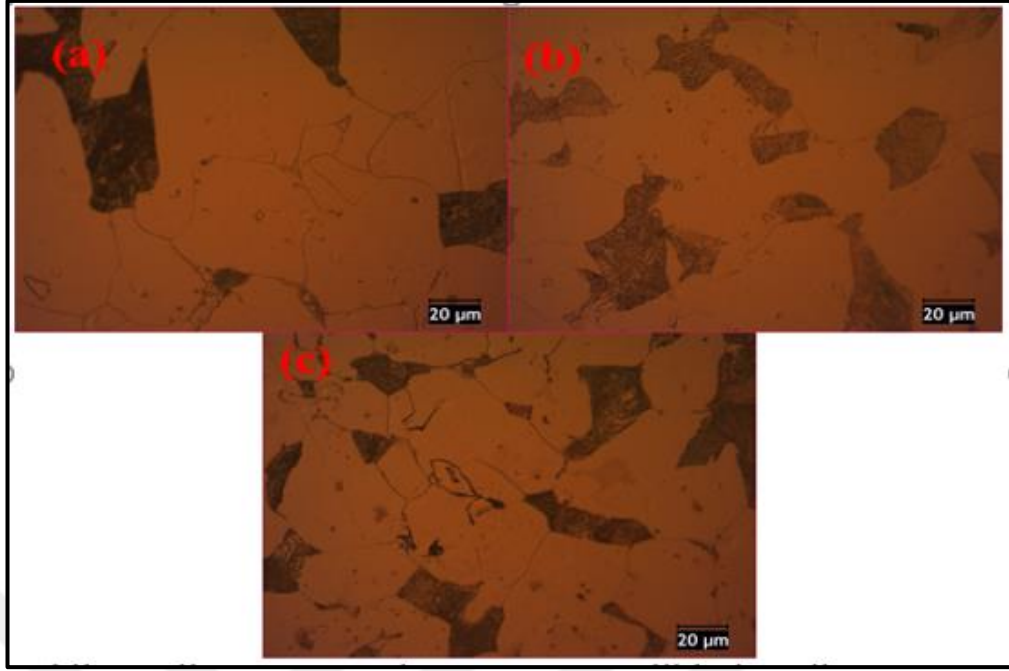
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, çelik numuneler toz metalurjisi yöntemi ile istenilen bileşimlerde imal edilmişlerdir. Farklı oranlarda eklenen nikel element miktarının, mekanik alaşımlama yöntemi ile mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bölüm 6.2.'de mikroyapı analizleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Bölüm 6.3.'de deney numunelerinin yoğunluk ölçüm sonuçları verilmiştir. Bölüm 6.4.'de çekme deneyi sonuçları tartışılmıştır. Bölüm 6.5.' te kırık yüzeylerin SEM görüntüleri açıklanmıştır.

6.2. MİKROYAPI ANALİZİ

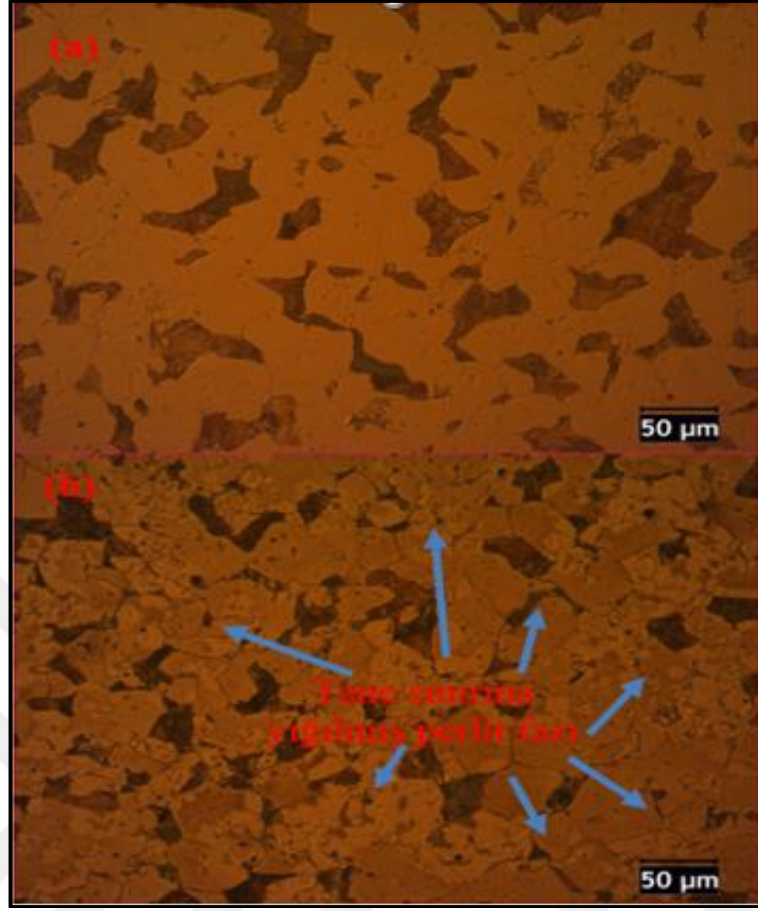
1400 °C'de argon ortamında sinterlenmiş TM yöntemi ve mekanik alaşımlamayla üretilmiş alaşımsız çeliğe bilya çapı, mekanik alaşımlama süresi ve toz- bilya oranı bakımından gerekli uygunlukları gözlemleyebilmek amacı ile mikroyapı yönünden karşılaştırılması şekil 6.1., şekil 6.2. ve şekil 6.3. verilmiştir.



Şekil 6.1. Bilya çapının mekanik alaşımlandırılan alaşımsız TM çeliklerin mikroyapısına etkisi. a) 4 mm, b) 5 mm ve c) 6 mm (200x büyütme).

Şekil 6.1.' de bilya çapının mekanik alaşımlaması yapılmış TM çeliklerin mikroyapılarına ait görselleri verilmiştir. Mikroyapı resimleri incelendiğinde bilya çapı arttıkça oluşan perlit boyutları küçülerek mikroyapıda homojen dağılım göstermiştir. Buda başlangıçta dayanımda ve % uzamada artışa neden olmuştur.

