



**SOĞUK ÇEKME İŞLEMİNDE REDÜKSİYON
ORANI VE ISIL İŞLEMİN ÇELİKLERİN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yücel YILMAZ

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL**

**SOĞUK ÇEKME İŞLEMİNDE REDÜKSİYON ORANI VE ISIL İŞLEMİN
ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE OLAN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yücel YILMAZ

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL**

**KARABÜK
Ocak 2022**

Yücel YILMAZ tarafından hazırlanan “SOĞUK ÇEKME İŞLEMİNDE REDÜKSİYON ORANI VE ISIL İŞLEMİN ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğ. Üyesi Yasin AKGÜL

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 26/01/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğ. Üyesi Özkan EKŞİ (KÜ)

.....

Üye : Dr. Öğ. Üyesi Alper İNCESU (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğ. Üyesi Yasin AKGÜL(KBÜ)

.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Yücel YILMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SOĞUK ÇEKME İŞLEMİNDE REDÜKSİYON ORANI VE ISIL İŞLEMİN ÇELİKLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yücel YILMAZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğ. Üyesi Yasin AKGÜL

Ocak 2022, 63 sayfa

Sıcak haddeleme yöntemine kıyasla soğuk çekme yöntemi, daha hassas kesit toleransına ve daha yüksek yüzey kalitesine sahip nihai mamullerin elde edilebilmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca soğuk çekme yöntemi, mekanik özelliklerin iyileştirilmesini sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, SAE 1040 ve AISI 4140 çeliklerine farklı redüksiyon oranlarında (%8, %12, %16) soğuk çekme işlemi uygulanmıştır. Numunelerin mikroyapıları optik mikroskop ve elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Oda sıcaklığında çekme testi ve aşınma testleri uygulanmıştır. Bunun yanı sıra çekme ve aşınma test sonuçları ile ilişki kurmak adına numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Soğuk çekme prosesine tabi tutulan çeliklerde, artan redüksiyon oranıyla mekanik ve tribolojik özelliklerin iyileştiği görülmüştür. %16 redüksiyon oranına sahip numunelere 500°C’ de 60 dk ısıl işlem uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlem ile 1040 çeliğinin dayanımında kayda değer bir

düşüş görülmeksizin, süneklilik değeri artış göstermiştir. Ayrıca, soğuk çekme işlemi sonucunda mekanik özelliklerin SAE 1040 çeliği için AISI 4140 çeliğine göre daha yüksek oranda iyileştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Soğuk Çekme, Isıl İşlem, Mekanik Özellikler, Mikroyapı

Bilim Kodu : 91514

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE OF THE EFFECT OF REDUCTION RATIO AND HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS VIA COLD DRAWING PROCESS

Yücel YILMAZ

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor:

Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL

June 2022, 63 pages

Compared to the hot rolling method, the cold drawing method allows to obtain final products with more precise section tolerance and higher surface quality. In addition, the cold drawing method provides the improvement of mechanical properties. In this thesis, cold drawing process was applied to SAE 1040 and AISI 4140 steels at different reduction ratios (8%, 12%, 16%). Microstructures of the samples were investigated using optical microscope and electron microscope. Tensile and abrasion tests were performed at room temperature. In addition, the hardness values of the samples were determined to correlate with the tensile and abrasion test results. It has been observed that the mechanical and tribological properties of steels subjected to cold drawing process improve with increasing reduction ratio. The samples with 16% reduction ratio were heat treated at 500°C for 60 minutes. With the applied heat treatment, the ductility

value increased without a significant decrease in the strength of the 1040 steel. In addition, as a result of the cold drawing process, it has been determined that the mechanical properties are improved at a higher rate for SAE 1040 steel than for AISI 4140 steel.

Key Word : Cold Drawing, Heat Treatment, Mechanical Properties,
Microstructure

Science Code : 91514

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın Dr. Öğr. Üyesi Yasin AKGÜL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Üretim alıőmaları boyunca desteğini esirgemeyen Sayın Mert ÖZLÜ'ye, tez çalışmalarında bilgileri ile tezimi destekleyen Sayın Figen DİKİLİTAŐ'a teşekkür ederim.

Karakterizasyon çalıőmalarımı yürüttüğüm Demir elik Enstitüsünün değerli ekibine, çalıőanlarına ve üretim çalıőmalarımı yürüttüğüm ağ elik A.Ő.'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
2.1. GENEL BİLGİLER.....	3
2.2. ÇELİKLERİN ALAŞIM MİKTARINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI	4
2.2.1. Alaşımsız Çelikler	4
2.2.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler	5
2.2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler	5
2.2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler	5
2.2.1.4. SAE 1040 Çeliği	5
2.2.2. Alaşımli Çelikler.....	6
2.2.3. Alaşım Elementlerinin Çeliklere Etkisi	8
2.2.3.1. Karbon.....	8
2.2.3.2. Silisyum	9
2.2.3.3. Mangan	9
2.2.3.4. Fosfor	9
2.2.3.5. Kükürt	9
2.2.3.6. Oksijen	10

	<u>Sayfa</u>
2.2.3.7. Bakır.....	10
2.2.3.8. Krom	10
2.2.3.9. Nikel.....	11
2.2.3.10. Molibden	12
2.2.4. AISI 4140 Çeliği.....	12
2.2.4.1. AISI 4140 Çeliğinin Kullanım Yerleri	12
BÖLÜM 3	17
METALLERİN PLASTİK ŞEKİLLENDİRİLMESİ	17
3.1. ANİZOTROPİ.....	17
3.2. PLASTİK ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ	17
3.2.1. Haddeleme	18
3.2.2. Dövme.....	19
3.2.3. Ekstrüzyon	19
3.2.4. Kesme	20
3.2.5. Bükme.....	20
3.2.6. Derin Çekme.....	20
3.3. PEKLEŞME	21
BÖLÜM 4	25
SOĞUK ÇEKME.....	25
4.1. SOĞUK ÇEKMEDE KUMLAMA.....	26
4.2. SOĞUK ÇEKMEDE SÜRTÜNME KATSAYISI.....	27
4.3. SOĞUK ÇEKME KALIPLARI	27
4.4. SOĞUK ÇEKME MAKİNELERİ	29
4.4.1. Tel Çekme Makineleri	29
4.4.2. Çubuk Çekme	30
4.5. TEL ÇEKME KUSURLARI.....	31
4.6. SOĞUK ÇEKMEDE ISIL İŞLEM.....	31
BÖLÜM 5	33

	<u>Sayfa</u>
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
5.1. MALZEMELER.....	33
5.2. SOĞUK ÇEKME İŞLEMİ VE ISIL İŞLEM	34
5.3. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI	37
BÖLÜM 6	43
6.1. MİKROYAPI	43
6.2. MEKANİK ÖZELLİKLER.....	47
6.2.1. Çekme Testi	47
6.2.2. Sertlik.....	48
6.2.3. Basma Testi	51
6.3. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER	52
BÖLÜM 7	59
SONUÇLAR VE ÖNERİ.....	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Fe-C denge diyagramı.....	4
Şekil 2.2 Farklı alaşım elementlerinin karbonlu çeliklerde alt akma noktasına etkisi..	7
Şekil 2.3 Çeliklerde farklı karbon oranlarında gerilme-şekil değiştirme eğrileri	8
Şekil 2.4 Çeliklerde karbon elementinin mekanik özelliklerin etkisi	8
Şekil 2.5 Krom oranının düşük karbonlu çelikte çekme dayanımına etkisi.....	10
Şekil 2.6 Demir karbon denge diyagramı	11
Şekil 2.7 Fe-Ni denge diyagramı	12
Şekil 2.8 AISI 4140 TTT diyagramı	16
Şekil 2.9 AISI4140 çeliğine ait CCT diyagramı	16
Şekil 3.1. Plastik şekil verme yöntemleri.....	18
Şekil 3.2. Soğuk deformasyon oranının artımı ile oluşan pekleşme etkisiyle, malzemenin mekanik özelliklerdeki değişimler	21
Şekil 3.3. Soğuk deformasyon miktarının artımı ile oluşan pekleşmenin, düşük karbonlu çelikten çubuk numunelerle elde edilen çekme eğrilerine etkisi 22	
Şekil 3.4. Bir kafesteki noktasal hatalar.....	22
Şekil 3.5. Bir kristaldeki kenar dislokasyonu (a) ve vida dislokasyonu (b)	23
Şekil 3.6. Kayma gerilmesi altında bir kafesteki kenar dislokasyonlarının hareketi	
Şekil 4.1 Soğuk çekme tipleri, (a) Tel ve çubuk çekme (b) Boru çekme	26
Şekil 4.2 Soğuk çekme kalıbının şematik kesiti.....	28
Şekil 4.3 Tel çekme tezgahının şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.4 Beş kalıplı sürekli bir tel çekme işlemi.....	29
Şekil 4.5 Tek bir elektrik motoruna bağlı kademeli sarma makinesi ile dört tel çekme işlemi	30
Şekil 4.6 Çubuk Çekme	30
Şekil 5.1 Sıcak haddelenmiş çubukların SEM görüntüleri;(a) SAE 1040, (b) AISI 4140	33
Şekil 5.2 Kumlama makinesi ve kumlama sonrası kireç kaplanmış çubuklar.....	34
Şekil 5.3 Soğuk çekmeye hazır çubuklar ve soğuk çekme kalıpları	35
Şekil 5.4 Soğuk çekme makinesi	35
Şekil 5.5 Isıl işlem fırını.....	37

Sayfa

Şekil 5.6 Qness Q250M makro sertlik ölçüm cihazı Brinell (HBW)	38
Şekil 5.7. Zwick Roell çekme test cihazı	39
Şekil 5.8 Aşınan çene yüzeyleri	40
Şekil 5.9. Aşınma test cihazı	40
Şekil 5.10. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	41
Şekil 5.11. Sem cihazına numunelerin yerleşimi ve görünümü.....	42
Şekil 6.1 Optik mikroskop görüntüleri a)1040-0 b) 4140-0 c) 1040-1 d) 4140-1 e) 1040-2 f) 4140-2 g) 1040-3 h) 4140-3 ı)1040-I i) 4140-I	44
Şekil 6.2 SEM görüntüleri a) 1040-0 b)1040-1 c) 1040-2 d) 1040-3	45
Şekil 6.3 SEM görüntüleri a) 1040-3, b)1040-I.....	46
Şekil 6.4 SEM görüntüleri a) 4140-0 b) 4140-1 c) 4140-2 d) 4140-3	46
Şekil 6.5 SEM görüntüleri a) 4140-3, b)4140-I.....	46
Şekil 6.6 SAE 1040 çekme test sonuçları	48
Şekil 6.7 SAE 1040 kalite çeliğin akma dayanımı ve sertlik grafiği	49
Şekil 6.8 AISI 4140 kalite çeliğin sertlik grafiği	50
Şekil 6.9 AISI 4140 kalite çeliğe ait basma grafiği	51
Şekil 6.10 SAE 1040 kalite çeliğe ait aşınma grafiği	52
Şekil 6.11 AISI 4140 kalite çeliğe ait aşınma grafiği	53
Şekil 6.12 1040-0 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu	54
Şekil 6.13 1040-1 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu	54
Şekil 6.14 1040-2 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu	55
Şekil 6.15 1040-3 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu	56
Şekil 6.16 4140-0 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu	56
Şekil 6.17 4140-1 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu	57
Şekil 6.18 4140-2 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu	57
Şekil 6.19 4140-3 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 SAE 1040 kimyasal içeriği	6
Çizelge 2.2. AISI 4140 kimyasal kompozisyonu.....	13
Çizelge 2.3. AISI 4140 ısı özellikleri.....	13
Çizelge 2.4. AISI 4140 mekanik özellikleri.....	14
Çizelge 2.5. AISI 4140 ısı işlem özellikleri.....	15
Çizelge 2.6. AISI 4140 kritik sıcaklıkları	15
Çizelge 5.1. AISI 4140 ve SAE 1040 kalitelere ait kimyasal analiz ve sertlik değeri	33
Çizelge 5.2. Numunelerin adlandırılması ve redüksiyon oranları.....	36
Çizelge 6.1. SAE 1040 ortalama çekme test sonuçları	47
Çizelge 6.2. SAE 1040 çeliğe ait sertlik ve çekme testi sonuçları.....	479
Çizelge 6.3. AISI 4140 çeliğe ait sertlik test sonuçları	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Fe	: Demir
C	: Karbon
N	: Newton
gr	: Gram
P	: Fosfor
°C	: Santigrat derece
cm	: Santimetre
Si	: Silisyum
mm	: Milimetre
F	: Kuvvet
α	: Kalıp açısı
μm	: Mikrometre
P	: Fosfor
S	: Kükürt
O	: Oksijen
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal

KISALTMALAR

SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Birliği
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Metal esaslı malzemeler, tarihin her döneminde önemini kaybetmemiş olup, insan hayatında çok önemli yeri bulunmaktadır [1]. Metal şekillendirme, doğal olarak oluşan metal parçalarını şekillendirmek için kullanılan kayalar kadar basit "araçlar" ile başlamıştır. Sanayi devrimi sırasında el aletleri ve kas gücü yerini makine süreçlerine bırakmıştır [2].

Çeliklerin mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biri, içerdikleri alaşım elementlerinin türü ve miktarıdır. Dolayısıyla, dayanım/ağırlık oranı daha yüksek olan çeliklerin geliştirilmesi için alaşımlama üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, sertleştirilebilirlik ve tribolojik performanslarını iyileştirmek için de metallere farklı elementlerin katkısına ek olarak, ısıl işlemle yararlanmak da mümkündür.

Soğuk çekme yönteminde artan redüksiyon oranı ile çeliklerde hem mekanik hem de tribolojik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Soğuk çekme, en eski metal şekillendirme işlemleri arasında yer almıştır ve büyük endüstriyel öneme sahip olmuştur. Bir çubuk, boru veya telin kesit alanını ve/veya şeklini bir kalıptan çekerek küçültme işlemi olup bu işlem, sabit kesitlere sahip uzun ürünlerde mükemmel yüzey ve kolay kontrol edilen boyutların elde edilmesini sağlamıştır [3]. Neredeyse bütün metaller soğuk çekilebilmektedir, soğuk çekme sonrasında da malzeme özelliklerinde değişimler yaşanmaktadır. Soğuk çekme işlemindeki deformasyon oranlarının doğru seçilmesiyle elde edilecek malzeme özellikleri istendiği gibi ayarlanabilmektedir. Talep edilen özellikler sonradan uygulanacak ısıl işlemlerle de sağlanabilmektedir [4].

Soğuk çekme, sıcak şekillendirme işlemlerine kıyasla daha yakın boyutsal toleranslar, daha iyi yüzey kalitesi ve geliştirilmiş mekanik özellikler gibi doğal avantajlara sahip, yaygın olarak kullanılan metal şekillendirme işlemidir. Küreselleşmenin gelişiyile

birlikte giderek artan rekabet nedeniyle, ürün kalitesi ve kaynakların optimize edilmiş kullanımını açısından süreç verimliliğini iyileştirmeye devam etmek son derece önemli hale gelmiştir. Otomobil sektörü, enerji sektörü ve madencilik sektöründeki talepler, çekme sürecinde çeşitli modifikasyonlara yol açmıştır [3].

Bu tez çalışmasında, soğuk çekme yöntemiyle 3 farklı redüksiyon oranında (%8, %12, %16) SAE 1040 ve AISI 4140 malzemeler şekillendirilmiş veya üretilmiş olarak tanımlanabilir. Üretim aşamasında, kumlama işlemi ile yüzeyi temizlenen çubuklar, belirtilen redüksiyonlarda zincirli soğuk çekme makinesinde kalıptan geçirilerek soğuk çekilmiş yuvarlak mamuller elde edilmiştir.

Ayrıca, literatür araştırmasında 1040 kalite soğuk çekilmiş mamule 500°C 'de uygulanan ısıtıl işlemin mekanik özelliklerde optimum iyileşme sağladığı görülmüştür [4]. Dolayısıyla, soğuk çekilmiş çubukların mekanik özellikleri karşılaştırıldıktan sonra en yüksek mekanik özelliklere sahip, %16 redüksiyon oranındaki numunelere 500°C' de 60 dk ısıtıl işlem uygulanmıştır. Üretilen tüm parçaların mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının soğuk çekme yöntemiyle ürün geliştirmeye yönelik bilgi birikimi ortaya koyması ve elde edilen bilgi birikimi ile çelik malzemelerin üretiminin geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

BÖLÜM 2

ÇELİKLER

2.1. GENEL BİLGİLER

Demir ve karbon elementlerinin birleşmeleri ile oluşan alaşım türü çelik olarak adlandırılmaktadır. Çelik veya dökme demir ham haldeki demirin çeşitli yöntemler kullanılarak belirli karbon oranları içermesi ile oluşmaktadır [5].

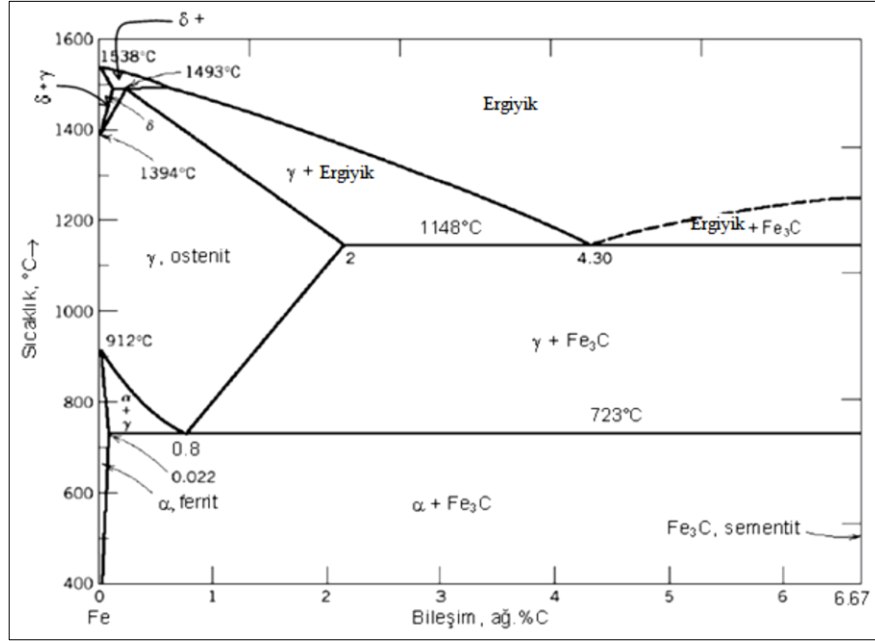
Çeliğin içyapısı ve çeliğin içerisindeki alaşım elementlerinin kimyasal bileşimi çeliğe farklı özellikler kazandırır. Çelik içerisine farklı oranlarda katkı elementleri katılabilir, çeliğe çeşitli işlemler (normalizasyon, ıslah vb.) ile farklı özelliklerde çelikler içyapı kontrol edilerek kullanım amacına göre kullanılabilir [6].

% Karbon seviyesi çeliklerin sınıflandırılmasında önem arz etmektedir. Çelikler sınıflandırılırken genellikle üç ayrı grupta incelenmektedir. Karbon oranı %0.25'e kadar düşük karbonlu, %0,25-0,55 arasında orta karbonlu, %0,55 oranından yüksek olan çeliklere yüksek karbonlu çelikler denilmektedir. %0.08 karbon oranında α ferrit ve sementitden oluşan yapının yani ötektoidin, östenitin yavaşça ötektoid sıcaklığının altına soğutulmasıyla elde edilmektedir. %0,8'den yüksek oranda karbona sahip çelikler ötektoid üstü çeliklerdir, %0.08'den düşük oranda karbona sahip çelikler ötektoid altı çeliklerdir [7].

Fe içeriğinde C oranının artması ile çeliğin mukavemeti artarken sünekliğinde azalma yaşanmaktadır. Çelik min.%0.02 maks.%2,1 karbon oranına sahip olmalıdır [5]. Genellikle çeliklerin gruplandırma yöntemleri:

- Kullanım alanları ve deoksidasyon durumlarına göre
- Ürün şekline göre

- Karbon ve alaşımlı çelikler olarak bileşimlerine göre
- Üretim programlarına, yöntemlerine göre
- Son üretim şekline göre [6].



Şekil 2.1. Fe-C denge diyagramı.

2.2. ÇELİKLERİN ALAŞIM MİKTARINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI

2.2.1. Alaşımsız Çelikler

Alaşımsız çelikler günümüzde demir çelik endüstrisinde üretilmekte olan çeliklerin çoğunluğuna sahiptir ayrıca ucuz ve kolay şekillendirilmekte olan alaşımsız çeliklerin mekanik özellikleri karbon içeriğine göre farklılık göstermektedir [5]. Alaşımsız çelikler karbon içeriğine göre 3 gruba ayrılır:

- %0,55 – 0,90 karbon içeriğine sahip çeliklere yüksek karbonlu çelikler.
- %0,25 - 0,55 karbon içeriğine sahip çeliklere orta karbonlu çelikler.
- %0,05 - 0,25 karbon içeriğine sahip çeliklere düşük karbonlu çelikler.

