

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



100Cr6 ÇELİĞİNDEN BURÇ İMALATINDA İNDÜKSİYONLA
YÜZEY SERTLEŞTİRME UYGULAMASI VE
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT CAN DURAN

Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. İrfan AY

Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan ERBAŞ

BALIKESİR, OCAK-2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Murat Can DURAN tarafından “100Cr6 ÇELİĞİNDEN BURÇ İMALATINDA İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME UYGULAMASI VE AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışmasının son sınavı 28/01/2016 tarihinde yapılmış olup, kurula verilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ

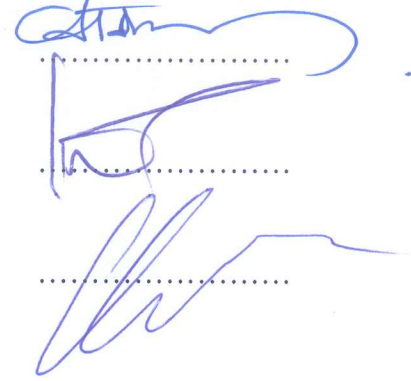
Üye

Prof. Dr. İrfan AY

Üye

Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan ERBAŞ

İmza



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tezi Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu onamıştır.

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

ÖZET

**100Cr6 ÇELİĞİNDE BURÇ İMALATINDA İNDÜKSİYONLA
YÜZEY SERTLEŞTİRME UYGULAMASI VE
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MURAT CAN DURAN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. ALAADDİN TOKTAŞ)
BALIKESİR, 2016**

Bu çalışmada, burç imalatında kullanılmak üzere 100Cr6 çeliğine 15 dev/dk dönme hızında indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Sertleştirme işlemi sonrasında merkeze doğru sertlik ve içyapı değişimi incelenmiş, sertleşmiş tabaka kalınlığı belirlenmiştir. İmal edilecek burcun dış ölçüleri sertleşen tabakada olmak koşuluyla indüksiyonla sertleştirilen yüzeylere ball on disk tipi aşınma deneyleri; kuru ortamda, oda sıcaklığında, 49,2 mm/sn kayma hızında, 2,5, 5 ve 10 N'luk kuvvetler altında yapılmıştır. Aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayıları elde edilmiş, aşınan yüzeylerdeki aşınma izleri optik ve elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Deneyler sonucunda, indüksiyon işlemi ile yüzeyde belirlenen martenzitik yapıya ulaşılmış ve çekirdek sertliğinden yaklaşık 2,5 kat daha fazla yüzey sertliği elde edilmiştir. Aşınma deneylerinde en fazla ağırlık kaybı 5 N kuvvet uygulandığında meydana gelmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: 100Cr6, çelik, indüksiyon, sertlik, aşınma, martenzit.

ABSTRACT

**THE EXAMINATION OF INDUCTION HARDENING APPLICATION AND
WEAR BEHAVIOUR IN MANUFACTURING OF
BUSHING OF 100Cr6 STEEL
MSc THESIS
MURAT CAN DURAN
BALIKESİR UN, INS SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. ALAADDİN TOKTAŞ)
BALIKESİR, 2016**

In this study, induction surface hardening process was performed at 15 rev/min rotating speed to 100Cr6 steel for manufacturing bush. After hardening, the variation of hardness and microstructure and the hardened layer thickness were examined. Ball-on disc type wear tests were carried out on induction hardened surfaces so long as the outside dimensions of the designed bush are on the hardened layer. Wear tests were performed at room temperature in dry medium, at 49,2 mm/s sliding speed and under 2,5 N, 5 N and 10 N forces. The coefficients of friction were obtained during wear tests. The wear tracks were investigated by optic and electron microscopes. As a result of the tests, the expected martensitic structure was obtained on the surfaces by induction hardening and the surface hardness was 2,5 times more than the core hardness. The highest weight loss was obtained when 5 N force was applied in wear tests.

KEYWORDS: 100Cr6, steel, induction, hardness, wear, martensite.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
KISALTMALAR	ix
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
2. 100Cr6 ÇELİĞİ	5
2.1 Rulman Çelikleri	5
2.1.1 Bazı Rulman Çeşitleri	7
2.2 100Cr6 Çeliğinin Genel Özellikleri	8
2.2.1 Krom.....	10
2.3 100Cr6 Çeliği İle Yapılan Çalışmalar	11
3. İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME	27
3.1 Çeliklerin Sertleştirilmesi.....	27
3.1.1 Sertleştirme İşleminin Aşamaları.....	28
3.1.1.1 Ön Isıtma	28
3.1.1.2 Östenite Dönüştürme.....	29
3.1.1.3 Bekletme-Isı Emdirme	29
3.1.1.4 Sertleştirme-Martenzite Dönüştürme	29
3.2 Yüzey Sertleştirme	30
3.2.1 Sementasyon	33
3.2.1.1 Katı Ortamda Sementasyon.....	33
3.2.1.2 Sıvı Ortamda Sementasyon	33
3.2.1.3 Gaz Ortamda Sementasyon	34
3.2.2 Nitrürleme (Nitrürasyon)	34
3.2.3 Alevle Yüzey Sertleştirme	35
3.2.4 Proses Seçimi	35
3.3 İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme	37
3.3.1 İndüksiyonla Isıtma İşlemi ve Sistemin Çalışma Mekanizması	38
3.3.1.1 Direnç	40
3.3.1.2 Alternatif Akım ve Elektromanyetizma	41
3.3.1.3 Histerisiz	42
3.3.1.4 Kabuk Etkisi ve Nüfuz Derinliği	42
3.3.1.5 Soğutma Ortamı	42
3.3.2 İndüksiyonla Isıtmada Kullanılan Güç Kaynakları.....	43
3.3.2.1 Bobin Seçimi ve Tasarımı	44
3.3.3 Isı İletimi	46
3.3.4 İndüksiyonla Sertleştirilebilen Malzemeler	46
3.3.5 İndüksiyonla Sertleştirilenin Avantajları	47
3.3.6 İndüksiyonla Sertleştirilenin Dezavantajları	47
3.4 İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Yöntemi İle Yapılan Çalışmalar	49

4. DENEYSEL ÇALIŞMA	59
4.1 Malzeme	59
4.2 Isıl İşlemler.....	60
4.3 Sertlik	63
4.3.1 Ham Numunenin Sertliği	63
4.3.2 İndüksiyonla Yüzeyi Sertleştirilmiş Numunenin Sertliği	64
4.4 Mikroyapı.....	66
4.5 Aşınma	66
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	69
5.1 Mikroyapılar.....	69
5.1.1 Ham Numunenin Mikroyapı İncelemesi	69
5.1.2 İndüksiyonla Sertleştirilmiş Numunenin Mikroyapı İncelemesi	70
5.2 Aşınma Deneyi Sonuçları	73
5.3 SEM Analizleri.....	78
6. GENEL SONUÇLAR	80
7. KAYNAKLAR	81

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Martenzit, birincil karbür ve bir miktar dönüşmemiş östenit içeren sertleştirilmiş yüksek karbonlu rulman çeliği AISI 52100'ün mikroyapısı.....	6
Şekil 2.2: Bilyalı rulman.....	8
Şekil 2.3: 100Cr6 çelik dolu malzeme.....	8
Şekil 3.1: Sertleştirme ortamı	27
Şekil 3.2: Martenzitik yapıdaki bir plakanın optik görüntüsü	28
Şekil 3.3: % 1 Cr'lu çelikte östenitleme sıcaklığının sürekli soğuma diyagramı üzerine tesiri.....	30
Şekil 3.4: Su verme işlemi sonucunda karbon ve martenzit oranına bağlı olarak sertlik ve mukavemet artışı	34
Şekil 3.5: Isıyı yüzeye uygulama prensibi	40
Şekil 3.6: Elektromanyetik indüksiyonun temel çalışma prensibi.....	41
Şekil 3.7: Isıtılan yüzeye soğutma sıvısının uygulanması	43
Şekil 3.8: İndüksiyonla ısıtmada yaygın olarak kullanılan bobin çeşitleri.....	45
Şekil 3.9: Çeşitli uygulamalarda kullanılan bobin tipleri	45
Şekil 3.10: İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi a) Yüzeyi ısınan parça, b) Isıtılan yüzeyin soğutulması	48
Şekil 4.1: Deneysel çalışmada kullanılan 100Cr6 çelik kütük	59
Şekil 4.2: Isıl işlem öncesi hazırlanan 100Cr6 çelik malzemeler	60
Şekil 4.3: 100Cr6 çeliğinden imal edilecek burca ait teknik resim	60
Şekil 4.4: İndüksiyon tezgahı genel görünümü	62
Şekil 4.5: İndüksiyon işlemine ait bazı görüntüler a) Kumanda panosu, b-c) Parçanın manyetik alana maruz bırakılarak ısıtılması, d-e) Su verme işlemi, f-g) İndüksiyon işlemi sonrasında malzemeler....	62
Şekil 4.6: Sertlik ölçümü a) Sertlik numunesi, b) METTEST marka Rockwell sertlik ölçme cihazı.....	63
Şekil 4.7: HECKERT marka Vickers sertlik ölçme cihazı a) Önden görünüş, b) Yandan görünüş	65
Şekil 4.8: Yüzeyden merkeze doğru Vickers (HV ₃₀) sertlik değişimi.....	66
Şekil 4.9: Ball on disk aşınma test cihazı	67
Şekil 4.10: Aşınma test cihazının şematik görünümü ve veri toplama	68
Şekil 5.1: Ham haldeki 100Cr6 çeliğinin mikroyapı görüntüleri a-b) 50X, c-d) 100X, e-f) 200X, g-h) 500X	69
Şekil 5.2: İndüksiyonlu 100Cr6 çeliğinin mikroyapı görüntüleri a) Dış kısım 50X, b) Dışa yakın kısım 50X, c) Orta kısım 50X, d) İç cidar kısmı 50X, e) Dış kısım 200X, f) İç (orta) kısım 200X, g) Geçiş bölgesi 200X, h) İç cidar kısmı (perlitik) 200X, i) Dış kısım 500X, j) Orta kısım 500X, j) Geçiş bölgesi 500X, k) İç kısım perlitik 500X	71
Şekil 5.3: 2,5 N kuvvette sürtünme katsayısının mesafeye göre değişimi	73
Şekil 5.4: 5 N kuvvette sürtünme katsayısının mesafeye göre değişimi	74
Şekil 5.5: 10 N kuvvette sürtünme katsayısının mesafeye göre değişimi	74
Şekil 5.6: Kütle kayıplarının uygulanan kuvvetlere göre değişim grafiği.....	75
Şekil 5.7: Aşınma deneyine tabi tutulan numuneler a) 2,5 N, b) 5 N, c) 10 N.....	76
Şekil 5.8: Aşınma yolu	76

Şekil 5.9: Aşınma yüzey görüntüleri	77
Şekil 5.10: 2,5-5 ve 10 N'luk kuvvetlerle aşınma testine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri (her bir kuvvetin altında yukarıdan aşağıya sırasıyla 150X, 600X, 1000X, 5000X, 15000X büyütme).....	79

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: 100Cr6 çeliğinin Türk Standartlarında gösterimi	9
Tablo 2.2: 100Cr6 çeliğinin bazı özellikleri ile ilgili örnek bir tablo	10
Tablo 3.1: Çeliklerin yüzey sertleştirme için mühendislik metotları	32
Tablo 3.2: Sık kullanılan beş yüzey sertleştirme işleminin karşılaştırmalı faydaları.....	36
Tablo 3.3: Parça yüzeyine uygulanan frekans ve buna bağlı olarak sertleşme derinlikleri.....	39
Tablo 4.1: 100Cr6 çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık olarak).....	59
Tablo 4.2: İndüksiyonla yüzey sertleştirmede kullanılan konum-hız ve devir parametrelerini gösteren program ekranı	61
Tablo 4.3: Rockwell C (HR _C) sertlik deneyi sonuçları	64
Tablo 4.4: Vickers (HV ₃₀) sertlik deneyi sonuçları	65
Tablo 4.5: Aşındırıcı uç özellikleri	67
Tablo 5.1: Numunelerin aşınma deneyleri sonrasındaki kütle kayıpları.....	75

SEMBOL LİSTESİ

P	: Basınç
T	: Sıcaklık
t	: Sıcaklıkta tutma süresi
V_s	: Soğutma hızı
A_{c1}	: Ötektoid reaksiyon sıcaklığı
A_{cm}	: Ötektoid üstü çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığı
M_s	: Martenzit başlangıç sıcaklığı
μm	: Mikrometre
φ	: Çap
Fe₃C	: Sementit

KISALTMALAR

Pa	: Pascal
Km	: Kilometre
ppm	: Milyonda bir birim
NASA	: Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
dev/dk	: Devir/dakika
HR_C	: Rockwell C sertlik değeri
mm	: Milimetre
Cr	: Krom
AISI/SAE	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü standartizasyonu
AFNOR	: Fransa Uluslararası Standartizasyon Kuruluşu
BS	: İngiliz Standartları
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
C	: Karbon
Mn	: Mangan
Si	: Silisyum
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
HB	: Brinell sertlik değeri
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
HV	: Vickers sertlik değeri
MHz	: MegaHertz
MoS₂	: Molibden disülfid
Ti	: Titanyum
mbar	: Milibar
V₄C₃	: Vanadyum karbür
V	: Vanadyum
wt	: Ağırlık
N	: Newton
m/sn	: Metre/saniye
S-N	: Gerilim-yorulmaya yol açan döngü sayısı eğrisi (Wöhler eğrisi)
TiN	: Titanyum nitrit
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
Hz	: Hertz
kHz	: Kilohertz
PIC	: Mikrodenetleyici modeli
kW	: Kilowatt
MPa	: Megapaskal
mm/sn	: Milimetre/saniye
W	: Watt
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Al	: Alüminyum
AC	: Alternatif Akım
GPa	: Gigapaskal
N	: Newton
nm	: Nanometre

ÖNSÖZ

Günümüzde çelik esaslı malzemelerin kullanımı hayatımızın vazgeçilmez unsurlarından birisi olmuştur. Buna bağlı olarak endüstride yaşanan ve teknolojinin önlenemez bir hızla ilerlemesiyle paralel olan gelişmeler; üretilen malzemelerin daha kaliteli, emniyetli, sağlam ve uzun ömürlü olmasına olanak sağlamaktadır.

Münferit olarak 100Cr6 çeliği ve indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemleri üzerine ayrı ayrı değişik çalışmalar yapılmış olmasına rağmen her ikisinin de birlikte olduğu çalışma sayısı yok denecek kadar azdır ya da literatüre girmemiştir. Bu çalışmada; 100Cr6 çeliği üzerinde tatbik edilen indüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin çeliğe olan etkileri araştırılarak bilimsel çalışmalara katkı sağlamak hedeflenmiştir.

Tez çalışmam süresince mesai mefhumu gözetmeden şahsıma her konuda destek ve yol gösterici olan saygıdeğer danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ ve benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ başta olmak üzere; tezimin hazırlanmasında bana kapılarını açan ve malzeme temini ile deneysel çalışmalarımın sağlıklı bir şekilde yapılmasına imkân veren 6'ncı Ana Bakım Merkezi Komutanlığı Teknik Müdürü Mühendis Albay Alper AKÇA, komutanlık çalışanları İsmail ALTINÇEKİÇ ve Adil AKSOY'a sonsuz teşekkürleri bir borç bilirim.

Ayrıca aşınma testleri ve SEM analizlerini gerçekleştirmemi sağlayan Er&Mir Tekstil ve Makina San. Tic. Ltd. Şti. Teknik Müdürü Sayın Dr. Ersin KORKMAZ'a da ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak bu uzun ve yorucu çalışma dönemi esnasında hep yanımda olan değerli eşim Uzm. Dr. Saniye ÖZDEMİR DURAN ile hayatım boyunca bana maddi ve manevi destek sağlayan sevgili anne ve babama şükranlarımı sunarım.

Balıkesir, Ocak 2016

Murat Can DURAN

1. GİRİŞ

İnsanoğlu ateşi ilk bulduğundan bu yana metalleri kullanmaktadır. Metaller hayatımızın her aşamasına girmiştir. Endüstriyel amaçlı kullanılan metallerin büyük çoğunluğu saf değildir. Çünkü saf metallerin yüksek iletkenlik, korozyon direnci gibi bazı üstün özellikleri varsa da genellikle yumuşak, mukavemetleri düşük ve pahalıdırlar. Ayrıca birçoğu istenilen mekanik özellikleri sağlayamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı metalik elementlerin bir metal veya ametalle ya da bunların birkaçı ile birlikte oluşturdukları alaşımlar geliştirilmektedir [1].

Çelik; içerisindeki karbon oranına göre, karbonun meydana getirdiği sementit ile saf demirin (ferrit) karışımından oluşan bir alaşımdır. Bunun yanında çelikler, karbonla beraber çelik katkı elementleri (manganez, silisyum vb.) veya alaşımlı çelikler ise büyük oranda alaşım elementleri içermektedirler. Çelik, herhangi bir işlemden geçmeden dövülebilen ve genellikle % 1,7'den fazla karbon içermeyen bir demir-karbon alaşımıdır. Özel durumlarda % 2 karbon içeren çelikler, orandaki alaşım maddeleri nedeni ile çelik grubuna dahildirler. Çelikte karbon fazla ise, karbonun demirle yapacağı bileşik olan sementit de fazla olacağından çelik sertleşir. Çünkü sementit sert, kırılđan ve biçimlendirilme özelliği olmayan bir fazdır. Çelikte karbon az ise bu kez ferrit fazla olacağından yumuşak ve biçimlendirilme özelliği yüksek olur. Hamdemirde büyük miktarda karbon, ayrıca katkı elementleri bulunmaktadır. Bu katkı elementlerinden manganez ve silisyum % 0,8'den fazla olamamak şartıyla çelikte istenen elementlerdir. Kükürt ve fosfor ise her oranda zararlıdır ve mümkün olduğu kadar uzaklaştırılmalıdır.

Metal ve alaşımlarının özelliklerini değiştirmek için katı halde uygulanan ısıtma ve soğutma işlemlerine ısıl işlem adı verilmektedir. Parçaların ısıl işlem sonunda iç yapılarında değişme olurken dış şekilleri değişmemektedir.

Isıl işlemler; çeliklere, soğuk ve sıcak şekillendirme gerginliklerini gidermek, talaş çıkaran işçilikleri kolaylaştırmak, sertlik ve dayanım kazandırmak, darbelere karşı direnci yükseltmek, elektrik ve manyetik özellikleri geliştirmek, kristal yapıyı

değiştirmek, ısı ve korozyon direncini yükseltmek, kimyasal bileşimi değiştirerek özellik kazandırmak, zamanla sertleşmeyi sağlamak, metal ve alaşımlarının gazlarını uzaklaştırmak gibi maksatlarla uygulanmaktadır [2].

Belli bir kullanım yeri için seçilen, kompozisyonu belli bir çelik malzemenin, belli oranlarda karbon (ve diğer alaşım elementleri) içermesi, istenen ve beklenen özelliklere sahip olmasını gerektirmez. Başka bir deyişle bir çelik malzemenin kompozisyonunun belli olması, o malzemenin teknik özelliklerinin bilinmesi için hiç yeterli değildir. Seçilen çelik malzemenin kompozisyonuna ve beklenen işlemlere göre ısı işlem veya işlemlerin uygulanması gerekmektedir. Isıl işlemler; basınç (**p** [Pa]), sıcaklık (**T** [°C]), sıcaklık tutma süresi (**t** [h]) ve soğutma hızı (**Vs** [°C/s]) parametreleri üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Özellikle otomotiv sanayisinin bütün dallarında, tekstil makinaları ve ağır sanayi makina ve sistemlerinde izafi hareket yapan birçok parça sürtünme ve aşınma zorlanmalarına maruz kalmakta, böyle parçaların teknik ömürleri genellikle aşınma dayanımları ile sınırlanmaktadır.

Sürtünme ve aşınma olayları ise teknik parçaların yüzey bölgesinde cereyan etmektedir. Tribolojik zorlanmalara (özellikle abrasiv aşınma zorlanmasına) maruz malzemelerin sadece yüzey bölgesinin sert ve aşınmaya dayanıklı olması gerekli ve yeterlidir. Yüksek ivmeli hareket eden veya darbeli yüklemeler altında çalışması gereken parçaların ise tam tersine, sertlik kaybı pahasına tokluk (ve süneklik) kazanması beklenir. Birbirine zıt yönde gelişen bu mekanik özellik değerlerinin aynı parçada, en yüksek derecede birleştirilmesi, yüzey sertleştirme yöntemleri ile mümkün olmaktadır. Dişli çarklar, çeşitli miller ve yürek mekanizmaları (eksantrik mili vb.), çeşitli üretim (sıvama ve kesme) kalıpları gibi sürtünme ve aşınma zorlanmalarına maruz, yüksek ivmeli hareket eden veya darbeli yüklemeler altında çalışması gereken konstrüksiyon elemanları ve parçaların; iç taraflarının (merkezi bölgeleri) mümkün mertebe tok olması gerekirken, yüzey bölgelerinin de sert olması istenmektedir. Bu beklenti ve gerekliliklere yüzey sertleştirme yöntemleri cevap vermektedir. Çeliklerde bu yöntemlerin uygulanma ve geliştirilmesi, sadece martenzitik dönüşümü değil, başka mekanizmaları da içeren çalışma doğrultularını oluşturmaktadır [3].

Sertleştirme, çeliklerin yapısını değiştirmek için yapılan kontrollü soğutmadır. Çeliklerin sertleştirilmesinde amaç malzemenin dayanımını arttırmaktır. Bu nedenle çelikler 700°C sıcaklığın üzerinde ısıtılır. Isıtma sırasında çelikteki bağlar kopmaktadır. Isıtılan çelik ani soğutma ortamında (suda ya da yağda) soğutulduğunda kopan bağlar ilk hallerine dönüşemediklerinden yeni bir doku elde edilmektedir. Çeliğin ani soğutulması ile gerginlik kazandırılmış dolayısıyla malzeme sertleştirilmiş olur. Sertleştirilme sonucunda dayanım önemli ölçüde artmaktadır. Sade karbonlu çeliklerde dayanımı bu şekilde üç katına kadar çıkarmak mümkündür. Sade karbonlu çeliklerde su verme ile sağlanan sertlik, dönüşümün hızlı olması nedeniyle yüzeyde yüksek, çekirdeğe inildikçe düşüktür. Katkılı çeliklerde ise dönüşüm yavaş olduğundan çekirdeğe kadar sertleşme sağlanabilmektedir.

Sertleştirilmesi istenen parçaların çalışma şartları göz önüne alındığında, tümüyle sertleştirilmesinin istendiği durumlar yanında, sadece gerekli kısımlarının sertleştirilmesi de istenebilmektedir. Genellikle makine parçalarında aşınmaması gereken yüzeylerin sertleştirilmesi gereklidir. Darbeli ve vuruntulu çalışma koşulları için çeliğin özlü olması; özlü olabilmesi için de çekirdeğine kadar sertleşmemesi gereklidir. Bu nedenle çelikler yalnız yüzeyde ince bir katmanın sertleştirilmesi ile çalışma koşullarına uygun hale getirilirler. Bu işleme de yüzey sertleştirilmesi adı verilmektedir [2].

Yüzey sertleştirme uygulamaları ile, aşınma dayanımının artırılması esas olmak üzere, diğer iyileştirmeler ve teknik yararlar şu şekilde özetlenmektedir:

- Eğme, bükme gibi tekrarlı yüklemelere maruz parçalarda yorulma dayanımı artırılabilir.
- İnce cidarlı, değişik kesitli parçalarda çarpılma ve/veya sertleştirme (su verme) çatlama tehlikesi engellenmekte veya en aza indirilmektedir.
- Aşınma dayanımı yüksek, teknik öneme sahip parçalarda aranan, merkez bölgesinde yüksek bir mukavemet, yanında yeterli derecede tokluk ve süneklığe sahip olma beklentisi yerine getirilmektedir.
- Bölgesel (sınırlı) sertleştirmeler mümkün olmaktadır.
- Bütün parça malzemesinin, sadece yüzey bölgesinden beklenen iyi özelliklere sahip olması gerekmediğinden, malzeme tasarrufu sağlanmaktadır (aynı

iŖi, aynı kalite ve verimlilikle yapabilmek için daha ucuz çeliklerin kullanılması mümkün olmaktadır).