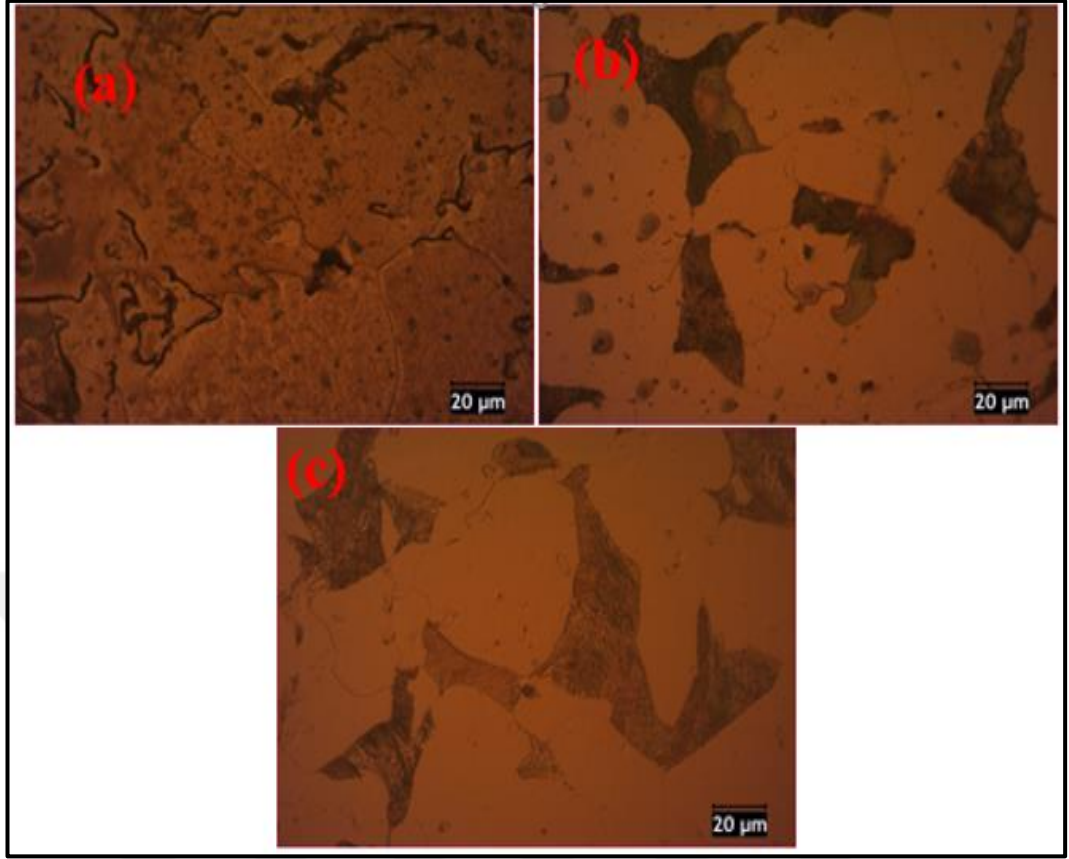
Ancak bilya çapı 6 mm'ye çıktığında perlitlerin tane sınırı boyunca oluşma eğiliminin arttığı bunda mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Sonuç olarak, 5mm bilya çapına sahip olan çelik numuneler en yüksek akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama sergilemiştir.



Şekil 6.2. a) 15 dk ve b) 1 saat mekanik alaşımlandırılan alaşımsız çelik numunelerin 200x mikroyapı görüntüsü.

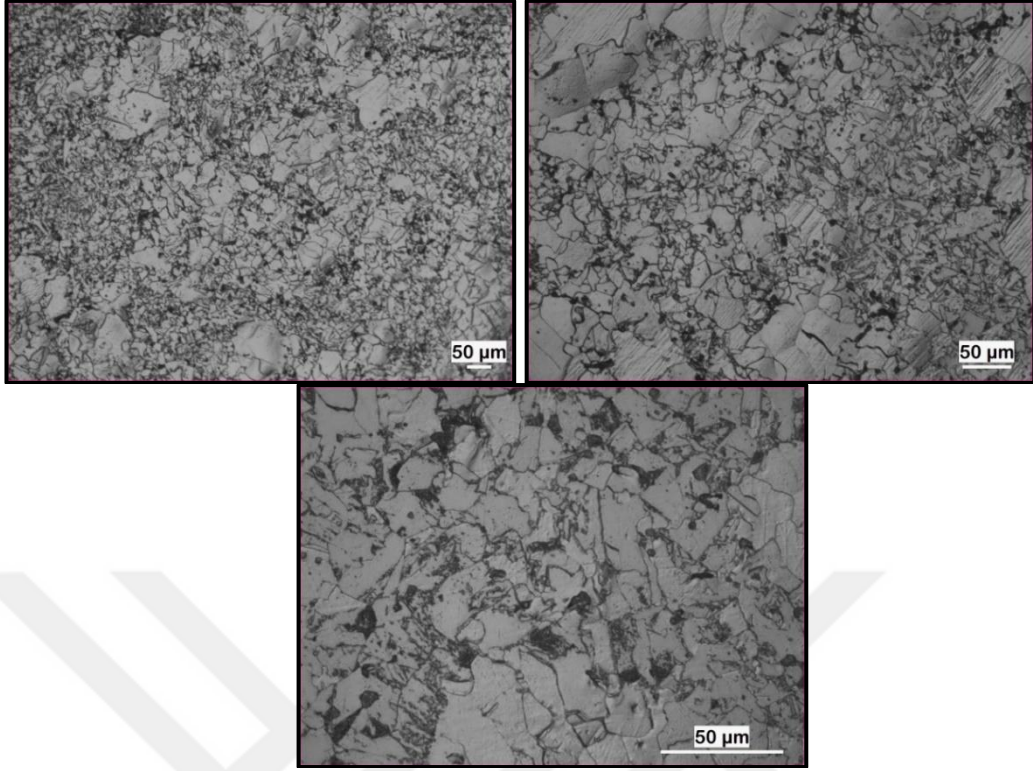
15 dk ve 1 saat süreyle mekanik alaşımlaması yapılmış numunelerin görselleri Şekil 6.2.' de verilmiştir. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile mekanik özelliklerde kötüleşme görülmüştür. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile tozlara aşırı yüklenme yapılmış ve toz aşırı şekilde gevrekleştiği bunda mekanik yönde olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

Ayrıca Şekil 6.2. incelendiğinde mekanik alaşımlama süresinin artması ile yapı içerisindeki perlit tane sınırlarına yığılmaya başlamıştır. Sonuç olarak, karıştırılan toz ve bilya oranı 15 dk. mekanik alaşımlandırılan çelik numuneler en yüksek akma ve çekme dayanımı sergilemiştir.