2.2.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

%0,25 değerine kadar karbon içeren çelikler, düşük karbonlu çelikler olarak adlandırılmaktadır. Bu çelikler, yumuşak ve çok yumuşak olmak üzere iki ayrı başlıkta incelenmektedirler. %0,15 ile %0,25 oranında karbon içerenler yumuşak çelikler; %0,07-0,15 arasında karbon içerenleri ise çok yumuşak çelikler şeklinde gruplandırılmaktadırlar. Çok yumuşak çelikler, soğuk şekillendirme prosesleri için uygundur. Yumuşak çelikler ise kaynak edilebilmektedirler ama sertleştirilebilmeleri su verme yöntemi ile uygun değildir ve bu çelikler yaygın olarak piyasada kullanılan alaşımsız çeliklerdir [7].

2.2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

Karbon değerleri %0,25-0,55 arasında olan çelikler, orta karbonlu çelik olarak adlandırılırlar. Bu çelik grubu ısıtma işlem uygulamalarına imkân vermekte olup, yumuşak çeliklere göre daha iyi sertleşebilme kabiliyetine sahiptir. Dövme, mil dayanıklı çelikler olmak üzere, orta karbonlu çelikler üçe ayrılabilir. Bu grup içerisindeki dövme çeliğinin ise karbon oranının %0,25-%0,35 aralığında olduğu bilinmektedir [7].

2.2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

Karbon değerleri %0,55-0,9 arasında olan çelikler, yüksek karbonlu çelik olarak adlandırılırlar. Bu çelik grubu mukavemet ve aşınma direnci yüksek uygulamalara imkân vermektedir, örneğin pres kalıp blokları üretimlerinde kullanılmaktadır [7].

2.2.1.4. SAE 1040 Çeliği

Birçok ülkenin çelikler ve dökme demirler için kendi sınıflandırma sistemi vardır. Uzun yıllar boyunca, sade karbonlu, düşük alaşımlı çelikler, SAE ve sonunda AISI tarafından tasarlanan bir sistem kullanılarak bileşime göre sınıflandırılmıştır. Bu şekilde sınıflandırılan çelikler, örneğin AISI/SAE 1040 çeliği gibi, çelik kod numarasından önce "AISI/SAE"ye sahiptir. Sistem sadece kompozisyona

dayanmaktadır. Dört veya beş basamaklı kod atamasında, son iki veya üç basamak karbon içeriğini (%1.00 ve üzeri karbon içeriğine sahip çelikler için üç basamak) ve ilk iki basamak bileşim sınıfını temsil etmektedir. Bu nedenle, daha önce bahsedilen AISI/SAE 1040 örneğinde, "10" düz karbonlu çeliklerin sınıfını temsil eder ve "40", %0.40 C'lik karbon içeriğini temsil etmektedir.

Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından başka bir sistem geliştirildi. Bu sistem bileşime değil, çelik ürüne göre örneğin, demiryolu rayları, kazan boruları, levha ve cıvatalar sınıflandırma yapılır. ASTM, aşağıdakileri içeren bir spesifikasyon sistemi geliştirmiştir: bileşim, mekanik özellikler ve diğer gerekli özellikler çelikler ve dökme demirler. ASTM sistemi demir malzemelerin ötesinde çok uzaklara ulaşan ve diğer malzemeleri de beraberinde içerir, örneğin kauçuk, çimento, ahşap, kumaş, bakır vb.

Sade karbon çelikleri, AISI ve SAE tanımlamalarına göre özel bileşime göre ayrıca sınıflandırılabilir. Spesifik bir örnek olarak, AISI/SAE 1040 tanımı, %0,40 nominal karbon içeriğine ve Çizelge 2.1'de bileşim aralığına sahip orta karbonlu bir çeliği belirtir [8].

Çizelge 2.1. SAE 1040 kimyasal içeriği.

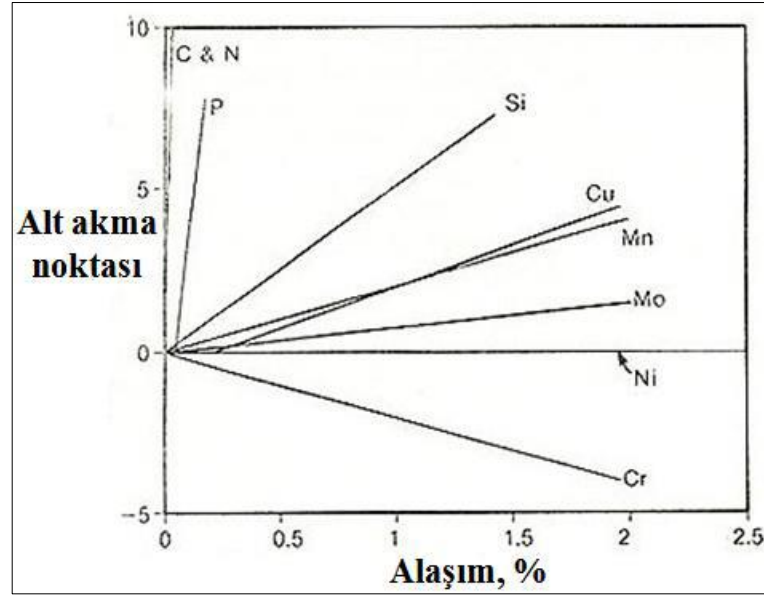
Element	% Oranı
Karbon	0.37-0.44
Mangan	0.60-0.90
Fosfor	0.040 maks.
Kükürt	0.050 maks.

2.2.2. Alaşımli Çelikler

Alaşımli çelikler, malzeme özelliklerine ait talepleri karşılayamayan karbonlu çeliklere alaşım elementi katarak kendine özgün malzeme özelliklerine sahip çelikler oluşturulmuştur. Kendine özgün malzeme özellikleri oluşturabilmek için çeliklere Mn, Si, Cr, B, Al, Co, Mo, N, Ti, W, V, Zr gibi elementler eklenir, bu elementler eklenmiş

çeliklere alaşımlı çelikler denir. Genellikle çeliklere katılan elementlerin sebepleri aşağıdaki gibidir:

- Elektrik direncini arttırmak
- Kristal kafes yapısını, manyetik özelliklerini değiştirmek
- Çekme, basma, vurma, kopma vb. dayanımlarını arttırmak
- Kaynaklanabilirlik, talaş kaldırma, sıcak veya soğuk şekillendirilme gibi özellikleri iyileştirmek
- Sertleştirmeyi sağlamak ya da iyileştirmek
- Oksitlenmeyi azaltmak
- Isıya karşı dayanımını arttırmak ya da düzenli bir ısıl genleşmeyi sağlamak
- Kimyasal maddelere, aşınmaya ve korozyan direncini arttırmak [6].

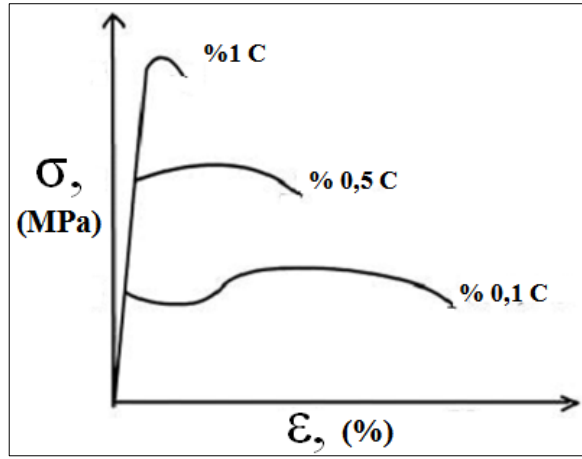


Şekil 2.2. Farklı alaşım elementlerinin karbonlu çeliklerde alt akma noktasına etkisi

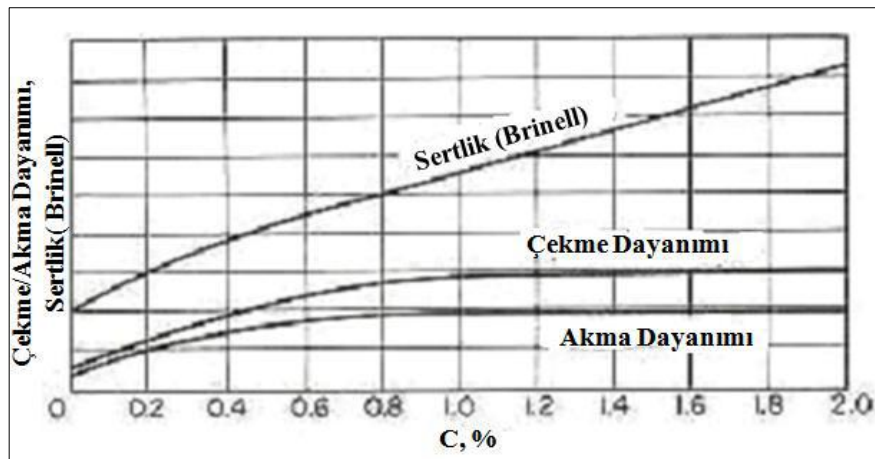
2.2.3. Alaşım Elementlerinin Çeliklere Etkisi

2.2.3.1. Karbon

Ana alaşım elementi olan demirden sonra çeliğin oluşmasını sağlayan en önemli alaşım elementidir. Çeliğe dayanım ve sertlik sağlayan en önemli alaşım elementidir. Isı dayanımını, elektrik direncini, korozyon ve aşınma dayanımı sağlamasının yanı sıra oksitlenmeyi azaltırken, çeliğin ergime derecesini ve sıcak ya da soğuk şekillenme kabiliyetini düşürmektedir [6].



Şekil 2.3. Çeliklerde farklı karbon oranlarında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.



Şekil 2.4. Çeliklerde karbon elementinin mekanik özelliklerin etkisi.

2.2.3.2. Silisyum

Çeliğe manyetik özellikler kazandırır, kimyasal maddelere karşı dayanımı, akma sınırını, çekme dayanımını artırır, sertleşme sınırını düşürerek martenzit yapı oluşturulmasında sertleşmenin çekirdeğe kadar gerçekleşmesini sağlar. Fakat silisyum kaba teneler oluşturarak darbe direncini azaltır. Dövülebilirlik, talaş kaldırabilme, kaynaklanabilirlik fazla silisyum ile olumsuz etkilenir [6].

2.2.3.3. Mangan

Mangan, çeliklerin kaynaklanabilirlik yeteneğini, aşınmaya karşı direnci, sertleştirme derinliğini artırır ve çelikte bulunması istenmeyen oksijenle bileşik oluşturarak oksijeni uzaklaştırır, ısıl genleşmeyi düşürür. Çeliklerin faz dönüşüm hızlarını düşürerek, dıştan merkeze(çekirdek) kadar gerçekleşmesine olanak verir.

Mangan, çelik içeriğinde kükürt ile haddeleme esnasında lifli yapı oluşturur, oluşan lifli yapı ekseninde yüksek süneklik ve çekme dayanımını elde ederler [6].

2.2.3.4. Fosfor

Çelik için olumsuz etkilerinden dolayı istenmeyen fosfor çeliğe üretim adımlarında dahil olan fosfor düşük oranda korozyon direncini ve çekme dayanımını artırır.

Çelikte kırılma kabiliyeti vermesinin yanı sıra elektrik direnci, şekillendirilebilme talaş kaldırılabilme kabiliyeti ve kaynaklanabilirliği fazlasıyla düşürmektedir [6].

2.2.3.5. Kükürt

Kükürt, çeliğin üretiminde demir filiziyle çeliğin içerisinde bulunan kükürt, fosfor gibi çeliğin içeriğinde istenmeyen bir element olup çelikte kırılma kabiliyeti vermesinin yanı sıra düşük sıcaklıkta ise çatlaklara neden olmaktadır [6].

2.2.3.6. Oksijen

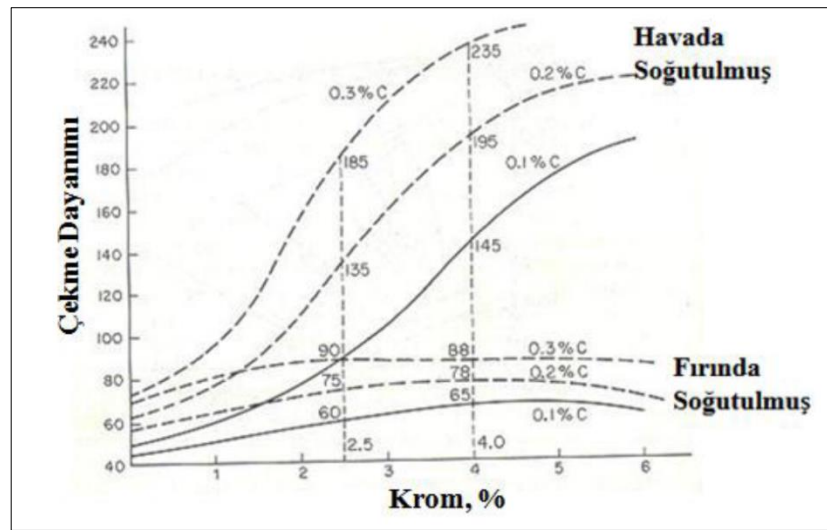
Çeliğin üretiminde çeliğin içerisinde bulunması önlenemeyen oksijen çelik için fazlasıyla zararlı olup çeliğin içerisinde demir oksite sebebiyet verir. Korozyona neden olan demir oksit, çeliğin yaşlanmasını ve kırılganlığını artırır [6].

2.2.3.7. Bakır

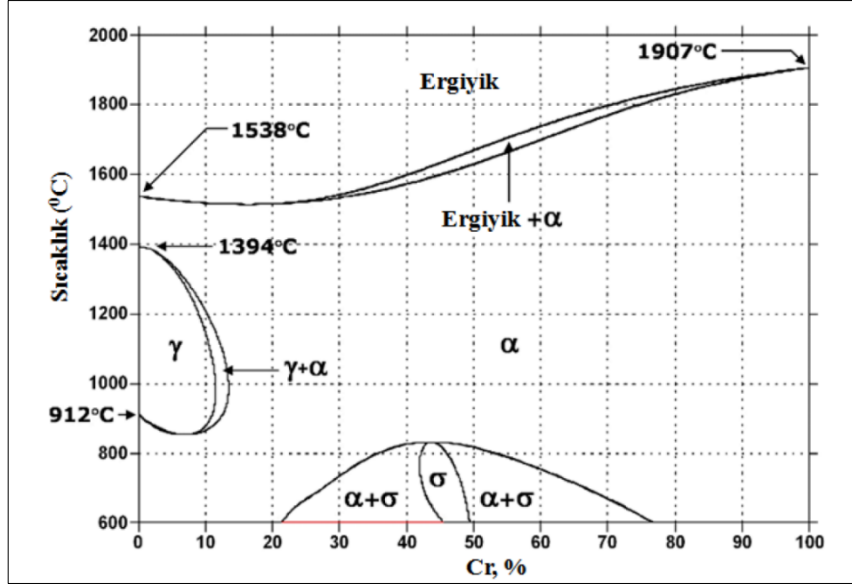
Hurdaların geri dönüşümü esnasında çeliğin içerisine katılmış olan bakır, çelikte az miktarda dayanımı ve korozyona olan direncin artmasını sağlar [6].

2.2.3.8. Krom

Alaşım elementlerinin en önemlilerinden olan krom çelikte aşınma, ısı, korozyon direnci, akma sınırı ve çekme dayanımını artırır. İnce taneli yapı oluşturan krom faz dönüşümlerini geciktirerek sertleşmeyi çekirdeğe kadar sağlar ve bu özellik kesici takım yapımında krom katkısının kullanılır. Çeliğin içerisinde bulunan %3 krom oranı, çeliğe manyetik özellik kazandırdığı için mıknatık yapımında tercih edilmektedir (Şekil 2.5). Krom içeren çeliklerde sertliğin fazla olmasından dolayı soğuk işlem yeteneği ve darbe dayanımlara karşı direnci düşüktür [6].



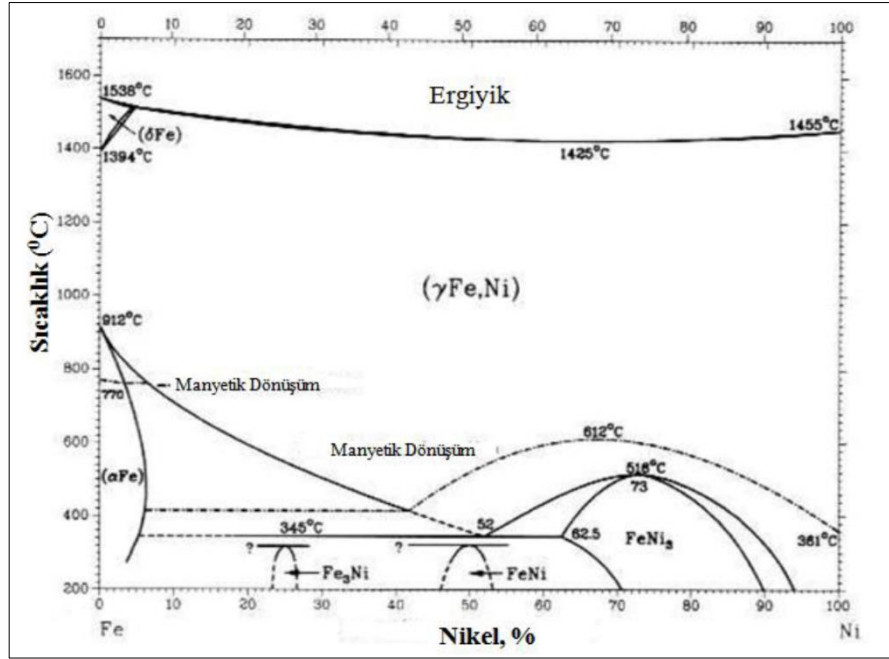
Şekil 2.5. Krom oranının düşük karbonlu çelikte çekme dayanımına etkisi.



Şekil 2.6. Demir karbon denge diyagramı.

2.2.3.9. Nikel

Çoğunlukla krom elementiyle kullanılmakta olan nikel, çelikte doku dönüşüm hızını yavaşlatarak, çekirdeğe kadar sertleşerek paslanmaya, korozyona karşı direncin, kimyasal maddelere direncin, yüksek ısıya dayanımın, elastikiyet özelliklerinin, darbe dayanımının artmasına neden olur. Mekanik parçaların yapımında kullanılan içeriğinde nikel elementi bulunan çelikler (Şekil 2.7), yüksek ısı dayanımına sahiptirler. Isıl genleşme dayanımları yüksek olan nikel alaşımlı çelikler elektrik direnç tellerinin yapımında kullanılır [6].



Şekil 2.7. Fe-Ni denge diyagramı.

2.2.3.10. Molibden

Çeliğin dövme gibi soğuk şekillendirilebilirliğini, akma sınırını, çekme dayanımını, kaynaklanabilirliğini, gevrekliğini, doku dönüşüm sıcaklığını azaltır fakat darbe direncini artırır. Isıl işlem sırasında, düzenli bir dokunun oluşmasını sağlar [6].

2.2.4. AISI 4140 Çeliği

Krom-molibden çeliği olarak bilinenmekte ve çok farklı alanda kullanım yerleri bulunmaktadır. Düşük alaşımlı, orta karbonlu, 42CrMo4 çeliği AISI 4140 şeklinde adlandırılmaktadır [7].

2.2.4.1. AISI 4140 Çeliğinin Kullanım Yerleri

4140 çeliği otomotiv ve havacılık uygulamaları olmak üzere, krank mili, yivli mil, aks mili, dişli çarklar vb. ürünlerde kullanıma sahiptir. Ayrıca, soğuk çekme 4140 çeliği ise mil ve çubuklarında, yaylarda, türbin motorlarında, demir yol tekerleklerinde, millerinde, turbo jeneratörlerin fren halkalarında, starter dişlilerinde kullanılmaktadır. Kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.2, ısıl özellikleri Çizelge 2.3, mekanik özellikleri

Çizelge 2.4, ısıtım işlem özellikleri Çizelge 2.5, kritik sıcaklıkları Çizelge 2.6’da gösterilmiştir [7].

Çizelge 2.2. AISI 4140 kimyasal kompozisyonu.

Element	% İçeriği
Karbon	0,38 – 0,45
Mangan	0,75 – 1,00
Fosfor	Max. 0,035
Kükürt	Max. 0,04
Silisyum	0,15 – 0,30
Krom	0,80 – 1,10
Molibden	0,15 – 0,25

Isıtım işlem ve gerilme konsantrasyonu ile farklı sıcaklıklarda dönüşüme uğrayabilmektedir. 480 C°’ı geçen sıcaklıklarda çalışma ortamlarında dayanımı çok hızlı azalmaktadır. %0,38 -0,45 aralığındaki karbon içeriği göz önüne alınarak aynı gruptan çeliklere göre orta derecede sertleşebilir fakat onlara göre dayanımı, mukavemeti, tokluğu daha iyidir. Oda sıcaklığındaki çalışma ortamlarında 1650 MPa’ a kadar çekme dayanımı gösterebilmektedir.