Teknik parçadan beklenen iŖleve göre, bu iyileŖtirme amaçlarından birisi ön plana çıkabilmekte ve uygulanacak yüzey iŖlemi ve iŖleme iliŖkin parametreler de buna göre tayin edilmektedir. Yüzey bölgesinin teknik özelliklerini deėiŖtirmek için baŖvurulan yüzey sertleŖtirme yöntemleri parçadan beklenen fonksiyona, mevcut malzemenin cinsine (kompozisyonuna), parçanın hassasiyetine (veya iŖin önemine) ve göze alınan maliyete bağlı olarak seçilmektedir [3].

AŖınmaya maruz kalan çeliklerin yüzeylerini belli bir kalınlığa kadar sertleŖtirebilmek için eŖitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar; sementasyon, nitrürleme, borlama gibi termokimyasal iŖlemler olabileceği gibi alevle ve indüksiyonla sertleŖtirme gibi çeliğin belli bir kalınlıkta yüzeyinin östenit bölgesine ısıtılıp hızla soğutulması ile yüzeyde martenzitik yapının elde edilmesiyle de olabilir.

Bu alıŖmada, burç imalatında kullanılan 100Cr6 eliğinin indüksiyon ısı iŖlemiyle yüzeyinin sertleŖtirilmesi ve sertleŖtirilen yüzeylerin aŖınma davranıŖının incelenmesi amalanmıŖtır.

2. 100Cr6 ÇELİĞİ

2.1 Rulman Çelikleri

Rulman çelikleri; sertlik açısından yüksek karbonlu, yorulma dayanımı açısından ise metalurjik olarak temiz (kalıntılar az) kalite çelikleridir. Rulmanlı yataklar, mekanik ekipmanlarda dönmeye imkan sağlamak ve ciddi yükleri taşımak için çokça kullanılmış ve bir temel bileşen olarak 100 yılı aşkın süredir birçok dönen mekanizmada endüstriyel gelişime önemli ölçüde katkı sağlamıştır.

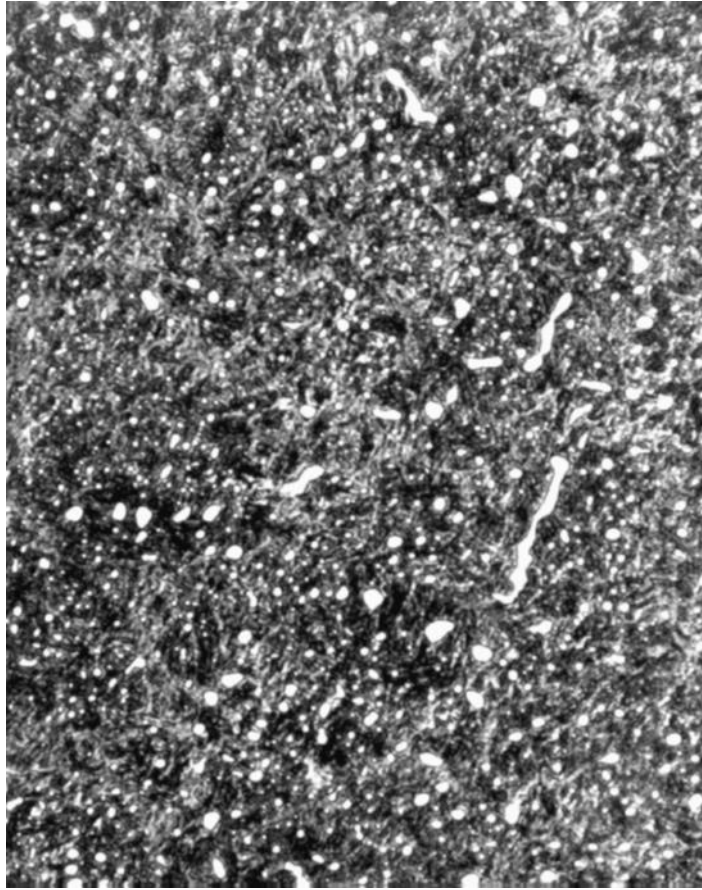
Rulmanlı yataklar, geniş kapsamlı teknik faktörler (ağırlık, sertlik, sürtünme, dayanıklılık vb.) ve beklenen kullanıma uygun hizmet ömrü arasında dengeye gereksinim duymaktadırlar. Bu ihtiyaçlar bir uygulamadan bir diğerine çok farklı şekilde olabilmektedir. Mesela, tipik otomobil uygulamaları 8-10 yıl (200.000 km) ve garanti süresi boyunca 500 ppm dayanıma sahip olmalıyken, helikopter türbinleri 30 yılın üzerinde ve % 100 dayanıma sahip olmalıdır [4].

Rulman yatağı elemanları birçok farklı şekilde dizayn edilmektedir. Bunlara örnek olarak bilyalı rulmanlar, silindirik rulmanlı yataklar, konik rulmanlı yataklar ve küresel rulmanlı yataklar gösterilebilir. Rulman malzemeleri her uygulamanın beklenen işletme koşullarına en uygun özellikleri sağlamak için seçilmektedir.

Yük, hız, sıcaklık, yağlama şartları, katı atık kirliliği ya da korozyif ortamlar, gerçek ömür koşulları altında en uygun işletme performansı için rulman çeliklerinin seçimine etki eden faktörlerdir. Yükler hassas cihaz rulmanlarında olduğu gibi çok küçük veya NASA Uzay Mekiğini araç montaj binasından fırlatma rampasına taşıyan raylarda olduğu gibi çok büyük olabilmektedir. Dönel hızlar bazı durumlarda neredeyse sıfır olabilmekte ya da bazılarında birkaç bin dev/dk olabilmektedir. Çalışma sıcaklıkları, gelişmiş askeri türbin motoru dizaynlarında sıvı hidrojen ve oksijeni 300-400°C (600-700°F)'ye taşıyan roket yakıt pompalarında donma sıcaklığının yüzlerce derece altında seyretmektedir. Yağlama, uzay vakumu içerisinde çalışan rulmanlarda hemen hemen hiç yoktur. Oldukça bol miktarda yağlayıcıda çalışan rulmanlarda bile, ağır arazi ekipmanlarında olduğu gibi atık girişi

ya da gıda imalatı veya kimya tesisi işletmelerinde olduğu gibi korozif elementler rulmanların performansını tehdit etmede rol oynayabilmektedir.

Rulman çelikleri aynı zamanda üretilebilirlik ve ekonomik cazibelerine dayalı olarak seçilmektedir. Böylece rulman çelikleri tümünden sertleştirme ve yüzey sertleştirme genel kategorileri içerisinde yer almaktadır. Tümünden sertleştirilmiş çelikler Şekil 2.1'de gösterildiği gibi rulman kesiti boyunca genellikle % 0,8-1,2 oranında değişmeyen karbon ihtiva etmektedirler.



Şekil 2.1: Martenzit, birincil karbür ve bir miktar dönüşmemiş östenit içeren sertleştirilmiş yüksek karbonlu rulman çeliği AISI 52100'ün mikroyapısı [5].

Bunun sonucunda su verme ve temperleme prosesleriyle ısıtılma tabii tutulduklarında, özellikleri kesit boyunca aşağı yukarı aynı kalmaktadır. Yüzeyi sertleştirilmiş çelikler, kıyaslama yapıldığında gerçekte genellikle % 0,1-0,4 arası karbon ihtiva eden düşük karbonlu çeliklerdir. Yüzeyi sertleştirilmiş çelikten mamül rulman bileşenlerinin ısıtılma işlemi, 870-980°C (1600-1800°F) arasındaki yüksek sıcaklıktan ilave karbonu yüzeye transfer eden bir atmosfere maruz bırakılmış bir

prosesi kapsamaktadır. Karbürlenmiş kısım su verilip temperlendikten sonra yaklaşık 58-64 HR_C sertliğinde sert bir yüzey ve daha yumuşak ama genellikle 25-50 HR_C sertlik aralığında daha tok bir iç yapıya sahip olmaktadır [5].

2.1.1 Bazı Rulman Çeşitleri

Rulmanlar, saf radyal yükler, saf aksenal baskı yükleri veya her iki çeşit yükü de kaldırmak için imal edilmişlerdir.

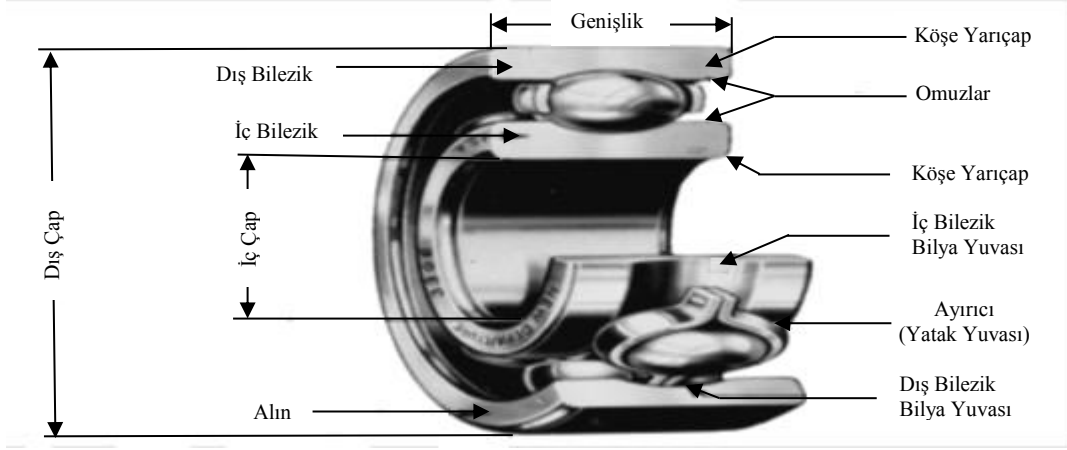
Düz rulmanlı yataklar büyük temas alanlarından dolayı aynı ebattaki bilyalı rulmanlara oranla daha büyük radyal yükler taşırlar. Ancak kanal ve yatakların neredeyse mükemmel geometriye sahip olma gereksinimi gibi bir dezavantajları vardır. Küçük bir hizalama hatası yatakların eğilmesine ve çizgi dışına çıkmasına neden olacaktır. Düz rulmanlı yataklar doğal olarak aksenal baskı yüklerini kaldıramamaktadırlar.

Helezonik yataklar, dikdörtgen malzemenin sertleştirilip taşlandıktan sonra yatak içine sarılmasıyla yapılırlar. Doğalarındaki esneklikten dolayı önemli ölçüde hizalama hatasını kaldırabilmektedirler. Gerektiğinde gövde ve yuva, iç ve dış yatakları ayırmak yerine kanallar için kullanılabilirler. Bu, özellikle radyal boşluk sınırlandırılmışsa önem arz etmektedir.

Küresel bilyalı basınç yatağı, ağır yükler ve hizalama hatası meydana geldiğinde kullanışlıdır. Küresel elemanların yük arttığında temas alanlarını artırma avantajları bulunmaktadır. Şekil 2.2'de bilyalı rulmana ait kesit resmi gösterilmiştir.

İğneli rulmanlar, radyal boşluk sınırlandırıldığında çok kullanışlıdır. Seperatörler kullanıldığında yüksek yük kapasiteleri bulunmaktadır, ancak hem yataklı hem de yataksız olarak donatılmışlardır.

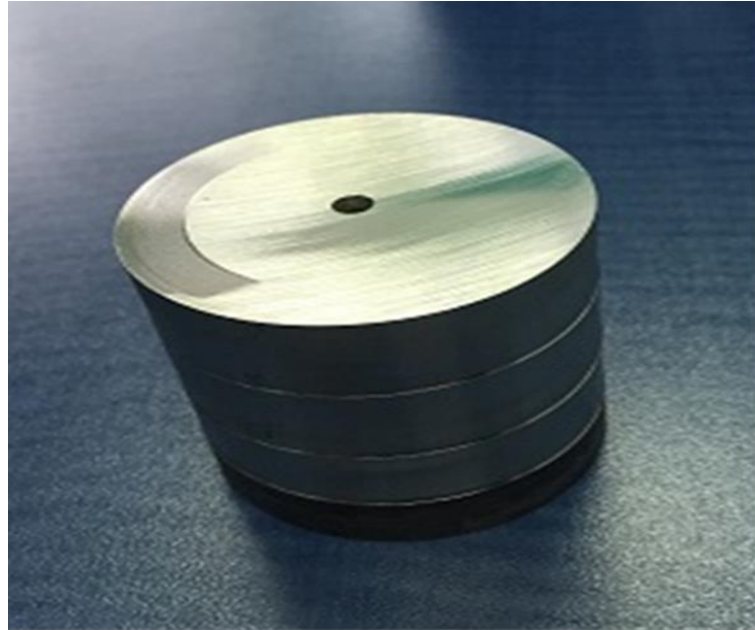
Konik rulmanlı yataklar, radyal veya aksenal baskı ya da her ikisinin kombinasyonu olan yükleri almalarından itibaren bilyalı ve düz rulmanlı yatakların yüksek taşıma kapasitelerine sahip olmaktadır. Konik rulmanlı yatak dizayn edilmiştir, böylece yatak yüzeyi ve kanallardaki tüm elemanlar rulman eksenine üzerindeki ortak bir noktada kesişebilmektedir [6].



Şekil 2.2: Bilyalı rulman [6].

2.2 100Cr6 Çeliğinin Genel Özellikleri

100Cr6 malzemesi kollu kılavuzlarda, freze çakılarına, millerde, hassas enstrüman parçalarında, burçlarda, yataklarda, rulman bileziği ve bilyelerde, damgalama araçlarında, dişli takımlarda, kalıplarda, ölçü aletlerinde, pimlerde, sıkma bileziklerinde, vidalarda, tezgah motor ve pompa parçalarında, anti sürtünme yataklarında, makaralarda, silindir gömleklerinde ve hidrolik ekipman parçalarında kullanımı geniş olan bir çelik türüdür [7]. 100Cr6 çelikten üretilmiş bir burç resmi Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



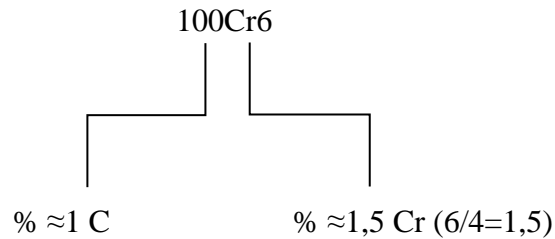
Şekil 2.3: 100Cr6 çelik dolu malzeme.

100Cr6 çeliği, rulman eleman parçaları üretiminde kullanılan bir sertleştirilmiş çelikler grubunun üyesidir. Özel çalışma koşulları sebebiyle minimum miktarda metal olmayan kalıntı içerikli uygun kimyasal bir bileşene ihtiyaç duymaktadır.

100Cr6 çelik ana olarak 30 mm'ye kadar çapa sahip rulmanlar için bilya, silindir ve yüzük gibi rulman eleman parçalarının üretiminde kullanılmaktadır. 100Cr6 çeliğinin Türk Standartlarında gösterimi Tablo 2.1'de verilmiştir. Metal olmayan kalıntıların varlığı, malzeme özelliklerinin belirlenmesinde ve özellikle amaç malzeme özelliklerini geliştirmek olduğunda çok önemli bir rol oynamaktadır. Metal olmayan kalıntıların çelik kalitesindeki etkisinin araştırılması onların boyut, şekil, kimyasal ve mineralojik bileşim ve fiziksel özelliklerine (erime sıcaklığı, deformabilitesi, sertliği vb.) bağlıdır. Metal olmayan kalıntı özellikleri temel olarak çeliğin üretimi ve dökümüne bağlıdır ve yüklemeye çeşitlilik gösterebilmektedir. Rulmanların çalışma ömrünü artırmak için gerekli olan şeyler yüksek ve eşit aralıklı sertlik, aşınma direnci, yorulma direnci, yüksek mukavemet, esneklik ve iyi işlenebilirliktir. Dolayısıyla kalıntı ya da farklı mikro yapı gibi malzemelerdeki en küçük kusurların çeliğin özelliklerinde ve işleminde zararlı etkileri vardır [8]. 100Cr6 çeliğinin bazı özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.1: 100Cr6 çeliğinin Türk Standartlarında gösterimi.

Adı	TS Numarası	Gösterimi	Kullanım Alanı
Takım Çelikleri	TS EN ISO 4957	100Cr6	Yüzey sıcaklığının genellikle 200°C'nin altında olduğu uygulamalar için alaşımli soğuk iş takım çeliklerinin yapımında



100Cr6 çeliği ortalama % 1 C ve % 1,5 Cr ihtiva etmektedir.

Tablo 2.2: 100Cr6 çeliğinin bazı özellikleri ile ilgili örnek bir tablo [9].

Karşılaştırılabilir Standartlar	SIAU	DIN	W.N.	AFNOR	BS	AISI/SAE	
	KS	100Cr6	1.3505	100C6	534A99	52100	
Kimyasal Analiz	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Diğer
	0,95-1,10	0,25-0,45	0,15-0,35	1,40-1,60	-	-	-
Sıcak Çalışma ve Isıl İşlem Sıcaklıkları (°C)	Kritik Noktalar	Dövme	Nor mali zasyon	Kritik altı Tavlama	İzo termal Tavlama	Sertleştirme	Gerilim Giderme
	Ac ₁ 750				800	840-860	
	Ac _m 785	1100-900	870-890	710-740			160-200
	M _s 210				720x5 saat	Yağ	
Mekanik Özellikler			Yüzey Sertliği (HR _C)		Yüzey Sertliği (HB)		
	Kare Numune 25 mm.		Sertleştirme ve Gerilim Gidermesinden Sonra		Küreselleştirilmiş		
			≥ 63		≤ 207		

2.2.1 Krom

Katkı elemanları çeliğe birtakım özellikler kazandırmaktadır. Bunlar; dayanım ve sertliğin artırılması, sertleşmenin kolaylaşması, korozyon direncinin yükselmesi, mıknatıslama özelliğinin gelişmesi, yüksek sıcaklıklara karşı dayanımın artması, elektrik direncinin yükselmesi, ısı etkisi altında genişlemenin ayarlanması ve kristal yapının incilmesi gibi özelliklerdir. Krom, çeliklerde en çok kullanılan katkı elemanlarından biridir. Karbonla birleşerek çok sert olan krom karbürü meydana getirir. Karbonun grafitleşmesini önler. Dönüşme hızını yavaşlatır. Kromlu çelikler mıknatıs yapımında kullanılmaktadır. % 1'e kadar kromlu çelikler suda, daha fazla kromlu çelikler yağda ya da havada sertleştirilirler. Krom, dövme ve ısıl işlemlere hassasiyeti artırır. Çeliklere sertlik, korozyona ve kimyasal etkilere dayanım, ısı ve yüksek aşınma direnci ile kesme özelliği kazandırmaktadır [2].

Çeliğe krom eklenmesi; çok sert olan krom karbürlerinin oluşumuna yol açmakta, nihayetinde oluşan çelik, karbon oranındaki basit bir artışla üretilen aynı sertlikteki çelikten daha sünek bir hale gelmektedir. Krom aynı zamanda tane yapısını inceltmekte, böylece iki kombine etki birden tokluk ve sertliğin artmasına yol açmaktadır. Krom eklenmesi, kritik sıcaklık farkının yükselmesine ve ötektoid noktasının sola hareket etmesine neden olmaktadır. Krom, böylece çok kullanışlı bir alaşım elementi haline gelmektedir [6].

Ergitme ve elektroliz yolları ile elde edilen krom sert ve kırılğan olduğu için saf olarak pek fazla kullanılmamaktadır. Parlak renkte bir metaldir. Elektrik iletkenliğine, soğuk ve sıcak şekillendirmeye karşı direnç göstermektedir. Ancak soğuk halde iken delinip, eğelenebilmekte, aynı zamanda kaynak, pres ve torna edilebilmektedir. Kimyasal simgesi **Cr**, özgül ağırlığı 6,8 kg/dm³, ergime ısısı 1615°C, soğukken eğilip bükülemeyen ancak 325°C sıcaklıkta kolayca biçimlendirilebilen bir metaldir. Krom, katkılı çeliklerin en önemli katkı elemanlarından. Özellikle paslanmaz çeliklerin önemli katkı elemanıdır. Isıya dayanıklı olması nedeniyle çeliğin ısı ve elektrik direncini yükselttiği için elektrik direnç telleri yapımında, kromun nikelle yaptığı alaşım ise ısıtma elemanlarının yapımında kullanılmaktadır [2].

2.3 100Cr6 Çeliği İle Yapılan Çalışmalar

Faussemagne (1996) tarafından yapılan “Evolution of surfaces properties for 100Cr6 steel by implantation and ionic mixing (İmplantasyon ve iyonik karıştırma ile 100Cr6 çeliği için yüzey özelliklerinin evrimi)” konulu çalışmada, bor ve nitrojenle implante edilmiş 100Cr6 çelik örnekleri üzerinde fiziko-kimyasal karakterize etme işlemi yapılmıştır. Uygulanan tribolojik testlerle, nitrojen ve bor implantasyonlarının diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlardaki çeşitlilikte de herhangi önemli bir sürtünme gelişimine yol açmadığı ortaya konulmuştur. Ancak implantasyon sırasında kazayla karbon bulaşmış bir numune setinde, bu tribolojik parametrelerde kayda değer bir gelişme fark edilmiştir. Bu kirliliğe iyon ışınlarıyla yapılan yüzey işlemede yaygın bir şekilde rastlandığı için, bu hadisenin literatürde belirtilen uyumsuzluğun kaynağını açıklamak için kullanabileceği değerlendirilmiştir. Tüm sonuçların dikkatli şekilde incelemesi, sürtünme katsayısı ve yıpranmanın evriminin yüzey karbon

miktariyla açıklanması için temas halinde olan iki parçanın pürüzlerinin rolünü temel alan bir teorik model sunulmasına yol açmıştır. Bu analiz ile 100Cr6 çeliğinin sürtünme ve yıpranmasının geliştirilmesi için, bu materyalin temas halinde olan iki parçanın sertlik yüksekliklerinden daha yüksek bir kalınlığa sahip iyi yapışmış bir karbon tabakasıyla kaplanması gerektiği ortaya konulmuştur [10].

Loewisch, Bomas, Mayr, Kienzier ve Neemann (2000) tarafından yapılan “Lifetime and fatigue limit prediction for components of high strength steels (Yüksek mukavemetli çelik bileşenleri için ömür süresi ve yorulma sınırı tahmini)” konulu çalışmada, beynitik koşuldaki pürüzsüz ve çentikli 100 Cr6 (SAE 52100) rulman çeliği numuneleri gerilim, burulma ve her ikisinin birleşimi, iç ve dış faz yüklemeleri altında S-N eğrilerini tespit etmekte kullanılmıştır. Yüksek çevrimli yorulma alanında, çatlak başlangıcına en çok Titanyum Karbonitrit ya da Alüminyum Oksitler gibi kalıntıların sebebiyet verdiği belirtilmiştir. Bu kalıntıların büyüklüğünün ömür süresi üzerindeki etkisini anlatmak için bir model geliştirilmiştir. Kalıntılar ve yüzey kusurlarının istatistiksel dağılımını kullanan bir en zayıf halka modeli yorulma sınırını anlatmak için kullanılmıştır [11].

Koçak (2003) tarafından yapılan “Metallerin Şekillendirilebilme Analizleri (Analysis of Formability of Metals)” konulu Yüksek Lisans çalışmasında, soğuk şekillendirilen malzemelerde oluşan kusurlardaki temel nedenin sünek kırılmalar olduğu, sünek kırılmaların hasar modelleri ile tahmin edilebileceği ifade edilmiştir. Çalışmada Cockcroft & Latham, McClintock, Freudenthal, Rice & Tracy, Oyane, Ayada, Brozzo modelleri gibi çeşitli modellerin rulman çeliği (100Cr6), paslanmaz çelik (X5CrNiMo1810) ve pirinçten (CuZn39) oluşan toplam üç malzemeye uygulanabilirliği araştırılmıştır. Malzeme hasar parametrelerinin elde edilmesinde çekme, standart basma, halka basma, flanşlı parça basma ve konik parça basma testleri kullanılmıştır. Bu testlerin incelenmesinde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan simulasyonlardan yararlanılmıştır. Mevcut hasar modellerinin malzemedeki kusur yerlerini tespit edebildiği, ancak kusur başlangıcını sayısal anlamda tespit edemediği gösterilmiştir [12].