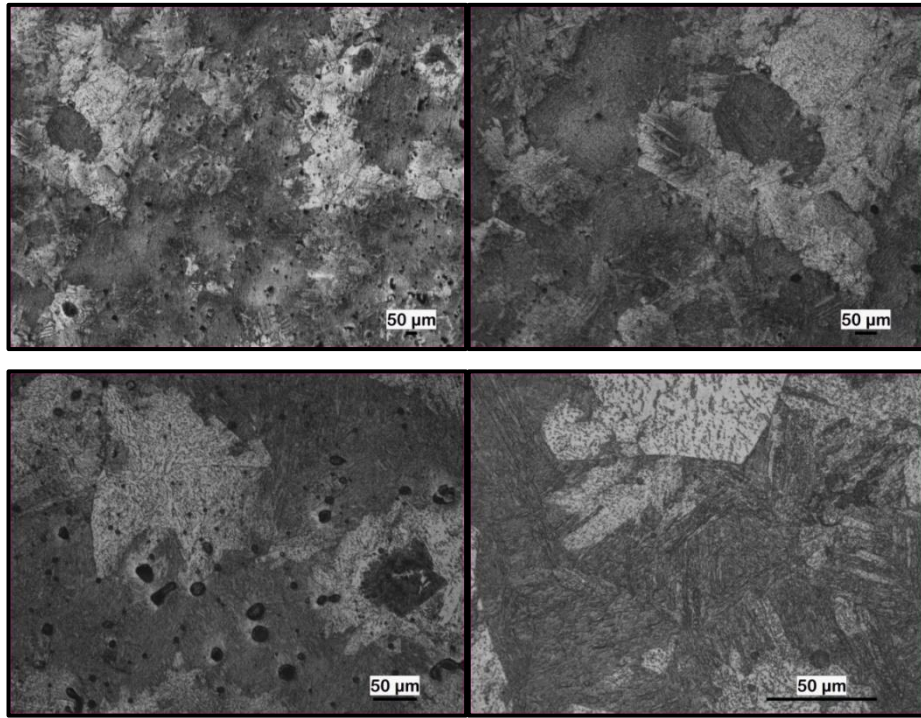


Şekil 6.3. Toz- bilya oranı a) 1/5 b) 1/7 c) 1/10 olan alaşımsız çelik numunelerin 200x mikroyapı görüntüleri.

Toz- bilya oranının alaşımsız çelikler üzerindeki mikroyapı resimleri Şekil 6.3.' de verilmiştir. Mekanik alaşımlamada toz- bilya oranının düşmesi ile tozlar ile bilya daha fazla etkileşime girmiştir. Toz/bilya oranının düşmesi serbest halde bulunan C atomlarının Fe ile bileşik oluşturması sonucu Fe_3C fazının artması bunun sonucunda toz- bilya oranının 1/5' den 1/10' a düşmesi ile perlit miktarında bir miktar artış olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, karıştırılan toz ve bilya oranı 1/10 olan çelik numuneler en yüksek akma ve çekme dayanımı sergilemiştir. Alaşımsız TM çeliklerin mekanik alaşımlama parametreleri incelendiğinde bilya oranı 1/10, bilya çapı 5mm ve karıştırma süresi 15 dk. çıkmıştır.



Şekil 6.4. 15 dk mekanik alaşımlandırılmış ağırlık olarak %5 Ni içeren çelik numunenin mikroyapı görüntüleri a) 100x, b)200x ve 500x büyütme.



Şekil 6.5. 15 dk mekanik alaşımlandırılmış ağırlık olarak %10 Ni içeren çelik numunenin mikroyapı görüntüleri a) 50x, b)100x c) 200x ve c)500x büyütme.

Şekil 6.4 ve Şekil 6.5 incelendiğinde yapının ferrit, perlit, beynit ve martenzit fazlarından oluştuğu görülmektedir. Nitekim Ni ilavesi mikroyapıda beynit ve martenzit fazlarının oluşmasının yanı sıra alaşimsız çeliğe göre perlit miktarındada artış sağlamıştır. Bu beklenen bir durumdur. Literatürde bu sonucu destekleyen çalışmalar mevcuttur (Aşgun vd., 2013; Erden vd., 2016).

6.3. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Tozların tartılması ve üretimi yapılan numunelerin yoğunluk ölçümlerinin yapılması için RADWAG AS-60-220 C/2 hassas terazi ve RADWAG AS yoğunluk ölçme kiti kullanılmıştır. Tozların istenilen bileşimde homojen olarak karıştırılması için Willy A. Bachofen AG T2F marka turbula mixer cihazı kullanılmıştır. Ardından 1/10 toz bilya oranında mekanik alaşımlanmış numune tozlarının preslenmesi için ise, 100 Ton kapasiteli HİDROLİKSAN marka hidrolik tek pistonlu pres kullanılmıştır. Ayrıca sinterleme işlemi için maksimum çalışma sıcaklığı 1600 °C olan Protherm PTF 16/75/610 marka atmosfer kontrollü boru fırında argon atmosferinde 1400 °C 'de 2 saat süre ile sinterlenmiştir. Yoğunluk ölçüm sonuçları Çizelge 6.1.' de verilmiştir.