Çizelge 2.3. AISI 4140 ısıtım özellikleri.

Özellikler		Koşullar	
		Sıcaklık	Uygulama
Isıtım Genleşme	12,3 (10-6/C°)	20-100 C°	Yağda su verilmiş, 600 C° temperlenmiş
Isıtım İletkenlik	42,7 (W/m.K)	100 C°	
Özgül Isıtım	473 (J/kg.K)	150-200 C°	

Yüksek dayanımlı makine parçaları ve elemanlarında kullanılabilen 4140 çelikleri merdane, levha, çubuk, plaka, mil veya döküm yöntemiyle üretilip şekillendirilebilir olup soğuk şekillendirmede %62 oranında şekillendirilebilirler. Yüksek dayanım amacıyla yapılan ısıtım işlem sonucunda hidrojen gevrekliği ortaya çıkabilir. Fakat hidrojen

gevrekliğini engellemek ve süneklik elde etmek amacıyla 2 ile 4 saat arasında 190 C° sıcaklıkta ısıtılmalı ve 540 C° sıcaklığa kadar sürünme dirençlerini korur, 1100 ile 1200 C° sıcaklıkta kolayca şekil verilebilir ve sıcak şekil verildikten sonra yavaşça soğutulmalıdır. Kaynaklanabilirlik özellikleri ise ısıtılma sonunda artar.

Çizelge 2.4. AISI 4140 mekanik özellikleri.

Özellikler		Koşullar	
		Sıcaklık	İşlem
Yoğunluk	7,7-8,03 ($\times 1000$ kg/m ³)	25 C°	815C° tavlanmış
Elastisite Modülü	190–210 GPa		
Poison Oranı	0,27-0,30		
Darbe Dayanımı	54,5 Joule		
Çekme Dayanımı	655 MPa		
Akma Dayanımı	417,1 MPa		
Uzama	% 25,7		
Kesit Daralması	% 56,9		
Sertlik	197 HB		

Zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramları, östenit dönüşümünde meydana gelen ve öncelikle dönüşüm ürününün özelliklerini belirleyen çok yönlü olayların ele alınmasında kullanılır. TTT (Zaman Sıcaklık Dönüşüm) ve CCT (Sürekli Soğuma Dönüşümü) olarak adlandırılan diyagramlarda değişim olayları sıcaklık ve zamanla ilişkili gösterilmektedir [7].

İzotermik dönüşüm için AISI 4140 çeliğinin TTT diyagramı Şekil 2.8’ de verilmiştir. İstenilen yapı baz alınarak 4140 çeliği belirlenmiş sıcaklığa hızla soğutulduktan sonra istenilen dönüşüm oluşuncaya kadar sabit sıcaklıkta bekletilir ve tekrar soğutulur. TTT diyagramından çelikte tamamıyla perlit veya beyrit yapı talep edildiğinde yararlanılır.

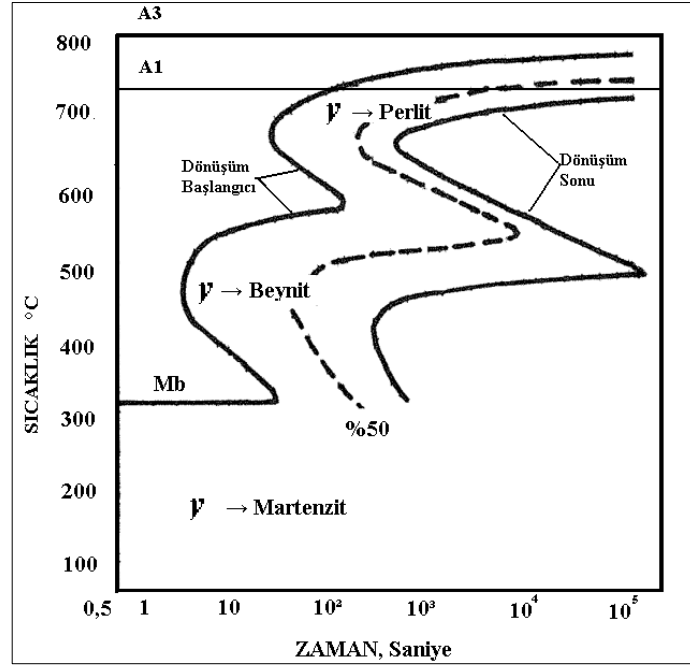
Çizelge 2.5. AISI 4140 ısıtma işlem özellikleri.

Özellikler	Koşullar	
	Sıcaklık (C°)	Soğutma Ortamı
Sıcak Şekil Verme	850 - 1050 C°	
Sertleştirme	820 - 860 C°	Su
	820 - 860 C°	Yağ
Normalizasyon Tavı	840 - 880 C°	
Yumuşak Tavlama (A1)	680 - 720 C°	

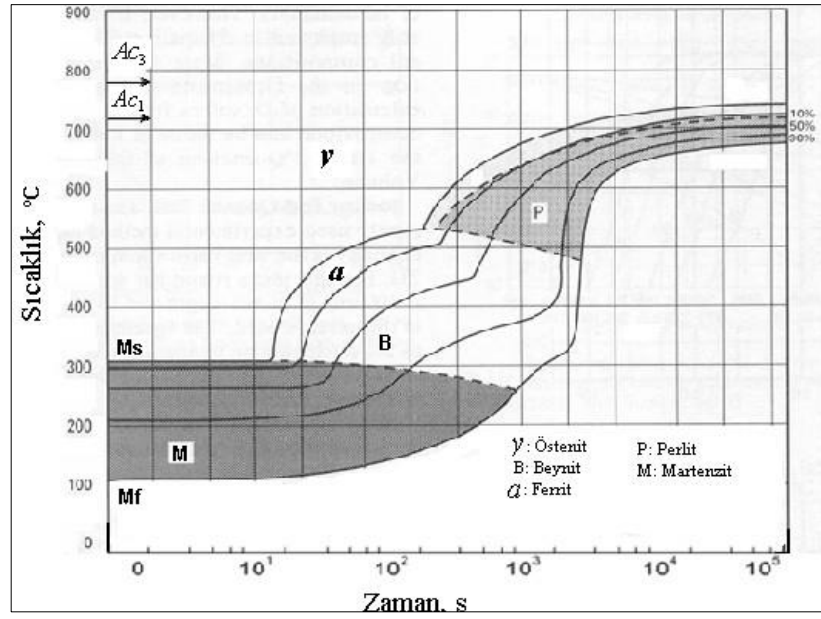
Çizelge 2.6. AISI 4140 kritik sıcaklıkları.

Element	M _f	M _s	A _{r1}	A _{c1}	A _{r3}	A _{c3}
Sıcaklık	260 C°	343 C°	680 C°	732 C°	743 C°	804 C°

4140 çeliği için CCT diyagramı Şekil 2.9' de verilmiştir. Su verme koşullarının tesirlerini tahmini bir şekilde görülebileceği diyagramlardır. Özel soğutma koşullarında erişebilen soğutma hızının, östenitten martenzite ya da beynitten perlitte faz değişiminin tesirlerini içerir [7]. Bu diyagramdan 4140 çeliğinin soğutma süreci hakkında bilgi sahibi olunup ayrıca çok kritik önemi bulunan martenzit değişiminin başlangıç (M_s) ve bitiş (M_f) sıcaklıkları görülebilir (Şekil 2.9). Bu sıcaklıklarla beraber 4140 çeliğinin ısınmasında kritik östenit dönüşüm sıcaklıkları (A_{c1} ve A_{c3}) Çizelge 7'de görülebilir. Soğuma hızları sonucu malzemedeki yapılar CCT diyagramı ile görünmektedir. Yapının martenzite çok hızlı soğumayla beraber değişeceği şekilde çok bariz biçimde görünmektedir. Beynitik yapı, çok hızlı olmayan soğutmayla kazanılabilir. Malzemenin yavaş soğutulmasıyla ferritik ve perlitik yapı oluşabilir [7].



Şekil 2.8. AISI 4140 TTT diyagramı.



Şekil 2.9. AISI4140 çeliğine ait CCT diyagramı.

BÖLÜM 3

METALLERİN PLASTİK ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Plastik şekillendirme soğuk, sıcak ve yarı sıcak olacak şekilde üç farklı durumda gerçekleştirilebilir. Yarı sıcak ve soğuk plastik şekillendirme işlemi redüksiyon oranının düşük, yüksek yüzey kalitesi ve yüksek mekanik özelliklerin talep edildiği durumlarda gerçekleştirilir. Sıcak şekillendirme çoğunlukla yüksek hacimli iş parçalarının plastik şekillendirilmesinde kullanılmaktadır [9].

Çekme mukavemeti, sertlik, hassas ölçü toleransı ve mükemmel yüzey kalitesi soğuk çekme işlemiyle artmaktadır. Soğuk çekmede, redüksiyon oranı arttıkça süneklik azaldığı ve yorulma dayanımının ise arttığı literatürde deneysel çalışmalar ile görülmüştür. Mekanik ve kristalografik yönelmenin sonucu olarak çekme eksenine paralel yönde malzeme anizotropik davranış gösterir [10].

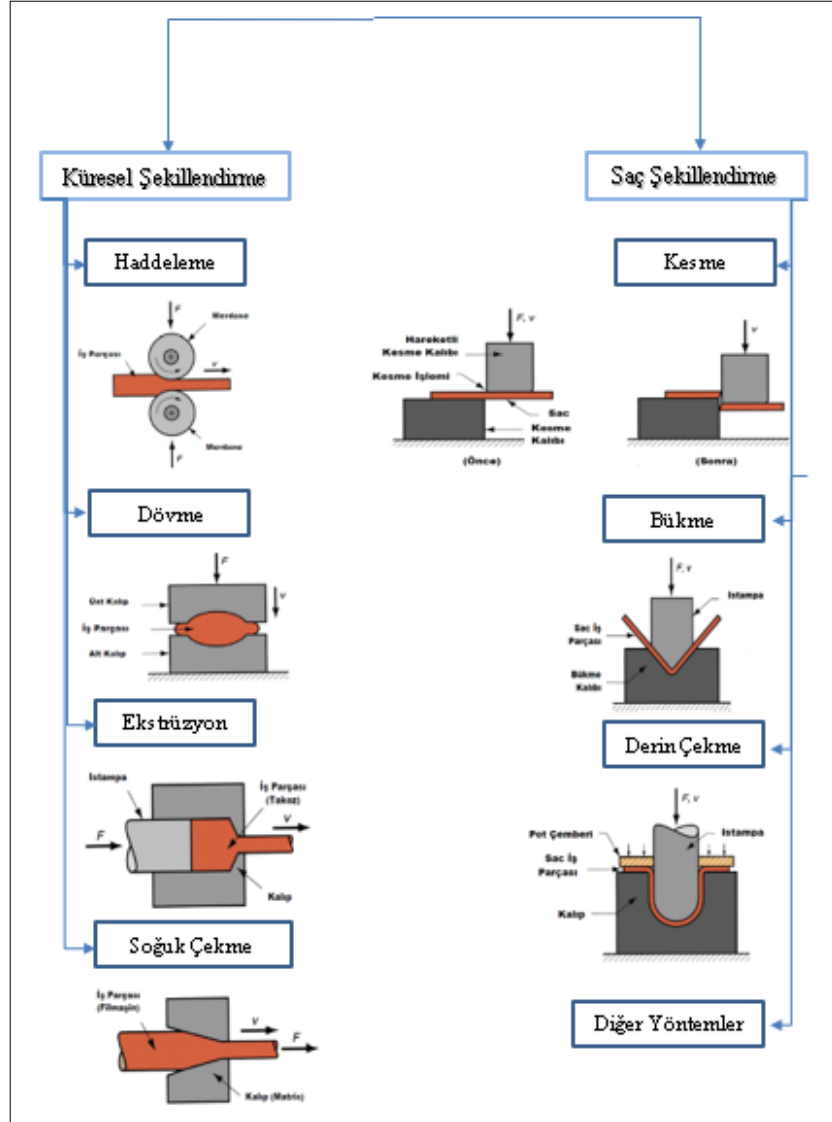
3.1. ANİZOTROPI

Atomlar arasında bulunan bağ kuvvetleri, metalik malzemelerde elastik veya plastik deformasyona karşı direnç oluşturmakta olup kristal yapıları metallere en önemli deformasyon mekanizması kayma, karşılıklı atom düzleminde bir atomun diğer atom düzleminde kaymasıyla meydana gelir. Kafes sitemindeki kayma düzlemiyle beraber tane dizilimlerinde metallerin şekillendirebilirliğinde önemlidir. Plastik şekillendirmede anizotropik yapının tesiri azımsanmayacak durumdadır [11].

3.2. PLASTİK ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ

Plastik şekil verme yöntemleri küresel şekillendirme ve saç şekillendirme olmak üzere iki ayrı başlıkta incelenmektedirler. Haddemeleme, dövme, ekstrüzyon ve soğuk çekme

küresel şekillendirme yöntemleri olarak; kesme, bükme, derin çekme ise sac şekillendirme yöntemleri olarak söylenebilmektedir.



Şekil 3.1. Plastik şekil verme yöntemleri.

3.2.1. Haddelenme

Haddelenme, basınç kuvvetleriyle iki zıt merdane sayesinde işin kalınlığının düşürüldüğü şekil verme olayıdır [9]. Uygulama sıcaklığı 1050 ve 1300 °C aralığında farklılık göstermektedir. Sıcak metale uygulanan kuvvetle beraber metalin boyut, şekil ve metalürjik özellikleri devamlı değişmektedir. Ayrıca, sıcak haddelenme prosesinde metal ürünler form ve şekil bakımından farklılık gösterir. Üretilcek ürüne göre döküm

ingotlar, kütük, slablar, demir/çelik çubuk ve profiller kullanılabilir. Sıcak haddeleme sonrası nihai mamuller şekillerine göre çoğunlukla iki temel grupta sınıflandırılır; düz ve uzun ürünler [12].

3.2.2. Dövme

Dövme, iki kalıp arasında basınç uygulanmasıyla şekillendirme işlemidir. Darbe ya da artan tedrici basınç uygulanmasıyla parçanın şekillendirilmesi gerçekleştirilir. Çok önemli endüstriyel işlem olan yüksek dayanımlı parçaların üretiminde otomotiv, uzay araçları ve diğer uygulamalarda kullanılmasında önemli role sahiptir. Kullanılan bazı parçalar şu şekildedir; dişliler, krank, şaft ve bilyeler, hava araçları yapı elemanları ve jet motor türbin parçaları. Dövme yöntemi ile farklı şekillendirme işlemlerini sınıflandırmak amacıyla çalışma sıcaklıkları kullanılır. Dövme yöntemi ile şekil verme işlemi sıcak veya yarı-sıcak olarak gerçekleştirilir. Gerçekleştirilen şekil verme işlemi ile istenilen yüksek deformasyon ile iş metalinin sünekliliğini arttırmak ve dayanımının azaltılması amacıyla gerçekleştirilir. Bunun yanında soğuk dövme bazı metallerde fazlasıyla kullanılmakta olup üstünlüğü ise parçanın uzama sertleşmesinden sonuçlanan artan mukavemettir [9].

3.2.3. Ekstrüzyon

Bir şekillendirme yöntemi olan ekstrüzyon, metal bloğunun preslenmesi aracılığıyla daha küçük kesit alanına sahip olan kalıp boşluğundan akma işlemine zorlandığı bir plastik deforme sürecidir. Bu yöntem, dolaylı yoldan bir sıkıştırma sürecidir. Ekstrüzyon, bileşim ve kullanılan tekniklere göre sıcak ya da soğuk olarak uygulanabilir.

Ekstrüzyon yöntemi sayesinde şerit, çubuk, boru ve pek çok boş ve dolu profillerin üretimi sağlanmaktadır. Karmaşık şekiller, 5 ile 200 mm çapındaki çubuklar, en fazla 800 mm iç çapa sahip 1,5-8 mm kalınlığındaki borular olmak üzere birtakım kesitler ortaya koymaya yardımcı olmaktadır.

Ekstrüzyon yöntemlerini dört sınıfta ele alabiliriz. Bunlar; hidrostatik ekstrüzyon, püskürtmeli ekstrüzyon, direkt ve indirekt ekstrüzyondur. Günümüzde en çok tercih edilen yöntemler ise direkt ve indirekt ekstrüzyon yöntemleridir [13].

3.2.4. Kesme

Kesme, mekanik, pnomatik ya da hidrolik güçle çalışan makinelerde kesicilerle gerçekleştirilen metali iki veya daha fazla parçaya ayırma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Kesme işlemiyle plaka ve sac malzemeler ara mamul veya nihai ürün haline getirilmektedirler [14].

Kesme prosesinde kalıplar arasında uygun boşluk bırakılmalıdır. Sac kalınlığı ve malzemenin özelliğine bağlı olarak kesme işlemindeki boşluk ve kalıp arasındaki mesafe belirlenir. Sert saclarda daha büyük, yumuşak saclarda daha küçük boşluklar kullanılmaktadır [10].

3.2.5. Bükme

Sac metal ürünlerin neredeyse tamamında sıklıkla kullanılan sac şekillendirme yöntemidir. Malzemenin sıcak veya soğuk olarak ve talaş kaldırmadan, sac malzemelerin belli bir eksen etrafında eğilerek veya döndürülerek plastik deformasyona uğratılması yoluyla kalıcı şekil değişimine uğratıldığı sac şekillendirme yöntemi olarak tanımlanmaktadır [14].

3.2.6. Derin Çekme

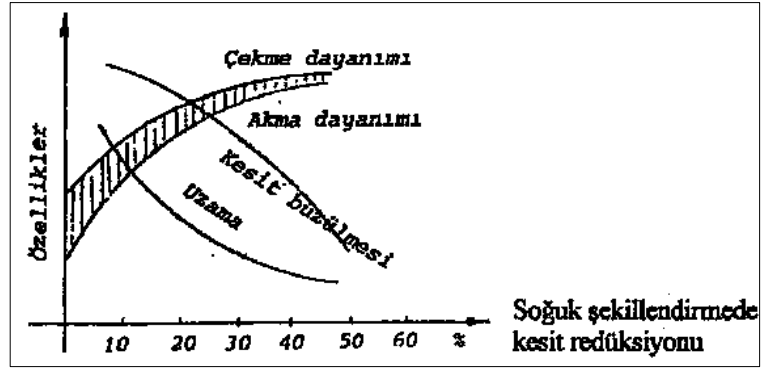
İki boyutlu, düz geometrisi bulunan sacın çekme kalıbı ve zımba ile preste çökertilerek veya başka bir deyişle sacın çekme kalıbı içerisine çökertilmesi ile istenilen derinlik ve profillerde üç boyutlu mamuller üretilmiş olur [15].

Otomotiv sektörü öncelikli olarak farklı sanayi alanlarında da kullanılmakta olan derin çekme işleminin başlıca teçhizatı kalıptır. Çeşitli kesitlerin üretimi için kullanılacak kalıplarda talep edilen mamul üretilinceye dek kalıp dizaynı değiştirilerek nihai mamul

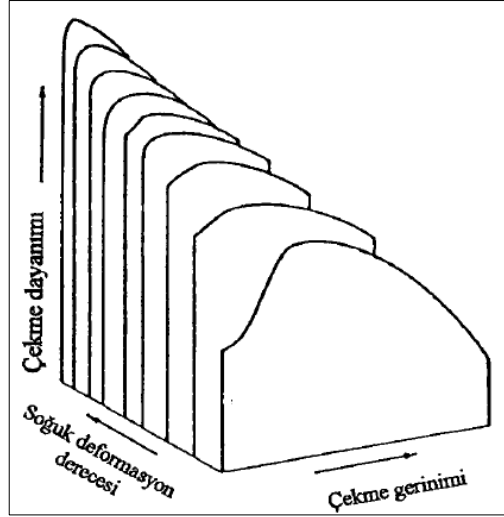
elde edilmeye çalışılmaktadır. Deneye dayalı uygulamalar gerektiren kalıplar yüksek maliyetli olup üretilecek parçanın ve kullanılması düşünülen kalıbın özelliklerinin ilk başta planlanması maliyet ve zamandan tasarruf sağlayacaktır. Şekillendirme prosesleri içerisinde en fazla sorun çıkaran proses derin çekmedir [16].

3.3. PEKLEŞME

Şekil 3.2’de belirgin şekilde soğuk deformasyona uğramış metallerde sertlik ve dayanım değerlerinin artarken kesit daralması, % uzama gibi plastik özellikleri düşmektedir. Şekil 3.3’te soğuk deformasyon oranı ile çekme dayanımının doğru ortantılı olarak etkileşimi verilmiştir. Deformasyon sertleşmesinin dayanım ve sünekliliğe olan tesiri de ayrıca gözükmemektedir [17].