Chengsong, Fritsching, Schulz, Bauckhage ve Mayr (2004) tarafından yapılan “Control of cooling during spray forming of bearing steel billets (Rulmanlı çelik çubuklarda püskürtmeli şekillendirmede soğutmanın kontrolü)” konulu

çalışmada, üretim işlemi esnasında rulmanlı çelik bilyalardaki bozulmayı en aza indirmek için 100Cr6 çelik çubuklar, tortuların soğutma ve katılaşma davranışlarını kontrol etmek amacıyla kendine özgü bir soğutma kontrol sistemli ve püskürtmeli olarak şekillendirilmişlerdir. Tortuların etrafındaki ısıtma, alt katmanın dibindeki gaz soğutması ve tortuların üzerindeki gaz akışının etkileri hem nümerik simülasyon hem de deneyle araştırılmıştır. Püskürtmeli şekillendirilmiş, rulman çeliğinin gözeneklilik profilleri ve mikroyapıları incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, tortuların ısı sınır şartlarının özellikle tortu dış yüzeyinde tortuların soğutma ve katılaştırma davranışları üzerinde önemli roller oynadığını göstermiştir. 100Cr6 çelik tortusundaki gözenekliliğin özel soğutma kontrol sistemiyle önemli ölçüde azaltılabildiği ifade edilmiştir [13].

Castro-Regal, Fernandez-Vicente ve Martinez (2005) tarafından yapılan “Comparison of sliding friction and wear behaviour of overhead conveyor steels tested under dry and lubrication conditions (Kuru ve yağlanmış koşullarda test edilmiş üst taşıyıcı çeliklerin kayma sürtünmesi ile yıpranma davranışının karşılaştırılması)” konulu çalışmada, farklı kalitedeki çeliklerin kayma sürtünmesi ve yıpranma davranışları hem yağlanmış hem de kuru koşullarda incelenmiştir. Test edilmiş çelik kalitelerinin normalde otomotiv sektörü gibi birçok endüstriyel alanda üstten taşıyıcı sistemlerde kullanıldığı vurgulanarak, kaymalı aşınma testleri pin on disk cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Üstten taşıyıcı yük arabalarında kullanılanlara benzeyen 100Cr6 çeliği ise pim olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak yağlanmış koşullarda elde edilen sürtünme katsayılarının yağsız koşullarda elde edilen değerlerden üç katı daha az olduğu, yağlanmış koşullarda meydana gelen yıpranma davranışını kontrol eden mekanizmanın aşındırıcı özellikte olduğu ve elde edilen yıpranma değerlerinin neredeyse önemsiz miktarda olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan yağsız testlerde yıpranmayı kontrol eden mekanizmanın aşınma ve adezyonun (tutma) bir karışımı olduğu belirlenmiştir [14].

Gonzalez, Elvira, Garcia de Andoin, Pizarro ve Bertrand (2005) tarafından yapılan “Influence of non-metallic second phases on fatigue behaviour of high strength steel components (Metalik olmayan ikinci fazın yüksek mukavemetli çelik bileşenlerinin yorulma davranışı üzerine etkisi)” konulu çalışmada, kalıntı türünün ultra temiz yüksek mukavemetli çelik üzerindeki gerçek etkisini ölçmek için 100Cr6

çeliğinden üretilen mekanik bileşenler yorulma testine sokulmuş ve kırılma yüzeyleri yorulma çatlaklarının kaynağını belirlemek için analiz edilmiştir. Farklı çelik yapımı yollarından iki ısıtma uygulaması testler için alınmıştır. Malzeme, sıkışma yükü altında yorulma testine tabi tutulmuş bilya şeklindeki bileşenler içinde dövülmüştür. Başarısız olanlar Tarama alanı Emisyon Mikroskobu SFEM (Scanning Field Emission Microscopy)'de analiz edilmiş ve yüksek yükteki başarısızlıkların birçoğunun az miktarda mangan sülfürden kaynaklandığı kanıtlanmıştır. Tüm yorulma çatlaklarının % 40'ından azının titanyum karbonitler ve sert oksitlerin sebep olduğu kalıntılara bağlı oluştuğu belirtilmiştir. Sert kalıntıların sayısı ve büyüklükleri azaltıldığında, oksit ve karbonitlerin yorulma ömründeki zararlı etkisinin de azaldığı görülmüştür. Ancak, mangan sülfür gibi daha az zararlı olarak ele alınan daha yumuşak kalıntıların yorulma hatasının direkt sebebi olarak daha belirgin bir rol oynamakta olduğu ve yüksek mukavemetli çelik bileşenlerde işlenebilirlik ve yorulma ömrü gerekliliklerinin dengelenmesi açısından daha derin bir şekilde ele alınması gerektiği ifade edilmiştir [15].

Püttgen, Hallstedt, Bleck ve Uggowitzer (2006) tarafından yapılan “On the microstructure formation in chromium steels rapidly cooled from the semi-solid state (Yarı katı halde iken hızla soğutulan kromlu çeliklerde mikro yapı oluşumu)” konulu çalışmada, yarı katı metal oluşumunun peltemsi haldeki mikro yapısal parametrelerle ilgili kesin bilgi gerektirdiği; bir çok hafif metal için, sıvı ve katı fraksiyon ve katı halin boyut, şekil ve bitişikliğinin “donma aralığından su verilmiş” koşulunda kolaylıkla değerlendirilebildiği vurgulanmıştır. Çeliğin soğuma sırasında farklı faz değişimlerine gitmesinden dolayı demir temelli alaşımları belirlemenin daha zor hatta imkânsız olduğu ve yüksek işleme sıcaklıkları yüzünden, su verme sırasındaki difüzyonun daha önemli olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, iki farklı çelik cinsinin, X210CrW12 takım çeliği ve 100Cr6 rulman çeliğinin yarı katı halden hızlıca soğutulması sırasındaki faz oluşumu anlatılmıştır. Bu iki çelik içinde, su verilmiş durumdaki mikro yapının yarı katı haldeki şartları direkt olarak yansıtmadığı ve bu yüzden mikro yapısal parametrelerin hiçbir metalografik evriminin mümkün olmadığı ifade edilmiştir. Ayrıca, yarı katı işlenmiş çeliklerin mikro yapılarının geleneksel olarak işlenmiş türlerinkinden tamamen farklı olduğunun da görüldüğü açıklanmıştır [16].

Uluğ (2006) tarafından yapılan “Sıfırlıtı/Kreojenik Isıl İşlemin 100Cr6 ve 8620 Kalite Çeliklerinin Özellikleri Üzerine Etkisi” konulu Yüksek Lisans çalışmasında, 8620 yüzey sertleştirilmiş ve 100Cr6 çeliklere sıfırlıtı ısıl işlem uygulanarak bu işlemin mikro yapı, kalıntı östenit hacim oranı, sertlik, darbe direnci ve aşınma direnci üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma için 10x10x50 mm deney numuneleri hazırlanarak iki farklı kalitedeki çeliğe farklı ısıl işlem döngüleri uygulanmıştır. 8620 yüzey sertleştirilmiş çelik 550°C’de 60 dakika ön ısıtmaya tabi tutulduktan sonra 930°C’de asetilen ortamı vasıtasıyla 24 dakika karbürlenmiştir. 120 dakikalık difüzyon süresi sonunda numuneler 860°C olan sertleştirme sıcaklığına indirilmiş ve 80°C’de yağ ortamında sertleştirilmiştir. -70°C’de 60 dakika sıfırlıtı işleme tutulan numuneler daha sonra 180°C’de 120 dakika temperlenmiştir. 100Cr6 kalite çelik ön ısıtma sıcaklığı olan 550°C’de 60 dakika, daha sonra östenitleme sıcaklığı olan 860°C’de 120 dakika tutulmuştur. Ardından numuneler 80°C’de yağ ortamında sertleştirilmiştir. -70°C’de 60 dakika sıfırlıtı işleme tabi tutulan numuneler sonrasında 200°C’de 120 dakika temperlenmiştir. Numuneler uygulanan işleme göre yalnızca sertleştirme işlemi uygulananlar, sertleştirme ve sıfırlıtı işlem uygulananlar ve sertleştirme, sıfırlıtı ve temperleme işlemi uygulananlar olacak şekilde 3 gruba ayrılmıştır. Optik mikroskop ile çekilen mikroyapı fotoğrafları irdelendiğinde 8620 ve 100Cr6 kalite çelikte sertleştirme sonrası ve sıfırlıtı işlem sonrası mikroyapıların birbirine benzer olduğu ortaya çıkarken temperleme işlemi sonrasında diğer işlemlerde görülen beynit morfolojisinin kaybolduğu tespit edilmiştir. Her numune grubu için X-ışını difraktometresi kullanılarak elde edilen difraksiyon paternleri incelenerek doğrudan karşılaştırma metodu ile kalıntı östenit hacim oranları belirlenmiştir. Sertleştirmeyi takiben yapılan sıfırlıtı işlemi her iki çelik kalitesinde de kalıntı östenit oranını % 38 azaltmıştır. Isıl işlemin son kademesi olarak yapılan temperleme işlemiyle, kalıntı östenit hacim oranında azalma devam etmiştir. Her iki çelikte de sıfırlıtı işlemiyle, kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi sonucu sertlik bir miktar artmıştır. Bu artış kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi ve sıfırlıtı işlemi sırasında meydana gelen karbür çökmesi mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Artış oranının, 8620 kalite çelik için yaklaşık % 1.5, 100Cr6 kalite çelik için ise yaklaşık % 3 düzeyinde olduğu saptanmıştır. Temperleme işlemi, uygulanan ısıl işlemler arasında en düşük sertlik değerinin elde edildiği ısıl işlem olarak belirlenmiştir. Temperleme sonucu sertlik değerindeki azalma oranının sertleştirilmiş duruma göre 8620 kalite çelikte % 8,

100Cr6 kalite çelikte ise % 3 dolayında olduğu tespit edilmiştir. 8620 ve 100Cr6 kalite çeliklere uygulanan sıfırtlı işlemin, tokluk değerlerinde fazla bir değişikliğe sebep olmadan sertlik değerlerinde artışa neden olmakta olduğu, her iki kalite çelikte de elde edilen aşınma direnci değerlerinin literatürde geleneksel ısıt işlemlerle elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte sıfırtlı ve temperleme işlemi ile sertleştirme sonrası elde edilen aşınma direncinin düştüğü görülmüştür. Sonuç olarak sıfırtlı işlemi ve temperlemenin, her durumda incelenen çeliklerin aşınma direncini olumsuz etkilediği ve her iki çeliğin sıfırtlı işlemiyle belirlenen mekanik özelliklerinin farklı mekanizmalarla kontrol edildiği anlaşılmaktadır [17].

Kameo, Nishiyabu, Friedrich, Tanaka ve Tanimoto (2006) tarafından yapılan “Sliding wear behavior of stainless steel parts made by metal injection molding (MIM) (Metal enjeksiyonlu kalıplamayla yapılmış paslanmaz çelik parçalarda kayma aşınması davranışı)” konulu çalışmada, metal enjeksiyonlu kalıplama (MIM) işlemiyle üretilmiş paslanmaz çelik parçaların aşınma direnci pin on disk tipi aşınma konfigürasyonu kullanılarak çalışılmıştır. Östenitik paslanmaz çelik 316 L (MIM ve dövme çelikten), çökeltilmiş paslanmaz çelik 17-4 PH (MIM ve dövme çelikten) ve geniş şekilde kullanılan rulman çeliği (DIN 100Cr6) metalleri kullanılmıştır. İki yüzey şartları, mesela sinterlenmiş ve parlatılmışta olduğu gibi MIM numunelerinin aşınma testlerinde dikkate alınmıştır. Özet olarak, 316 L'nin aşınma direnci 17-4 PH'den daha düşük ve 17-4 PH'da 100Cr6 ile hemen hemen aynıdır. Bunun ötesinde dövme çelikleri MIM metallerden daha iyi bir aşınma direnci göstermiştir. Bu yönelmelerden sorumlu olan mekanizmalar, aşınmış yüzeylerin ve numunelerin mikroyapılarının mikroskobik tetkikleri ve kimyasal muayeneleri vasıtasıyla tartışılmıştır [18].

Habak, Lebrun ve Morel (2007) tarafından yapılan “A study of the influence of the metallurgical state on shear band and white layer generation in 100Cr6 steel: application to machining (100 Cr6 çeliği üzerindeki kesme bandı ve beyaz katman kuşağı üzerinde metalürjik etkisine dair çalışma:Talaşlı imalat uygulaması)” konulu çalışmada, talaşlı imalat esnasında iş parçalarının; büyük gerilmeler, yüksek gerilme oranı, yüksek sıcaklıklar, karmaşık yükleme geçmişleri ve geri kazanım deneyimi yaşamakta olduğu, bu yüklemeleri yeniden üretmek ve 100Cr6 rulman çeliğinin

davranışını anlamak için yarı statik ve dinamik mekanik testler uygulandığı anlatılmıştır. Bu testlerin, özel geometrilik başlık şeklinde numuneler kullanarak kesimden sonra talaşların üzerinde gözlenmiş ilk kesim bölgesinin yeniden üretilmesine imkân sağladığı ifade edilmiştir. Çalışmada malzemenin iki metalürjik hali araştırılmıştır (karbürü ve karbürsüz). Her hal için, üç malzeme sertliği kullanılmıştır (46, 51 ve 55 HR_C). Test parametreleri ile gerilme oranı ve sıcaklık araştırılmıştır. Tüm testlerde kesme bölgelerinin mikroyapıları incelenmiştir. Sonuçlar karbür varlığının malzeme direncinin yükselmesine doğru eğimli olduğunu göstermiştir. Kesilmiş bölgelerin mikroskopik tetkikleri, mikroyapı ve termo-mekanik etkiler ile beyaz bölgelerin karakteristiği arasındaki hattın etkisine dikkat çekmiştir. Yarı statik ve dinamik kesme testleriyle, talaşlı imalatta elde edilmiş olanlara benzer beyaz katman üretmenin mümkün olduğu belirtilmiştir. Karbür varlığının kesme bantları ve beyaz katman üretimi üzerinde güçlü bir etkisinin olduğu, test sıcaklığı ve gerilme oranının artırılmasının kesme bandı genişliği ve beyaz katmanların artışına yatkınlık sağlamasına yol açtığı tespit edilmiştir. Dinamik testlerde elde edilmiş beyaz katmanlarla, sert tornalamada gözlemlenen talaş üzerinde kıyaslama yapılmıştır [19].

Sariibrahimoğlu, Kızıl, Aksit, Efeoğlu ve Kerpiççi (2008) tarafından yapılan “Tribological behavior of sintered steel under starved lubrication in R600a environment (R600a ortamındaki kuru yağlama altında sinterlenmiş çeliğin tribolojik davranışı)” konulu çalışmada, yeni çevre dostu kabul edilen R600a (İzobütan) soğutucusuyla uyumlu, aşınma direnci ve sürtünme katsayısını geliştirmek ve karakterize etmek amaçlanmıştır. Ancak, R600a kullanılan kompresörlerin uzun vadeli aşınma ve dayanımlarının bilinmediği ifade edilmiştir. Hava ve R600a ortamındaki kuru yağlama altında işlenmemiş ve buharlı işlenmiş çelik karşısında çalışan 100Cr6 çelik pimin tribolojik davranışı araştırılmıştır. Testler, 50 N’luk sabit bir yük ve 0,8 m/sn’lik kayma hızında yürütülmüştür. Her aşınma testinin başlangıcında numuneye madeni yağ serpiştirilmiştir. Aşınma testlerinden sonra pim ve plaka numuneler üzerinde enerji ayırımı X ışını analizi ve SEM uygulanmıştır. R600a’da yapılan testlerdeki dayanım mesafesi, havada yapılanlardan daha düşük çıkmıştır. R600a’nın aşınma üzerindeki ters etkisinin, vizkozitede değişim ve R600a’nın doğasındaki yağın köpüklenme karakteristiğine bağlı olduğu düşünülmüştür [20].

Gigovic-Gekic, Oruc, Vitez ve Vujicic (2009) tarafından yapılan “Analyse and Research of Nonmetallic Inclusions for Steel 100Cr6 (100Cr6 Çeliği İçin Metal Olmayan Kalıntıların Analiz ve Araştırması)” konulu çalışmada, metal olmayan kalıntıların varlığı ve onların kimyasal bileşenlerinin araştırma sonuçları, vakum ve açık indüksiyon elektrik fırınında üretilen çelik ve bu çelik için öngörülen özellikler üzerindeki etkileri göstermek için sunulmuştur. Optik ve taramalı elektron mikroskobu metal olmayan kalıntıların varlığını saptamak ve kimyasal bileşenlerini belirlemek için kullanılmıştır. 100Cr6 çelik numunelerinin ısıtma işlemi; koruyucu atmosfer olmadan fırında 800 °C sıcaklığa ısıtma, mevcut sıcaklıkta 4 saat kadar bekletme, fırını soğutma, koruyucu atmosfer olmadan fırında 820°C sıcaklığa ısıtma, mevcut sıcaklıkta 20 dakika kadar bekletme, suda söndürme/su verme, koruyucu atmosfer olmadan fırında 180 °C sıcaklığa ısıtma, mevcut sıcaklıkta bir buçuk saat kadar bekletme ve soğutma adımları takip edilerek yapılmıştır. Isıl işlemden sonra, optik bir mikroskop metal olmayan kalıntıların araştırılması ve belirlenmesi için kullanılmıştır. Saptanan metal olmayan kalıntıların kimyasal bileşenlerinin analizi bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda; üretilen çeliğin kimyasal analizinden, açık indüksiyon elektrik fırınında üretilen eriyiklerde ASTM 295 standardına göre daha fazla yüksek sülfür içeriği görüldüğü, bunun azaltılması için uygun hammadde seçiminin gerekli olduğu, eriyikteki yüksek sülfür içeriği kalıntılarının artan sülfür seviyesinin bir sonucu olduğu, atmosferin bir etkisi olarak beklenen açık indüksiyon fırınından alınan eriyiklerde artan oksit içeriğinin varlığı tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi karmaşık metal olmayan oksit-sülfat ve sülfat kalıntılarının varlığını göstermiştir. Kalıntıların zararlı etkileri deformasyon derecesi artırılarak azaltılmıştır. Hammaddelerin uygun seçiminin çok önemli olduğu ve yüksek kalite rulman çeliğinin endüstriyel üretimi durumunda eritme için vakum fırın kullanılması gerektiği önerilmiştir. Bir sonraki adım olarak açık indüksiyon fırınlarının bazı rulman çelik türlerinin üretiminde kullanılabileceği ve ham maddelerin seçimi ve neden önemli olduğu konusunda araştırma yapılmasının gerekli olduğu vurgulanmıştır [8].

Stienon, Fazekas, Buffiere, Vincent, Daguiere ve Merchi (2009) tarafından yapılan “A new methodology based on X-ray micro-tomography to estimate stress concentrations around inclusions in high strength steels (Yüksek mukavemetli çeliklerde bulunan kalıntılardaki gerilim konsantrasyonunu ölçmek için kullanılan

yeni X-ışını mikro-tomografi metodu)” konulu çalışmada, 3 boyutlu görüntü metodolojisi olarak nanoiz ve alan emisyonu (FE) ölçümleri, işletme koşulları gereği mekanik yüklemelerde kullanılan çelik matrisinin içerisindeki kalıntıların gerilim alanlarını daha gerçekçi bir şekilde ölçebilmek amacıyla önerilmiştir. Hertzian temasına tabi tutulmuş 100Cr6 rulman çeliklerin içine gömülü kalsiyum alüminat kalıntısı için bu metod detaylı olarak açıklanmıştır. Söz konusu kalıntının gerçek morfolojisi ve mekanik özellikleri nitelendirilmiştir. Üzerinde çalışılan materyalin dönmesiyle oluşan boşluklar resimlendirilmiştir. Bunların kontak gerilim alanında, kalıntının yön bağımlı davranış göstermesine neden oldukları ve kalıntı boşluklarının kontak yüzeyine dik olması durumunda kalıntının etki alanının daha geniş olacağı belirtilmiştir. Kalıntı boşluk sisteminin 3 boyutlu detaylı şeklinin, iki konik boşluk içeren bir düzleştirilmiş küresel kalıntı şekli ile iyi seviye bir kesinlikle yer değiştirebileceği gösterilmiştir. Bu yöntemin, FE ölçümlerinin uygulanabilirlik alanını genişlettiği, buna karşın boşlukları çıkarmak ve plastiklik özelliğini yok saymanın ölçülmüş gerginlik alanı ile gerçek şekle bağlı değer arasında geniş bir uyumsuzluk doğurduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kalıntı boşluk sisteminin yönüne bağlı olarak hesaplanmış gerilim alanı üzerinde ara koşulların büyük etkisi olduğunun görülmekte olduğu, bu metodolojinin karmaşık yorulma yüküne tabi tutulan yüksek mukavemetli çeliklerde kalıntı zararları konusunda daha iyi tahminler yapabilmek adına atılmış ilk adım niteliğinde olduğu vurgulanmıştır. Gelecekte, bu metodolojinin imalat süreçleri ile bağlantılı hale getirilebileceği, bu durumun çelikteki kirleşler ile kalıntının karmaşık şekillerinin temelinde yer almakta olduğu ifade edilmiştir [21].

Kara (2009) tarafından yapılan “Yüzeyi İnce Film Kaplanmış 100Cr6 Çeliğinin Çeşitli Ortamlarda Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” konulu Yüksek Lisans çalışmasında, MoS₂-Ti kaplama malzemesi; dört farklı parametrede (Çalışma Basıncı, Taban Malzeme Gerilimi, MoS₂ Magnetron Akımı ve Ti Magnetron Akımı) ve bu parametreler her biri için ayrı ayrı üç seviyede olmak üzere, belirlenen dokuz farklı kaplama koşulunda, darbeli DC manyetik alanda sıçratma yöntemiyle AISI 52100 (100Cr6) çelik malzeme üzerine kaplanmıştır. Elde edilen kaplamalar, sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi için; sabit çevresel hızda ve sabit yük altında atmosfer, 5x10⁻³ mbar ve 8x10⁻⁶ mbar vakum ortamlarında sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulmuşlardır. Söz konusu koşullarda test edilen

numunelerin çeşitli yöntemlerle incelenmelerinden, elde edilen kaplamalarda kristolografik yönlenmenin kaplama yapısındaki titanyum oranına bağlı olarak değişmekte olduğu belirlenmiştir. Uygulanan kaplama koşullarında gerçekleştirilen MoS₂-Ti kaplamaları genel olarak gözenekli ve kolonsal bir yapıya sahip olduğu, kaplamaların kalınlığını etkileyen en etkin parametrenin magnetron hedef akımı olduğu ortaya çıkarılmıştır. Yapıya eklenen titanyum oranının artmasıyla genel olarak kaplamaların vakum ortamındaki tribolojik davranışlarının olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür [22].

Ryttberg, Wedel, Recina, Dahlman ve Nyborg (2010) tarafından yapılan “The effect of cold ring rolling on the evolution of microstructure and texture in 100Cr6 steel (Soğuk halkalı haddelemenin 100Cr6 çeliğinde mikro yapı ve doku evrimine etkisi)” konulu çalışmada, başlangıçta dikdörtgen yatay kesitte olan 100Cr6 çelik halkaların soğuk halkalı haddelemesi sırasında mikro yapı ve doku gelişimleri incelenmiştir. Haddeleme işlemi önceden belirlenen aralıklarda durdurularak, halkaların değişen derecedeki deformasyonlarıyla 1.05 ile 1.5 arasında değişen genişleme oranlarına ulaşılmıştır. Basit dikdörtgen yatay kesitli halkaların sonuçları daha karmaşık yatay kesitli soğuk haddelenmiş halkaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Optik ve taramalı elektron mikroskopundan elde edilen sonuçları sertlik ölçümleri ile birleştirildiğinde, iki farklı halka şeklinin soğuk halkalı haddeleme sırasında benzer materyal akışı sergilediği görülmüştür. Deformasyon, en ciddi şekilde halkaların iç çaplarında görülmüştür ve dış çapa doğru azalan bir oran izlemiştir. Elektron geri saçılım kırınımı (EBSD) uygulanarak, halka haddeleme işlemiyle halka boşluklarının fiber dokusunun değiştiği görülmüştür. Bu işlemin, haddeleme sırasında kesme ve basma bozulmasının bir karışımını ifade ettiği tespit edilmiştir [23].