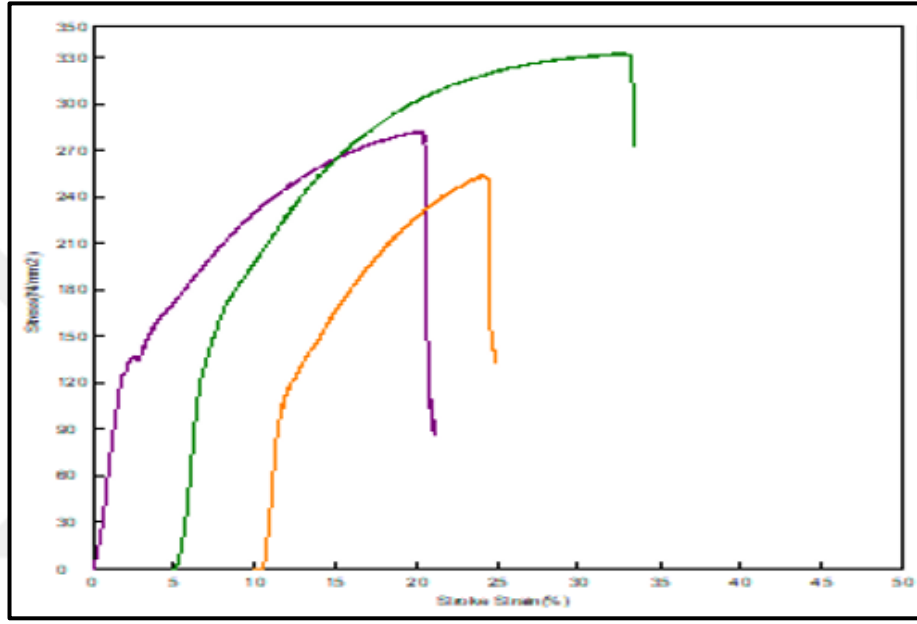
Çizelge 6.1. Numunelere ait yoğunluk ölçümleri.

BİLEŞEN	Yoğunluk (gr/cm ³)	Yoğunluk (%)	Gözeneklilik (%)
0,55C+ FE MASIZ	7,3957	94,3	5,7
0,55C+ FE 15 DK	7,2176	92	8
0,55C+ FE 30 DK	7,2937	93	7
0,55C+ FE 1 SAAT	7,4383	94,8	5,2
0,55C+ FE+ 5Nİ MASIZ	7,342	93	7
0,55C+ FE+ 5Nİ 15 DK	7,0687	89,5	10,5
0,55C+ FE+ 5Nİ 0.5 SAAT	7,4451	94,3	5,7
0,55C+ FE+ 5Nİ 1 SAAT	7,3844	93,5	6,5
0,55C+ FE+ 10Nİ MASIZ	7,0995	89,4	10,6
0,55C+ FE + 10Nİ 15 DK	7,6429	96,2	3,8
0,55C+ FE+ 10Nİ 0.5 SAAT	7,4803	94,2	5,8
0,55C+ FE+ 10Nİ 1 SAAT	7,4178	93,4	6,6
0,55C+ FE 4MM BİLYA 1 SAAT	7,4546	95	5
0,55C+ FE 5MM BİLYA 1 SAAT	7,5561	96,4	3,6
0,55C+ FE 6MM 15 DK	7,2872	92,9	7,1

Numunelerin sinterleme sonrası yoğunlukları nikel oranının artması ile kayda değer bir değişime uğramadığı ve birbirine yakın olduğu görülmüştür. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri gözenek oranı ile ilişkilidir. Gözenekler gerilimin yoğunlaştığı merkezler olarak davranırken, çatlak ilerlemesine de katkı sağlamaktadır. Demir esaslı TM malzemelerin üretiminde, sinterleme sonrasında yavaş soğuma hızı nedeniyle, malzemenin mikroyapısı ferrit ve perlit şeklinde oluşmaktadır (Sarıtış vd., 2007). Bu çalışmada ilave edilen Ni miktarının artması ile beynitik ve martenzitik yapısında olduğu görülmüştür. Ayrıca Ni miktarının artması ile üretilen toz metal çeliklerin sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin iyileştiği görülmektedir. Mikroyapı incelemelerinde ise Ni içermeyen 0.55C+ Fe çeliğinin mikroyapısının ferrit ve perlitten oluştuğu ancak içerisinde nikel miktarının ağırlık olarak %5, 10 bulunması durumunda mikroyapıda daha sert fazların oluştuğu ve beynit ile martenzit faz oluşumları görülmüştür.

6.4. ÇEKME DENEYİ SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI

TM yöntemi ve mekanik alaşımlamayla üretilmiş alaşımsız çeliğe bilya çapı, mekanik alaşımlama süresi ve toz- bilya oranı bakımından gerekli uygunlukları gözlemleyebilmek amacı ile mikroyapı yönünden karşılaştırılması şekil 6.6., şekil 6.7. ve şekil 6.8.' de verilmiştir.



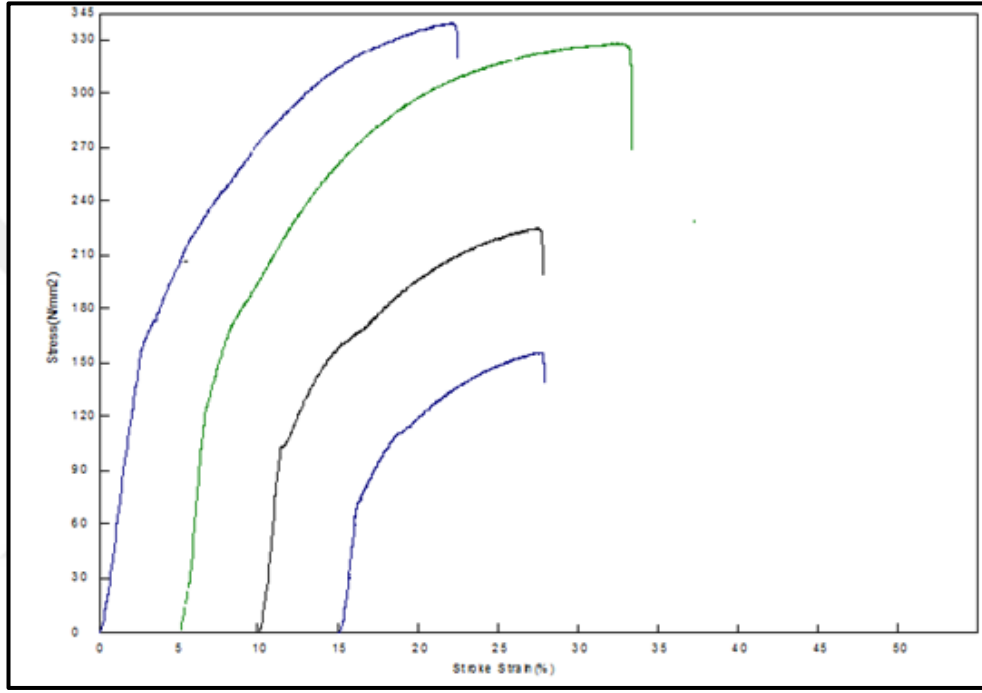
Şekil 6.6. Bilya çapının alaşımsız TM çeliklerinde çekme dayanımına etkisi (Sırası ile 4 mm, 5 mm ve 6 mm bilya çapı).