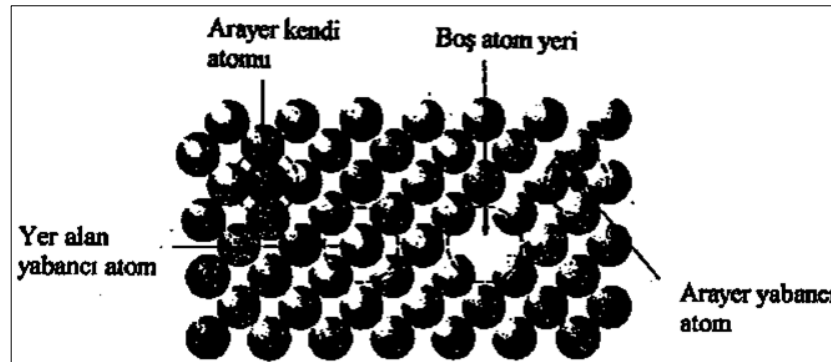
Şekil 3.2. Soğuk deformasyon oranının artımı ile oluşan pekleşme etkisiyle, malzemenin mekanik özelliklerdeki değişimler.



Şekil 3.3. Soğuk deformasyon miktarının artımı ile oluşan pekleşmenin, düşük karbonlu çelikten çubuk numunelerle elde edilen çekme eğrilerine etkisi.

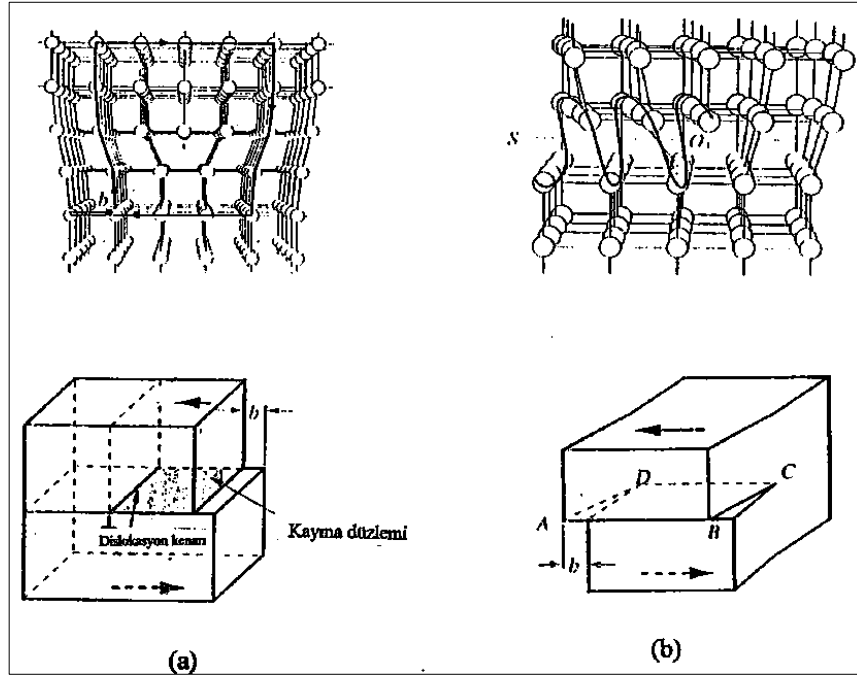
Metalde oluşan pekleşme etkisi, metalin kafes yapısının dislokasyonlara dayanmaktadır. Dörde ayrılan metalin iç yapısındaki kusurlar;

- a) Yüzeysel hatalar (tane sınırları gibi)
- b) Hacimsel hatalar (boşluklar veya oksit, sülfür, silikat gibi metalik olmayan inklüzyonlar)
- c) Noktasal hatalar (Şekil 3.4'te görüldüğü gibi boş atom yeri, arayer kendi atomu, arayer yabancı atom veya empürite atomu, yeralan yabancı atom veya empürite atomu)
- d) Çizgisel hatalar veya dislokasyonlar (Şekil 3.5'te görüldüğü gibi kenar dislokasyonu ve vida dislokasyonu)

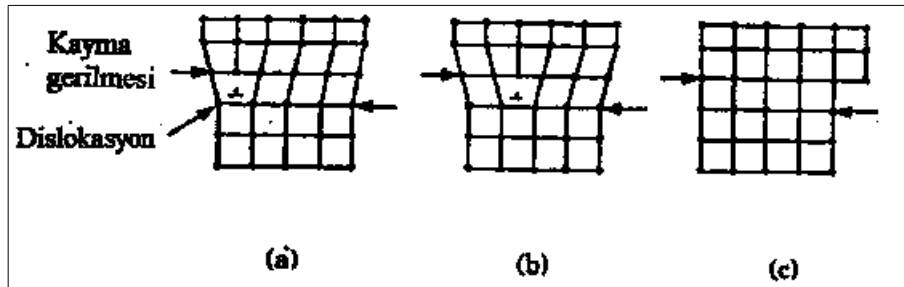


Şekil 3.4. Bir kafesteki noktasal hatalar.

Metalin teorik dayanımı ve gerçek dayanımı arasındaki farkı anlatabilmek için en belirgin kusurlar dislokasyonlardır. Dislokasyona sahip kayma düzlemi, hatasız ya da ideal kafesteki kayma düzleminde daha düşük kayma gerilmesi gerektirmektedir (Şekil 3.6). Plastik deformasyonlarla bu dislokasyonlar hareket etmekte ve artan deformasyon oranıyla dislokasyon yoğunluğu (birim hacimdeki dislokasyon çizgilerinin toplam uzunluğu), oda sıcaklığında 106 mertebesinde artabilmektedir [17].



Şekil 3.5. Bir kristaldeki kenar dislokasyonu (a) ve vida dislokasyonu (b).



Şekil 3.6. Kayma gerilmesi altında bir kafesteki kenar dislokasyonlarının hareketi.

Dislokasyonun varlığı, kaymaya neden olan kayma gerilmesini düşürmesine rağmen, dislokasyonlar birbirlerini engelleyebilirler veya malzemede bulunan tane sınırları, inklizyonlar, empüriteler gibi engeller tarafından engellenebilirler. Bu engellemeler,

artan deformasyon oranıyla büyümekte ve kayma için gereken gerilmede artmaktadır. Kayma gerilmesindeki artış, malzemenin tüm dayanımı arttırmakta ve bu olayda pekleşme veya deformasyon sertleşmesi olarak tanımlanmaktadır [17].

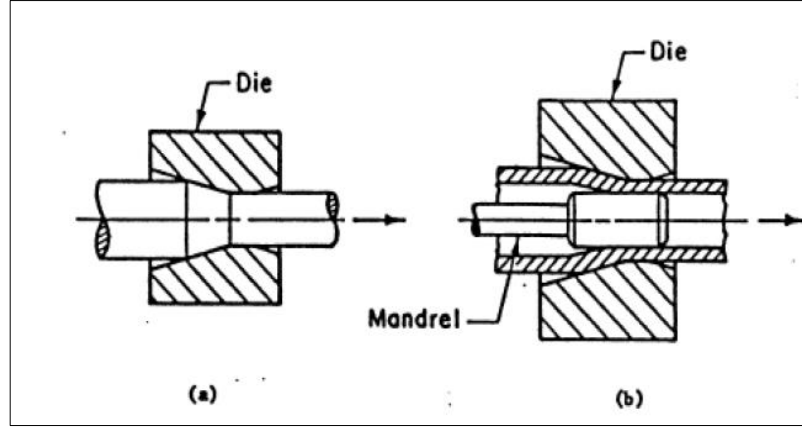
BÖLÜM 4

SOĞUK ÇEKME

Soğuk çekme prosesi matrizen (kalıp, hadde) geçirilen metal çubuğun matrisin uyguladığı kuvvetle ebadının düşerek boyunun uzamasıdır. Soğuk çekme sonrası hassas kesit toleransı ve yüksek yüzey kalitesi dolayısıyla herhangi bir ek proses uygulanmaksızın ya da uygulanarak nihai mamul elde edilir. Elde edilen mamuller piston, cıvata, şaft, somun vb birçok üründe kullanılmaktadır. Çubuk ya da tel birkaç kez soğuk çekme prosesi uygulanabilir, endüstride deformasyon oranı çubuklarda %10-30, tellerde %20-50 oranındadır. Redüksiyon oranı ve mamul özelliklerine göre üretim aşamalarına geçişte ısıl işlem uygulanması gerekebilir. Nihai malzeme ebadına göre tel çekme ($\emptyset 0,1 < 5\text{mm}$) ya da çubuk çekme ($\emptyset 5 < 80\text{mm}$) olarak adlandırılır [10]. Soğuk çekme aşağıdaki gibi gruplandırılır:

- Boru Çekme: Büyük çaplı boruyu kalıptan geçirerek küçük çaplı boru elde edilir (Şekil 4.1 (b)). Büyük ve küçük çaplı üretimlerde için uygundur.
- Tel ve Çubuk Çekme: Çubuk veya telin kesiti, kalıp açıklığından geçirilerek küçültülür (Şekil 4.1 (a)). Küçülen kesit kalıp açıklığından geçerken çekme ve basma gerilimi deformasyona uğratar.

Çekme prosesinin ticari nedenlerle kapsamlı araştırma alanı olmasının nedeni mamulde yüksek yüzey kalitesi ile dar ebat toleransı sağlayabilmesidir [3].



Şekil 4.1. Soğuk Çekme Tipleri, (a) Tel ve Çubuk Çekme (b) Boru Çekme.

4.1. SOĞUK ÇEKMEDE KUMLAMA

Mekanik yüzey işleme yöntemlerinden olan kumlama, malzeme yüzeyine yüksek hızlarda parçacıkların püskürtülmesi, fırlatılmasıyla gerçekleştirilir. Bu kumlama işlemi farklı metallerde, camlarda, kumaşlarda, betonlarda çok farklı sektörlerde çelik bilye, cam tozu, kayısı çekirdeği, silis kumu gibi çeşitli aşındırıcılar farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Kumlama prosesinin kullanım amaçlarını 3 grupta incelendiğinde:

- Yüzey Temizleme ve Hazırlama: Boya, kaplama, pas, tufal, farklı atıkların ortadan kaldırılması, üretim veya uygulama sonrası yüzey parlaklığının elde edilmesi amacıyla kullanılır. Kullanım alanlarından somun, manşon, cıvata gibi ürünlerde düşük maliyetle görsel değerini arttırdığı için kullanılmaktadır. Soğuk çekmede asitle yüzey temizleme işlemine kumlama sayesinde gerek kalmamaktadır. Soğuk çekmede finalde düzgün malzeme çıkarabilmek için metalin pas ve tufaldan arındırılmış saf malzeme yüzeyinde olması gerekmektedir. Matrizen geçen metalin ebatı azalırken gerçekleşen yüksek plastik deformasyon ile metalin yüzeyi ile iç tarafı birleşir. Bu nedenle yüzeyde bulunan safsızlıkların matrise girişi sonrası metalin iç tarafıyla birleşmesi homojenliğe zarar vermektedir.
- Yüzey Özelliklerinin Değiştirilmesi: Mekanik dayanımına tesiri bulunan kaynak, döküm gibi proseslerdeki yüzey gerilmelerinin, artık gerilmelerin ısıl işleme ortadan kaldırılması yoğun kullanılmaktadır ancak maliyetli ve zaman

gerekmektedir. Kumlama işlemiyle ise daha düşük maliyet ve daha kısa sürede yüzeyde bulunan artık gerilmeler giderilmektedir.

- Malzemelerin Şekillendirilmesi: Farklı kullanım amacı olarak ise kumlamada malzemelere şekil vermek karşımıza çıkmaktadır. Ayarlanabilen kum püskürtme şekli, hızı, püskürtme açısı ile konveyör sistem ile türbine istenilen yakınlıkta geçirilen malzemelere bazı uygulamalarda basınçlı hava ile şekil verilebilmektedir [18].

4.2. SOĞUK ÇEKMEDE SÜRTÜNME KATSAYISI

Soğuk çekmede sürtünme, yüksek yüzey alanı teması ve malzeme geçişi esnasında çekme tezgahında oluşan gerilmeler şekillendirme kuvvetine etkisi dolayısıyla önem arz etmektedir. Soğuk çekme prosesinde sürtünmenin düşürülmesi: soğuk çekme tezgahının ömründe, proses verimliliğinde artış, duruş süresinde, enerji tüketiminde, takım tüketiminde ve üretim maliyetinde azalmaya imkân vermektedir [3].

4.3. SOĞUK ÇEKME KALIPLARI

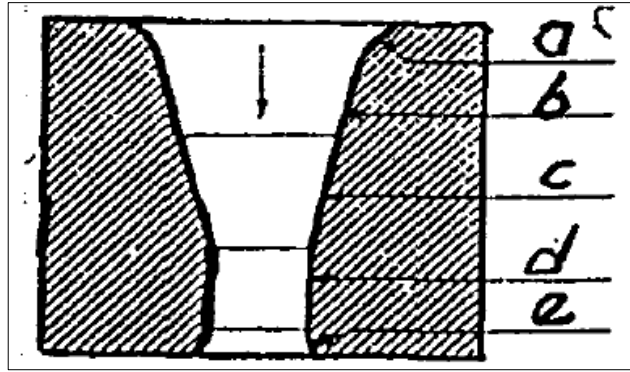
Soğuk çekme kalıpları çoğunlukla imalat çeliklerinden (orta karbonlu) üretilen zarfa konumlandırılarak soğuk çekme tezgâhında üretilecek mamulün ebat ve şekline göre kullanılan kalıplar farklılık gösterir. Soğuk çekme kalıpları şu şekildedir:

- Alaşımli çelik kalıplar: Yüksek karbon (%1,5-2) ve krom (%10-13) içerirler. Büyük ebatlı çeliklerin üretiminde yer alırlar.
- Sinterlenmiş sert metal kalıplar: Alaşımli kalıplardan daha uzun ömürlü olup çok fazla olan çekme proseslerinde yer alırlar. Çok daha yüksek karbon (%5), kobalt (%8) ve tungsten (%87) sahiptirler. Toz metalürjisiyle sinterlenerek elde edilirler ve farklı farklı sert karbürler içermektedirler. Aşınma dayanımı yüksek, darbe dayanımı düşüktür.
- Elmas kalıplar: Yüksek karbonlu çelik tel ve çubukların üretiminde yer alırlar. Sertlik ve ısı iletim katsayıları yüksektir.

Şekil 5.2' de belirtildiği üzere soğuk çekme kalıbında beş farklı kısım vardır Bunlar:

- Radyus
- Giriş Açısı
- Karşılama Açısı
- Silindirik Bölge
- Çıkış

A kısmındaki çap, kalıba girmekte olan mamulün çapından daha büyük olur ve mamulün üzerinde bulunan yağlayıcılarla girişi sağlanır. Giriş açısı, kalıbın yarım açısı (α), telin çıkış çapı ve gerçekleşen rediksiyona bağlıdır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Soğuk çekme kalıbının şematik kesiti.

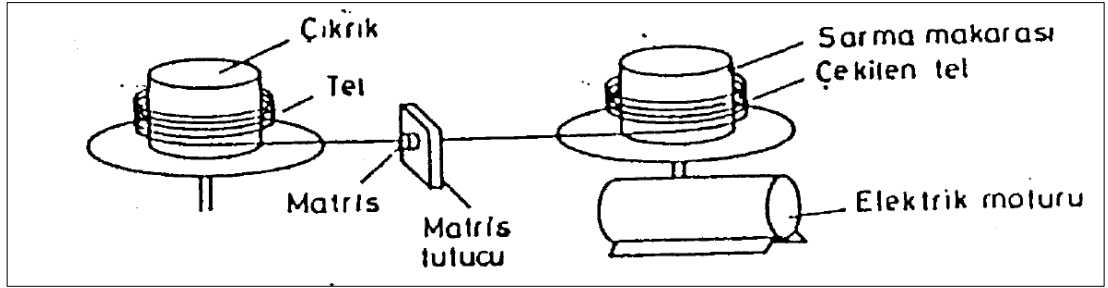
Silindir kısım mamulün matristen düzgün ve homojen halde çıkışına imkân verir. Şekillendirmeye zamanla aşınarak kesit şekli bozulan kalıbın ömründe silindirik kısmın çok fazla tesiri vardır. Silindirik kısmın boyu kalıp ömrünün arttırmasına karşın, sürtünme yüzeyinin artması çekme prosesinin gerçekleşmesinde gerekli olan kuvveti arttırır. Yüksek çekme kuvveti ise malzemenin kopma olasılığını arttırır. Pratikte de yüksek sürtünme kuvvetinde çelik kalıplar için deformasyon, sert metal ve elmas kalıplar içinse kalıbın patlamasına neden olabilir. Kalıbın silindirik kısmının uygun uzunluğu, malzemenin çıkış çapının $2/3$ ' ü olup çıkış kısmı mamulün matristen kolaylıkla çıkmasına yarar. Matris biçimini ve çekme kuvvetinde en mühim etken kalıp açısı diye adlandırılan konik kısmın yarım açısıdır (α) [10].

4.4. SOĞUK ÇEKME MAKİNELERİ

Çoğunlukla soğuk çekme proses adımlarının tamamı (doğrultma, kumlama, parlatma, yağlama ve soğuk çekme) bileşik makinelerle Ø40 mm'ye kadar kangal formunda bulunabilen malzemeler ile seri üretimde soğuk çekme gerçekleştirilebilir. Soğuk çekme sonrası talep ve mamul çapı dikkate alınır, çubuk olarak kesilerek ya da kangal formunda üretilebilir [10].

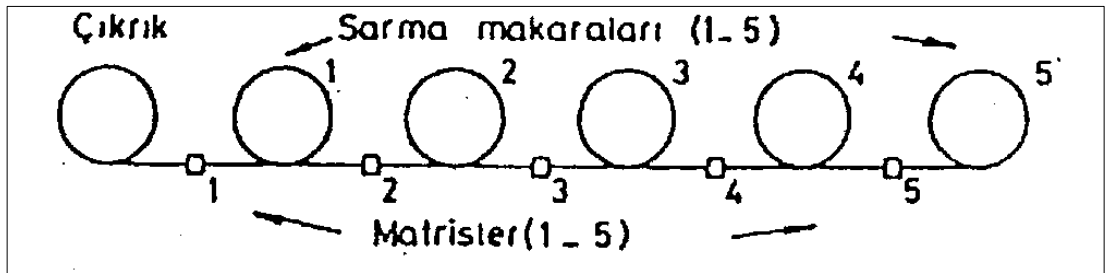
4.4.1. Tel Çekme Makineleri

Tel çekme makinelerinde kalıp, çıkırık, kıskaç, sarma makarası ve mekanik kumanda gibi kısımlar vardır. (Şekil 4.3) Kıskaç ucuk sivriltilip kalıptan geçmiş olan telin tutulmasında, sarma makarası ise telin çekilerek sarılmasında kullanılır.



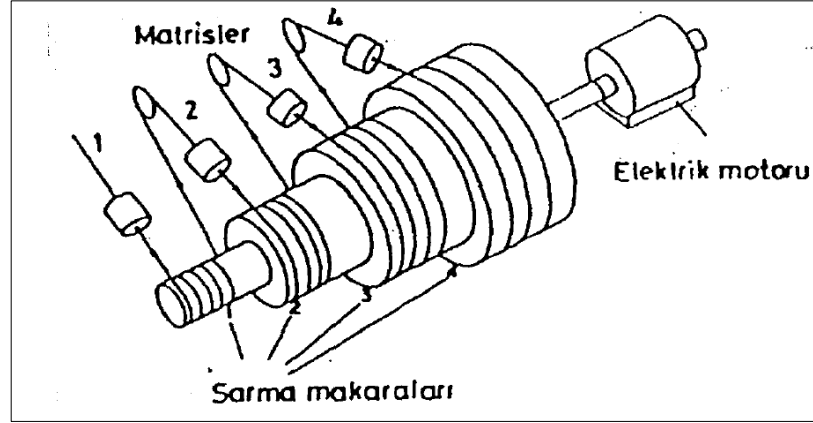
Şekil 4.3. Tel çekme tezgahının şematik gösterimi.

Tel çekme prosesinde çekilmekte olan tel bir matristen sonra sarma makarasına sarılır, sonra daha düşük kesitli matrise girerek artarada birkaç matristen geçerek talep edilen çapta tel elde edilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Beş kalıplı sürekli bir tel çekme işlemi.

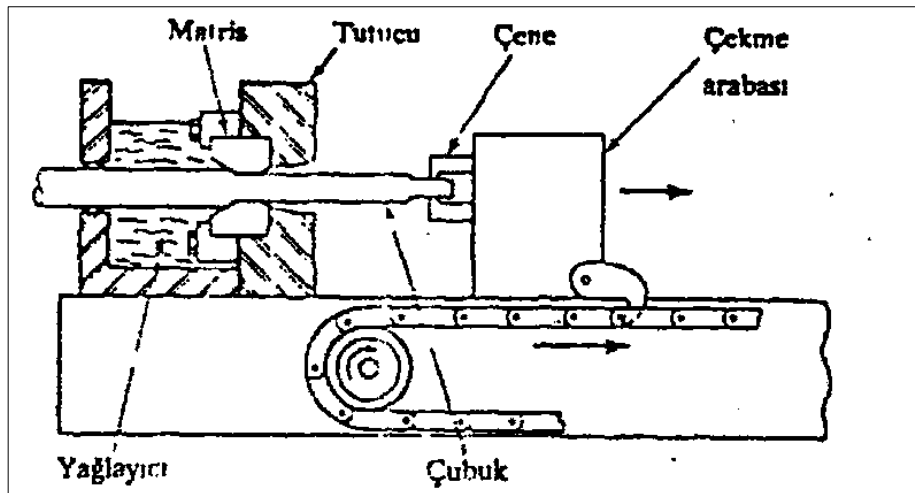
Matristen geçmekte olan telin çapı her matris geçişinde düşerken boyu ve hızı orantılı bir şekilde artmaktadır. Sarma makaralarının çevresel hızları ile tel hızına uyumu, her sarma makarasının ayrı bir elektrik motoruna bağlanması (Şekil 4.4) veya (Şekil 4.5)'te görüldüğü gibi tek bir elektrik motoruna bağlı olan sarma makarasının değişik çaplarda kademeli yapılması ile sağlanır [10].