Rogal, Dutkiewicz, Czeppe, Bonarski ve Olszowska-Sobieraj (2010) tarafından yapılan “Characteristics of 100Cr6 bearing steel after thixoforming process performed with prototype device (Prototip cihaz ile gerçekleştirilen tikso döküm işleminin ardından 100Cr6 rulman çelik karakteristiği)” konulu çalışmada, yüksek basınçlı döküm makinesine (HPDC) bağlı çalışan ve çelikten tikso döküm yapabilme kapasitesine sahip bir cihaz temel alınmıştır. Gerekli olan yarı katı sıcaklık aralığına kadar indüksiyonla ısıtma işleminin ardından numuneler koruyucu

bir argon atmosferi içerisinde modifiye edilmiş yüksek basınçlı döküm makinesi silindrine alınmış ve önceden ısıtılmış baskı kalıbının içine enjekte edilmiştir. 100Cr6 rulman çeliği (dövme işleminin ardından) hammadde olarak kullanılmıştır. Çeliğin metalografik analizi, 2 µm ile 8 µm arasında tane büyüklüğü ile karakterize edilen tüm hacme sahip homojen bir yapı göstermiştir. Diferansiyel tarama kalorimetre (DSC) analizi sayesinde tikso döküm için gerekli olan işlem sıcaklığının 1.390°C olduğu ve bu sıcaklığın da sıvı fazın yaklaşık % 45'i anlamına geldiği saptanmıştır. Yarı katı işlemin ardından bu tür teknolojik parametreler sayesinde, mikro yapı 15 µm ile 40 µm arasında büyüklüğe sahip küresel tanelerden oluşmuştur. Küreciklerin mikro yapısı, plakalar arasında ostenit kalıntıları ile birlikte ağırlıklı olarak martensit varlığını (yaklaşık % 76 hacim payı ile) göstermiştir. X ışını analizi tikso döküm numunelerinin genellikle martensit ve ostenit kalıntıları barındırdığını göstermiştir. İlk dövme işleminden sonra numunenin kalınlığı 27 HR_C iken, tikso döküm işlemi ardından bu değer 60 HR_C olmuştur ki bu artış martensit ve karbür varlığının göstergesidir. Tikso döküm işlemi sırasında oluşan gerginliği yok etmek ve plastiksiz yapıyı artırmak için tikso dökümler iki saat boyunca 150°C gibi düşük sıcaklığa tabi tutulmuştur. Bu ısıl işlemde sonra sertlik değeri 62,3 HR_C olarak ölçülmüştür. Ayrıca, tikso dökümlerde fazları belirlemek için geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılmıştır [24].

Ballıkaya (2011) tarafından yapılan “100Cr6 Çeliğinin Teğetsel Tornalama-Frezeleme Yöntemi İle İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Deneysel Araştırılması” konulu Yüksek Lisans çalışmasında, özellikle tezgâh motoru ve pompaları, ölçüm aletleri, kalıp parçaları, miller, kollu kılavuz ve birçok makine parçası yapımında kullanılan 100Cr6 rulman çeliği teğetsel tornalama-frezeleme yöntemi ile işlenmiştir. Tam faktöriyel deneysel tasarım yöntemi kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, iş parçası devri, kesici takım devri, aksel ilerleme ve talaş derinliği gibi kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kesme parametrelerinden kesici takım devri ve iş parçası devrinin belirli bir değere kadar artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği bu değerden sonraki değerlerde tekrar arttığı belirlenmiştir. Kesme derinliğinin ve aksel ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda 100Cr6 rulman çeliğinin

teğetsel tornalama-frezeleme yöntemi ile işlenmesinde kesme parametrelerinin etkili olduğu, elde edilen yüzey kalitesinin taşlamaya yakın olduğu belirlenmiştir [7].

Hauserova, Dlouhy, Novy ve Zrník (2011) tarafından yapılan “Accelerated Carbide Spheroidisation In 100Cr6 Steel (100Cr6 Çelikte Hızlandırılmış Karbür Yumrulaştırılması)” konulu çalışmada, 100Cr6 çeliğine yumuşatma tavlama yapılarak hızlı karbür yumrulaştırması ve 100Cr6 rulman çeliğinin sertliğindeki düşüş üzerine araştırma yapılmıştır. Çalışmada, yeni tasarlanan programların geleneksel ısı işleme prosedürlerinden daha kısa olduğu ve bu alanda çok büyük bir potansiyel oluşturduğu belirtilmiştir. Çalışmada kullanılan 100Cr6 malzemenin başlangıçtaki mikro yapısı östenit öncesi sınırları boyunca çökelen az miktarda sementitle beraber perlit içermekte olup başlangıç materyali sıcak olarak dövülmüştür. Yeni tasarlanmış olan termal programların karbür yumrulaştırması davranışı ve 100Cr6 rulman çeliği türünde sertlik azalışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, 100Cr6 rulman çeliğinin su verme dilatometresinde ısı işleme ile yumrulaşmış karbür ve azalmış sertlikte bir mikro yapı üretilmiştir. Başlangıçtaki 351 HV10 değerdeki sertlik 277 HV10 değerdeki son haline inmiştir. Yaklaşık 30 saniyelik bekleme süresinden geçmiş numunenin mikro yapısı hem orijinal hem de yeni sementit lamellerinin karışımından oluşmuştur. Orijinal lamel kısmen parçalı olup, A_{c1} üzerinde 30 saniyelik bekleme süresinin orijinal sementit parçalarının tamamıyla parçalanması için çok kısa olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu işlem, östenit ayrıştırma sürecinde ince yeni sementit parçalarının oluşmasına yol açmıştır. Östenitleme ve östenit ayrıştırmanın tekrar eden döngülerini içeren programlar neredeyse tamamıyla yumrulaşmış karbürli mikro yapılar üretmiştir. Yumrulaşmış karbürlerin sürtünmesi artmış ve termal döngülerin artan sayısı ile beraber sertlik düşmüştür. Hızlandırılmış karbür yumrulaştırılmasının temeli karbon difüzyonunun azaltılmasıdır. Bu ısı işleme programları karbür yumrulaştırması için gereken zamanı birçok saatten dakikalara kayda değer şekilde azaltmıştır [25].

Kananen, Eskelinen ve Haeggström (2011) tarafından yapılan “Discriminating pores from inclusions in rolled steel by ultrasonic echo analysis (Ultrasonik eko analizi ile haddelenmiş çeliklerde kalıntıları gözeneklerden ayırt etme işlemi)” konulu çalışmada, çeliklerin üretimi sırasında meydana gelen kalıntı ve

gözenekler nedeniyle kalitelerinin bozulduğu, dış gerilime tabi tutulmaları halinde geniş kalıntıların çelik bileşenlerinin mekanik mukavemetini azaltan çatlaklıklar oluşturduğu ifade edilmiştir. Bu çalışma içerisinde, kalite kontrolünde kullanılan ultrasonik daldırma darbe-yankı düzeneği, sinyal bazlı kalıntı ve gözenek ayırım işlemi için kullanılmıştır. Kullanılan küçük dalga ve kısa zamanlı Fourier dönüşüm metotları, optik mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak doğrulanmıştır. Ultrasonik metot, bünyesinde toplamda 24 kalıntı ve 16 gözenek bulundurduğu tespit edilen 22 adet haddelenmiş 100Cr6 çelik rulman numuneleri üzerinde test edilmiştir. Yankı tepe frekansındaki farklılıklara dayalı olarak, küçük dalga dönüşüm metodu kullanılarak gözenekleri kalıntılardan ayırmak mümkün olmuştur. Sülfid ve oksit enklüzyonları da 9-14 MHz frekans aralığı içerisinde farklılıklar göstermiştir. Geliştirilen ultrasonik metodun, haddelenmiş 100Cr6 rulman çeliklerindeki kalıntıları gözeneklerden ayırma özelliğine sahip olduğu saptanmıştır [26].

Guddat, M'Saoubi, Alm ve Meyer (2011) tarafından yapılan “Hard turning of AISI 52100 using PCBN wiper geometry inserts and the resulting surface integrity (PCBN silecek geometri uçları kullanarak yapılan AISI 52100’ün sert tornalaması ve ortaya çıkan yüzey bütünlüğü)” konulu çalışmada, yüksek verimlilik, yüksek elastikiyet ve soğutuculardan kaçınmaya olanak sağlamak için sert tornalamanın günümüzde sertleştirilmiş metallerde çalışan parçaların bitimindeki taşlamaya bir alternatif olduğu belirtilmiştir. Çok taneli bor küp nitrür (PCBN) silecek uçları kullanmanın geleneksel uçlarla yapılan makinada işleme deneyleriyle karşılaştırıldığında artan bir besleme hızında yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ifade edilmiştir. Avantajları bilinmesine rağmen sert tornalama işleminde yüzey bütünlüğünde silici PCBN uçlarının etkisinin literatürde iyi bir şekilde açıklanmadığı, bu çalışmada silici PCBN uçlarının tümden sertleştirilmiş AISI 52100 (100Cr6) (58-62 HR_C)’ün sert tornalanmasıyla bitimindeki kesim kuvveti ve yüzey bütünlüğündeki etkisini araştırmayı hedeflemiştir. Deneylerin istatistiksel tasarımını temel alan bir model, kesim parametreleri içerisindeki yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetini tahmin etmek için oluşturulmuştur. Yüzey ve yüzey altı bütünlüğünün ölçümü geleneksel geometri uçlarıyla karşılaştırıldığında, PCBN silici uçlarının uygulanmasının gelişmiş yüzey pürüzlülüğü ve yüksek baskılı artık gerilmesiyle sonuçlandığı tespit edilmiştir [27].

Tonicello, Girodin, Sidoroff, Fazekas ve Perez (2012) tarafından yapılan “Rolling bearing applications: some trends in materials and heat treatments (Rulmanlı yatak uygulamaları: bazı malzeme eğilimleri ve ısıl işlemler)” konulu çalışmada, rulmanlı yataklarda kusurun başlıca nedeninin değme yorulması olduğu ifade edilmektedir. Haddeleme değme yorulması (RCF), sonunda malzemenin yok olmasına öncülük eden büyük haddeleme değme kısımlarını içerisinde bulunduran yakın yüzey dalgalı gerilim alanının sebep olduğu çatlama başlangıcı ve yayılım mekanizmaları şeklinde tanımlanmıştır. Bu kapsamda; haddeleme değme yorulma direnci ve boyutsal kararlılığı rulmanlı yatak malzemelerinin önemli iki gerekliliğidir. Haddeleme değme yorulması malzemedeki yüzeyin altındaki elastik homojensizlik (kalıntı) mevcudiyetinden kaynaklanabilmekte ve yüzeyde de yağlama koşullarının yetersizliği ya da kirliliğinden ötürü oluşabilmektedir. Materyal ve ısıl işlem konusunda iki klasik çözüm sunulmuş ve tartışılmıştır. İlk olarak klasik şekilde değme gerilmesini düşürmek için kullanılan seramik bilyaların kirlenmiş ortamda daha derin oyuklara neden olabildiği gösterilmiştir. İkinci olarak, termoelektrik güç ölçümünü temel alan bir birleşik yaklaşım, muhafaza ettiği östenit içeriğiyle orantılı olarak boyutsal değişiklik gösteren beynitli 100Cr6 çeliğinin boyutsal kararlılığı tahmin etme ve anlamada kullanılmaktadır. Çalışmanın sonucunda; yüzey haddeleme değme yorulmasının uygun ısıl işlemlerle yüzey sertliğini artırarak ya da yağlama sınır rejiminde seramik haddeleme elemanları kullanarak kısıtlanabileceği, ancak bu tarz çözümlerin kirlenmiş ortamda daha derin oyuklara neden olabileceği gösterilmiştir. Termoelektrik güç ölçümleri, yıpranma sırasında faz fraksiyonu evrimlerini karakterize etmek için kullanan bir birleşik yaklaşım beynitli 100Cr6 çeliği için kullanılmıştır. Bu, çeşitli sıcaklıklardaki yıpranma işlemleri altında çok iyi boyutsal değişiklik tahminlerini göstermektedir. Hiçbir karbür çökmesi, tutulan östenitin dekompozisyonu (bozulma) ile ilişkili dilatasyonunu (genleşme) dengeleyemeyeceğinden, beynitli 100Cr6 çeliği, kendi martenzitik emsalinden daha büyük boyutsal bir evrim sergilemektedir [4].

Amey, Huang ve Rivera-Diaz-del-Castillo (2012) tarafından yapılan “Distortion in 100Cr6 and nanostructured bainite (100Cr6 ve nano-yapılı beynitlerde bozulmalar)” konulu çalışmada, 100Cr6 ve nano-yapılı karbür içermeyen beynit dönüşümlü çelik üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Faz dönüşümü nedeniyle oluşan bozulma seviyesinde ısıl işlemin etkisi saptanmıştır. Martenzit

yerine beynit dönüşümü kullanıldığında, soğutma hızının 100Cr6 üzerinde bozulma derecesini onda bire düşürerek önemli bir rol oynadığı saptanmıştır. Nano-yapılı karbür içermeyen beynit oluştururken, soğutma hızını daha da fazla düşürerek bozulma seviyesinde ilave azalmaların elde edilmesinin mümkün olduğu belirtilmiştir. Termodinamik ölçümlere başvurarak ve sinir ağı kullanarak, bozulmanın düzenlenebileceği saptanmıştır. Bünyesinde büyük ölçüde dönüşmemiş östenit bulunması halinde (nano yapılı beynit durumu gibi), bu durumun bozulmayı düzenlemek için kullanılabilmesi, ayrıca dönüşmemiş östenit miktarını kontrol ederek, gerilim azalması ile oluşan daralma sayesinde beynit oluşumu nedeniyle meydana gelen bozulmanın yayılımını dengelemenin mümkün olduğu ifade edilmiştir. Isıl işleme tabi tutulmuş bileşenlerin üretimi sırasında meydana gelen faz dönüşümün (boyutsal değişim) bir sonucu olarak, bu mekanizmaların işletilmesinin bozulmanın azaltılmasına katkıda bulunabileceği değerlendirilmiştir [28].

Grad ve Kerscher (2012) tarafından yapılan “Fatigue Crack Paths in the VHCF-regime of 100Cr6 (100Cr6’nın VHCF rejiminde yorulma çatlak izleri)” konulu çalışmada, yüksek mukavemetli çelikten yapılmış dairesel yüklü makine parçalarının genellikle yüzeyaltı kalıntılarından dolayı yüksek ömür sağlamada başarısız oldukları vurgulanmıştır. Bu hadise, çok yüksek devirli yorulma (VHCF) rejiminde bozulmaya sebep olan düşük gerilim genliklerindeki yorulma testlerinde açık olarak gözlenmiştir. Buna karşın yüksek gerilim genliklerinde çatlak başlangıcı ve bozulmanın yüzeyden başladığı tespit edilmiştir. Gerilme seviyesine bağlı olarak farklı çatlak büyüme mekanizmalarının yüzeyaltı kalıntılardan başlayan bozulmada asli rol oynadığı gösterilmiştir. Bozulmalardan başlayan çatlak büyümesini analiz etmek için martenzitik koşuldaki 100Cr6 çelik numuneleri bozulmaya kadar farklı yüklerdeki çekme-basma altında test edilmiştir. Çatlak yüzeyler, çatlak mekanik teorisini uygulamak için çatlak orijini üzerindeki odakla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile test edilmiştir. Sonuç olarak bozulma tipindeki değişim, kendine özgü gerilim şiddet faktörleri ve uzun çatlakların başlaması için genel eşik değerine bağlı olan farklı çatlak büyüme mekanizmalarıyla açıklanmıştır [29].

Szost, Vegter ve Rivera Diaz Del Castillo (2013) tarafından yapılan “Developing bearing steels combining hydrogen resistance and improved hardness (Hidrojen direnci ve yükseltilmiş sertlik özelliklerini birlikte kullanarak rulman

çeliklerin geliştirilmesi)” konulu çalışmada, termodinamik ve kinetik sayısal modelleme, hidrojen dirençli rulman çelik tasarlamak için bir araya getirilmiştir. Var olan hidrojen dirençli çeliklerin düşük sertlik değerleri nedeniyle rulman için uygun olmadığı, önerilen mikro yapının martensit matrisini birleştirdiği ve ince sementit çökeltilerinin mukavemet ve hidrojen kondensobu olarak işlem gören V_4C_3 nano ölçülü parçacıkların oluşmasına yol açtığı ifade edilmiştir. Ultra sertlik ve hidrojen direnci amaçları arasında var olan çatışmanın iki yöntem ile giderilebileceği görülmüştür. Bunlar, ilk olarak 100Cr6’ya 0,5 wt. % V ekleyerek var olan çelik üretim teknolojisini korumak, ikinci olarak östenitlemeden oluşan yeni bir ısıl işlem uygulamak (ve ardından iri V_4C_3 ’leri eritmek için ani ısı yükselmesi uygulamak), V_4C_3 parçacıklarının oluşması için ısı seviyesini $600^{\circ}C$ ’a yükseltmek (ardından iri sementiti eritmek için ani ısı yükselmesi uygulamak) ve son olarak ince sementit takviye parçacıkların oluşması için tavlama ve $215^{\circ}C$ derecesinde ısıtma işlemlerini uygulamak şeklinde tanımlanmıştır. Yeni çeliğin artırılmış kondensob (tutma) kapasitesinin termal desorpsiyon (yüzeyden çıkarma) aracılığıyla gösterilebileceği ve ısıl işlemin ardından istenilen mikro yapı varlığının geçirimli elektron mikroskobu ile kanıtlanabileceği belirtilmiştir. Kondensob özelliğinin doğal bir sonucu olarak önemli bir sertlik artışı gözlemlenerek bu artış kontrollü V_4C_3 presipitasyonu (çökelti) ile ilişkilendirilmiştir [30].

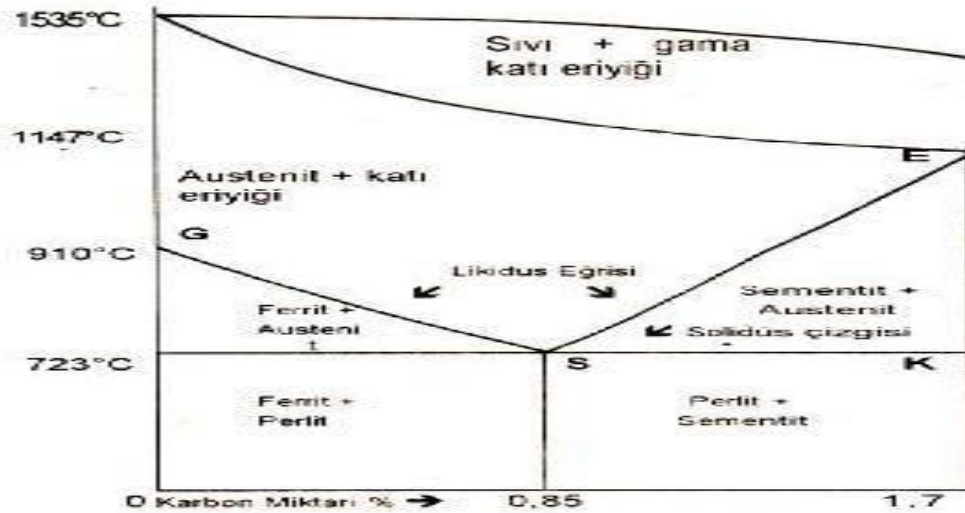
Kang, Vegterb ve Rivera-Diaz-del-Castillo (2014) tarafından yapılan “Rolling contact fatigue in martensitic 100Cr6: subsurface hardening and crack formation (Martenzitik 100Cr6’da haddeleme değme yorulması: yüzey altı sertleştirme ve çatlak oluşumu)” konulu çalışmada, 100Cr6 çeliği üzerinde haddeleme değme yorulma testleri ball-on-rod test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı hasarının yüzey altında kademeli sertlik değişimleri sonucu ortaya çıktığı ve mikro çatlakların kalıntılarının yanında oluştuğu tespit edilmiştir; her ikisinin de plastik deformasyonun kanıtı olduğu ifade edilmiştir. Sertlik artışının artık gerilim artışından kaynaklandığı düşünülmüş, mikro çatlakların ise kalıntılarının etrafında oluşan gerilme yoğunlaşmasının bir sonucu olarak oluştuğu belirlenmiştir. Mikro çatlak yöneliminin üretilen artık gerilmelerin derecesine bağlı olarak stres durumundan etkilendiği öne sürülmüştür. Artık gerilim artışının, hasar morfoloji üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulduğunda, taşıyıcı eleman test yöntemlerini optimize etmekte anahtar bir faktör olabileceği değerlendirilmiştir [31].

3. İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME

3.1 Çeliklerin Sertleştirilmesi

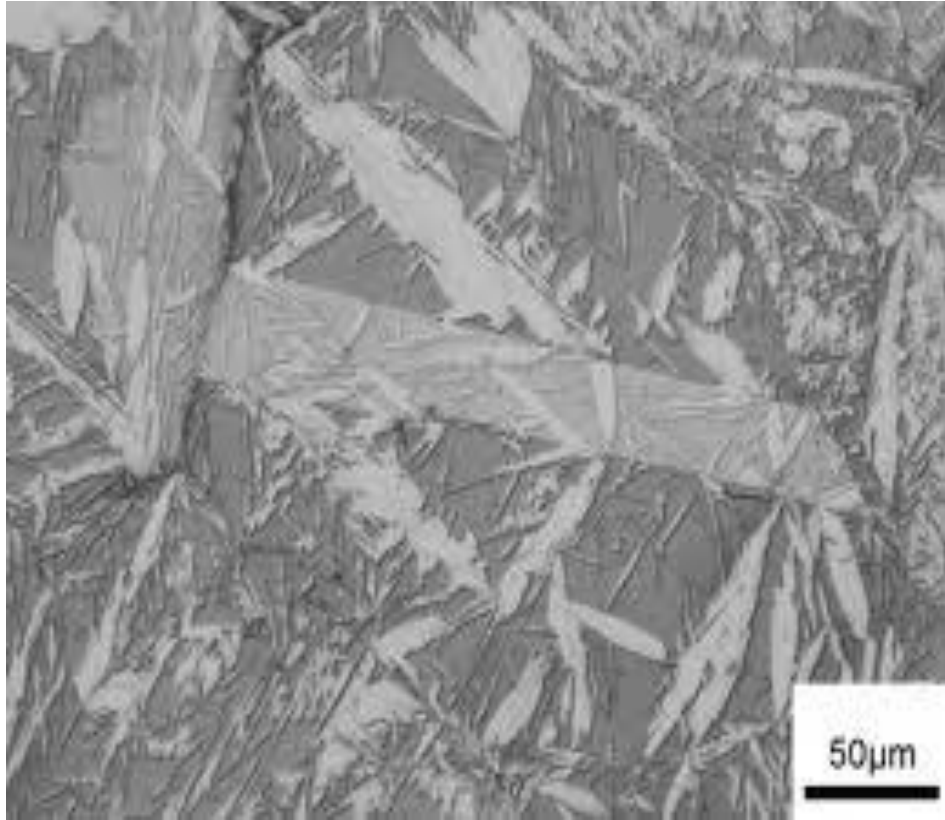
Çeliğe özellik kazandıran en önemli ısıl işlem sertleştirmedir. Sertleştirme için çeliklerin östenit bölgesine kadar ısıtılması gereklidir. Çelik bir ferrit-sementit alaşımıdır. Bu alaşımın karbon oranı % 1,7'ye kadar bir ötektoit yapmaktadır. Ötektoit oranda karbon oranı % 0,85 ve sıcaklık 723°C'dir. Ötektoit sıcaklık üzerinde çelik, bir yapı değişimine uğramaktadır. Isıl işleme tabi tutulmadan önce çelik çift fazlıdır. Bu fazlar karbon oranına göre ferrit+perlit veya perlit+sementittir. Ötektoit sıcaklık üzerinde perlit yapı östenite dönüşmektedir. Diğer fazlar ferrit ve sementit ise Şekil 3.1'de gösterildiği gibi GSE çizgisi üzerinde dönüşmesini tamamlayarak östenit olmaktadır. Östenit karbon eritme özelliği olan 14 atomlu yüzey merkezli bir kristal yapıdır.