Çizelge 6.2. Bilya çapının alaşımsız çeliklerin çekme dayanımına etkisi.

Bilya çapı	Akma D. (MPa)	Çekme D. (MPa)	% Uzama
4mm	137	283	20,2
5mm	205	334	27,7
6mm	121	245	15,4

Şekil 6.6.' da görüldüğü üzere bilya çapı 5 mm'de en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak, mekanik alaşımlamada yoğun bir öğütme uygulamasıyla, sürekli olarak plastik deformasyon, kırılma, soğuk kaynak, yeniden kırılma ve kaynaklanmayla homojen ve ince mikroyapının oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 6 mm bilya çapında yani bilya çapının artması dayanımın düşmesinin nedeni kullanılan demir tozu 150 µm altı olmasından kaynaklandığı

görülmektedir. Bilya çapı toz boyutu oranlandığında 4 mm çap için 0,0375, 5 mm çap için 0,03 mm çap için ve 6 mm çap için 0,025'dir. Genel kural olarak 1/30 oranı yani 0,0333 ideal bilya çapı toz oranı olarak bilinmektedir. Bu değere en yakın bilya çapı 5 mm'dir. Nitekim en yüksek dayanım bu çaptaki üretilen numunelerde görülmektedir. Sonuç olarak, 5mm bilya çapına sahip olan çelik numuneler en yüksek akma dayanımı, çekme dayanımı ve % uzama sergilemiştir.



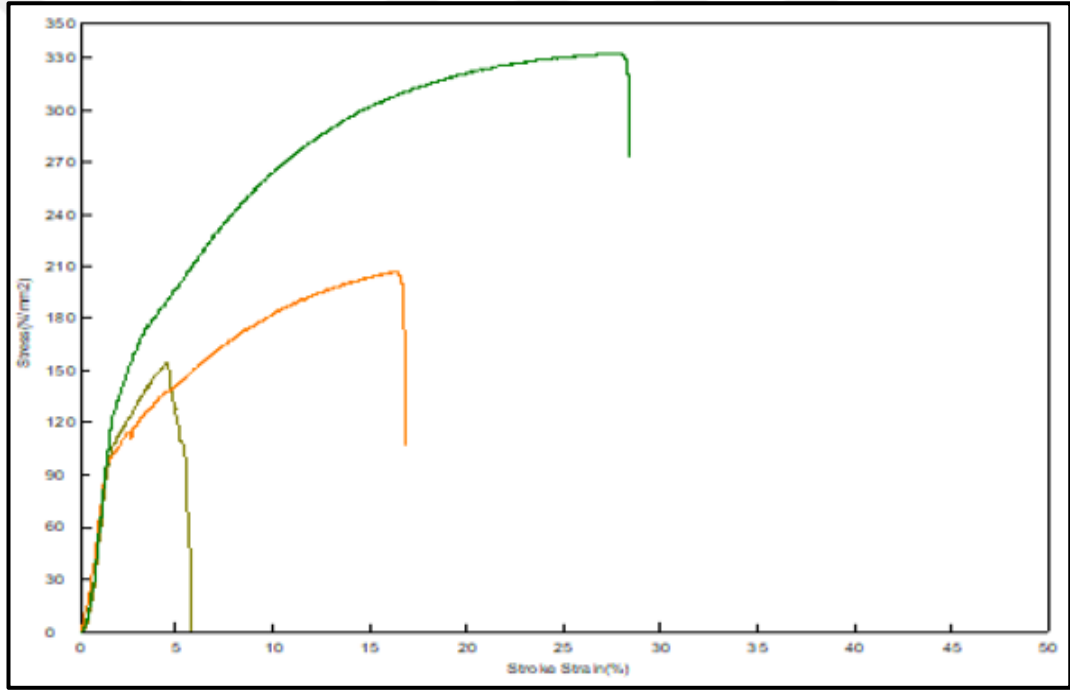
Şekil 6.7. Alaşım süresinin çekme dayanımı üzerine etkisi (Sırasıyla 15 dk., 1 saat, 2 saat ve 3 saat).

Çizelge 6.3. Alaşım süresinin çekme dayanımı üzerine etkisi.

Mek. Alaşım Süresi	Akma D. (MPa)	Çekme D. (MPa)	% Uzama
15dk	207	340	22
1 saat	205	334	27,7
2 saat	170	229	17,6
3 saat	87	159	12,4

Mekanik alaşım süresinin artması ile mekanik özelliklerde kötüleşme görülmüştür. Mekanik alaşım süresinin artması ile tozlara aşırı yüklenme

yapılmış ve toz aşırı şekilde gevrekleştiği bununda mekanik yönde olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra mekanik alışım ortamını atmosfer kontrollü olmamasından kaynaklı olarak tozların mekanik alışımlama sırasında oksitlenme ihtimalini artırmaktadır. Şekil 6.7. ve 6.10. incelendiğinde mekanik alışımlama süresinin artması ile yapı içerisindeki perlit tane sınırlarına yığılmaya başlamış bunun sonucunda çekme testi sonucunda kopmanın tane sınırlarında meydana geldiği malzemenin akma ve çekme dayanımında ve % uzamasında düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, karıştırılan toz ve bilya oranı 15 dk. mekanik alışımlandırılan çelik numuneler en yüksek akma ve çekme dayanımı sergilemiştir.