Şekil 4.5. Tek bir elektrik motoruna bağlı kademeli sarma makinesi ile dört tel çekme işlemi.

4.4.2. Çubuk Çekme

Soğuk çekilmiş çubuk elde etmek için kullanılan çubuk çekme makineleri hidrolik basma, matris, çekme arabası, çene, yağlayıcı gibi parça kısımlardan oluşur (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Çubuk çekme.

Soğuk çekme prosesi için yüzeyi temizlenmiş çubuğun uç kısmı hidrolikle kalıptan geçirilerek çekme arabasının çene kısmını tutması ile çubuk kalıptan geçirilir. Soğuk çekme işleminden sonra çubukta istenilen yüzey kalitesi ve doğrusallığın sağlanması için çubuk doğrultma-parlatma makinelerinden geçirilir [10].

4.5. TEL ÇEKME KUSURLARI

Üretim prosesinin tamamının ya da üretim adımlarından birinin hatalı gerçekleştirilmesi ile kusurun oluşmaya açık hale gelmesi ve artık gerilmeler meydana gelebilir. Telin kalitesinin belirlenmesinde yüzey kusuru önemli bir yere sahiptir. Kangaldan soğuk çekilmiş tele taşınan metalürjik işlemlerden kaynaklanan kusurlar ergitme ve dökümde oluşur. Yuvurlanma nedeniyle oluşan kusurlar kalıptan (hadde, matris) geçerken ısınma ve deformasyonda oluşur.

Çekilmiş tüplerde de aynı durumlar vardır, yüksek mukavemete sahip SAE 1030 çelik boruların şekillendirilmesi esnasında ortaya çıkan hataların deneysel gözlemlerinde başlıca hatalar balık pullaşması, erken patlama, çapsal büyüme, mikro ve makro çatlaklardır.

4.6. SOĞUK ÇEKMEDE ISIL İŞLEM

Mekanik (tokluk, süneklik) ve fiziksel (elektriksel iletkenlik) özellikleri soğuk çekme ile olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir. Metallerin bu kötüleşen etkilerinin sınırlandırılması için soğuk çekme işleminde redüksiyon oranı belli sınırlar arasında olmalıdır ayrıca bu kötüleşen etkileri yok ederek tekrar başlangıç özellikleri elde etmek için yeniden kristalleştirme tavlama gerçekleştirilmektedir. Toparlanma, yeniden kristalleştirme ve tane büyümesi olarak üç adımda gerçekleşen yeniden kristalleştirme tavlama özellikle yeniden kristalleştirme aşamasında soğuk çekme yapısı tamamen değişmektedir. Değişen soğuk çekme yapısında uygulanan yeniden kristalleştirme tavlama ile mukavemet ile sertlikte azalma görülürken, süneklik artmaktadır. Çoğunlukla metalin 60 dk içerisinde yarısının yeniden kristalleştiği sıcaklık ve takribi olarak metalin mutlak ergime sıcaklığının %33 ile %50 oranı arasında bulunan sıcaklık yeniden kristalleştirme sıcaklığı olarak kabul edilir.

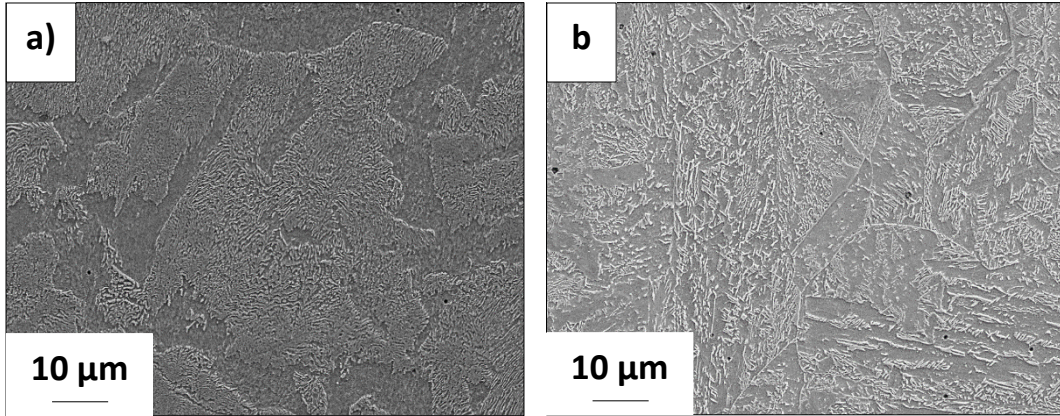
Gerçekte soğuk çekme redüksiyon oranı, kimyasal bileşim, tav süresi, ilk tane boyutu ve malzemenin ergime sıcaklığı vb. farklı faktörler dolayısıyla yeniden kristalleşme sıcaklığı sabit değildir [19].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. MALZEMELER

Orta karbonlu çelik olan SAE 1040 ve ıslah çeliği olan AISI 4140 için soğuk çekme işlemi uygulanmıştır. İşlem için, sıcak haddelenmiş ve yuvarlak çubuk formundaki çelikler kullanılmıştır. Sıcak haddelenmiş Ø24mm malzemelerin SEM fotoğrafları Şekil 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Sıcak haddelenmiş çubukların SEM görüntüleri;(a) SAE 1040, (b) AISI 4140.

Tez çalışmasında kullanılan haddelenmiş çeliklerin kimyasal kompozisyonları ve sertlik değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Soğuk işlem görmemiş başlangıç numuneleri tez içerisinde 1040-0 ve 4140-0 olarak adlandırılmışlardır.

Çizelge 5.1. AISI 4140 ve SAE 1040 kalitelere ait kimyasal analiz ve sertlik değeri.

Kalite	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	Sertlik Değeri (HBW)
AISI 4140	0,42	0,26	0,89	0,015	0,017	1,03	0,247	0,219	0,0042	310,4
SAE 1040	0,42	0,15	0,83	0,014	0,020	0,03	0,039	0,004	0,0022	172,6

5.2. SOĞUK ÇEKME İŞLEMİ VE ISIL İŞLEM

İlk adımda SAE 1040 ve AISI 4140'a ait üçer çubuk hazırlanmış olup kumlama işleminden geçirilerek sıcak haddelenmiş mamul üzerinde bulunan tufal, pas, boya vb. atıkların giderilmesiyle yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kumlama sonunda korozyona karşı savunmasız durumda kalan çubuklar kireçten geçirilmiştir, böylelikle kumlama sonrası korozyona uğramaları engellenmiştir.

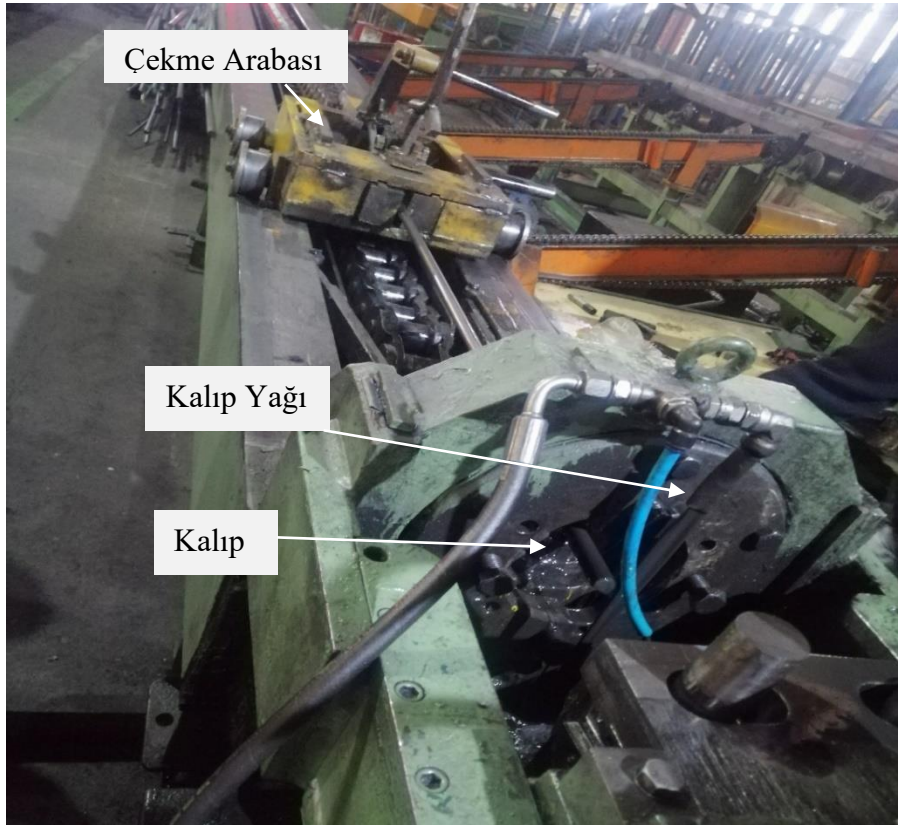


Şekil 5.2. Kumlama makinesi ve kumlama sonrası kireç kaplanmış çubuklar.

Boy ve ebat ölçümleri yapılmış, kullanılacak kalıp (matris) belirlenmiştir. Sıcak haddelenmiş ve kumlama işlemine girip kireç kaplanmış çubuklar ve soğuk çekme kalıpları Şekil 5.3'te, soğuk çekme makinesi Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Soğuk çekmeye hazır çubuklar ve soğuk çekme kalıpları.



Şekil 5.4. Soğuk çekme makinesi.

Soğuk çekme işlemi öncesi, sıcak haddelenmiş çubuklara ve soğuk çekme sonrasında soğuk çekilmiş çubuklara yapılan boy ile çap ölçümleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Ayrıca, Çizelge 5.2’de numunelerin adlandırılması ve redüksiyon oranları gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Numunelerin adlandırılması ve redüksiyon oranları.

1. Redüksiyon (Kalıp Ölçüsü 22,90mm)					
Numune Adı	İlk Ölçü(mm)	İlk Boy(cm)	Son ölçü(mm)	Son boy(cm)	Redüksiyon Oranı (%)
1040-1	24	122	22,95	134	8,56
4140-1	24	115,5	22,97	127	8,40
2. Redüksiyon (Kalıp Ölçüsü 22,41mm)					
1040-2	24	120	22,45	138	12,5
4140-2	24	117,5	22,46	135,5	12,42
3. Redüksiyon (Kalıp Ölçüsü 21,91mm)					
1040-3	24	121	21,95	145	16,35
4140-3	24	120	21,96	145	16,28

AISI 4140 Kalite çelikte 3 Numaralı Redüksiyonda çekme arabasının serbest kaldığında neredeyse hattan çıkacağı görülmüştür. Bu durum, AISI 4140 çeliğinin soğuk çekilebilirliği için SAE 1040 çeliğine oranla daha fazla çekme kuvveti uygulandığını göstermektedir.

SAE 1040 ve AISI 4140 kalite çeliklere Şekil 5.5’ te gösterilen Protherm marka ısıtım işlem fırınında 500 °C sıcaklıkta 60 dk ısıtım işlem uygulanmış ve havada soğumaya bırakılmıştır. Isıtım işlem uygulan ısıtım işlem fırını Şekil 5.5’te gösterilmiştir. Isıtım işlem uygulanan numuneler 1040-I ve 4140-I şeklinde adlandırılmışlardır.



Şekil 5.5. Isıl işlem fırını.

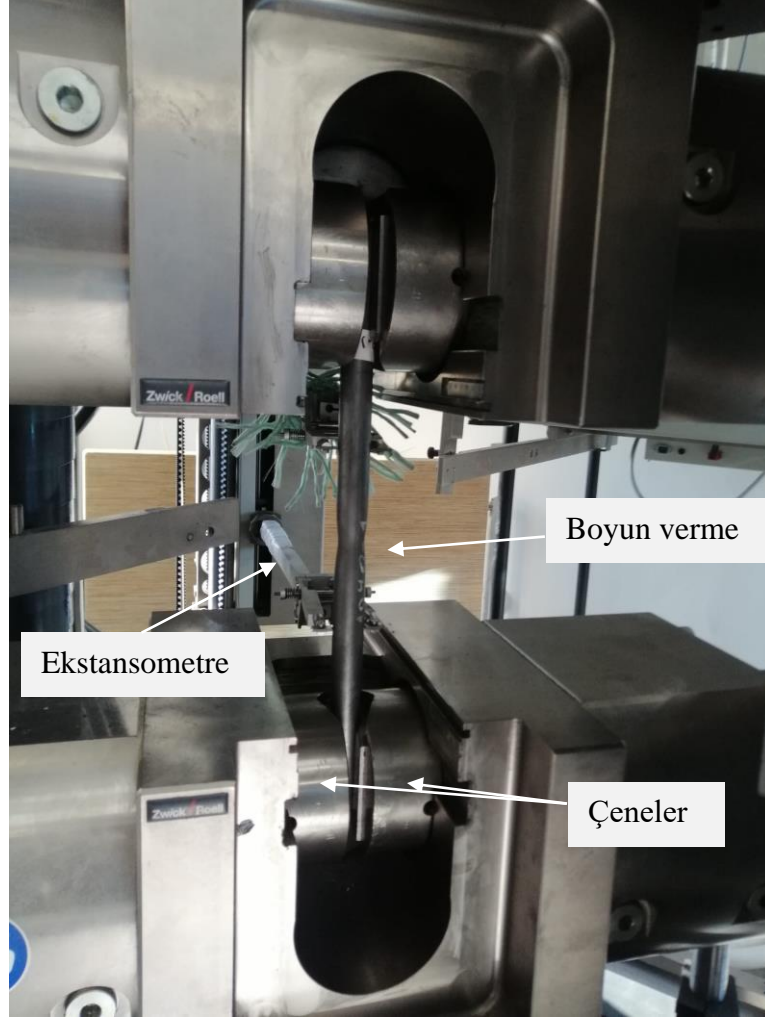
5.3. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Tüm numuneler için SiC kağıtlarıyla (400, 800, 1000, 1200, 2000 mesh) zımparalama, 3 μ elmas süspansiyonla parlatma ve %3 nital çözelti ile dağlama olmak üzere metalografik işlemleri yapılmıştır. Örneklerin mikroyapıları Nikon MA 200 optik mikroskobu ile incelenmiştir. Brinell sertlik testi, bilya çapı 2,5mm ve 187,5 kgf yük altında gerçekleştirilmiştir. Brinell testinin gerçekleştiği sertlik test cihazı Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



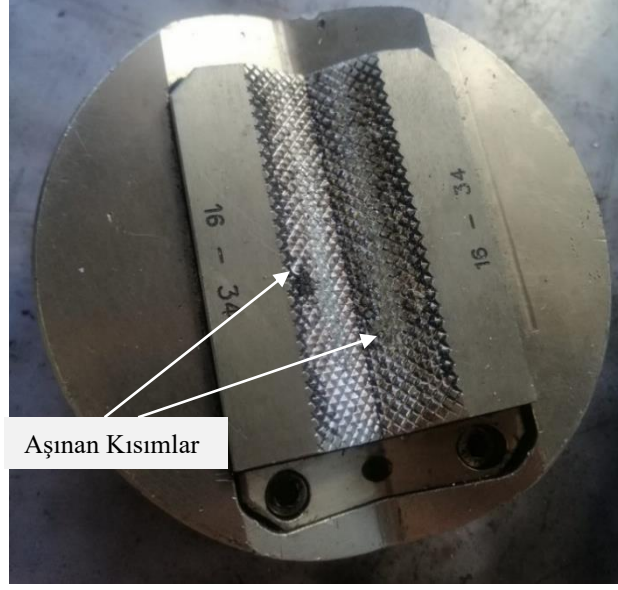
Şekil 5.6. Qness Q250M makro sertlik ölçüm cihazı Brinell (HBW).

Çekme testleri, Zwick marka çekme-basma test cihazı kullanılarak (Şekil 5.7) oda sıcaklığında DIN EN ISO 6892-1 çekme test standardına göre gerçekleştirilmiştir. AISI 4140 Kalite çelikte çekme testi numunesinin sertliğinin fazla olması nedeniyle çekme cihazına ait numuneyi tutan kısmın (çene) numuneyi diş sıyırması diye tanımlanan şekilde tutamamasıyla çekme testi gerçekleştirilememiştir, Şekil 5.8’de görüldüğü üzere çekme test cihazına ait çenede aşınma meydana gelmiştir.



Şekil 5.7. Zwick Roell çekme test cihazı.

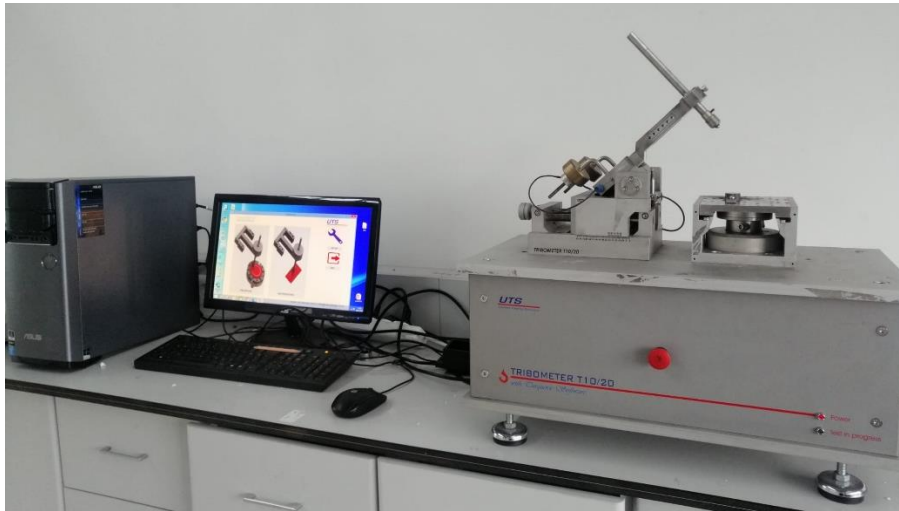
SAE 1040 kalite çeliğe çekme testi uygulanmış ve kopma öncesi boyun verme Şekil 5.7'de gözlemlenmiştir.



Şekil 5.8. Aşınan çene yüzeyleri.

Çekme testi uygulanamayan AISI 4140 çeliğine basma testi uygulanmıştır. Basma testi de aynı test cihazında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. AISI 4140 kalite çeliğe ait 7,5x7,5 mm kare olarak hazırlanmış 7,5 mm yükseklikte numunelere 0,30 mm/dk hızda basma kuvveti uygulanmıştır.

Numunelerin aşınma direncini belirlemek için 20N ve 30N yük altında, 200 m kayma mesafesi için, 48 mm/s kayma hızında ve AISI 52100 çelik bilye kullanılarak UTS Tribometre cihazı (Şekil 5.9) ile aşınma testi yapılmıştır.



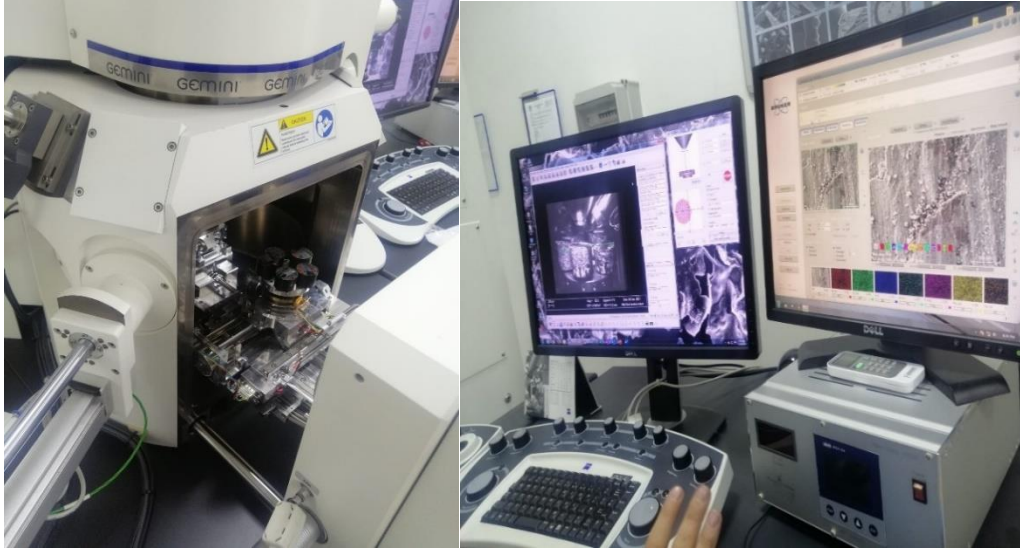
Şekil 5.9. Aşınma test cihazı.