Isı verilmeye başlandığında ötektik sıcaklık üzerinde perlit ve sementitin dönüşmesi sonucunda serbest kalan karbon atomları östenitik yapıda merkez boşluğuna girerek yerleşmekte ve katı eriyik meydana getirmektedirler. Isı arttıkça boşluklar büyüyeceğinden daha fazla karbon atomu eritme (içine alma) yeteneği kazanan kristaller % 1,7'ye kadar karbon alacak duruma gelmektedir.



Şekil 3.1: Sertleştirme ortamı.

Çelik soğumaya başladığında işlem tersine işleyerek yine sementit ve perlit yapı oluşmaktadır. Hızlı soğutma yapılarak buna zaman verilmezse karbon atomları bulunduğu kristal kafes içerisinde kalmış olmaktadır. Yeni kristal yapı karbon eritme yeteneğine sahip olmadığı halde zoraki karbon atomu bulundurmaktadır. Fazladan karbon atomları olduğu için bu kristaller düzgün kübik şekilde olamamaktadırlar. Düzgün olmayan bu kristal yapı, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi martenzit adını almakta ve şekil bozukluğu gerginliklere neden olmaktadır. Sertliğin sebebi de budur [2].



Şekil 3.2: Martenzitik yapıdaki bir plakanın optik görüntüsü [32].

3.1.1 Sertleştirme İşleminin Aşamaları

3.1.1.1 Ön Isıtma

Çelik malzeme oda sıcaklığından hemen su verme sıcaklığındaki fırına konulacak olursa, dış yüzeyler yüksek ısıyla karşılaşırken, iç kısımlar başlangıçta soğuk kalmaktadır. Bu sıcaklık farkı büyük iç gerilimlere ve sonucunda da

çatlamalara neden olmaktadır. Bunu önlemek için çelik; esas fırınlamadan önce, daha düşük sıcaklıktaki bir fırında ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Ön ısıtma sade karbonlu çeliklerde 650-700°C, alaşımlı çeliklerde ise 800-900°C sıcaklıklarda yapılmalıdır. Ön ısıtmada zaman genellikle önemli değildir.

3.1.1.2 Östenite Dönüştürme

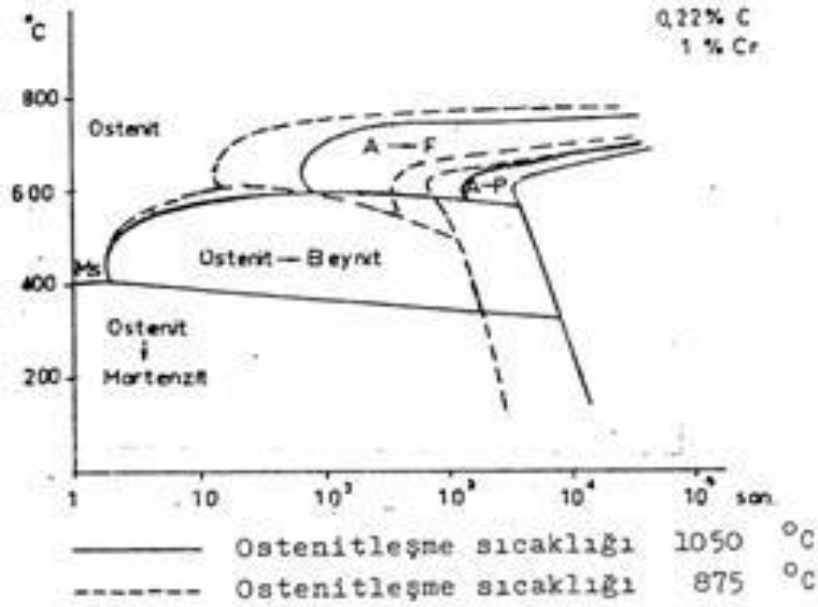
Sade karbonlu çeliklerde östenite dönüştürme sıcaklığı, perlitin dönüşme sıcaklığı olan 723°C'dir. Ötekoitüstü çeliklerde östenite dönüştürmek için SE çizgisinin üstüne çıkmaya gerek yoktur. Çünkü 723°C'de perlit östenite dönüşmektedir. Sementitin östenite dönüştürülmesi gerekmemektedir. Dönüşmede elde edilecek martenzit de sementit kadar serttir. Ancak ötektikaltı çeliklerde bütün yapının östenite dönüşmesi gereklidir. Alaşımlı çeliklerde alaşım elemanlarının karbürlerinin erimesi için daha yüksek sıcaklıklar gereklidir.

3.1.1.3 Bekletme-Isı Emdirme

Çeliklerin su verme sıcaklığında dönüşmesinin tamamlanması için bir süre bekletilmesi gerekmektedir. Bu bekletme işlemi genellikle her cm kalınlık için 5 dakikadır. Katkılı çeliklerde dönüşüm daha geç olduğundan 20-30 dakika daha fazla bekletme gerekir.

3.1.1.4 Sertleştirme-Martenzite Dönüştürme

Su verme sıcaklığına kadar tavllanmış olan çelikler izotermal dönüşüm diyagramındaki Ms çizgisine kadar soğutulacak olursa martenzit yapı elde edilmektedir. Sertleştirme, Şekil 3.3'te verildiği gibi genel olarak östenit bölgesinden, elle tutulabilecek bir sıcaklığa kadar yapılmaktadır.



Şekil 3.3: % 1 Cr'lu çelikte östenitleme sıcaklığının sürekli soğuma diyagramı üzerine tesiri [33].

3.2 Yüzey Sertleştirme

Her bir çelik tipinin imalat ve işletmede ayrı ayrı avantajları vardır. Örneğin, tümenden sertleştirilmiş çelikler, karbürlemeyle mukayese edildiğinde su verme ve temperleme ısıl işlemlerinde daha basit olduğundan önerilmektedir. Diğer tarafta yüzeyi karbürlenmiş çelikler, atık kirliliği ya da hatalı hizalamanın gerilim artıran etkilerini kapsayan çevresel etkilere daha iyi adapte olabilmektedir. Ayrıca daha yumuşak, tok bir iç bölge ve yüzeydeki faydalı baskılı atık gerilmelerinin varlığında tüm kesitteki kırılmaya karşı daha iyi direnç sağlamaktadırlar [5].

Çeliğin ısıl işlemi, atık gerilmelerini azaltan ve/veya sertlik (mukavemet), süneklik ve tokluk gibi malzeme özelliklerini düzenleyen zaman ve sıcaklık kontrollü işlemlere başvurmaktadır. Diğer mekanik veya kimyasal işlemler zaman zaman ısıl işlem başlığı altında gruplandırılmaktadır. Genel ısıl işlem çeşitleri; tavlama, su verme, temperleme ve yüzey sertleştirmedir [6].

Yüzey sertleştirme; daha yumuşak, tok iç yapıya etki etmeden parçaların aşınma direncini geliştirmekte olan ve Tablo 3.1'de verilen geniş çeşitlilikteki teknikleri kapsayan bir prosestir. Bu sert yüzey ve darbe sonucu çatlağa direnç kombinasyonu, beraberinde işlem esnasında meydana gelen darbeye dirençli tok bir

iç yapıyla birlikte aşınma direnci için çok sert bir yüzeye sahip olması gereken eksantrik dişlisi, volan dişlisi, rulmanlar veya şaftlar, türbin uygulamaları ve otomobil bileşenleri gibi parçalarda kullanışlıdır. Birçok yüzey işlemi, çatlak başlama ihtimalini azaltan yüzeydeki atık gerilmelerine sebep olmakta ve yüzey-iç arayüzde çatlak büyümesini durdurmaya yardımcı olmaktadır. Bunun haricinde çeliğin yüzey sertleştirmesinin tümünden sertleştirmeden fazla avantajı bulunmaktadır, çünkü daha az masraflı düşük karbon ve orta karbon çelikleri, kalın kesitlerin tümünden sertleştirilmesine bağlı minimal bozulma ve çatlak problemleriyle yüzey sertleştirmesine tabi tutulabilmektedirler.

Çeşitli yüzey sertleştirme metotları için 2 farklı yaklaşım bulunmaktadır:

- Tasarlanmış bir artış veya yeni bir katman eklenmesi ihtiva eden metotlar,
- Tasarlanmış bir artış veya plaka ebatlarında bir artışın olmadığı yüzey ve yüzeyaltı modifikasyonu ihtiva eden metotlar.

Yüzey sertleştirme metotlarından ilk grup; ince filmler, yüzey kaplamaları veya kaynak kaplamaları (sert yüzkaplama) ihtiva etmektedir. Filmler, yüzey kaplamaları ve kaplamalar, genellikle iş parçalarının özellikle tüm yüzeylerinin sertleşmiş olması gerektiğinde, üretim miktarı artışında olduğu gibi daha az etkin maliyetli hale gelmektedir. Film, yüzey kaplama ve kaplamaların yorulma performansı, alt katman ve eklenmiş katman arasındaki bağ kuvvetine dayanan sınırlayıcı bir faktördür. Füzyon kaynaklı kaplamaların güçlü bağları vardır, fakat ilk yorulma yüklü aşınma uygulamalarında kullanılmış olan yüzeyi sertleştirilmiş çelikler, yüzeyi sertleştirilmiş ağır çelikler ve alev ya da indüksiyonla sertleştirilmiş çelikleri kapsamaktadır. Buna rağmen yüzey kaplamaları ve kaplamalar birçok uygulamada etkili olabilmektedir. Örneğin TiN ve Al₂O₃ gibi takım çelikleriyle yüzey kaplamaları sadece sertlikleriyle değil, aynı zamanda krater aşınması ve kaynak çapağını azaltan kimyasal durgunluklarıyla da etkilidirler. Bazı kaplamalar korozyon direnci özelliği verebilmektedir. Geniş alanlar için seçmeli sertlik istendiğinde, kaplamalar etkili olabilmektedir.

İkinci grupta bulunan difüzyon metotları; karbon, nitrojen veya bor gibi sertleştirme çeşitleriyle yüzeyin kimyasal bileşimini modifiye etmektedir. Difüzyon metotları, parçanın tüm yüzeyinin etkin sertleşmesine imkan verebilmektedir ve genellikle çok sayıda parçanın yüzey sertleştirilmesi yapıldığında kullanılmaktadır.

Buna karşılık seçmeli yüzey sertleştirme metotları bölgesel sertleştirmeye imkan verebilmektedir. Seçmeli sertleştirme genellikle dönüşüm sertleşmesini (ısıtma ve su verme) kapsamaktadır, ancak bazı seçmeli sertleştirme metotları (seçmeli nitrürleme, iyon yerleştirme, iyon ışını karıştırma) yalnızca bileşimsel modifikasyon temeli üzerine kurulmuşlardır [34].

Tablo 3.1: Çeliklerin yüzey sertleştirilmesi için mühendislik metotları [34].

KATMAN EKLEMELERİ		ALT KATMAN İŞLEMLERİ	
Sert Yüzkaplama	Yüzey Kaplamaları	Difüzyon Metotları	Seçmeli Yüzey Sertleştirme Metotları
Füzyon Sertyüzkaplaması (Kaynaklı Kaplama)	Elektrokimyasal Kaplama	Karbürleme (Sementasyon)	Alevli Sertleştirme
Termal Püskürtme (Füzyonsuz Yapışık Kaplama)	Kimyasal Buhar Çökeltme (Elektriksiz Kaplama)	Nitrürleme	İndüksiyonla Sertleştirme
	İnce Filmler (Fiziksel Buhar Çökeltme, Püskürtmeli Metal Film, İyon Kaplama)	Karbonitrürleme	Lazerli Sertleştirme
	İyon Karıştırma	Nitrokarbürleme	Elektron Işını Sertleştirme
		Borlama	İyon Yerleştirme
		Titanyum-Karbon Difüzyonu	Seçmeli Karbürleme ve Nitrürleme
		Toyota Difüzyon Prosesi	Ark Lambası Kullanımı

Yüzey sertleştirme, düşük karbonlu çelik üzerinde sert bir dış yüzey üretirken, aynı zamanda iç kısımda süneklik ve tokluğun muhafaza edilmesini amaçlamaktadır. Bu da yüzeydeki karbon oranının artırılmasıyla yapılmaktadır. Katı, sıvı ya da gaz karbürize malzemeler kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan yüzey sertleştirme işlemlerinden bazıları sementasyon, nitrürleme, alevle sertleştirme ve indüksiyonla sertleştirmedir [6].

3.2.1 Sementasyon

Karbürasyon adı da verilen bu yöntemle çelik yüzeyine atomik difüzyon yolu ile karbon atomları emdirilmektedir. Çelik yüzeyinin karbon oranı yükseltilerek sertleşme yeteneği kazandırılmaktadır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi sementasyon işlemi ile yüzeyde 1-3 mm'lik bir katman karbon emdirilerek sertleştirilmektedir.

3.2.1.1 Katı Ortamda Sementasyon

Katı karbon verici maddeler kullanılarak yapılan sementasyon çeşitlidir. Karbon verici maddeler meşe kömürü, kok ya da linyit, kemik kömürü, deri, kösele, tırnak ve boynuz talaşlarıdır. Semente edilecek parça katı karbon vericilerle özel çelik kasalar içerisine yerleştirilip kapatılmaktadır. Çelik parçaların etrafı en az 30 mm kalınlığında sementasyon maddesi ile kaplanmış olmalıdır. Kasanın kapağı sızdırmaz bir şekilde kapatılarak, kasa fırına yerleştirilmektedir. Fırın sıcaklığı 875-950°C arasında olmalıdır. Sementasyon kasası fırında 8-16 saat süre ile bekletilmektedir. Bunun sonucunda malzeme yüzeyi yeterli oranda karbon emerek sertleşmiş olmaktadır.

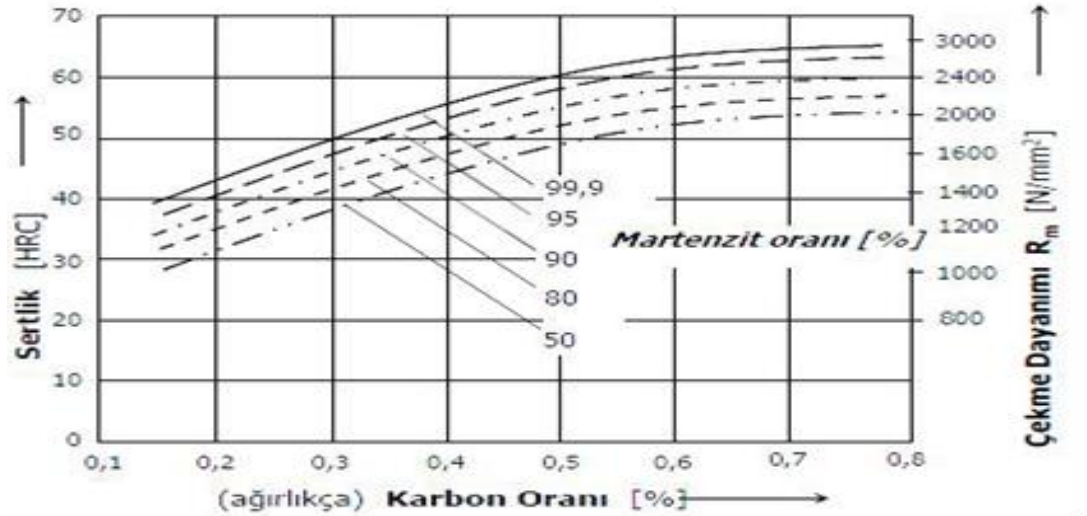
3.2.1.2 Sıvı Ortamda Sementasyon

Sıvı karbon vericilerle yapılan sementasyon işlemidir. Sodyum Siyanür (NaCN), Potasyum Siyanür (KCN), Kalsiyum Siyanür (N₂) sıvı sementasyon işleminde kullanılan bileşiklerdir. Bu maddeler ergitilerek sıvı hale getirilmektedir. Çelik parçalar 800-875°C sıcaklığa kadar ısıtılıp sıvı siyanür banyosuna daldırılmaktadır. Bu banyoda 15-45 dakika bekletilmekte, bu süre içerisinde malzeme yüzeyinin sertleştirilmesi gerçekleşmektedir. Ekonomik olduğu için en

fazla kullanılan yöntemdir. Sıvı ortamda sementasyona siyanür banyosu adı da verilmektedir.

3.2.1.3 Gaz Ortamda Sementasyon

Gaz ortamda sementasyon, özel fırınlarda civata, vida, pim gibi küçük makine parçalarına uygulanmaktadır. Gaz sementasyonda metan, etan, asetilen, hava gazı vb. gaz karbon vericiler kullanılmaktadır. Gaz ortamda sementasyon uzun zaman almaktadır, buna karşılık kabuk ince olmaktadır. Fırına gönderilen karbon verici gaz, sementasyon sıcaklığında karbon atomlarını çeliğe vererek etki etmekte ve kabuktaki karbon yüzdesinin yükselmesini sağlamaktadır [2].



Şekil 3.4: Su verme işlemi sonucunda karbon ve martenzit oranına bağlı olarak sertlik ve mukavemet artışı [35].

3.2.2 Nitrürleme (Nitrürasyon)

Az karbonlu ve az katkı (krom, molibden ve alüminyumlu) çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme yöntemidir. Sementasyondan farklı olarak çelik yüzeyine karbon yerine azot atomları emdirilmektedir. Azot atomları çelik yüzeyinde bir nitrür tabakası oluşturmaktadır. Bu tabaka ayrıca sertleştirmeye gerek olmayan sert olan bir katmandır. Nitrürasyon fırınlarının sıcaklığı 450-540°C'dir ve fırından sürekli amonyak gazı geçirilmektedir. Nitrür tabakasını, parçalanan amonyak gazından serbest kalan azot atomları çelik yüzeyine girerek oluşturmaktadır. Bu

oluşum 72 saatte gerçekleşmekte ve elde edilen bu tabaka yüksek sıcaklıklarda da sertliğini korumaktadır.

3.2.3 Alevle Yüzey Sertleştirme

İçerisinde karbon oranı % 0,35-0,70 arasında bulunan krom-nikelli, krom-molibden katkı elemanlı ve sade karbonlu çeliklere uygulanmaktadır. Sertleştirilecek yüzey, alev yardımı ile kısa zamanda su verme sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Isıtılan yüzeye su püskürtülerek soğutma işlemi yapılmakta, yapılan bu işlemle yüzeyde 1-3 mm kalınlıktaki bir kısım sertleştirilmektedir. Alevle yapılan yüzey sertleştirme işlemi fırına sığmayacak kadar büyük parçalara uygulanmaktadır [2].

3.2.4 Proses Seçimi

En yaygın kullanılan yüzey sertleştirme metotlarının faydaları Tablo 3.2'de mukayese edilmiştir. Alev ve indüksiyonla sertleştirme, genellikle orta karbonlu çelikler, orta karbonlu alaşım çelikleri, bazı dökme demirler ve düşük alaşımli çelikler gibi çelik aileleriyle sınırlandırılmıştır. Alevle sertleştirilebilecek parçalarda boyut sınırı yoktur, çünkü sadece parçanın sertleştirilecek kısmının ısıtmaya ihtiyacı bulunmaktadır. Alevle sertleştirme genellikle çok kalın yüzeyler (yaklaşık 1,2-6 mm veya 0,6-0,25 inç) için kullanılmaktadır, ince yüzey derinliklerinin kontrolü ısıtma prosesinin doğasından dolayı zordur.

Dönüşüm sertliği, yorulma mukavemeti için yararlı olan yüzeyin baskılı atık gerilmelerini ortaya koymaktadır. Oysa ki seçmeli sertleştirmede, bazı atık çekme gerilmeleri, sertleştirilmiş bölgenin sertleştirilmemiş bölge ile buluştuğu yerde var olacaktır. Dolayısıyla alev ya da indüksiyonla sertleştirme gibi metotlar, geometrik gerilme konsantrasyonlarından uzakta uygulanmalıdır. Nitrüleme ve sementasyon, yüzey yorgunluğuna karşı iyi direnç sağlamakta, dişli ve kamlarda geniş olarak kullanılmaktadır. Eğilme yorulması açısından ideal yüzey derinliği, ulaşılmış bozulma başlangıç noktasının iç taraftan yüzeye doğru transfer edildiği yer gibi görünmektedir [34].

Tablo 3.2: Sık kullanılan beş yüzey sertleştirme işleminin karşılaştırmalı faydaları.

Proses	Faydaları
Sementasyon	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (orta yüzey derinlikleri); temas yükü için kusursuz kapasite; iyi eğilme yorulma mukavemeti; tutukluğa karşı iyi bir direnç; su verme çatlamasından mükemmel arınma; düşük ile orta maliyetli çelik ihtiyacı; yüksek sermayeli yatırım ihtiyacı
Karbonitrüleme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (sığ yüzey derinlikleri); temas yükü için uygun kapasite; iyi eğilme yorulma mukavemeti; tutukluğa karşı iyi bir direnç; iyi bir boyutsal kontrol imkanı; su verme çatlamasından mükemmel arınma; çoğunlukla tatmin edici düşük maliyetli çelik ihtiyacı; orta sermayeli yatırım ihtiyacı; geliştirilmiş tuz korozyon direnci
Nitrüleme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (sığ yüzey derinlikleri); temas yükü için uygun kapasite; iyi eğilme yorulma mukavemeti; tutukluğa karşı mükemmel bir direnç; mükemmel bir boyutsal kontrol imkanı; su verme çatlamasından iyi arınma (ön işlem esnasında); orta ile yüksek maliyetli çelik ihtiyacı; orta sermayeli yatırım ihtiyacı; geliştirilmiş tuz korozyon direnci
İndüksiyonla Sertleştirme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (derin yüzey derinlikleri); temas yükü için iyi kapasite; iyi eğilme yorulma mukavemeti; tutukluğa karşı uygun bir direnç; uygun bir boyutsal kontrol imkanı; su verme çatlamasından uygun arınma; çoğunlukla tatmin edici düşük maliyetli çelik ihtiyacı; orta sermayeli yatırım ihtiyacı
Alevle Sertleştirme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (derin yüzey derinlikleri); temas yükü için iyi kapasite; iyi eğilme yorulma mukavemeti; tutukluğa karşı uygun bir direnç; uygun bir boyutsal kontrol imkanı; su verme çatlamasından uygun arınma; çoğunlukla tatmin edici düşük maliyetli çelik ihtiyacı; düşük sermayeli yatırım ihtiyacı

3.3. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme

Bütün indüksiyonla ısıtma sistemlerinin temeli, Michael Faraday'ın 1831 yılında ortaya çıkardığı elektromanyetik indüksiyonla başlamıştır. Faraday Yasası olarak da bilinen bu yasaya göre, bir iletkenin değişken bir akım geçirildiği takdirde, yakınında bulunan diğer iletkenin gerilim indüklenir. Faraday'ın bu keşfi, elektrik motorlarının, jeneratörlerin ve transformatörlerin gelişimine katkıda bulunmuştur. Ancak motor, jeneratör ve trafo sargılarından geçen akımın manyetik gövde üzerinde fuko akımlarını (yüzey bölgesinde indüksiyon akımı) oluşturması ve bunun sonucu olarak ortaya çıkan ısı kaybı uzun seneler istenilmeyen bir durum olarak görülmüştür ve azaltılması için çareler aranmıştır [36].

İndüksiyonla ısıtma ilk defa ısının trafo ve motor sargılarında üretiminin bulunmasıyla dikkat çekmiştir. Buna bağlı olarak indüksiyonla ısıtma teorisi üzerinde çalışılmış, bu nedenle motor ve trafolar ısıtma kayıplarının en aza indirgenmesiyle maksimum verim sağlayacak şekilde üretilebilmiştir. Yüksek frekanslı indüksiyon güç kaynaklarının gelişimi, yüzey sertleştirilmesi için indüksiyonlu ısıtmanın kullanımına vasıta olmuştur. İndüksiyonun zamansız kullanımı, temel prensiplerin anlaşılmasından dolayı kendine özgü uygulamaların kişisel tecrübeyle birleşmesiyle deneme ve yanılmaya yol açmıştır. Yıllar geçtikçe temel prensiplerin anlaşılması genişlemiş, bugünkü ısıtma uygulamalarının bilgisayar modellemesi ve proseslerine kadar uzamıştır. İndüksiyonla ısıtmanın bu temel teorilerinin bilgi dağarcığı, indüksiyonla ısıtma işleminde olduğu gibi indüksiyonla ısıtma uygulamalarının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır [37].