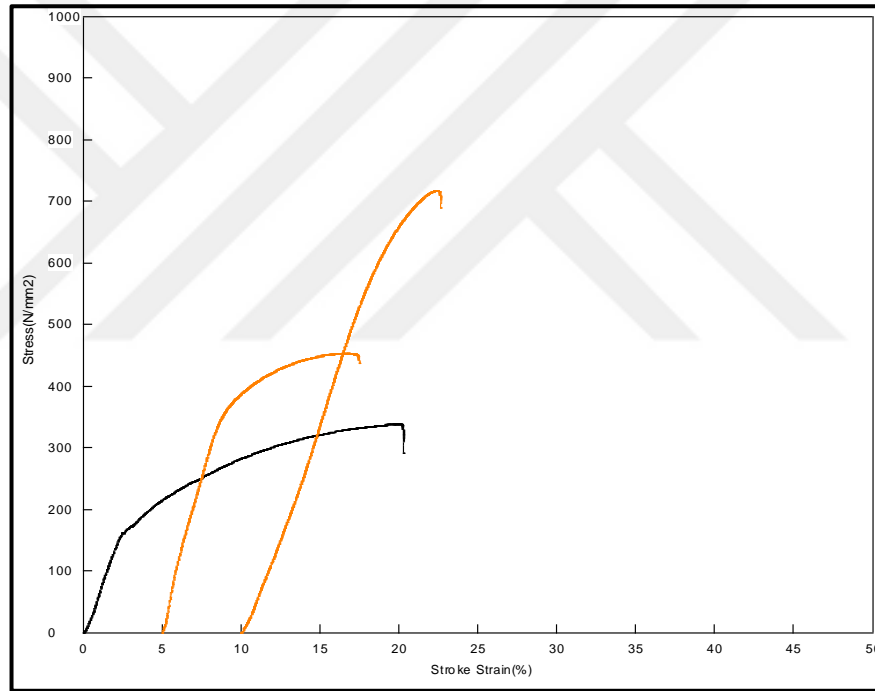


Şekil 6.8. Toz- bilya oranı 1/10, 1/7, 1/5 olan numunelerin çekme dayanımı üzerine etkisi (Sırasıyla 1/10., 1/7 ve 1/5 Toz- bilya oranı).

Çizelge 6.4. Toz/Bilya oranının alışımsız çeliklerin çekme dayanımına etkisi.

Katılan toz/Bilya	Akma D. (MPa)	Çekme D. (MPa)	% Uzama
1/5	105	155	4,81
1/7	117	208	16,4
1/10	205	334	27,7

Toz- Bilya oranının düşmesi ile mekanik özelliklerde iyileşme görülmüştür. Ayrıca Toz- Bilya oranının düşmesi ile akma dayanımında artış akma uzamasında azalma görülmüştür. Mekanik alaşımlama da Toz- Bilya oranının düşmesi ile tozlar ile bilya daha fazla etkileşime girmiştir. Ayrıca, akma olayı serbest halde bulunan C, N gibi arayer atomlarının oluşturduğu Cottrell atmosferinin dislikasyon hareketini engellemesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Toz/bilya oranın düşmesi serbest halde bulunan C atomlarının Fe ile bileşik oluşturması sonucu Fe_3C fazının artması bunun sonucunda akma ve çekme dayanımı da artış akma uzamasında azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Mekanik alaşımlama süresinin 15dk, bilya çapı 5 mm ve toz bilya oranının 1/10 olarak tespit edilmiştir.

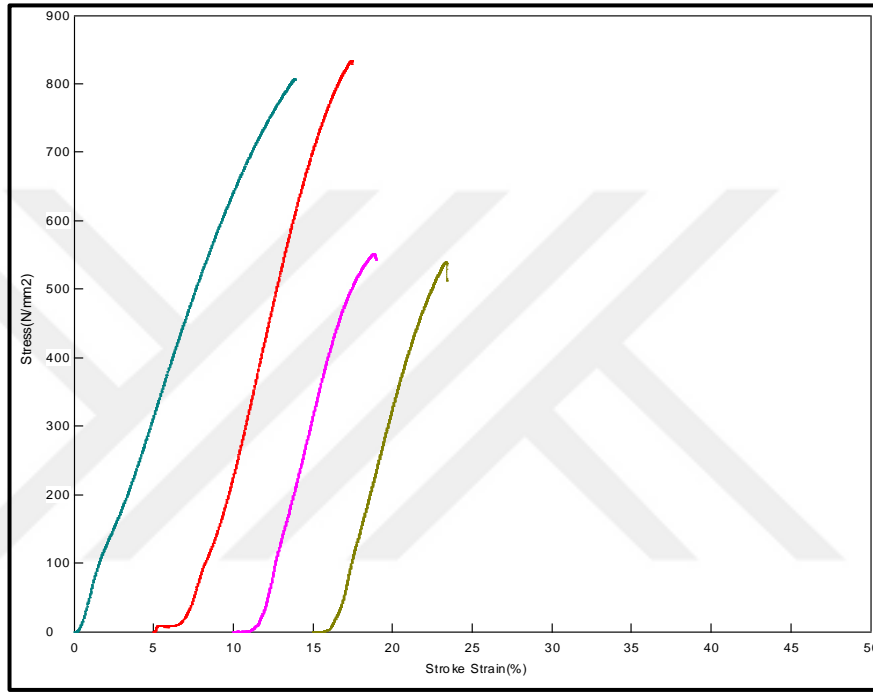


Şekil 6.9. 15dk. mekanik alaşımlandırılan % ağırlık olarak farklı oranlarda Ni içeren TM çelik numunelerin çekme eğrileri (sırasıyla Fe-C, Fe-C-5Ni ve Fe-C-10Ni).

Çizelge 6.5. 15dk. mekanik alaşımlandırılan farklı Ni içeren TM çelik numunelerin çekme eğrileri çekme (UTS), % uzama değerleri.

Bileşenler	Max. Çekme (N/mm ²)	Max. Uzama (%)	Sertlik (Hv _{0.5})
Fe-C (15dk MA)	340	20	133
Fe-C-5Ni (15dk MA)	455	14	235
Fe-C-10Ni (15dk MA)	835	13	530

Ağırlık olarak %5 ve 10 Ni ilave edilen çelik numune kompozisyonlarında 15 dk. mekanik alaşımlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ni miktarının artması ile mekanik özelliklerde iyileşme gözlenmiştir. Genel olarak nikel miktarının artışı ile çekme ve akma dayanımının arttığı ve yüzde uzamanın azaldığı görülmüştür. Dayanımdaki artışın nedeni nikelin mikroyapıdaki perlit miktarını artırmasına ayrıca yapıda oluşan beyrit ve martenzit fazlarına bağlanmıştır.



Şekil 6.10. Farklı sürelerde mekanik alaşımlandırılan ağırlık olarak % 10 Ni içeren TM çelik numunelerin çekme eğrileri (sırasıyla 0-15-30-60dk MA yapılan numuneler).

Çizelge 6.6. Farklı sürelerde mekanik alaşımlandırılan ağırlık olarak % 10 Ni içeren TM çelik numunelerin çekme eğrileri çekme (UTS), % uzama değerleri.