Numunelerin aşınma oranı, Archard'ın katsayı formülüne göre kayma mesafesinin sonunda aşınma hacmi kaybı kullanılarak belirlenmiştir. Aşınan hacim, ISO 4287-1997 standardına göre Mitutoyo SJ-410 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

Örneklerin aşınmış yüzeylerinin mikroyapısı, enerji dağılımlı spektrum (EDS) (Bruker X Flash 6/10) ile donatılmış Carl Zeiss Ultra Plus taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Sem cihazına numunelerin yerleşimi ve görünümü Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Sem cihazına numunelerin yerleşimi ve görünümü.

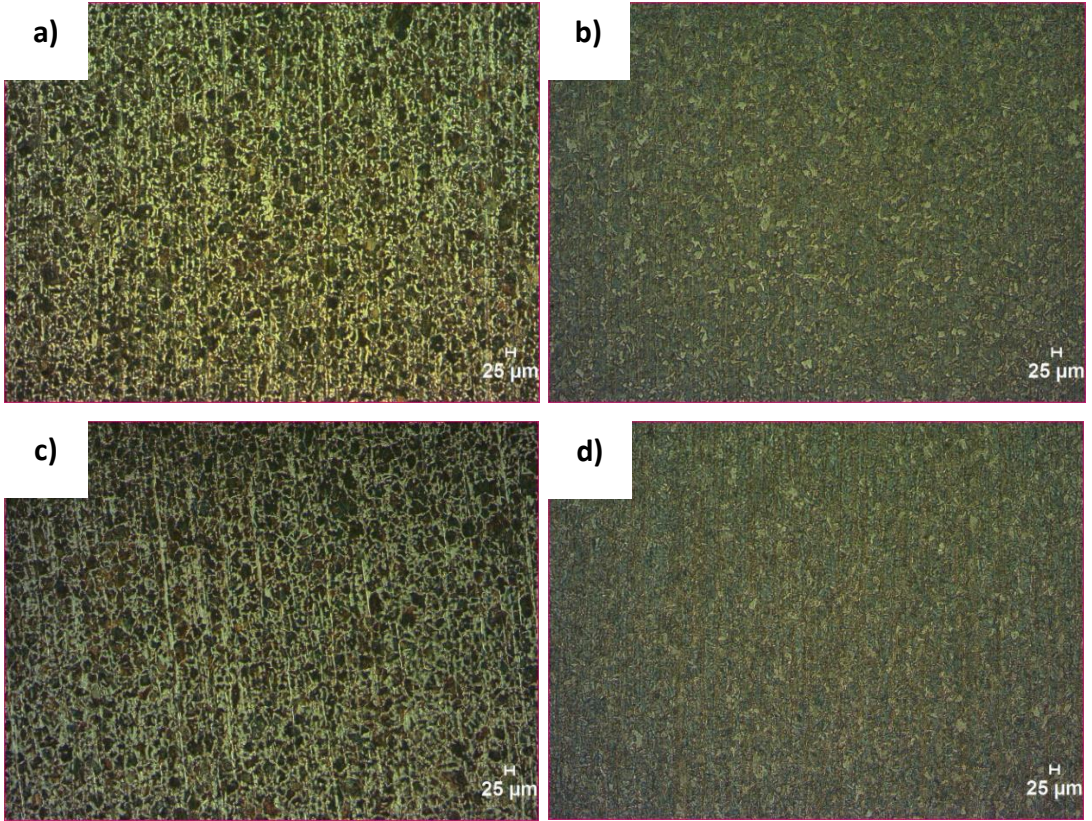
Numunelerin kimyasal bileşimleri ise GNR Atlantis Optik Emisyon Spektrometresi ile ölçülmüştür.

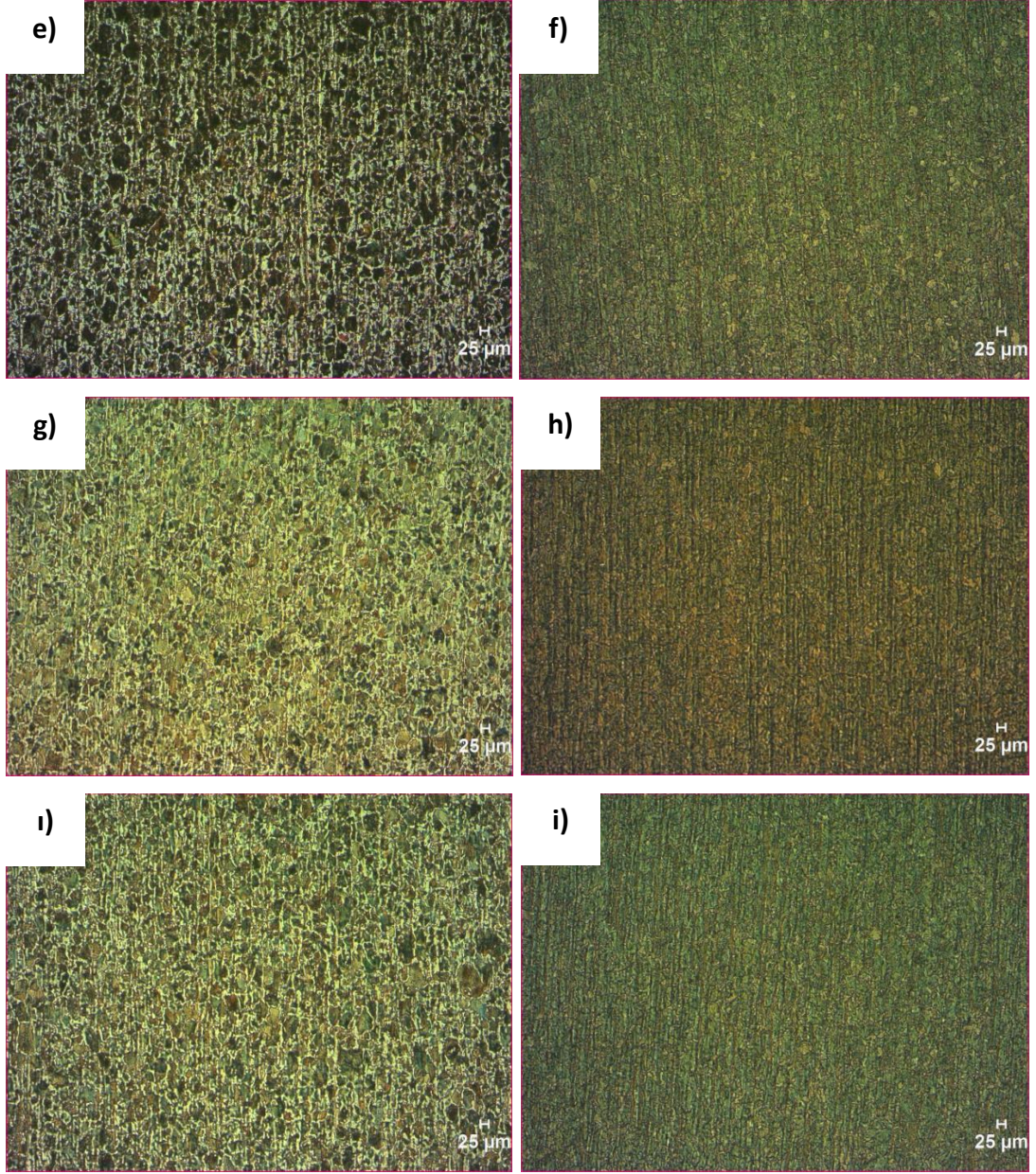
BÖLÜM 6

DENEYSEL BULGULAR

6.1. MİKROYAPI

2 farklı kompozisyondan sıcak haddelenmiş, 3 farklı redüksiyonda soğuk çekilmiş ve 3. redüksiyonda ısıl işlem uygulanmış numunelerin kesit yüzeyleri incelemek için öncelikle kesilmiştir. Akabinde, sıcak bakalit kalıba alınmış, zımparalama, parlatma ve % 3 nital kimyasalı ile dağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin 50X büyütmede mikroyapı görüntüleri Şekil 6.1’de verilmiştir. SAE 1040 kaliteye ait SEM görüntüleri Şekil 6.2 ve 6.3’te, AISI 4140 kaliteye ait SEM görüntüleri Şekil 6.4 ve 6.5’te verilmiştir.



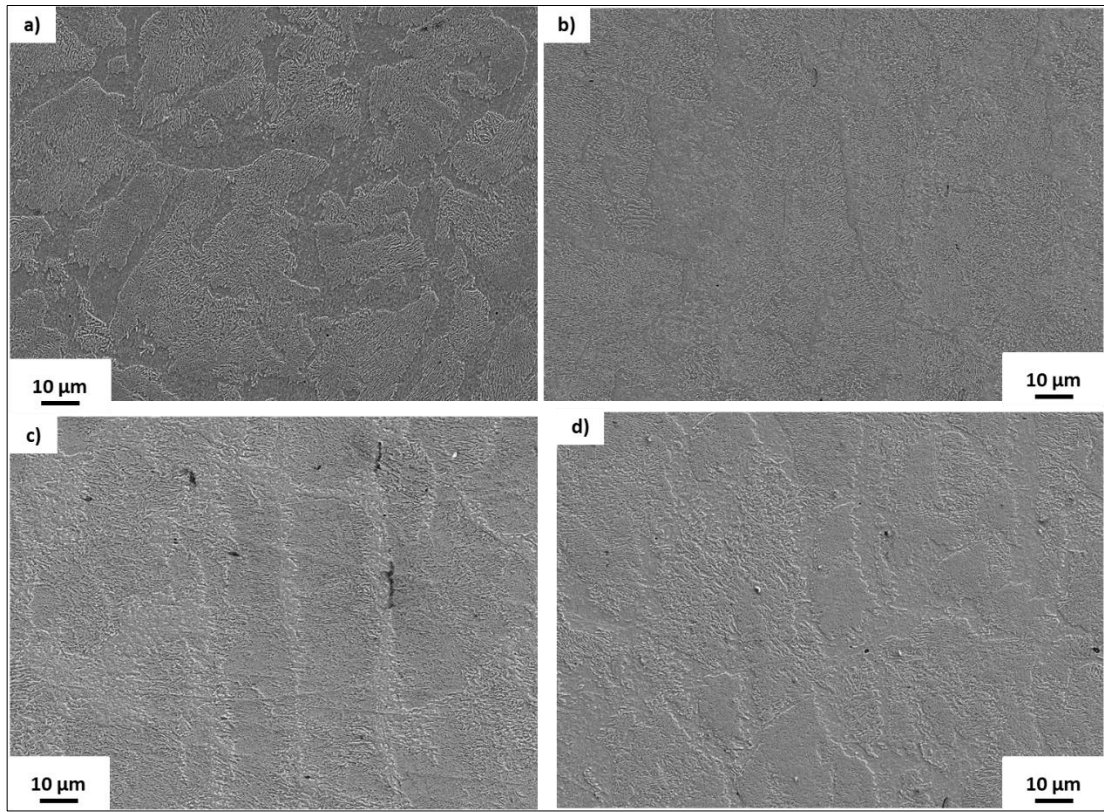


Şekil 6.1. Optik mikroskop görüntüleri a)1040-0 b) 4140-0 c) 1040-1 d) 4140-1 e) 1040-2 f) 4140-2 g) 1040-3 h) 4140-3 ı)1040-I i) 4140-I

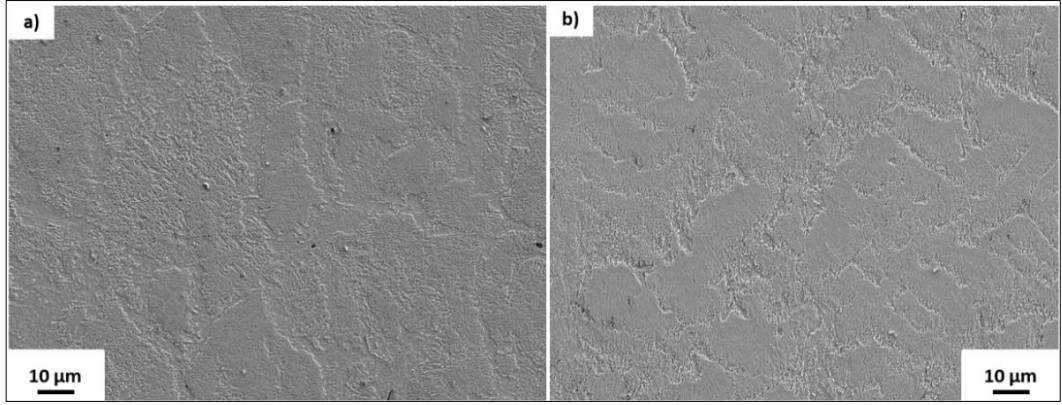
Mikroyapı için optik mikroskop ile 50x büyütmede mikroyapı görüntülerinde redüksiyon oranının artmasıyla yapıdaki çekme yönüne paralel yönlenmelerin arttığı görülmektedir. Soğuk çekme ile matrisin malzemeye basma gerilmesi uygulaması ile metalde pekleşme oluşmaktadır. Pekleşme sonucunda soğuk deformasyona uğramış metallerde sertlik ve dayanım değerlerinin artarken plastik özellikleri düşmektedir [1].

Şekil 6.2’de 1040-0, 1040-1, 1040-2, 1040-3’e ait Şekil 6.3’te 1040-3 ve 1040-I’e ait SEM görüntüleri verilmiş olup optik mikroskoptaki görüntülere benzer yönlendirmeler görülmektedir.

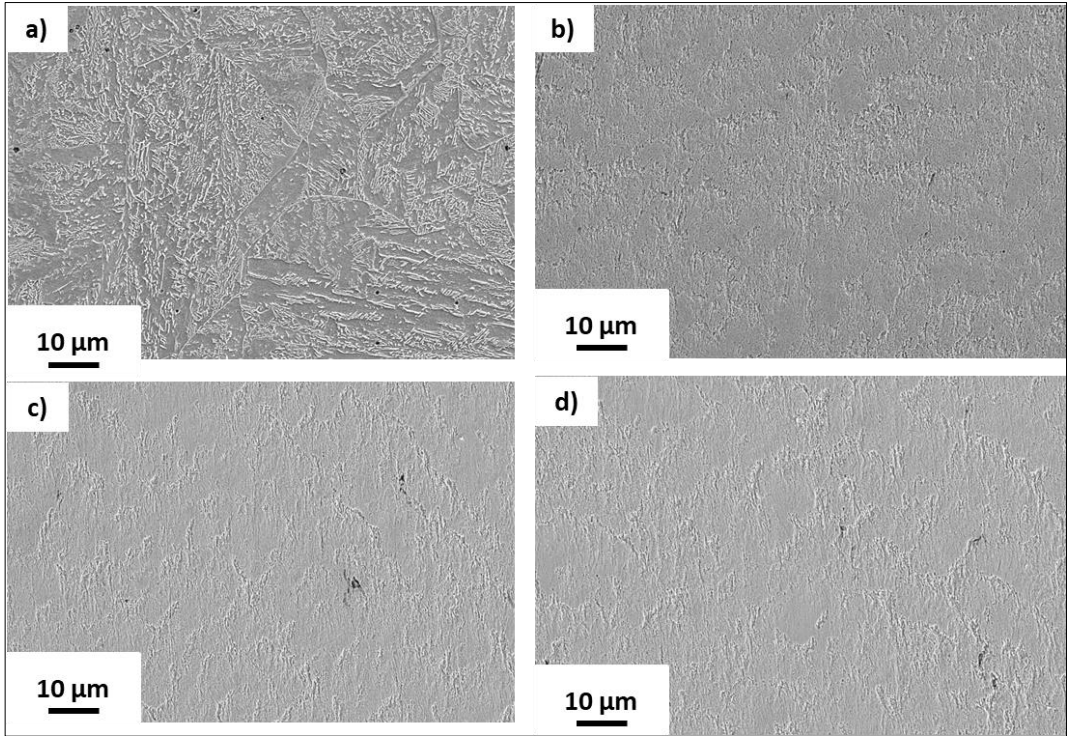
C. Çarboğanın yapmış olduğu tez çalışmasında, soğuk çekme işlemi sonrasında soğuk deformasyon nedeniyle tanelerdeki homojenlik bozulmuş ve çekme yönüne paralel yönde taneler çekme yönünde uzamıştır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında gözlemlenen mikroyapıların literatür ile uyumlu olduğu söylenebilmektedir [1].



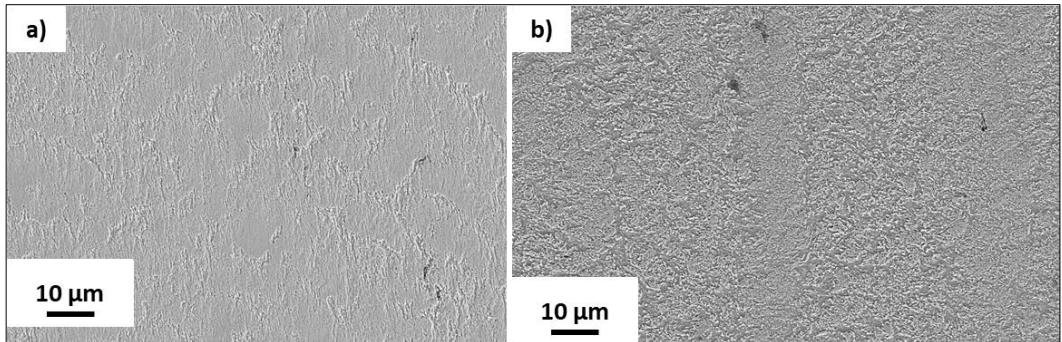
Şekil 6.2. SEM görüntüleri a) 1040-0 b)1040-1 c) 1040-2 d) 1040-3.



Şekil 6.3. SEM görüntüleri a) 1040-3, b)1040-I.



Şekil 6.4. SEM görüntüleri a) 4140-0 b) 4140-1 c) 4140-2 d) 4140-3.



Şekil 6.5. SEM görüntüleri a) 4140-3, b)4140-I.

6.2. MEKANİK ÖZELLİKLER

6.2.1. Çekme Testi

SAE 1040 Çeliğine çekme testi uygulanmış ve test sonuçlarının ortalaması Çizelge 6.1’de ve Şekil 6.6’de gösterilmiştir. Çizelge ve grafikte görüldüğü üzere en düşük çekme dayanımına soğuk haddelene işlemine tabi tutulmayan sıcak haddelenmiş SAE 1040 çeliği sahiptir. Soğuk çekme işlemi uygulanan numuneler daha iyi çekme dayanımı göstermişlerdir. Redüksiyon oranı ile beraber de çekme dayanımları artmıştır. En iyi çekme dayanımına %16 redüksiyona uğramış ve ısıl işlem uygulanmış numune sahip olmuştur. Bir başka deyişle, soğuk deformasyona uğramamış 1040-0 numunesi en düşük çekme dayanımına sahip iken, numunelerin artan redüksiyon oranlarıyla beraber çekme dayanımları da artış göstermiştir.

Çizelge 6.1. SAE 1040 ortalama çekme test sonuçları.

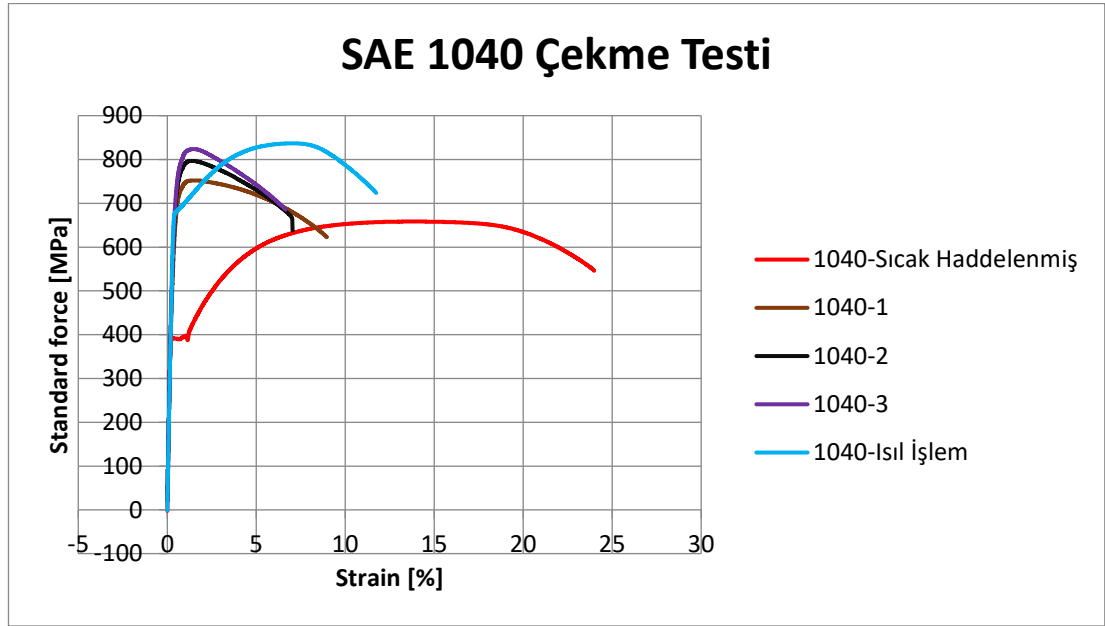
Numune	Redüksiyon Oranı	m_E	$R_{p0.2}$	R_m	F_m	
		GPa	MPa	MPa	kN	
1040-0		219,25	391,06	658,37	299,08	23,74
1040-1	8,56	208,32	681,76	752,20	311,16	8,67
1040-2	12,5	213,99	720,59	797,07	314,95	6,74
1040-3	16,35	214,28	742,72	823,92	311,78	6,33
1040-I	16,35	210,28	681,88	836,95	315,26	11,39

N. Sinan Köksalın yapmış olduğu tez çalışmasında, soğuk çekme işlemi sonrasında Ç1040 kalite numune 500°C, 650°C, 840°C fırında 60dk ısıtılmış, sonra havada soğutulmuştur. Mekanik mukavemet sonuçları incelendiğinde akma, çekme gerilmesinin en iyi 500°C ‘de olduğu, sertliğin 500°C ve 840°C ‘de yakın sonuçlar olduğu görülmüştür. Çalışmalarında 650°C civarında ısıl işlemde yeniden kristalleşme başlayabileceği için, soğuk çekmenin kazandırdığı mukavemet tamamen kaybolabilmektedir. 840 °C’da yapılan ısıl işlem sonucunda da; mukavemet ve sertlik artarken, şekil alabilirlik değerlerinde ise azalma görülmüştür [4].