İndüksiyonlu ısıtıcılarının ilk kullanılmaya başlandığı dönemlerde ilk yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre yüksek olduğu bir gerçektir. Özellikle orta frekans ısıtıcılar (motor-alternatör grupları) hem ilk yatırım, hem de periyodik bakım giderleri açısından pahalı bir sistem oluşturmuştur. 1966 yılından itibaren yarıiletken güç sistemlerinin geliştirilmesi ile indüksiyon ısıtımında yeni bir devir başlamıştır. Bu devrede son zamanlarda kaydedilen en önemli gelişme değişen frekanslı indüksiyon ocakları olmuştur. Yarıiletken teknolojisinin gelişimi ile bahsi geçen ekonomik sorun önemini kaybetmiş ve bu alandaki çalışmaların günümüzde oldukça yaygınlaşması sağlanmıştır [38].

İndüksiyonla sertleştirme; rulmanlar, dişliler, silindirler vb. bileşenlerin yüklemeye karşı direncini geliştirmek ve yüzeyi aşınmaya karşı korumak için belirlenmiş iyi bir tekniktir. Sertleştirme prosesi, yakın yüzey bölgesinin östenitleme sıcaklığı üzerinde indüktif ısıtılması ve ardından da su soğutması ile gerçekleştirilmektedir. Bu; normal olarak, daha az sert fakat daha tok temel malzemesinden bir geçiş bölgesiyle ayrılmış olan uygun sertlik ve mukavemetli yüzeyin yanında martenzitik bir mikroyapıya yol açmaktadır. Sertleştirme derinliği, sertliğin uygulamaya bağlı standartlar tarafından tanımlanan verilmiş seviyenin altına düştüğü mesafe olarak tanımlanmıştır [39].

3.3.1 İndüksiyonla Isıtma İşlemi ve Sistemin Çalışma Mekanizması

İndüksiyonla ısıtma; üniform yüzey sertleştirme, bölgesel yüzey sertleştirme, tümünden sertleştirme ve sertleştirilmiş parçaların ısıtma işlemi sağlayan çok yönlü bir ısıtma metodudur. Isıtma, yüksek frekanslı alternatif akımın bir indüktörden (genellikle su soğutmalı bakır bobin) geçirilmesiyle üretilmiş bakır alana demir esaslı parçanın yerleştirilmesiyle tamamlanmaktadır. Isıtma derinliği; alternatif akımın frekansı, güç girişi, zaman, parça bağlantısı ve su verme zamanına bağlı indüksiyon tarafından üretilmektedir.

Frekans yükseldikçe Tablo 3.3'de gösterildiği gibi ısıtma daha incelikli veya sığlaşır. Bu nedenle, daha derin yüzey derinlikleri ve hatta tümünden sertleştirme işlemi düşük frekanslar kullanılarak yapılmaktadır. Elektriksel hususlar histerisiz ve eddy akımlarını kapsamaktadır [34].

Frekansı 10.000-1.000.000 arasında değişen bir akımın geçtiği sargılar arasına konulan çelik parçalar çok kısa bir zamanda yüzeyden ısınmaktadır. Akım kesilip, ısınan yüzeye su püskürtülerek soğuması, dolayısıyla sertleşmesi sağlanmış olmaktadır. Krank milleri, dişliler, miller vb. parçalar bu yöntem ile sertleştirilmektedir. Parça yüzeyinden ince bir tabaka sertleştiği için parçada iç gerginlik meydana gelmemektedir [2].

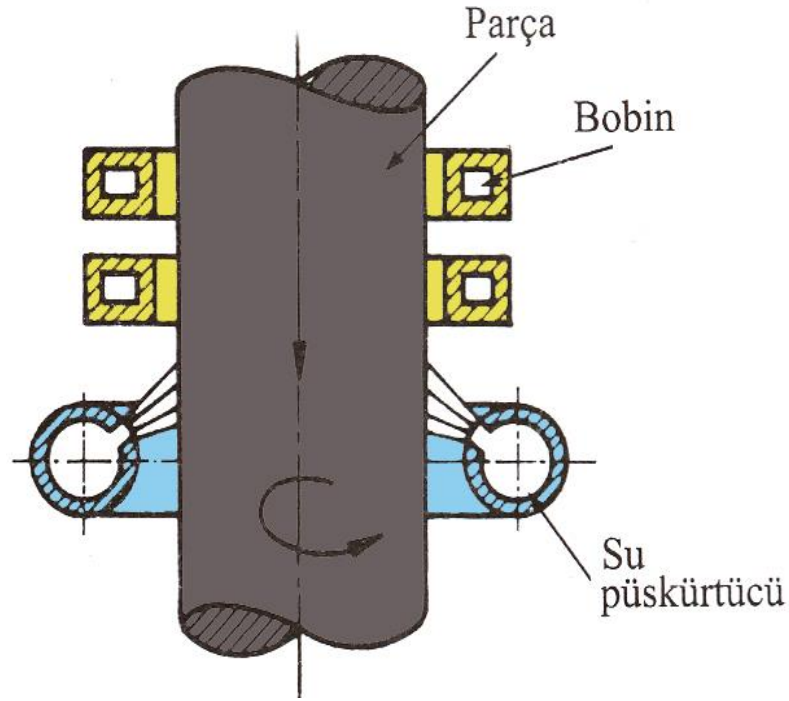
İndüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işleminde alternatif akım yük sargısı, ısıtılacak yüzeyi sıkıca sarmaktadır. İşlem yapılacak parçayı saran bobinlerin içerisinden yüksek frekanslı alternatif akım geçirilerek, yüksek frekanslı bir

manyetik alan elde edilmektedir. Oluşan yüksek frekanslı akımlar metalin yüzeyinde hareket etmektedir. Metalin bu akımlara karşı gösterdiği direnç nedeniyle parça yüzeyi ısınmaktadır.

Tablo 3.3: Parça yüzeyine uygulanan frekans ve buna bağlı olarak sertleşme derinlikleri.

Frekans (Hz)	Elektrik Enerjisinin Girme Derinliği (mm)	Sertleşme Derinliği (mm)
1000	1,50	4,60-8,90
3000	0,90	3,80-5,10
10000	0,50	2,50-3,80
120000	0,15	1,50-2,50
500000	0,08	1,0-2,0
1000000	0,05	0,25-0,75

Burada elektrik direkt olarak parçaya verilmemekte, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi parçayı saran yük sargısına (bobine) verilmektedir. Bu sayede indüksiyon yolu ile parçanın yüzeyinde elektrik akımı meydana gelmekte ve yüzey birkaç saniye içerisinde sertleştirme (su verme) sıcaklığına ulaşmaktadır. Isınmanın bu birkaç saniyeden fazla tutulması, parçanın iç yapısının da ısınmasına sebebiyet vermektedir. Bu sebeple ısıtma süresi iyi ayarlanmalıdır. Herhangi bir frekansta, ısıtma süresi parçaya göre uzatılarak sertleşme derinliği artırılabilir.



Şekil 3.5: Isıyı yüzeye uygulama prensibi [40].

3.3.1.1 Direnç

Tüm metaller, elektrik akışına direnç gösterirken bu elektriği iletmektedirler. Akımın bu akışına karşı direnç ısı formunda güç kayıplarına sebep olmaktadır. Bu nedenle “Enerjinin Korunumu Kanunu” gereğince, enerji bir şekilden başka bir şekile geçmekte ancak kaybolmamaktadır. Direnç tarafından oluşturulan kayıplar (3.1) eşitliği temel alınarak hesaplanmaktadır.

$$P=i^2.R \quad (3.1)$$

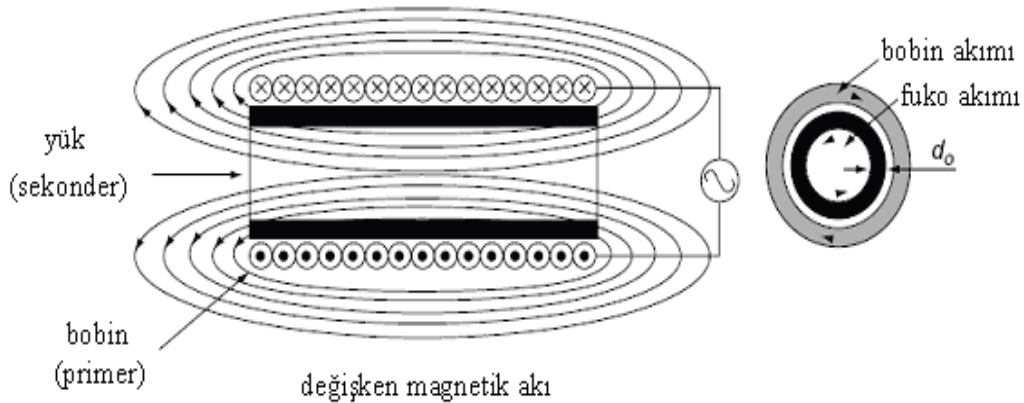
Burada; i akım miktarını, R ise direnci ifade etmektedir.

Zira; kayıp miktarı, akımın karesi ile doğru orantılıdır, akımı katlamak kayıpları (ve ısı üretimi) önemli ölçüde artırmaktadır. Gümüş ve bakır gibi bazı metallerin çok düşük dirençleri bulunmaktadır, dolayısıyla bu metaller çok iyi birer iletkenlerdir. Bakır teller nakil esnasında düşük ısı kayıplarından dolayı elektriğin enerji nakil hatlarından taşınmasında kullanılmaktadırlar. Çelik gibi diğer metallerin elektrik akımına karşı yüksek dirençleri vardır, bu nedenle bir elektrik akımı çelikten geçtiğinde, önemli ölçüde ısı üretilmektedir. Bir elektrik ocağının üzerindeki çelik rezistans, 60 Hz akımlı ev tipi akışa doğru olan dirence dayanan ıstmaya bir örnektir.

Benzer şekilde indüksiyon bobini içerisindeki bir kısım tarafından üretilen ısı da kısım içerisinde dolaşan elektrik akımına bağlıdır.

3.3.1.2 Alternatif Akım ve Elektromanyetizma

İndüksiyonlu ısıtıcılar, bir elektrik bobinine (indüksiyon bobini) alternatif elektrik akımı sağlamak için kullanılmaktadırlar. İndüksiyon bobini bir elektrik akımını ısıtmak için metal kısma (iş parçası) doğru indükleyen elektrik (ısı) kaynağı haline gelmektedir. İş parçası ve indüksiyon bobini arasında ısı kaynağı gibi bir temas istenmemektedir ve ısı, bobinin hemen yanındaki sınırlı alanlar veya yüzey bölgeleriyle kısıtlandırılmıştır. Bu nedenle bir indüksiyon bobinindeki alternatif akımın (AC) gözle görülmez bir kuvvet alanı (elektromanyetik veya akı) mevcuttur. İndüksiyon bobini iş parçasının yanına ya da çevresine yerleştirildiğinde, güç hattı bobin ve iş parçası arasındaki hava boşluğunda yoğunlaşmaktadır. İndüksiyon bobini bilfiil ana trafo, ısıtılmış iş parçası ise ikincil trafo işlevini görmektedir. İndüksiyon bobininin çevresindeki kuvvet alanı, iş parçasındaki eşit ve ters akımı indüklemekte, daha sonra iş parçasıyla birlikte bu indüklenmiş elektrik akımının akışına karşı olan dirence bağlı olarak ısıtma yapılmaktadır. İş parçasının ısıtma oranı; Şekil 3.6'da gösterildiği gibi indüklenmiş akımın frekansı, şiddeti, malzemenin özgül ısı, malzemenin manyetik geçirgenliği ve malzemenin akımın akışına karşı gösterdiği dirence bağlıdır. İndüklenmiş akımlar çoğu zaman eddy akımları olarak anılmaktadır ve eddy akımları yoğun manyetik alanlarda üretilen en yüksek akım şiddetini beraberinde getirmektedir [37].



Şekil 3.6: Elektromanyetik indüksiyonun temel çalışma prensibi [36].

3.3.1.3 Histerisiz

Histerisiz kayıpları, yalnızca çelik, nikel gibi manyetik metaller ve diğer birkaç metalde vuku bulmaktadır. Bu manyetik parçalardan (örneğin karbon çeliğinden yapılanlar) oda sıcaklığında indüksiyonla ısıtıldığında, alternatif manyetik akı alanı, manyetik kutupların her devirde kutupsal yönünü değiştirmesi gibi metalin çift kutuplarının (dipol) salınım yapmasına neden olmaktadır. Bu salınıma histerisiz adı verilmektedir ve çift kutuplar salınım yaptığıında meydana gelen sürtünmeye bağlı olarak küçük miktarda bir ısı oluşmaktadır. Çelikler, Curie sıcaklığının üzerinde ısıtıldıklarında manyetiklik özelliklerini kaybetmekte ve histerisiz sona ermektedir [37].

3.3.1.4 Kabuk Etkisi ve Nüfuz Derinliği

Bobine değişken bir akım uygulanması sonucunda düzgün dağılıma sahip değişken bir magnetik alan oluşmaktadır. Ancak bu düzgün dağılıma sahip magnetik alanın malzeme içerisinde oluşturmuş olduğu fuko akımının dağılımı düzgün değildir. Malzemenin dış yüzeyinde akım dağılımı maksimum olup, malzemenin merkezine doğru üstel olarak azalmaktadır. Tüm akımın malzeme yüzeyinden ve yüzeydeki yoğunlukta geçmesi halinde akımın erişebileceği derinliğe “akım nüfuz derinliği” adı verilmektedir. Akım nüfuz derinliği; uygulanan frekansa, ısıtılan malzemenin özgül direncine ve malzemenin manyetik geçirgenliğine bağlı olarak değişmektedir. İndüksiyonla ısıtma birçok sanayi alanında kullanıldığı için, hangi amaçla kullanılacaksa o duruma uygun akım nüfuz derinliğinin seçilmesi gerekmektedir. Örneğin yüzey sertleştirme işleminde kullanılacaksa, akım nüfuz derinliğinin mümkün olduğunca küçük seçilmesi gerekmektedir. Ama eğer ısıtma, haddeleme gibi işlemlerde kullanılacaksa daha büyük akım nüfuz derinliği seçilebilmektedir [36].

3.3.1.5 Soğutma Ortamı

Soğutma ortamı olarak Şekil 3.7’de gösterildiği gibi su veya yoğunluğu ayarlanmış yağ kullanılmaktadır. Bu sayede parçaların istenen bölgeleri

sertleştirilirken diğer bölgeler ise yumuşak kalmaktadır. Suda sertleştirme; ısıtılmış çelik parçanın soğutulmasında, en yüksek soğuma hızı parça ve su arasındaki sıcaklık farkının en yüksek olduğu durumda değil, bu aradaki farkın 350 ila 400°C arasında olduğunda görülür. Suda görülen bu durum yağ gibi diğer sıvılarda da aynı derecede geçerlidir. Su ile sertleştirme yağ ile sertleştirmeye göre üç kat daha iyi sertleştirmektedir. Suda sertleştirme endüstride kullanılan en etkili ve en yaygın sistemdir, çünkü ekonomik ve kolaydır. Yağda sertleştirmede yağın soğutma gücü suyun 1/3'ü kadardır. Suda ve yağda soğutmanın yanı sıra nadiren de olsa havada da soğutma yapılmaktadır [38].



Şekil 3.7: Isıtılan yüzeye soğutma sıvısının uygulanması [40].

3.3.2 İndüksiyonla Isıtmada Kullanılan Güç Kaynakları

Endüstriyel uygulamalarda, çeşitli parçaların indüksiyonla ısıtılması için geniş frekans aralıkları kullanılmaktadır. Bu frekansları sağlamak için çeşitli güç kaynakları üretilmiştir. Isıtılacak parçaların yüzeylerine ve ısıtılması gereken derinliklere bağlı olarak, bu güç kaynaklarından yararlanılmaktadır. Parçaya ve derinlik miktarına bağlı olarak frekanslar 50 Hz ile 10 MHz arasında değişmekte ve buna bağlı olarak kullanılan güç kaynakları da değişebilmektedir.

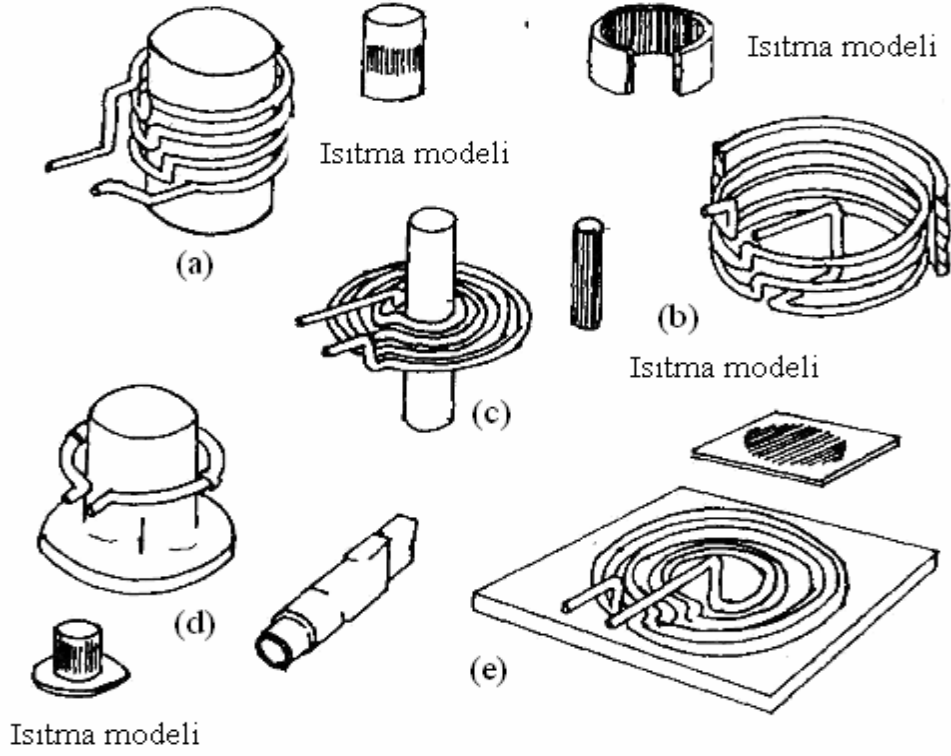
Güç kaynaklarını, orta frekanslı jeneratörler ve yüksek frekanslı jeneratörler diye iki bölüme ayırmak mümkündür. Düşük frekanslı jeneratörlerde frekanslar 50 Hz ile 10 kHz arasında değişmektedir. Orta frekanslı olanlarda 10-70 kHz arası, Yüksek frekanslı jeneratörlerde ise bu aralık 70 ve üstü kHz'dir. Endüstride genellikle 2-70 kHz aralığındaki frekanslardan yararlanılmaktadır. Kütleli tam ısıtma için düşük frekanslar, yüzey sertleştirme için frekans yükseldikçe sertleşme derinliği azalmak kaydıyla yüksek frekanslı makineler tercih edilmektedir.

3.3.2.1 Bobin Seçimi ve Tasarımı

İndüksiyonla yüzey ısıtmanın ve sertleştirmenin başarısı belirli oranda uygun ve doğru bobin seçimine bağlıdır. Bobinin biçimi, ısıtılacak parçaların geometrik şekline, boyutları parçada istenilen ısı dağılımı ve ısıtma yöntemi gibi faktörlere dayalıdır. Bobin içindeki manyetik alanın şiddeti, ısıtma hızını belirleyen ana faktördür. Hızlı bir ısıtma sağlamak için bobinin, akımın maksimum akışını sağlaması, ayrıca parça ile bobin arasındaki mesafenin en az olması gerekmektedir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak bobin seçimi ve tasarımı yapılmaktadır.

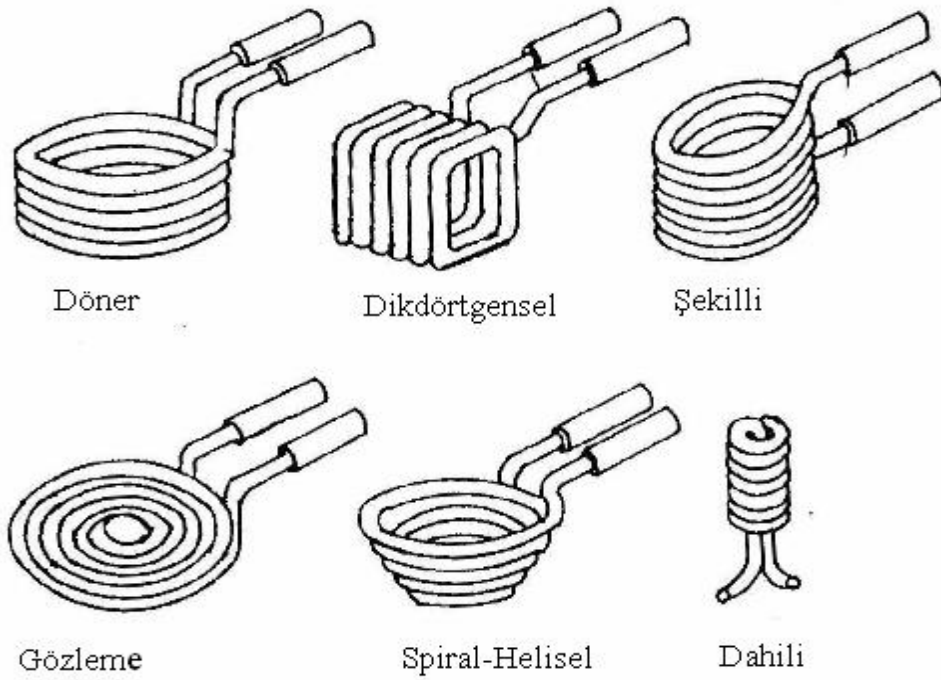
Bobin seçiminde ve tasarımında genellikle bakır borular kullanılmaktadır. Bunun yanında radyasyon kayıplarını büyük ölçüde azaltmak, bobinin uzun süre kullanımını sağlamak, kontak hatalarını önlemek ve kabuklanma problemlerini ortadan kaldırmak amacıyla bakır bobinleri kaplamak için seramik ve refrakter malzemeler kullanılabilir.

Kullanım yerlerine göre bobinlerin çeşitli tiplerde tasarlanması ve seçilmesi gereklidir. Genelde Şekil 3.8'de gösterildiği gibi tasarlanan ve kullanılan bobin tipleri; basit selenoid türü bobin, iç çapları ısıtmak için kullanılan çok sarımlı bobin, taramalı uygulamalar için yüksek akım yoğunluğu sağlayan çok sargılı bobin, taramalı dönen uygulamalar için kullanılan tek sargılı bobin, bölgesel yüzey uygulamalarında kullanılan yassı tabanlı bobin olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 3.8: İndüksiyonla ısıtmada yaygın olarak kullanılan bobin çeşitleri.

Bu bobin tiplerinin yanında, Şekil 3.9’da verilen çeşitli uygulamalar için kullanılan farklı bobin tipleri de mevcuttur.



Şekil 3.9: Çeşitli uygulamalarda kullanılan bobin tipleri [41].

3.3.3 Isı İletimi

Bir iş parçasının iç kısmına doğru olan ısı akışının ana mekanizması, yüzey üzerinde ilk olarak eddy akımları tarafından üretilen ısı iletimine dayanmaktadır. Histerisiz, ikincil bir etki üretmekte ve ısının ikinci üreticisi olmaktadır. Histerisize bağlı kayıplar çok küçük etkilerinden dolayı indüksiyon işlemleri için ısı miktarı hesaplamalarında genellikle gözardı edilebilmektedir. Isıtma hızı çoğunlukla;

- Manyetik akı alanının alan şiddeti,
- İndüksiyon bobininin iş parçasına bağlantısı,
- Istılmakta olan malzemenin elektrik ve manyetik özelliklerinin tesiri altındadır.

Arzu edilen ısıtma oranı uygulamayla beraber çeşitlilik göstermektedir. Yüzeyin eddy akımı ısıtmasına bağlı olan yoğun ısı üretiminin iç reaksiyonu, iç kısma doğru olan ısı transfer oranı, sıcaklık ve ısıtma çevrimi esnasındaki değişime güçlü bir bağlılık sergileyen birçok malzemenin elektriksel, termal ve metalurjik özellikleri olgusu nedeniyle ısı transferinin matematiksel analizi oldukça karmaşıktır [37].