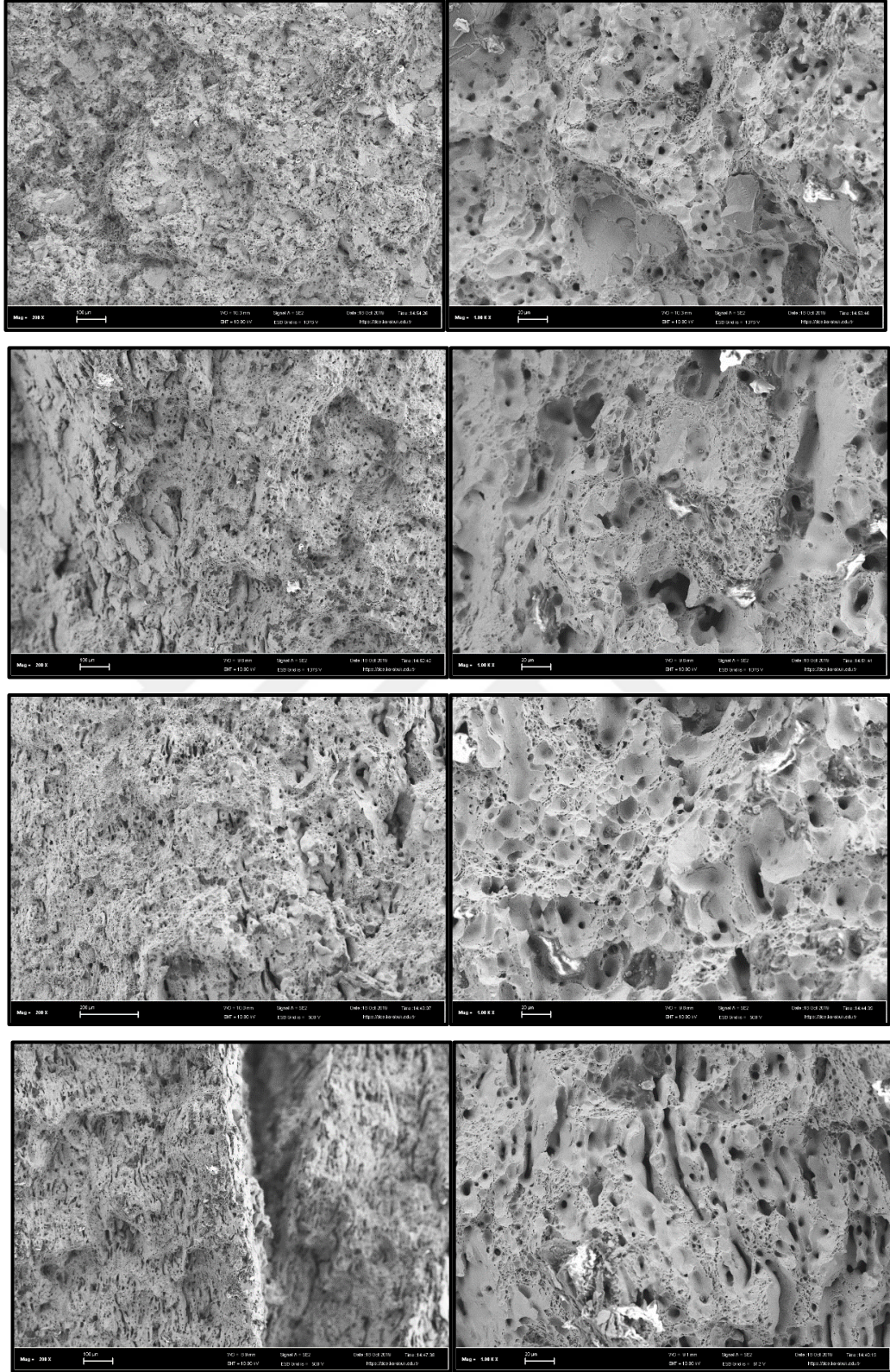
Bileşenler	Max. Çekme D. (N/mm ²)	Max. Uzama (%)	Sertlik (Hv _{0,5})
Fe-C-10Ni (MA'sız)	809	14	133
Fe-C-10Ni (15dk MA)	835	12	133
Fe-C-10Ni (30dk MA)	554	9	235
Fe-C-10Ni (1 saat MA)	540	8	530

Şekil 6.10. ve çizelge 6.6.' da da görüldüğü gibi ağırlık olarak %10Ni içeren çelik bileşiminde alaşımsız çelik numunede olduğu gibi mekanik alaşımlama süresinin artması ile mekanik özelliklerde kötüleşme görülmüştür. Daha önce ifade edildiği gibi mekanik alaşımlama süresinin artması ile tozlara aşırı yüklenme yapılmış ve toz aşırı şekilde gevrekleştiği bununda mekanik yönde olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra mekanik alaşımla ortamını atmosfer kontrollü olmamasından kaynaklı olarak tozların mekanik alaşımlama sırasında oksitlenme ihtimalini artırmaktadır.

6.5. SEM KIRIK YÜZEY GÖRÜNTÜLERİ

Farklı bileşimine sahip numunelerin farklı büyütme oranlarında alınan SEM kırık yüzey resimleri şekil 6.11.' de görülmektedir.

1400°C' de sinterlenmiş farklı mekanik alaşımlama sürelerine sahip TM çelik numunenin çekme deneyi sonrası X5000'de kırık yüzey görüntüleri alınmıştır. Farklı nikel bileşimine sahip numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde (şekil 6.11.) görüldüğü gibi kırık yüzeylerin tamamen kısmen sünek (petekli yapı) ve kısmen gevrek (ayrılma düzlemleri) davranış sergilemişlerdir. Kırık yüzeylerin tamamında gözeneklerin olduğu belirgin bir şekilde görülmüştür. Bu durum kırılmanın mikro boşlukların birleşip ilerlemesiyle gerçekleştiğini göstermektedir. Fakat gevrek kırılmanın bir göstergesi olan ayrılma düzlemleri ağırlık olarak %10 Ni içeren çelik numunede en fazla, %5 Ni içeren çelik numunelerde orta, %0 Ni içeren alaşımsız çelik numunelerde ise en az olduğu görülmektedir. Çekme testi sonucu Ni miktarının artması ile akma ve çekme dayanımında artış % uzamada düşüş gözlenmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen değerlerle kırık yüzey resimleri uyumluluk göstermektedir.