Bu çalışmada da soğuk çekilmiş çubuğa 500°C’de 60dk ısıl işlem uygulanmış havada soğumaya bırakılmış çubuklarda; mukavemet, sertlik, % uzama değerleri arttığı görülmüştür, literatür çalışmaları bu sonucu destekler niteliktedir [4].

Çekme test grafiği Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Çekme test grafiğinde % uzamanın soğuk çekme öncesi 23,74 olduğu, soğuk çekme sonrasında 8,67 ye düştüğu artan redüksiyon oranı ile % uzamanın 6,33'e düştüğu görülmüştür. %6,33 oranındaki uzama oranı uygulanan ısıl işlem ile %11,39'a artmıştır. Isıl işlem sonrası % uzama oranı ve çekme kuvveti artarken akma noktasının 1. Redüksiyondaki akma noktasına gerilediği görülmüştür.

G. Dönmezin yapmış olduğu tez çalışmasında, soğuk deformasyonun malzemenin deformasyon sertleşmesi ile mukavemetini arttırdığı sünekliliğini düşürdüğu görülmüştür [20]. Dolayısıyla bu tez çalışmasında elde edilen çekme değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 6.6. SAE 1040 çekme test grafiği.

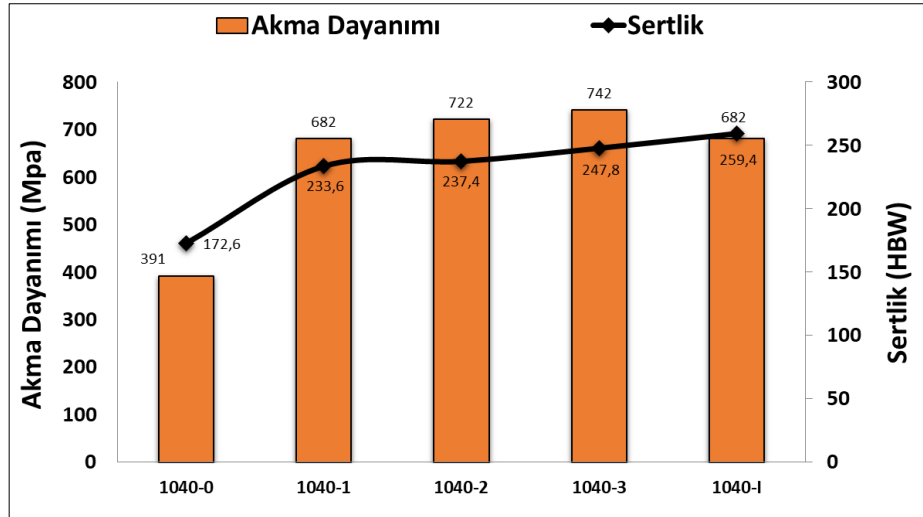
6.2.2. Sertlik

SAE 1040 Kalitesinde sertlik değerlerinin soğuk çekme prosesinde arttığı görülmektedir. Soğuk çekme sonrası en sert yapının elde edildiği 1040-3 numunesi olup sertlik değerinin arttığı görülmektedir. Sertlik değerlerin Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. SAE 1040 çeliğe ait sertlik ve çekme testi sonuçları.

Numune	Redüksiyon Oranı	Sertlik (HBW)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama
1040-0		172,6	391	658	23,74
1040-1	8,56	233,6	682	752	8,45
1040-2	12,5	237,4	722	800	6,76
1040-3	16,35	247,8	742	824	6,63
1040-I	16,35	259,4	682	837	11,39

SAE 1040 kalite çeliğin akma dayanımı ve sertlik grafiği Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Soğuk çekme prosesinde redüksiyon artışı ile akma dayanımı ve sertlik değerleri artış göstermiştir. 1040-3’e ısıtıl işlem uygulanması ile akma dayanımı 1040-1 ile aynı değere düşmüştür ancak sertliği ısıtıl işlem sonrasında artmıştır.



Şekil 6.7. SAE 1040 kalite çeliğin akma dayanımı ve sertlik grafiği.

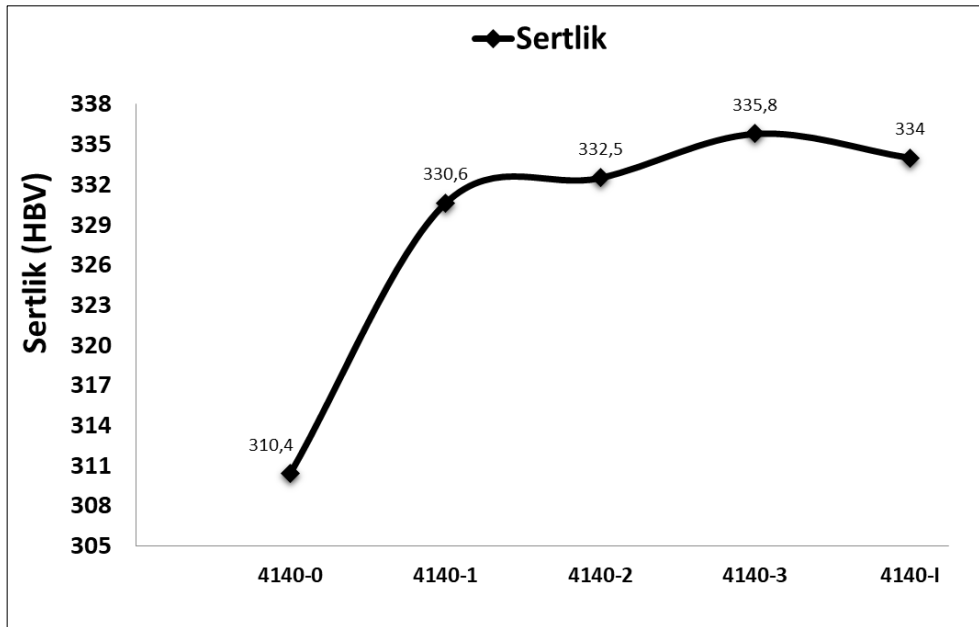
SAE 4140 Kalitesinde sertlik değerlerinin soğuk çekme prosesinde arttığı görülmektedir. Soğuk çekme sonrası en sert yapının elde edildiği 4140-3 olup sertlik değerinin ısıtıl işlem sonrası yok sayılabilecek kadar az miktarda azaldığı görülmektedir. Literatürde yaklaşık olarak “Çekme Gerilmesi (MPa) = 3,45 Brinell Sertlik Değeri (HBW)” eşitliği kullanılmaktadır [21]. AISI 4140 çeliğinde çekme testi gerçekleştirilemediği için bu hesaplamayla çekme dayanımı hesaplanmış Çizelge 6.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. AISI 4140 çeliğe ait sertlik test sonuçları.

Numune	Redüksiyon Oranı	Sertlik (HBW)	$\sigma_{\text{ç}}(\text{MPa}) = 3,45 \cdot \text{Sertlik (HBW)}$
4140-Sıcak Haddelenmiş	-	310,4	1070
4140-1.Redüksiyon	8,40	330,6	1140
4140-2.Redüksiyon	12,42	332,5	1130
4140-3.Redüksiyon	16,28	335,8	1158
4140-Isıl İşlem Görmüş	16,28	334	1152

C. Çarboğanın yapmış olduğu tez çalışmasında, soğuk çekme işlemi sonrasında sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Dolayısıyla bu tez çalışmasında elde edilen sertlik değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu söylenebilmektedir [1].

AISI 4140 kalite çeliğin sertlik grafiği Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Soğuk çekme prosesinde redüksiyon artışı ile sertlik değerleri artış göstermiştir ancak bu sertlik artışı SAE 1040 çeliğinden farklı olarak çok düşük farklar olarak görülmüştür. 4140-3’e ısıl işlem uygulanması ile sertlikte soğuk çekme işleminin farklı redüksiyon oranlarında ki numuneler gibi kayda değer sertlik değişimi yaşanmamıştır.

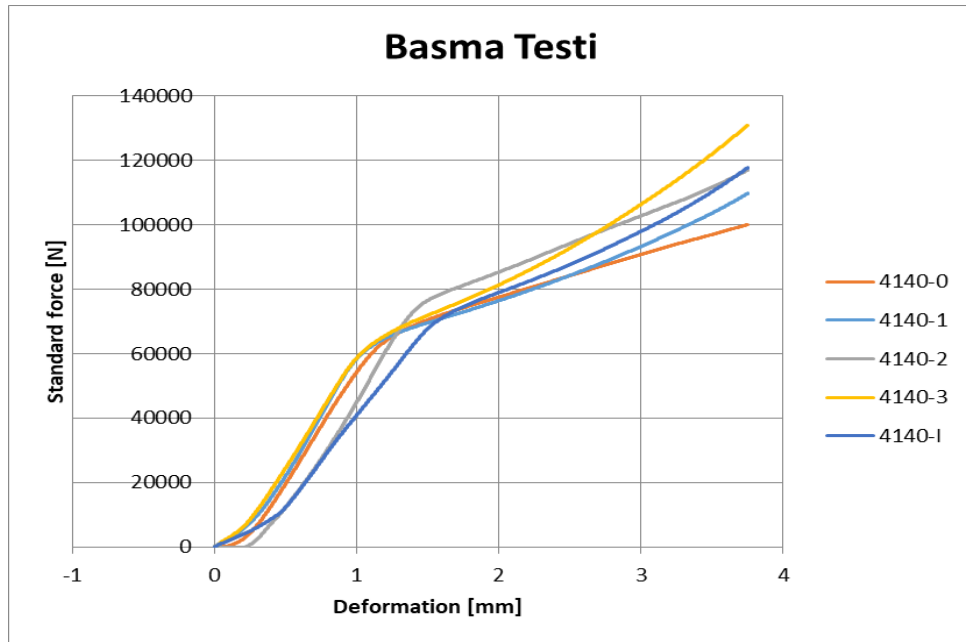


Şekil 6.8. AISI 4140 kalite çeliğin sertlik grafiği.

6.2.3. Basma Testi

AISI 4140 çeliğine basma testi uygulanmış olup test sonuçları Şekil 6.9'de gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere aynı deformasyon miktarının elde edilmesi için gereken en düşük kuvvete soğuk çekme prosesine girmemiş sıcak haddelenmiş numune (4140-0) sahiptir. Soğuk çekme işlemi uygulanan numuneler en yüksek kuvvetlere sahip olmuştur.

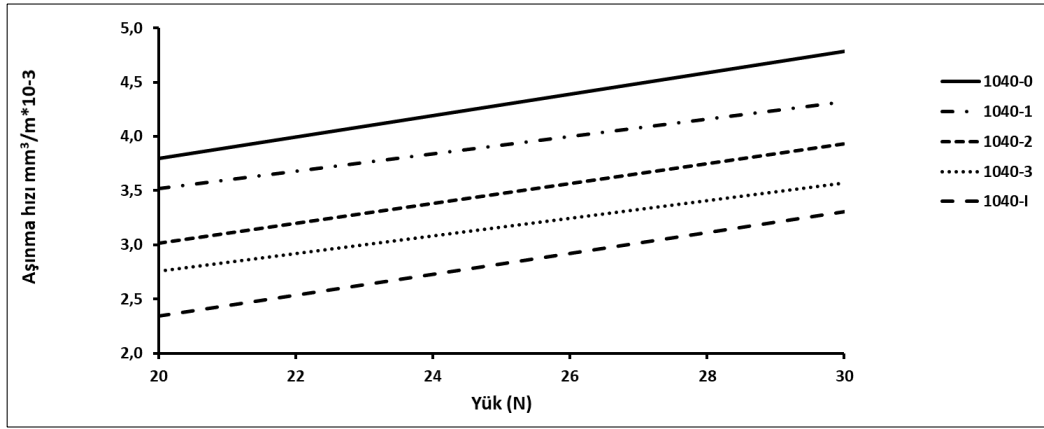
Basma testinin gerçekleştirildiği Zwick Roell marka cihaz 7,5mm olan numune yüksekliğinin %50 si olan numune yüksekliği 3,75mm'e düştüğünde basma test cihazı tarafından otomatik durdurulmuştur. Basma testinde akma noktası 6000N ve 8000N arasında yoğunlaşmış olduğu görülmektedir. 4140-0 numunesi ile 4140-1 numunesini 3,75mm'e düşürebilmek için 4140-0 numunesine uygulanan basma kuvvetinden %9,75 daha fazla basma kuvveti uygulanması gerekmiştir. 4140-1 numunesi ile 4140-3 numunesini 3,75mm'e düşürebilmek için 4140-1 numunesine uygulanan basma kuvvetinden %19,25 daha fazla basma kuvveti uygulanması gerekmiştir. Isıl işlem uygulanmış 4140-I numunesine 4140-3 numunesine uygulanan basma kuvvetine göre %10,06 daha az basma kuvveti uygulanması gerekmiştir. Basma test sonuçları sertlik testi sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.9 AISI 4140 kalite çeliğe ait basma grafiği.

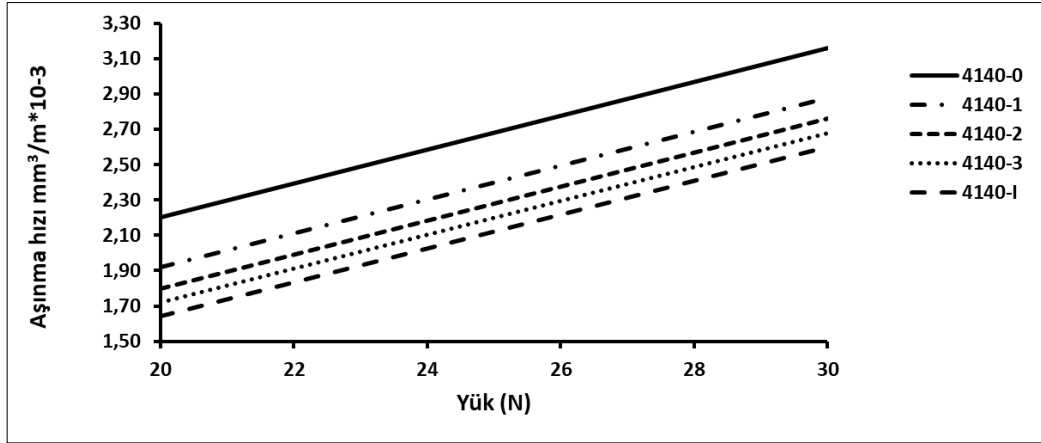
6.3. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER

SAE 1040 ve AISI 4140 çeliği için 20N ve 30N olmak üzere iki farklı yük altında numunelere uygulanan 8mm aşınma yüzeyinde toplam 200m mesafe katedilerek gerçekleştirilen aşınma testi sonuçları Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü üzere en düşük aşınma dayanımına soğuk haddelene işlemine tabi tutulmayan sıcak haddelenmiş SAE 1040 çeliği ve AISI 4140 çelikleri sahiptir. Soğuk çekme işlemi uygulanan numuneler daha iyi aşınma direnci göstermişlerdir. Redüksiyon oranı ile beraber de aşınma dirençleri artmıştır. En iyi aşınma direncine %16 redüksiyona uğramış ve ısıl işlem uygulanmış numune sahip olmuştur. Archard yasasına [22] göre numunelerin aşınma oranları, sertlikleri ile ters orantılıdır. Elde edilen bulguların Archard yasasına uygun olduğu söylenebilmektedir. Bir başka deyişle, en düşük sertliğe sahip işlem görmemiş 1040 ve 4140 çeliğinin aşınma dayanımı en düşük iken, numunelerin artan sertlik değerleriyle beraber aşınma dayanımları da artış göstermiştir.



Şekil 6.10. SAE 1040 kalite çeliğe ait aşınma grafiği.

Soğuk çekme işlemi ile %8,56 redüksiyon oranında sıcak haddelenmiş SAE 1040 çeliğinin aşınma dayanımı %10 artış göstermiştir. Redüksiyon oranı sırasıyla %12,50 ve %16,35’e çıkarıldığında ise aşınma direnci %18,33 ve %25,83 artış göstermiştir. Ayrıca ısıl işlem uygulanınca aşınma değeri %16,35 redüksiyon oranına göre ekstra %6,74 artış göstermiştir.



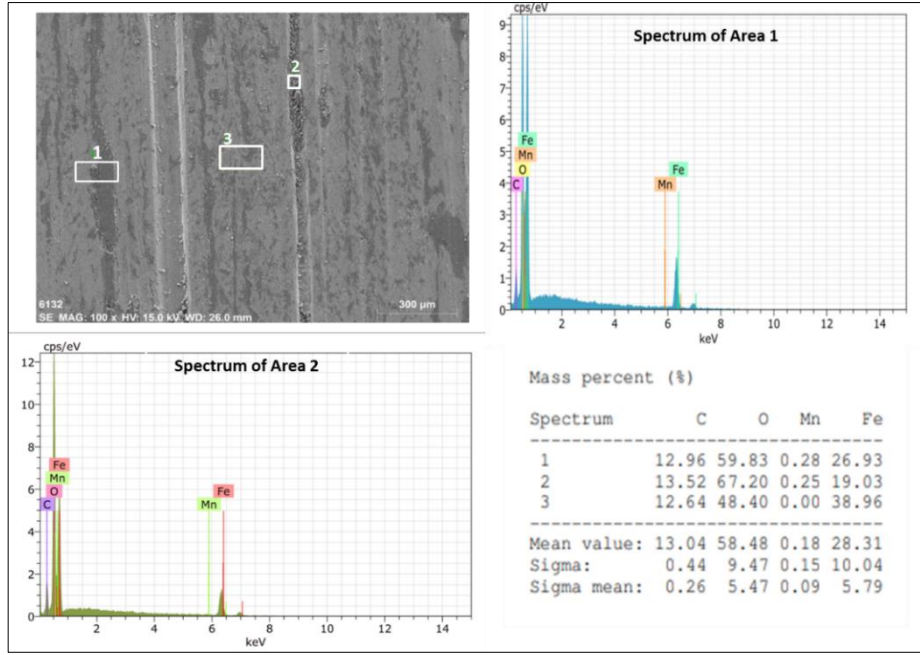
Şekil 6.11. AISI 4140 kalite çeliğe ait aşınma grafiği.

Soğuk çekme işlemi ile %8,40 redüksiyon oranında sıcak haddelenmiş AISI 4140 çeliğinin aşınma dayanımı %8,86 artış göstermiştir. Redüksiyon oranı sırasıyla %12,42 ve %16,28'e çıkarıldığında ise aşınma direnci %12,65 ve %15,18 artış göstermiştir. Ayrıca ısıl işlem uygulanınca aşınma değeri %16,28 redüksiyon oranına göre ekstra %2,98 artış göstermiştir.