3.3.4 İndüksiyonla Sertleştirilebilen Malzemeler

İndüksiyonla sertleştirilecek malzemelerde teorik olarak % 0.30-0.60 karbon miktarının olması aranmaktadır. Daha yüksek karbonlu çeliklerde çatlama riski söz konusudur. % 0.30'un altında karbona sahip çeliklerin indüksiyonla efektif olarak sertleştirilmeleri mümkün değildir, ancak malzemenin içeriğinde yüksek oranda başta Mn olmak üzere Si, Cr, Ni ve V gibi alaşım elementleri mevcut ise % 0.20 karbon oranına kadar sertleştirme mümkündür. % 0.60'ın üzerinde karbon miktarına sahip çeliklerin ise indüksiyonla sertleştirilmeleri tavsiye edilmez, zira malzeme yüksek sertlik almaya müsait olduğu için çok yüksek çatlama riski taşımaktadır [42].

Genellikle motor kranklarının ana yatak muylusu, uzun miller, dişliler, piston kolu ve kamaların yüzeyleri genelde bu yöntemle sertleştirilmektedir [40]. Ayrıca yüksek vasıflı (GGG50-GGG70) sfreo dökme demir malzemeler de indüksiyonla sertleştirilebilen malzemeler sınıfına girmektedir [42].

3.3.5 İndüksiyonla Sertleştirilmenin Avantajları

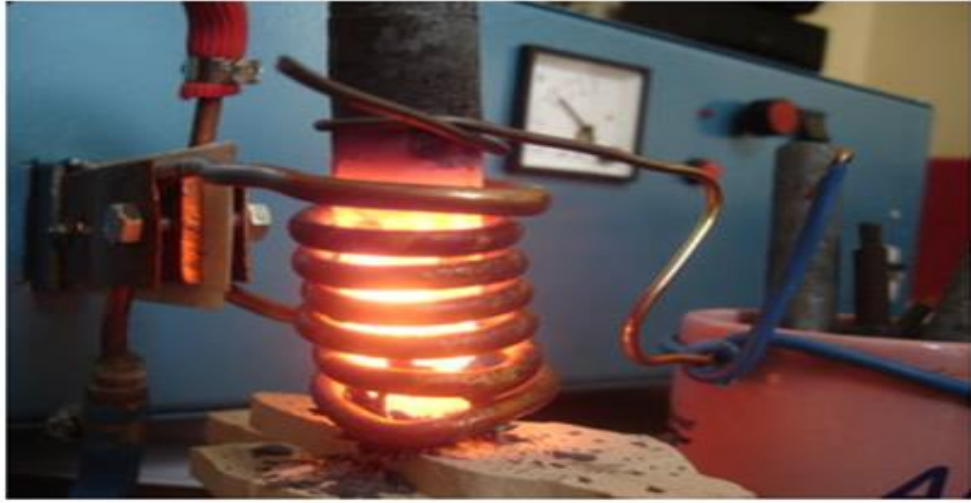
- Belirli bir alanın sertleştirilmesini mümkün kılmaktadır.
- Deformasyon asgari düzeydedir.
- Sertleştirme süreleri kısadır.
- Parametreler ayarlandıktan sonra sertleştirme işleminin tekrar edilebilirliği yüksektir.
- Hızlı soğutma ile ince martenzit oluşmaktadır.
- Uzun tavlama sonucu kaba tane oluşumu olmamaktadır.
- Sertlik derinliği istenilen düzeyde tutulabilmektedir.
- Büyük parçaların fırında sertleştirilmesinin pratik olmadığı durumlarda bölgesel sertleştirilmeyi mümkün kılmaktadır.
- Minimum yüzey dekarburizasyonu (karbonsuzlaşma) ve oksidasyon sağlamaktadır.
- Artan yorulma mukavemeti sağlamaktadır.
- Bu proses bir üretim hattıyla birleştirilebilmektedir.
- Düşük proses maliyeti sağlamaktadır.
- Alevle sertleştirmeye oranla daha yüksek ısı girişi sağlanmaktadır.
- Elektrik ortamında otomatik kontrol sayesinde ısıtma daha iyi ayarlanmaktadır.
- İndüksiyonla yüzey sertleştirmede, malzemenin ısınma süresi çok düşük olduğundan çevrenin ısınması da çok azdır.
- Parçaların seri imalatında zaman ayarı, elektriksel olarak yüzeye tatbik edilen sıcaklığın ve nüfuz derinliğinin otomatik olarak ayarlanması oldukça kolaydır.
- Küçük tesislerde bile kullanılabilir [40,42].

3.3.6 İndüksiyonla Sertleştirilmenin Dezavantajları

- En önemli dezavantajı elektrik üretimi ve ayarlama aletlerine gereksinim duyan tesis masraflarının oldukça yüksek olmasıdır.
- Sargıların imal edilmesi ve geliştirilmesi oldukça pahalıdır.
- Komplike sargıların gerektiği durumlarda ve bunun yanında parça sayısı da çok az ise sertleştirme maliyeti daha fazla artmaktadır.

- Kalifiye (yetişmiş) işçiye ihtiyaç duyulmaktadır.
- Bu yöntem malzeme seçimine sınırlama getirmektedir.
- Düşük karbon miktarlı parçalarda diğer yöntemle ulaşabilen sertlik değerlerine ulaşamaz, yüksek karbonlu çeliklerde ise çatlama tehlikesi meydana gelmektedir.
- Keskin kenar ve köşeli parçaların bu bölgelerinde aşırı ısınmalar meydana geleceği için güçlükler oluşmaktadır [40].

Bir indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemine ait resimler Şekil 3.10'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.10: İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi a) Yüzeyi ısınan parça, b) Isıtılan yüzeyin soğutulması.

3.4 İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme Yöntemi İle Yapılan Çalışmalar

Koroğlu ve Sazak (2002) tarafından yapılan “Mutfak Uygulamaları İçin Yarım Köprü Seri Rezonans İnvvertörlü İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı” konulu çalışmada, indüksiyonla ısıtmanın mutfak uygulamalarında da kullanılabilceği gösterilmiştir. Bu amaçla, bobin tasarımını da kapsayan komple bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarlanmış, küçük güçlü bir prototipi gerçekleştirilmiş ve test edilmiştir. Sunulan sistem yardımıyla indüksiyon ısıtmanın ev tipi uygulamalarda verimli bir şekilde kullanılabilceği gösterilmiştir. Rezonans invertör ve sıfır akım anahtarlama tekniği sayesinde anahtar kayıpları azaltılmış buna bağlı olarak elektromanyetik parazitler (EMI) önlenmiştir. Bu sistemin; verimli, temiz, güvenli, ısı kontrolünün kolay, hassas ve ısıtma zamanının kısa olması gibi kullanım avantajlarına sahip olduğu, bilinen mutfak ısıtıcıları ile kıyaslandığında oldukça yüksek verime sahip olduğu görülmüştür [43].

Şengül (2006) tarafından yapılan “İki Farklı Kontak Basıncı Altında AISI 1045 Çeliğinin Fretting Yorulması Üzerinde İndüksiyonla Sertleştirmenin Etkisi” konulu Yüksek Lisans çalışmasında, Fretting’in temas eden iki eleman arasında meydana gelen küçük genlikli titreşimli bir kayma olayı olduğu tanımlanarak farklı iki kontak basıncı altında (100 ve 200 MPa), AISI 1045 çeliğinin fretting yorulma davranışı üzerinde indüksiyonla sertleştirmenin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, indüksiyonla sertleştirilmiş AISI 1045 çeliğinin düz ve fretting yorulma davranışlarında, işlem yapılmayanlarla karşılaştırıldığında, % 30’un üzerinde iyileşmenin elde edildiğini göstermiştir. Bununla beraber, mevcut çalışma aralığı için hem indüksiyonla sertleştirme işlemi uygulanmış hem de uygulanmamış numunelerde kontak basıncının fretting hasarının oluşumunda dikkate değer bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir [41].

Lo, Kinser, Melikhov ve Jiles (2006) tarafından yapılan “Magnetic Nondestructive Characterization of Case Depth in Surface-Hardened Steel Components (Yüzeyi Sertleştirilmiş Çelik Bileşenlerde Yüzey Derinliğinin Manyetik Tahribatsız Karakterizasyonu)” konulu çalışmada; bir seri indüksiyonla sertleştirilmiş çelik çubukta manyetik histerisiz özellikleri ve Barkhausen etkisi sinyalleri, yüzey derinliğinin tahribatsız ölçümü için ölçüm tekniklerini geliştirme amacıyla, ölçümler ve model simülasyonlarıyla incelenmiştir. Bu işlem, sertleştirilen

çubukların hem çekirdeğinde hem de yüzeyinde yer alan iki safhada ilerleyen ters miknatıslanmada ölçülen histerisiz çevriminden çıkarılmaktadır. Numunelerin yüzey derinlikleri; histerisiz çevrimini, çekirdekten ve kabuktan gelen sinyallerin ağırlıklı bir toplamı olarak ele alınarak tahmin edilmiştir. Sonuçların, sertlik derinlik profillerinden belirlenen nominal yüzey derinlikleriyle iyi bir uyum halinde oldukları tespit edilmiştir [44].

Antola ve Bagnasco (2006) tarafından yapılan “A Tool for Load Modeling in Induction Hardening Equipment Driven by Power Semiconductor Systems (Güç Yarıiletken Sistem ile Çalışan İndüksiyon Sertleştirme Cihazında Yük Modelleme Aracı)” konulu çalışmada; Kelvin etkisinin (kabuk etkisi) makul derecede karmaşık bir geometriye sahip vites, kam mili, eksantrik mili ve diğer iş parçalarının indüksiyonla ısıtma ile gerçekleştirilen yüzey sertleştirmede kullanıldığı ifade edilmiştir. Metallerin ve alaşımların yüzey sertleştirilmesi (indüksiyonla ısıtma jargonunda düşük veya orta frekans kullanarak) için gerekli olan indüksiyon ısıtma cihazı bir bobin veya bobin takımından ve 50 kHz’e kadar yarı iletken güç tahrik sisteminden oluşmaktadır. Tahrik sisteminde var olan güç, bir transformatöre eşdeğerdir. İlki uyarı bobini veya bobin takımı anlamına gelirken kısa devreli kabul edilen ikinci unsur ise iş parçası ile ifade edilmektedir. Elektrik yükünü ölçmek için iş parçasındaki yerel eğrilik etkileri nedeniyle bölgesel yüzey derinliklerindeki varyasyonları ve termal etkiler sebebiyle birbirine bağlanan manyetik parçalar ile iletkenlikteki varyasyonlar nedeniyle yüzey derinliğinin alan ve zaman varyasyonlarını belirlemek gereklidir. Kelvin etkisinin bu ve diğer uygulamalarında, genellikle yerel yüzey derinliklerini elektrik ileten cisimlerin yüzeylerindeki yerel eğriliklerle ilişkilendirmek gerekebilmektedir. Bu çalışmanın amacının iki yönlü olduğu vurgulanmıştır. Birincisi yerel yüzey derinliğini yerel ortalama eğrilik ve düz iletken cisimlerde iyi bilinen yüzey derinliği ile ilişkilendiren bir kapalı form analitik formül elde etmektir. Bu formülün uygulanabilirlik sınırları tartışılır olduğu, tahmin edilen yüzey derinliklerinin yüzey sertleştirme süreçleri kapsamında elde edilen mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığı belirtilmiştir. İkinci olarak, yüzey sertleştirme için kullanılan koşullarda indüksiyonla ısıtma cihazının elektrik yükünü belirlemek maksadıyla yukarıda belirtilen formül uygulanmıştır. Bir indüksiyonla ısıtma sisteminin seçimi veya tasarımında, planlanan süreçteki parametreler (Kelvin etkisi derinliği, ulaşılabilecek sıcaklıklar ve ısıtma prosesinin süresi ve diğerleri),

bobinler ve güç tahrik sistemi üzerinde kısıtlamalara sebep olmaktadır. İndüksiyon bobinleri ve bobin takımlarının en ideal şekline ve ölçüsüne karar vermek amacıyla, iş parçaları üzerinde gerçekleştirilen karmaşık termal ve elektromanyetik süreçlerin bir bilgisayar kodu kullanılarak simülasyonunun geliştirilmesinin gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmada belirtilen muhtemel formül, bu dijital simülasyonların planlanması sırasında kullanılmak üzere tavsiye edilmektedir. Bobinleri içerisindeki parçalarla birlikte hareket ettiren elektronik güç sisteminin tasarımında yük empedansının belirtilmesinin gerektiği, burada belirtilen formülün tahrik sisteminin seçimini veya tasarımını etkileyebilecek yük özelliklerini değerlendirmek için kullanılabilmesi belirtilmiştir [45].

Magnabosco, Ferro, Tiziani ve Bonollo (2006) tarafından yapılan “Induction heat treatment of a ISO C45 steel bar: Experimental and numerical analysis (ISO C45 çelik çubuğun indüksiyonla ısıl işlemi: Deneysel ve nümerik analiz)” konulu çalışmada; C45 tipi çeliğin indüksiyonla sertleştirilmesi işlemi üzerinde yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar anlatılmıştır. Test parçaları hem tavlanmış hem de normalize hallerde kullanılmıştır. Numunelerin sertleştirilmiş derinlik ve mikroyapısı, konvansiyonel mikroyapı ve mikrosertlik analiziyle incelenmiştir. Termal geçmiş, faz dağılımları ve mikrosertlik profillerini tahmin etmek amacıyla ısıl işlemi simule etmek için nümerik bir model kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları deneysel veri ile onaylanmıştır. Zorlukların ve işlem ve malzeme parametrelerinin doğru bilgisini gerektiren bu prosedürün sınırlarının altını çizmenin yerinde olacağı vurgulanmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasında gözlemlenen hata oranı, model konstrüksiyonu üzerine kabul edilmiş yaklaşımlar dikkate alınarak gerekçelendirilebilmektedir. İlk malzeme yapısı, perlit ferrit fazlar arasında ayırım olmadan homojen bir şekilde gözönüne alınmıştır. Bu nedenle model, elektrik ve termal iletkenlik özellikleri üzerindeki heterojenlik etkisini yok saymaktadır. Bu hipotez tane boyutu yeterince iyi olduğunda doğrulanmaktadır. En iyi sonuçlar ayrıca ilk tane boyutu dikkate alındığında da mümkündür. Ayrıca, termal değişim katsayısı sıcaklıkla sabit olarak dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, işlem tarafından endüklenmiş atık gerilmeleri mikrosertlik hesabında hesaba alınmamaktadır. Buna rağmen, nümerik sonuçların deneysel gözlemlerle tatmin edici mutabakat sağladığı ifade edilmiştir [46].

Kim, Yoon, Doh, Ko ve Shon (2006) tarafından yapılan “Rapid sintering process and mechanical properties of binderless ultra fine tungsten carbide (Bindersiz (bağlayıcısız) aşırı ince tungsten karbürün hızlı sinterleme işlemi ve mekanik özellikleri)” konulu çalışmada; aşırı ince WC (Wolfram Carbide) sert metallerinin kısa bir zamanda hızlı sinterlenmesi, yüksek frekanslı indüksiyonla ısıtma sinterleme işleminin imalat potansiyeli üzerine odaklanılarak araştırılmıştır. Bu işlemin avantajı, aşırı ince malzemelerde yakın teorik yoğunluk ve tane büyümesi yasağına doğru çok çabuk yoğunlaşmaya imkân tanınmasıdır. % 98,5’e kadar bağlı yoğunluktaki yoğun saf bir WC sert metali, eşzamanlı 60 MPa basınç uygulaması ve 2 dk. içinde toplam 15 kW güç kapasitesi çıktılı indüksiyon akımıyla üretilmiştir. Daha büyük bir toplam güç kapasitesi çıktısı, daha yüksek sıcaklık artış oranı ve böylece daha yüksek WC tozu yoğunlaştırma oranına sebep olmaktadır. Daha ince, ilk WC tozu boyutu, daha yüksek yoğunluk ve daha iyi mekanik özellikler anlamına gelmektedir. 60 MPa basınç altında ve 0,4 µm WC tozu kullanılarak toplam % 90 güç kapasitesi veriminde elde edilen kırılma tokluğu ve sertlik değerleri sırasıyla 7,1 MPa m^{1/2} ve 2854 kg/mm²’dir [47].

Durukan (2007) tarafından yapılan “Effects of Induction Heating Parametres on Forging Billet Temperature (İndüksiyonla Isıtma Değişkenlerinin Dövme Çubuk Sıcaklığına Etkileri)” konulu Yüksek Lisans çalışmasında, AISI 1045 tip, çapı 30 mm ve boyu 100 mm olan çelik çubuklar bir indüksiyon fırınında ısıtılmıştır. Isıtma sırasında; farklı güç, taşıyıcı hızı ve indüksiyon bobin kutu çaplarının etkisi incelenmiştir. Deneylerde 125 kW 3000 Hz indüksiyon ısıtıcısı kullanılmıştır. Isıtma deneyleri 2³ Faktöriyel Deney Tasarım Metoduna göre yapılmıştır. Çoklu doğrusal regresyon tekniği kullanılarak ısıtılan çubukların sıcaklığını tahmin etmeye yönelik matematiksel bir denklem geliştirilmiştir. Farklı ısıtma parametreleri sonucu ölçülen sıcaklık değerleri ile matematiksel denklemden elde edilen sıcaklık değerleri karşılaştırılmasında iyi bir uyum gözlenmiştir [48].

Son, Yum, Kim, Hwang, Kim, Yoo ve Lee (2008) tarafından yapılan “Development of high strength center-pillar by high frequency induction heating (Yüksek frekanslı indüksiyonla ısıtma ile yüksek mukavemetli merkezi takviyenin geliştirilmesi)” konulu çalışmada; ince çelik levhaların preslenmesiyle şekil verilen kaporta gövdesi üzerinde uygulanan yüksek frekanslı indüksiyon sertleştirme

teknolojisinin, kaporta parçalarının mukavemetlerini yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma işlem yöntemiyle bölgesel olarak artırmak için geliştirildiği ve bu şekilde takviye güçlendirme ihtiyacının ortadan kaldırıldığı belirtilmiştir. Saç levhaların gerilme mukavemetini artırma tekniği, binek aracının ön zemin traversi ve merkezi takviye güçlendirme işleminde uygulanmıştır. İndüksiyon sertleştirme teknolojisinin konvansiyonel düşük karbonlu çeliklerde uygulanması ve otomotiv kaportasında ağırlık azalımı istendiğinde, yan darbe dayanımı incelenmiştir. Bu çalışmada, yüksek frekanslı indüksiyonla ısıtma işlemine tabi tutulan başlık biçimindeki modeller için temel deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek sertlik gösteren mikroskobik gözlemler sayesinde ısıtma bölgesinde martenzitik dönüşüm tespit edilmiştir. Ayrıca, bor çeliğinden yapılmış merkezi takviye modelinin sertlik ve mukavemetinin yüksek frekanslı indüksiyonla ısıtma sayesinde önemli derecede artış gösterdiği belirlenmiştir [49].

Thandar; Saldanah ve Moe (2008) tarafından yapılan “Design and Construction of Power System for Induction Heating (IH) Cooker Using Resonant Converter (Rezonans güç çevirici kullanılarak indüksiyonla ısıtma fırını için güç sistemi dizayn ve konstrüksiyonu)” konulu çalışmada; indüksiyonla ısıtma fırını için rezonans güç çevirici temeline dayalı güç sistemi dizayn ve konstrüksiyonu sunulmuştur. Maksimum çıkış gücü 500 W civarında ve rezonans frekansı ise 24 kHz’dir. Kontrol devresi; hata yükselticisi (amplifikatör), zaman geciktirme bölümü, salıngaç (osilatör) bölümü, geçit vurumu bölümü, geçit vurumu trafosu ve rezonans depo devresinden oluşmaktadır. Yarım köprü serisi rezonans güç çevirici ve yapılandırma seçilmiştir. Çalışma sonucunda daha az enerji tüketimi, emniyet, etkinlik, hızlı ısıtma ve % 90 ve üzeri verimliliğe sahip olma özellikleri nedeniyle indüksiyonla ısıtma fırınlarının geliştirilebileceği değerlendirilmiştir [50].

Nart ve Sert (2009) tarafından yapılan “İndüksiyon Isıl Yükleme İle Bir Çatlak Etrafında Oluşan Gerilmelerin Modellenmesi” konulu çalışmada, indüksiyonla ısıtma yöntemi ile kaplamaların ara yüzeylerindeki çatlak etrafında oluşan termal gerilmelerin bulunması hedeflenmiştir. Yapılan analiz sonucunda, çalışma parçası yüzeyinin kısa bir sürede yüksek sıcaklıklara ulaştığı gözlenmiştir. Kaplama ara yüzeyinde bulunan çatlağın termal bariyer görevi yaparak ısı iletimini engellediği ve bu durum sonucunda, çatlak bölgesindeki sıcaklıkların parçanın diğer

bölgelerine nazaran daha yüksek olduğu ve çatlağın ön ve arka yüzeyleri arasında sıcaklık farklılıklarının olduğu gözlenmiştir. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farklılıklarından dolayı, çatlak boyunca farklı termal gerilmeler oluşmuştur. Yapılan analizler sonucunda, indüksiyonla ısıtmanın metal malzemeler için hızlı ve kontrollü bir ısıtma aracı olduğu görülmüştür. Hızlı ısıtma kabiliyetinden dolayı, termal şoklara maruz kalan ve yüksek sıcaklıklarda çalışan makine parçalarının deneysel uygulamaları için indüksiyonla ısıtmanın elverişli olduğu görülmektedir. Kontrollü ısıtma kabiliyetinden dolayı ise, belli sıcaklık aralıklarında çalışan makine parçalarının termal yorulma deneyleri için indüksiyonla ısıtmanın oldukça elverişli olduğu tespit edilmiştir [51].

Suzuki, Yatsushiro, Shimizu, Sugita, Saito ve Kubota (2009) tarafından yapılan “Development of Induction Surface Hardening Process For Small Diameter Carbon Steel Specimens (Küçük Çaplı Karbon Çelik Modellerde İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme İşleminin Geliştirilmesi)” konulu çalışmada; daha önce genel konvansiyonel işlemlerde kullanılmamış olan bir yöntemle, 2 MHz değerinde ultra yüksek frekanslı jeneratör kullanılarak indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi geliştirilmiştir. 6 mm çapındaki numune, geliştirilen cihaz kullanılarak farklı jeneratör voltajı ve numune hareket hızı koşullarında sertleştirilmiştir. Kalan gerilim dağılımı, enine kesit incelemesi, sertlik dağılımı ve bozulma oranları ölçülerek su verilmiş numuneler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, ısıl işlem koşullarından biri iyi bir sonuç vermiştir; sertleştirilmiş bölgenin derinliği yaklaşık 0,4 mm ve sertlik yaklaşık olarak yüzey yakınında 600 HV olarak ölçülmüştür. Daha derin sertleştirilmiş bölgelere sahip numuneler yüzeyde boylamsal yönde yaklaşık -500 MPa kompresif kalan gerilim değeri göstermiştir. Buna ilave olarak, bu özellik yüzeyden merkeze doğru hafifçe azalma göstermiştir. Ancak, daire yönünde kompresif artık gerilim yaklaşık 0 MPa olarak ölçülmüştür. Mevcut indüksiyonla sertleştirme ile karşılaştırıldığında bu eşyönsüzlük geniş termal gerilime yol açmıştır. Ayrıca, 3 mm ebadındaki numunede, yaklaşık 0,09 mm derinliğe ve yüzey yakınında yaklaşık 600 HV sertliğe sahip çok sığ bir sertleşmiş alan elde edilmiş ve bu değer bu çapta elde edilen en iyi sonuç olarak kaydedilmiştir [52].