Şekil 6.11. Farklı sürelerde mekanik alaşımlandırılan ağırlık olarak % 10 Ni içeren TM çelik numunelerin SEM kırık yüzey görüntüsü (Sırasıyla MA'sız, 15dk. MA'lı, 30dk. MA'lı ve 1 saat MA'lı, (200x-1000x)).

BÖLÜM 7

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 0.55C+ Fe, 0.55C+ Fe +5Ni, 0.55C+ Fe+ 10Ni alaşımları mekanik alaşımlı ve mekanik alaşımsız olarak üretilmiştir. Mekanik alaşımlamalılar da toz-bilya oranı (1/5, 1/7, 1/10), bilya boyutu (4 mm, 5 mm, 6 mm), mekanik alaşımlama süresi (15 dk, 30 dk, 1 saat, 2 saat ve 3 saat) olarak üretilerek birbirleri arasında kıyaslaması yapıp mekanik özelliklere olan etkileri gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda;

- a) Mekanik alaşımlama süresinin artması ile mekanik özelliklerde kötüleşme görülmüştür. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile tozlara aşırı yüklenme yapılmış ve tozların aşırı şekilde gevrekleştiği bununda mekanik yönde olumsuz etkilediği düşünülmektedir.
- b) Karıştırma süresi olarak 15 dk. mekanik alaşımlandırılan çelik numunelerde en yüksek akma ve çekme dayanımı sergilemiştir.
- c) Toz- Bilya oranının düşmesi ile mekanik özelliklerde iyileşme görülmüştür. Ayrıca Toz- Bilya oranının düşmesi ile akma dayanımında artış akma uzamasında azalma görülmüştür. Sonuç olarak, karıştırılan toz ve bilya oranı 1/10 olan çelik numuneler en yüksek akma ve çekme dayanımı sergilemiştir.
- d) Genel olarak Ni oranı artıkça çeliklerin akma dayanımında, çekme dayanımında ve sertlik değerlerinde bir artış görülmektedir. Bu durum Ni miktarı artıkça mikroyapıda beynit ve martenzit oluşum miktarı artmasından kaynaklanmaktadır.
- e) TM çeliklerinin kırık yüzeyleri incelendiğinde iki tip kırılma modeli görülmüştür. Kırık yüzeylerin hepsi kısmen sünek (petekli yapı) ve kısmen gevrek (ayrılma düzlemleri) davranış göstermişlerdir. Fakat gevrek kırılmanın bir göstergesi olan ayrılma düzlemleri Ni miktarının artması ile

artış göstermiştir. Bu durum % uzama ve % kesit daralması değerleri ile uyum göstermektedir.



KAYNAKÇA

1. S. İzgiz, “Çelik El Kitabı” , *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, Ankara, 1992.
2. K. Onaran, “Malzeme Bilimi”, *İ.T.Ü. Kütüphanesi*, sayı 1402, İstanbul, 1989.
3. K. Onaran, “Malzeme Bilimi”, *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, 1993.
4. L. H. Van Vlack (Çeviren: R. A. Safoğlu), “Malzeme Bilimine Giriş”, *İ.T.Ü. Makina Fakültesi*, İstanbul, 1972.
5. W. Weissbach (Çeviren: S. Anık ve E.S. Anık) “Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi”, *Birsen Kitapevi*, İstanbul, 1977.
6. W. Domke (Çeviren: M. Y. Gürleyik), “Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi”, *Kuzey Gazetecilik Matbaacılık A. Ş.*, Trabzon, 1988.
7. H. Karabulut, “Mikroalaşımli Çeliklerde Yaşlanma Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 2004.
8. H. Karabulut and S. Gündüz, “Effect of vanadium content on dynamic strain again in microalloyed medium carbon steel”, *Materials and Design*, 2004.
9. A. Kaynar, “Orta karbonlu alaşımsız ve mikroalaşımli çeliklerde sıcak deformasyon ve soğuma şartlarının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 2013.
10. A. M. Sage, “Microalloyed steels for structural applications”, *Meals and Materials*, 1989.
11. <https://www.nickelinstitute.org/about-nickel/nickel-alloys/>.
12. M. Yüksel, “Malzeme Bilgisi”, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Özkan Matbaacılık Ltd. Şti.*, 2008.
13. D. R. Askeland, “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, (Çeviren: M. Erdoğan) Cilt 2, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, 2000.
14. Ş. Güleç, “Malzeme Ders Notları”, *İ.T.Ü. Makina Fakültesi*, Sayı 35, İstanbul, 1990.

15. H. J. Bargel ve G. Schulze (Çevirenler: Ş. Güleç ve A. Aran), “Malzeme Bilgisi”, Cilt 2, TÜBİTAK, *Marmara Araştırma Enstitüsü*, TÜGAM Matbaası, Gebze, 1985.
16. İ. B. Eryürek, “Hasar Analizi”, *İ.T.Ü. Makina Fakültesi*, İstanbul, 1993.
17. TS 138 (Güncel Standart: TS 138 EN 10002- 1: 1996), “Çekme Deneyleri”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1996.
18. N. C. Altan, “Transformation induced crack closure and fatigue life analysis of shape memory alloys using finite elements”, B. S., Mechanical Engineering, *Middle East Technical University*, 2007.
19. S. A. Tsukerman, “Powder Metallurgy” Pergamon Press Ltd., *Oxford*, London, 1965.
20. R. M. German, “Powder metallurgy and particulate materials processing” (Çevirenler: S. Sarıtaş, M. Türker, N. Durlu, *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, Ankara, 2016.
21. G. S. Upadhyaya, “Powder Metallurgy Technology”, *Published by Cambiridge International Science Publishing*, England, 2002.
22. K. Skotnicova, M. Kursá, and I. Szurman, “Powder Metallurgy”, *Faculty of Metallurgy and Materials Engineering*, Ostrava, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Selim ERMAN, 1992 yılında Kayseri’de doğdu; ilköğrenimini Namazgah İhsan Dikmen İlkokulu’nda, lise öğrenimini Ali Osman Sönmez Anadolu Meslek Lisesi’nde tamamladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2016 yılında buradan mezun oldu. Halen Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı’ndan eğitimine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Piremir Mahallesi 4. Ergin Sk. Reis Ap. No: 20/5 Yıldırım / BURSA.
Tel : (536) 565 30 76
E-posta : selimerman16@gmail.com