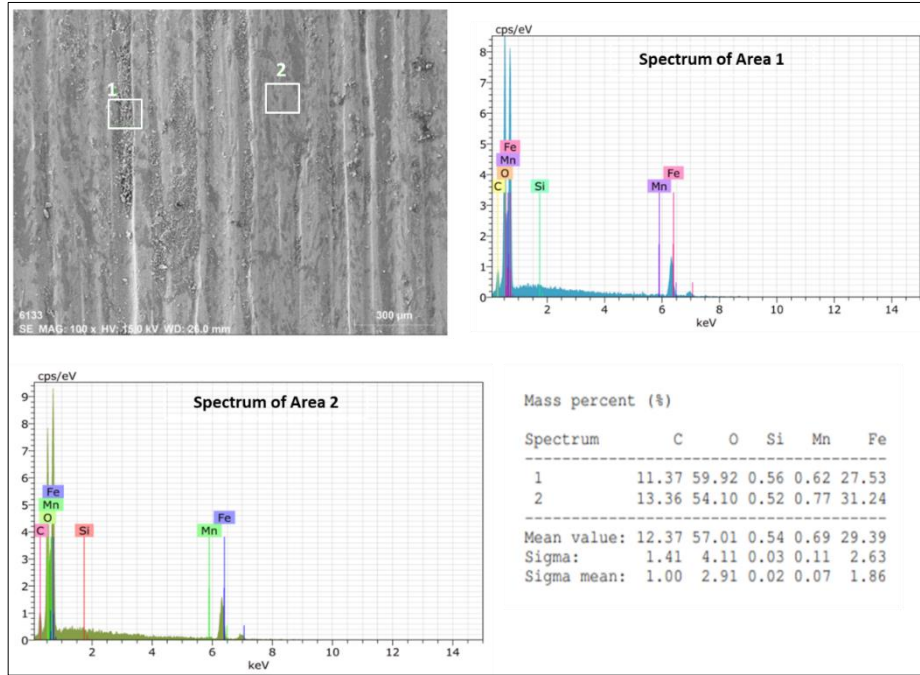
SAE 1040 kalitesi AISI 4140 kalitesine göre aşınma sonuçlarında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Aşınma testi sonrasında numunelerin aşınma mekanizmalarının incelemek amacıyla aşınan numune yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda incelenmişlerdir.

1040-0 numunesinin 30N kuvvet altında aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu Şekil 6.12'de gösterilmiştir. SEM-EDX analiz derin aşınma çiziklerinin ve aşınmadan kaynaklı olukların olduğu, kayma sırasında ortaya çıkan sürtünme ısısı temas yüzeyinde oksidasyon oluşumuna neden olduğu gözlemlenmiştir [23].

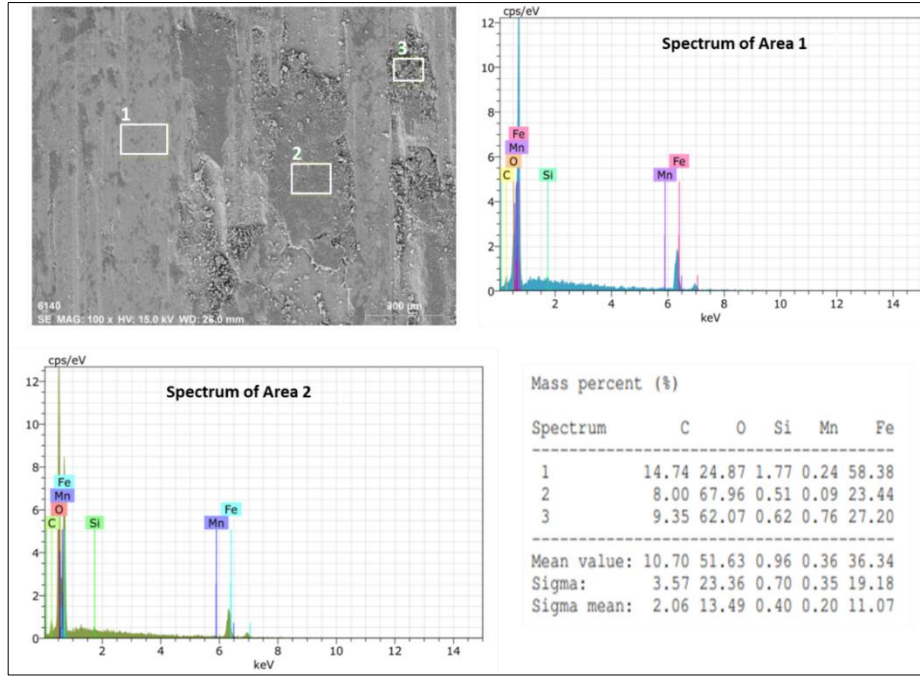
1040-1 numunesinin 30N kuvvet altında aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu Şekil 6.13'te gösterilmiştir. SEM görüntülerinde aşınma yönü belirgin durumda görülmektedir. Derin aşınma çiziklerinin ve olukların 1040-0 numunesine göre küçüldüğü, EDX analiz sonuçlarında ise oksitlenmenin 1040-0 numunesine göre hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12. 1040-0 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.



Şekil 6.123. 1040-1 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.

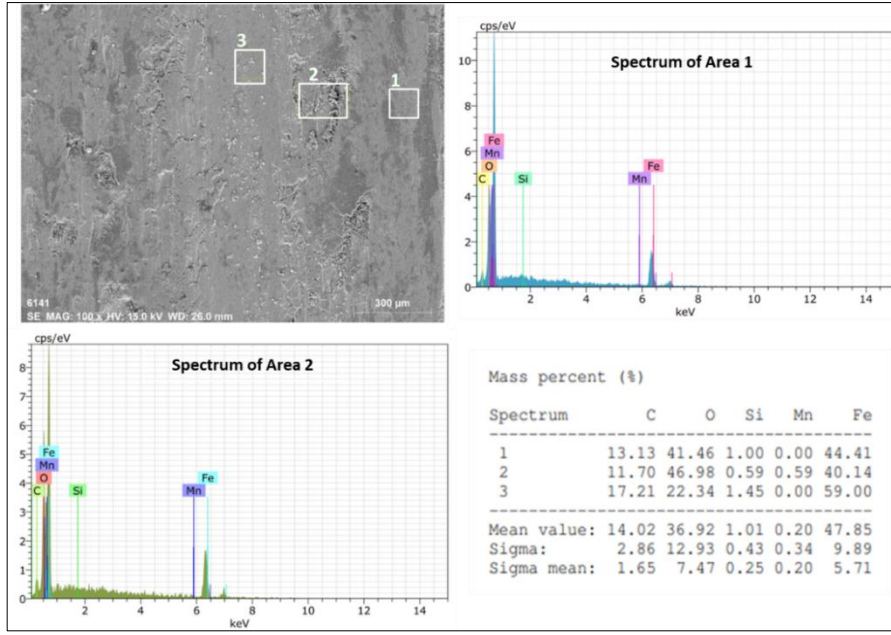


Şekil 6.134. 1040-2 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.

1040-2 numunesinin 30N kuvvet altında aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu Şekil 6.14'te gösterilmiştir. SEM görüntülerinde derin aşınma çiziklerinin ve olukların 1040-1 numunesine göre belirgin düzeyde azaldığı, EDX analiz sonuçlarında ise oksitlenmenin 1040-1 numunesine göre bir miktar daha az olduğu gözlemlenmiştir.

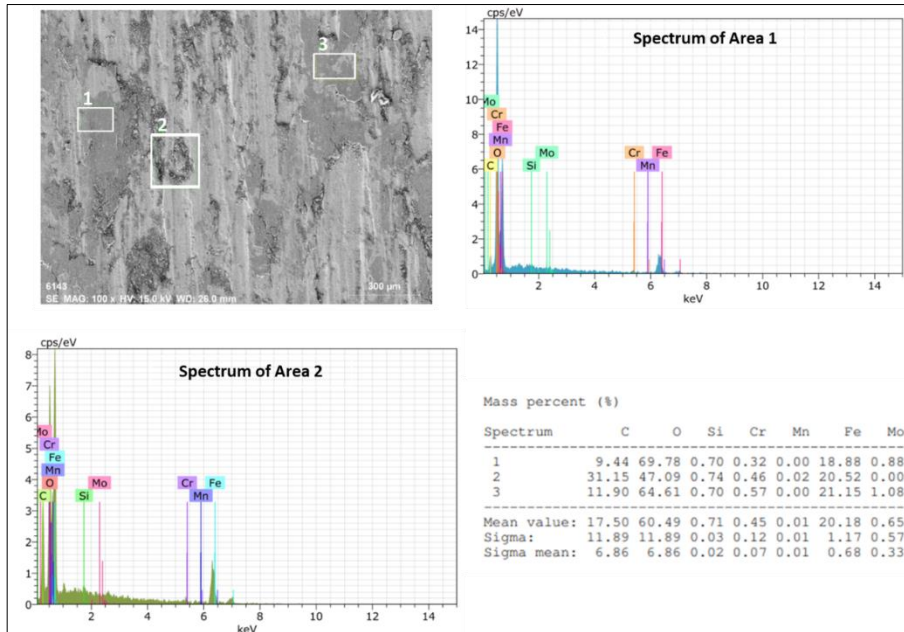
1040-3 numunesinin 30N kuvvet altında aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu Şekil 6.15'te gösterilmiştir. SEM görüntülerinde derin aşınma çiziklerinin ve aşınmadan kaynaklı olukların 1040-2 numunesine göre neredeyse tamamen ortadan kalktığı, EDX analiz sonuçlarında ise yine oksitlenmenin olduğu gözlemlenmiştir.

SAE 1040 çeliği için yapılan SEM incelemeleri sonucunda aşınma yüzeylerindeki değişimler aşınma dirençlerindeki değişimi doğrulamaktadır. SAE 1040 çeliğine benzer bir şekilde AISI 4140 çeliği için de yüzey incelemeleri yapılmıştır.

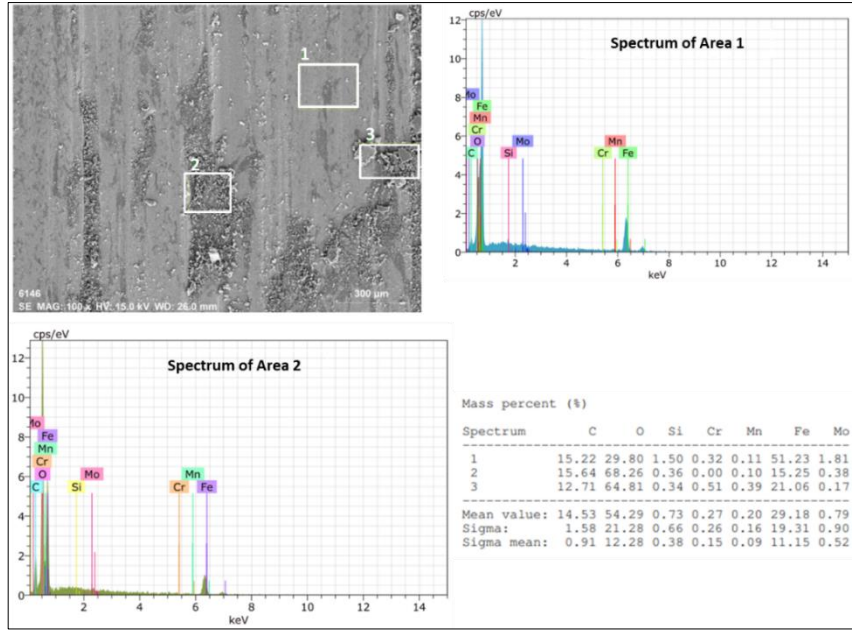


Şekil 6.145. 1040-3 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.

4140-0 numunesinin 30N kuvvet altında aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu Şekil 6.16'de gösterilmiştir. SEM görüntülerinde yüksek aşınmanın gerçekleştiği, derin aşınma çiziklerinin ve aşınmadan kaynaklı olukların olduğu, EDX analiz sonuçlarında ise oksitlenmenin fazla olduğu gözlemlenmiştir.

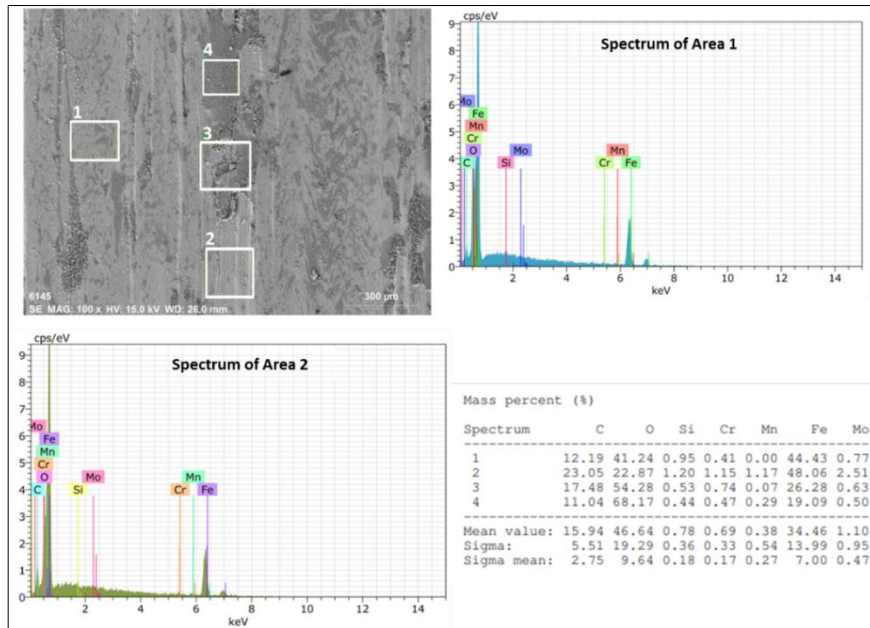


Şekil 6.156. 4140-0 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.



Şekil 6.167. 4140-1 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.

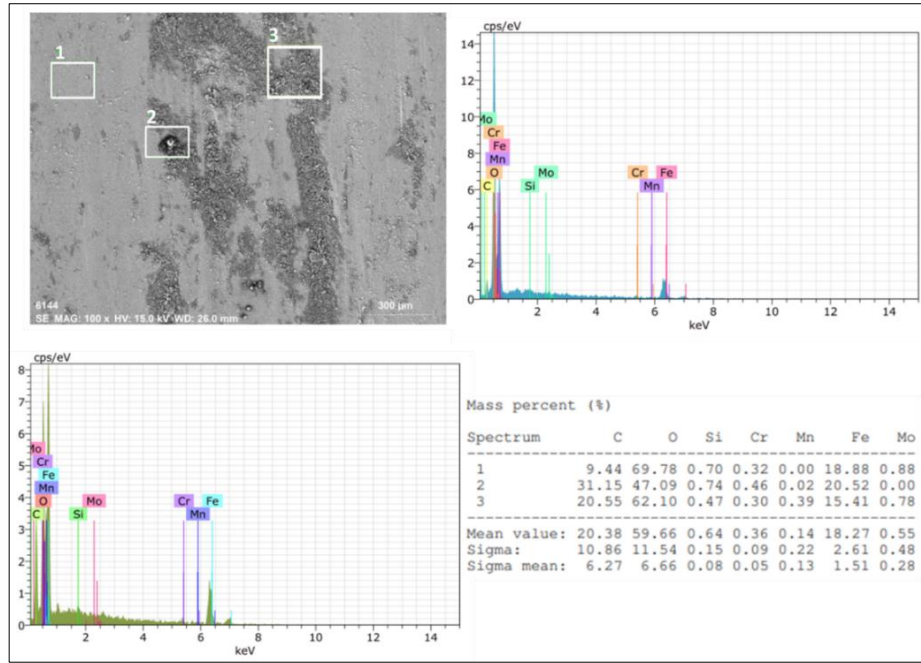
4140-1 numunesinin 30N kuvvet altında aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu Şekil 6.17’de gösterilmiştir. SEM-EDX analizlerinde, derin aşınma çiziklerinin ve aşınmadan kaynaklı olukların 4140-0 numunesine göre azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.18. 4140-2 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.

4140-2 numunesinin 30N kuvvet altında aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu Şekil 6.18’de gösterilmiştir. SEM görüntülerinde olukların genişliğinin 4140-1 numunesine göre daraldığı, çiziklerin ise azaldığı söylenebilmektedir.

4140-3 numunesinin 30N kuvvet altında aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu Şekil 6.19’de gösterilmiştir. SEM-EDX analizinde derin aşınma çiziklerinin 4140-2 numunesine göre oldukça azaldığı, oluk oluşumunun neredeyse görülmediği ve yoğun debrislerin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 6.19. 4140-3 numunesinin aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonucu.

AISI 4140 çeliğinde numunelerin aşınma oranlarının birbirlerine yakın olması sebebiyle aşınan yüzeylerindeki değişimler, SAE 1040 çeliğinde daha belirgindir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİ

Bu çalışmada aynı ebat iki farklı kalite ile farklı kalıplar, farklı redüksiyon oranında soğuk çekme işlemine tabi tutulmuş olup, bu mamullerden alınan numunelere metalografik-mikroyapı, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Gerçekleşen redüksiyon artışı ile mikroyapıda yönlennmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Yapıdaki yönlennmelerin redüksiyon oranıyla orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir.
- Mikroyapı da gerçekleşen yönlennmeler ile oluşan safsızlıkların soğuk çekme yönünde yönlendiği gözlemlenmiştir.
- Soğuk çekme işleminde artan redüksiyon ile çekme kuvvetlerinde önemli artışlar olmuştur.
- Soğuk deformasyon oranının artışı ile sertliğin arttığı buna bağlı olarak aşınmanın azaldığı gerçekleştirilen sertlik ve tribolojik testlerde gözlemlenmiştir.
- Tribolojik testler sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde artan redüksiyon oranının tribolojik özellikleri iyileştirdiği, SEM görüntülerde aşınma yüzeylerinin en yüksek redüksiyonda daha az derinlikte çizikler olduğu gözlemlenmiştir.
- Soğuk deformasyona uğramış metallerde sertlik ve çekme dayanım değerlerinin artarken süneklilik özelliklerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Soğuk çekilmiş SAE 1040 kalite ile AISI 4140 kalite arasındaki mekanik özellikler incelenmiş, AISI 4140 çeliğinde krom, molibden, nikel etkisi ile sertlik, çekme kuvvetinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Özetle, soğuk çekme işleminde SAE 1040 ve AISI 4140 kalite çeliğe 3 farklı redüksiyon sonrasında mekanik özellikleri en iyi olan en yüksek redüksiyonda görülmüştür. SAE 1040 kalite 3.redüksiyon numunesine 500°C 60dk ısıtıl işlem uygulanmıştır. Uygulanan ısıtıl işlem ile numunenin akma kuvveti azalırken çekme ve % uzama değerinin arttırdığı görülmüştür. Aynı şekilde uygulanan ısıtıl işlem ile AISI 4140 çeliğinin sertlik ve basma dayanımı değerlerinde iyileşme olmuştur. Ayrıca, tezin bir başka bulgusu ise soğuk çekme ile mekanik özelliklerde iyileşmenin SAE 1040 çeliği için AISI 4140 çeliğine göre daha belirgin olmasıdır.

Tez çalışmasında bahsedildiği üzere ısıtıl işlem olumlu etki göstermiştir. Ancak bu tez çalışmasında redüksiyon oranının etkisi parametrik incelenirken ısıtıl işlem tek bir parametrede incelenmiştir. İlerleyen çalışmalarda ısıtıl işlemin de farklı sıcaklık ve süreler için parametrik olarak incelenmesi önerilmektedir.

12. İnternet: "Entegre Kirlilik Önlenmesi ve Kontrolü (IPPC)", https://kipdf.com/entegre-kirlilik-nlenmesi-ve-kontrol-ippc_5b3866f7097c47006a8b46c0.html (2022).
13. Bayram, H., "Ekstrüzyon yönteminde sıcaklık, ekstrüzyon hızı ve sürtünme parametrelerinin profil kalitesine etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2008).
14. Batuk, Ç., "AA7075 alüminyum alaşımlarının konik şekillendirilebilirliğine işlem parametrelerinin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2018).
15. Özçelik, G., "Derin çekme işleminin simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya (2008).
16. Yıldız, H. and Kırılı, O., "Derin çekme işleminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (3): 317–326 (2004).
17. Erhuy, C. G., "Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sacların şekillendirilebilirlik özelliği ve mekanik karakteristikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2001).
18. Satıcı, M. E., "Kumlama işleminin ve bu işleme etkiyen parametrelerin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2004).
19. Uyar, Ç., Atar, E., Kayalı, E., and Çimenoglu, H., "21Mn5 Kalite Çelik Çubukta Soğuk Çekme Oranının Yeniden Kristalleşme Davranışına Etkisi".
20. Dönmez, G., "Zincir Çeliklerinin Soğuk Çekme Oranına Bağlı Olarak Deformasyon Davranışlarının Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2003).
21. İnternet: Savunma Bilimleri Dergisi "AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi", <https://dergipark.org.tr/en/pub/khosbd/article/477252> (2022).
22. Turan, M. E., Sun, Y., and Akgul, Y., "Improved wear properties of magnesium matrix composite with the addition of fullerene using semi powder metallurgy", *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 26 (2): 130–136 (2018).
23. Tanriverdi, A. N., "Comparison of the effects of graphene and graphite addition on microstructure and mechanical properties of iron matrix metals via powder metallurgy", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük (2021).

ÖZGEÇMİŞ

Yücel YILMAZ ilkokulu İstanbul'da, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. 2014 yılında Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde öğrenime başlayıp 2020 yılında mezun oldu. 2020 yılında başladığı, yüksek lisans eğitimini 2022 yılında Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında tamamladı. 2020 yılından beri Çağ Çelik A.Ş. 'de Kalite ve Eğitim Mühendisi olarak çalışmaktadır.