Zhang, Bowler ve Lo (2009) tarafından yapılan “Magnetic Characterization of Surface Hardened Steel (Yüzeyi Sertleştirilmiş Çeliğin Manyetik

Karakterizasyonu)” konulu çalışmada; dikkatli bir şekilde karakterize edilmiş iki takım 25 mm çapında yüzeyi sertleştirilmiş çelik çubukların manyetik özellikleri üzerinde tahribata yol açmadan yüzey derinliğinin değerlendirilmesini sağlayacak yeni metotlar geliştirme amaçlanmıştır. İndüksiyonla sertleştirilmiş 4140 ve karbürize 8620 çelik çubuklar üzerinde çalışılmıştır. Her takımda ısıl işleme tabi tutulmuş fakat yüzeyi sertleştirilmemiş numuneler ile birlikte üç farklı nominal derinliğe kadar sertleştirilmiş numuneler yer almıştır. İşlemin ardından, çubukların mikro sertlik profilleri ölçülmüş ve elde edilen veri her yüzeydeki orta sertlik derinliğini bulmak için analiz edilmiştir. Bu ölçümler, yüzey altındaki derinlik seviyesi bakımından numunelerin mikro yapılarını ortaya koyan optik mikrografiler ile karşılaştırılmıştır. Ölçümlerde elde edilen mıknatıslanma eğrileri ile histerisiz halkalarının analizi aracılığıyla, çubukların diferansiyel geçirgenlikleri ve doygunluk mıknatıslığı belirlenmiştir. Her iki sertleştirme mekanizması için uygulamadaki belirli bir kuvvet derecesinde (1350-1450 A/m) artış gösteren yüzey derinliği ile birlikte diferansiyel geçirgenliğin de arttığı fakat bu artışın sadece indüksiyon ile sertleştirilmiş çubuklarda önemli seviyede olduğu saptanmıştır. Doygunluk mıknatıslığı M_s “yaklaşım kanunu” kullanılarak değerlendirilmiş ve indüksiyon ile sertleştirilmiş çelik çubuklar ile karbürize çelik çubuklarda yüzey sertliği arttıkça doygunluk mıknatıslığının azaldığı gözlemlenmiştir. Gözlemlenen davranışın, merkez ve yüzey tabakadaki doygunluk mıknatıslığının hacim ağırlıklı tutarını ifade etmek için kullanılan M_s modeli ile basit ve yeterli şekilde tanımlanabileceği tespit edilmiştir [53].

Sapate ve Didolkar (2009) tarafından yapılan “Metallurgical investigation of failure of coal mill drag chain pin (Kömür değirmeni bağlama zincir pimindeki bozukluğun metalürjik tetkiki)” konulu çalışmada; bir çimento fabrikasının kömür değirmeninde ham kömür bunkerinden mezar geçitine kömür taşımak için kullanılan bağlama zinciri konveyörlerinin kırılmış bağlantı pimleri incelenmiştir. Bozulma analizi iki kırık pime uygulanmış, bozukluğun yerinin pimlerin ucunun yanında olduğu tespit edilmiştir. Her iki arızalı pimin de kırık yüzeyin yakın çevresinden küçültülmüş ölçekte enine kesiti alınmıştır. Sertlik ve metalografik çalışmalar, pimlerin iç kısmının martenzitik mikroyapıda tavlansınken, yüzeylerinin ise indüksiyonla sertleştirildiklerini göstermektedir. Metalografik çalışmalar, indüksiyonla sertleştirmede değişebilirlik ve iç kısımda istenmeyen kaba martenzitik

mikroyapıyı göstermektedir. Kırık yüzey ve kırılımsal (fraktografik) analizler SEM ile çalışılmış, eğilme gerilmeleri ve burulma gerilmelerini azaltan küçük yumruya bağlı olan yorulma kırılması gösterilmiştir. Gerekli yüzey derinliğini sağlamak için uygun indüksiyonla sertleştirme ve bağlantı pimleri için En-24 çeliği kullanımı bağlantı pimlerinin ömrünün daha fazla artması için önerilmiştir [54].

Dereci (2010) tarafından yapılan “İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi” konulu Yüksek Lisans çalışmasında, indüksiyonla ısıtma sistemleri anlatılmış ve indüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan güç kaynaklarından bahsedilmiştir. Ayrıca yüksek frekanslı sistemlerde oluşan anahtarlama kayıplarını azaltmak için kullanılan yumuşak anahtarlama teknikleri anlatılarak, mutfak uygulamalarında kullanılan bir indüksiyonla ısıtma sisteminin simülasyonu ve uygulaması yapılmıştır. Uygulaması yapılan kısmi rezonanslı inverter sisteminde devrenin kontrolü PIC mikroişlemcisiyle ile sağlanmıştır. Sıcaklık geri beslemesi alınarak ısıtılacak malzemenin istenilen referans sıcaklığa kadar ısınması sağlanmıştır. Ayrıca uygulama devresinde sıfır gerilimde geçiş kullanılarak, devre üzerindeki anahtarlama kayıpları azaltılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, mutfak uygulamalarında kullanılan indüksiyonla ısıtma sisteminin klasik elektrikli ısıtıcılara göre daha verimli olduğu görülmüştür [36].

Oktay (2011) tarafından yapılan “Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme İşleminin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi” konulu Yüksek Lisans çalışmasında, indüksiyonla yüzey sertleştirme ısıl işleminin östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin mikroyapı ve yorulma dayanımı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, GGG70 sınıfı alaşımlı küresel grafitli dökme demir numuneler; 900°C’de 90 dk östenitleme yapılarak, 375°C sıcaklıktaki tuz banyosunda 120 dk süre ile östemperlenmiştir. Daha sonra östemperlenmiş yorulma numunelerine yüksek frekanslı indüksiyonla yüzey sertleştirme ısıl işlemi yapılmıştır. Karşılaştırma amacıyla döküm koşullarındaki numunelerin yüzeylerine de indüksiyonla yüzey sertleştirme yapılmıştır. Numunelerin yorulma dayanımları dönmeli-eğmeli yorulma yöntemi ile belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, östemperlenmiş+yüzeyi indüksiyonla sertleştirilmiş numunelerin yorulma dayanımlarının yüzeyi indüksiyonla

sertleştirilmiş dökülmüş haldeki numunelerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi, östemperlenmiş koşullara göre yorulma dayanımını % 25 artırmıştır [38].

Danda (2011) tarafından yapılan “Effect Of Induction Hardening On High Carbon Steel Forgings (Yüksek Karbonlu Çelik Dövme İşlemlerinde İndüksiyonla Sertleştirmenin Etkisi)” konulu çalışmada; yüzey sertleştirmenin, daha sert yüzeyler elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir ısıtma işlem süreci olduğu ve bunun için genellikle indüksiyonla sertleştirme tekniğinin kullanıldığı ifade edilmiştir. Bu yöntem ile parçanın özelliklerini bir bütün olarak etkilemeden metalin sadece seçilmiş alanlarda sertleşmesinin sağlandığı, uygunluk açısından % 0,73 oranında karbon içeren yüksek karbonlu çelik numunenin dövme yöntemiyle daha ileri derecede dövüldüğü belirtilmiştir. Bu aşamada dövme işlemi sırasında meydana gelen yüzeysel pürüzleri yok etmek için numunenin bir torna tezgâhında işlendiği, ancak bu işlemden önce işlenebilirliğini artırmak için tavlama işlemi uygulandığı vurgulanmıştır. İndüksiyon ısıtıcısında, numune önce ön ısıtma işlemine alınmakta, daha sonra tekrar ısıtılmakta ve su spreleri ile sert bir yüzey elde etmek için soğutulmaktadır. Daha sonra elde edilen sertlik ve mikro yapılar işlemin farklı seviyelerinde karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre sertlik değerinin dövme işleminden önce ve tavlama işleminden sonra aynı olduğu, fakat dövme işleminden sonra bir miktar arttığı, yüzeydeki sertlik değerinin indüksiyonla sertleştirme sonrasında büyük bir artış gösterdiği, merkeze doğru ise azaldığı tespit edilmiştir. Mikro yapısal gözlemler dendritik yapıların dövme işlemi sırasında küçük parçacıklara ayrıldığını ve tavlama işleminin ince ferrit ve perlit parçacıkların irileşmesine yol açtığını gösterdiği ifade edilmiştir. İndüksiyonla sertleştirmenin yüzey üzerinde yarı martenzit bir yapının, merkezde ise yumuşak bir dokunun oluşmasına yol açtığı belirtilmiştir [55].

Kohli ve Singh (2011) tarafından yapılan “Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology (Yüzey tepki yöntemi kullanılarak indüksiyonla sertleştirmede işleme parametrelerinin optimizasyonu)” konulu çalışmada; besleme oranı, bekletme oranı, materyal ve indüktör bobini arasındaki akım ve boşluk gibi işleme parametrelerinin AISI 1040 çeliğinin sertliği üzerindeki iki farklı koşul altındaki etkisinin indüksiyonla

sertleştirme sırasında haddelenmiş ve normalize edilmiş olduğunu deneysel araştırmaların gösterdiği vurgulanmıştır. Elde edilen optimum sertlik değerleri; 3.21 mm/sn besleme oranı, 5 saniye bekletme süresi, 135 Amper akım ve malzeme ve indüktör bobini arasındaki 5.29 mm boşluk olan işleme parametrelerinin optimum değerlerinde haddelenmiş ve normalize edilmiş koşullar için sırasıyla 56.4 HR_C ve 57.8 HR_C'dir. Deneysel veri ve bağlanım denklemiyle elde edilen verinin birbirleriyle ilişkili olduğu ve bu geliştirilen bağlanım denklemlerini doğrulamakta olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, orta karbonlu çelikten miller, akslar veya otomobil parçaları yapmak için hammaddenin öncelikle normalize edilmesi ve sonra malzemenin üniform sertliğini elde etmek için indüksiyonla sertleştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir [56].

Fomin, Steinhauer, Lyasnikov, Wenig ve Zakharevich (2012) tarafından yapılan “Nanocrystalline Structure of the Surface Layer of Plasma-Sprayed Hydroxyapatite Coatings Obtained Upon Preliminary Induction Heat Treatment of Metal Base (Ana metalin ilk indüksiyonlu ısıl işlemi üzerinde elde edilmiş plazma püskürtmeli hidroksiapatit kaplamaların yüzey tabakasının nanoyapısı)” konulu çalışmada; intrabon titanyum implantlar için biyouyumlu nanoyapılı hidroksiapatit (HA) kaplamalar, plazma püskürtme yöntemi ile elde edilmiştir. HA kaplamalar, ortalama 10-30 nm tane boyutunda ve öncelikli olarak plazma püskürtme tortusuna doğru olan alt katmanların indüksiyonla ısıl işlemine bağlı olarak elde edilmiş morfolojik heterojenliğin geliştirilmiş karakteristiği ile karakterize edilmiştir. Bilgisayar destekli görüntü işlemiyle birlikte taramalı elektron mikroskobu verilerine dayanılarak ortalama tane boyutunun indüksiyonla ısıl işlem sıcaklığına bağlı olduğu belirlenmiştir [57].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi, spektral analiz cihazında 4 adet yakmanın (% ağırlık olarak) ortalaması alınarak elde edilmiş ve Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Şekil 4.1’de gösterilen DIN 1.3505 numaralı AISI E 52100 kodlu 100Cr6 çelik malzeme kullanılmıştır.

Tablo 4.1: 100Cr6 çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık olarak).

C	Mn	Si	Cr	P	S	Mo	Al	Cu	Ni
0,995	0,444	0,223	1,401	0,006	0,002	0,028	0,019	0,172	0,085

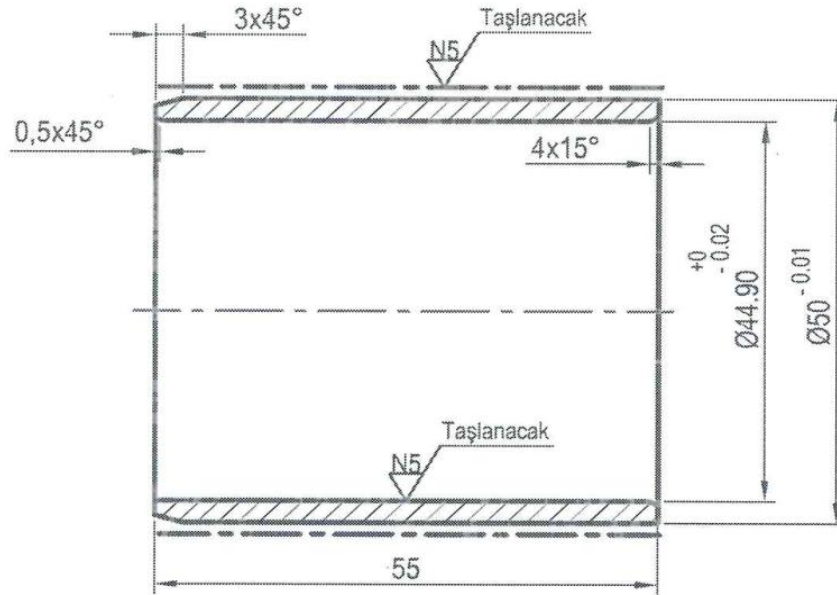


Şekil 4.1: Deneysel çalışmada kullanılan 100Cr6 çelik kütük.

Burç imalatında kullanılmak üzere $\phi 55$ mm çaplı temin edilen silindirik kütük malzeme; dış çap değerleri $\phi 52,7$ mm’ye işlenerek 57 mm boyunda kesilmiştir. Elde edilen bu ölçüler sonrasında malzeme indüksiyon tezgahında sertleştirme ısıl işlemine dolu olarak alınmıştır (Şekil 4.2). İndüksiyonla sertleştirilmiş haldeki malzeme; Şekil 4.3’te verilen boyutlara, gerekli talaşlı imalat prosedürleri (tornalama ve taşlama) uygulanmak suretiyle getirilmiştir.



Şekil 4.2: Isıl işlem öncesi hazırlanan 100Cr6 çelik malzemeler.



Şekil 4.3: 100Cr6 çeliğinden imal edilecek burca ait teknik resim.

4.2 Isıl İşlemler

Deney numunelerinin indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi için 100 kW gücünde, 10 kHz çıkış frekansında, 380 Volt AC besleme voltajlı ve maksimum 200 kg iş parçası ağırlığına sahip olan Inductotherm marka Inductoscan-Sp model indüksiyonla yüzey sertleştirme tezgahı kullanılmıştır (Şekil 4.4).

Yüzey sertleştirme ısı işlemlerinde kullanılan indüksiyon bobinlerinin çapı $\phi 68$ mm'dir. Isıl işlem sırasında iş parçası (100Cr6) 15 dev/dk ile döndürülmüş ve düşey yöndeki bobin ilerleme hızı 3 mm/sn ile sabit tutulmuştur. Tezgaha ait program parametreleri Tablo 4.2'de verilmiştir. 64 mm'lik pozisyon indüksiyon başlangıç durumu olup, bobin bu pozisyona 25 mm/sn'lik hızla gelip burada 1 sn beklemektedir. 130 mm'lik pozisyona 3 mm/sn'lik hızla ilerlemektedir (bu aşama malzemenin indüklenmesi ve su verilmesi aşamasıdır). 158 mm'lik pozisyon en üst nokta konumu olup, bobin burada 35 sn güç kapalı konumda soğutma suyu açık olarak beklemektedir. Sonrasında 64 mm'lik konuma, 25 mm/sn hızla güç ve su kapalı konumda inmektedir.

Tablo 4.2: İndüksiyonla yüzey sertleştirmede kullanılan konum-hız ve devir parametrelerini gösteren program ekranı.

No	Pozisyon (mm)	Güç (%)	Bekleme (sn)	Hız (mm/sn)	Dönme (dev/dk)	Z eksen	Su	Son
1	64	45	1,0	25	<u>15</u>	Off	On	Hayır
2	130	45	0,0	<u>3</u>	<u>15</u>	Off	On	Hayır
3	158	0	35,0	10	<u>15</u>	Off	On	Evet
4	0	0	0	0	0	Off	Off	Hayır

İndüksiyonla yüzey sertleştirme ısı işlemi sırasında östenizasyon (östenitleştirme) sıcaklıkları ölçülemedi. Fakat sertleştirme sonrası elde edilen sertlik değerleri ve içyapı incelemelerinden bu sıcaklıkların belirlenen indüksiyon işlem parametrelerine bağlı olarak uygun östenitleştirme sıcaklık aralıklarında (815-830°C) olduğu söylenebilir. Isıl işlem sırasında soğutma ortamı olarak % 5 yağ katkılı su kullanılmıştır. $\phi 52,7$ mm çaplı malzemenin indüksiyonla sertleştirme işlemi sonucunda yaklaşık 3 mm derinliğinde sertleştirilmiş bölge tespit edilmiştir. Şekil 4.5'te uygulanan sertleştirme işlem kademeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4: İndüksiyon tezgahı genel görünümü.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.5: İndüksiyon işlemine ait bazı görüntüler a) Kumanda panosu, b-c) Parçanın manyetik alana maruz bırakılarak ısıtılması, d-e) Su verme işlemi.



(f)



(g)

Şekil 4.5 (devam): f,g) İndüksiyon işlemi sonrasında malzemeler.

4.3 Sertlik

4.3.1 Ham Numunenin Sertliği

Isıl işlem öncesi malzeme sertlikleri Mettest marka sertlik ölçme cihazında Rockwell C metodu kullanılarak 5 ölçüm ortalaması alınarak ölçülmüştür (Şekil 4.6).



(a)



(b)

Şekil 4.6: Sertlik ölçümü a) Sertlik numunesi, b) METTEST marka Rockwell sertlik ölçme cihazı.

Ham numuneye ait sertlik deneyi sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Rockwell C (HR_C) sertlik deneyi sonuçları.

Ölçüm No	HR _C	DIN 50150'ye göre dönüşüm değerleri		
		HB	HV	Çekme dayanımı (MPa)
1	32,8	310	326	1048
2	33,0	312	328	1054
3	32,6	308	324	1042
4	33,1	313	329	1057
5	32,8	310	326	1048
Ortalama	32,9	311	327	1051

4.3.2 İndüksiyonla Yüzeyi Sertleştirilmiş Numunenin Sertliği

İndüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş olan numuneye Şekil 4.7'de gösterilen HECKERT marka sertlik ölçüm cihazı kullanılarak Vickers (HV) yöntemiyle sertlik ölçümü yapılmıştır. 30 kg yük 12 sn uygulanarak tatbik edilmiştir. Deney sonuçları Tablo 4.4 ve Şekil 4.8'de verilmiştir. İndüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş malzemedan alınan, dıştan içe doğru yapılan ve en dıştaki 1 numara olarak adlandırılan ölçüm değerleri herbiri yaklaşık 0,5 mm adımlarla olan 8 farklı noktadaki ölçüm değerlerini ifade etmektedir. Etkin sertlik değerlerinin 1-2-3-4-5 numaralı ölçüm noktalarında olduğu tespit edilmiştir.



(a)

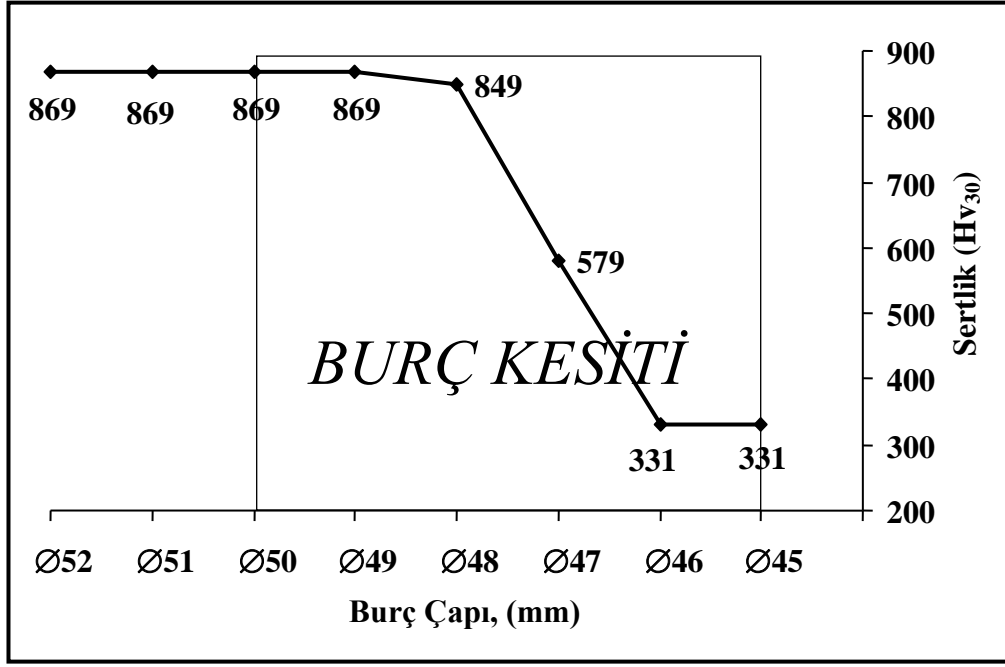


(b)

Şekil 4.7: HECKERT marka Vickers sertlik ölçme cihazı a) Önden görünüş, b) Yandan görünüş.

Tablo 4.4: Vickers (HV₃₀) sertlik deneyi sonuçları.

No	HV ₃₀
1	869
2	869
3	869
4	869
5	849
6	579
7	331
8	331



Şekil 4.8: Yüzeyden merkeze doğru Vickers (HV₃₀) sertlik değişimi.

4.4 Mikroyapı

Ham haldeki ve indüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş deney numuneleri 240, 320, 600, 800 ve 1000 Grade sulu zımparalama sonrasında 3 µm ve 1 µm elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler % 5 nital (HNO₃) çözeltisi ile dağlanarak Nikon marka ışık mikroskobu yardımıyla dıştan içe doğru sıralamayla farklı büyütme oranlarında mikroyapı görüntüleme incelemesi yapılmıştır.

4.5 Aşınma

Deney numunelerinin aşınma deneyleri Şekil 4.9’da gösterilen ball on disk aşınma test cihazında yapılmıştır. Aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı ucun özellikleri Tablo 4.5’te verilmiştir.

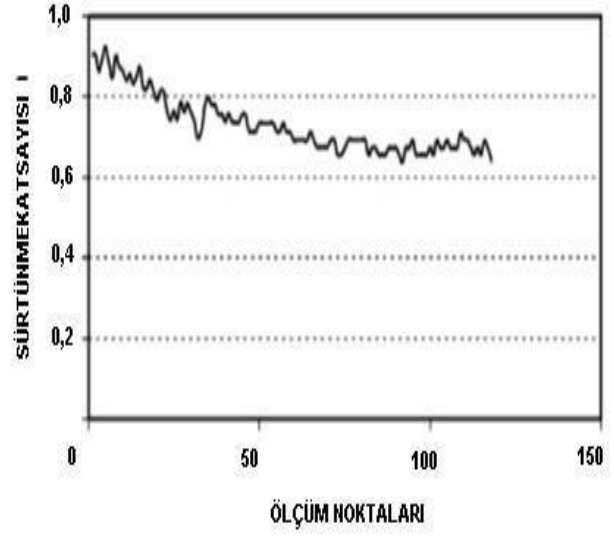
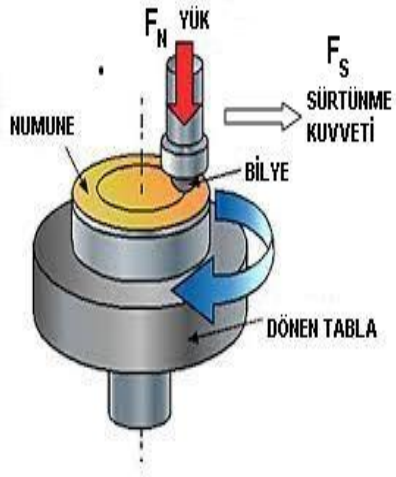


Şekil 4.9: Ball on disk aşınma test cihazı.

Tablo 4.5: Aşındırıcı uç özellikleri.

Tungsten Karbür	% 93,5-% 94,5
Kobalt	% 5,5-% 6,5
Çap	5 mm
Grade	25
Çekme Dayanımı	1517 MPa (220 kpsi)
Basma Dayanımı	5171-5447 MPa (750-790 kpsi)
Elastiklik Modülü	~ 634-641 GPa
Poisson Oranı	0,26
Sertlik	~1450-1500 HV ₁
Yoğunluk	14,95 g/cm ³

Numunelere; oda sıcaklığında, kuru ortamda, dönüş devri 18,8 dev/dk, iz çapı 50 mm, sürtünme hızı 49,2 mm/sn, örnekleme süresi 3 sn olan 2,5-5 ve 10 N'luk üç farklı kuvvet uygulanarak aşınma deneyleri uygulanmıştır (Şekil 4.10). Numunelerin her deney sonrasında alkol ile temizlenerek 0,0001 gram hassasiyetli terazide kütle kayıpları ölçülmüştür.



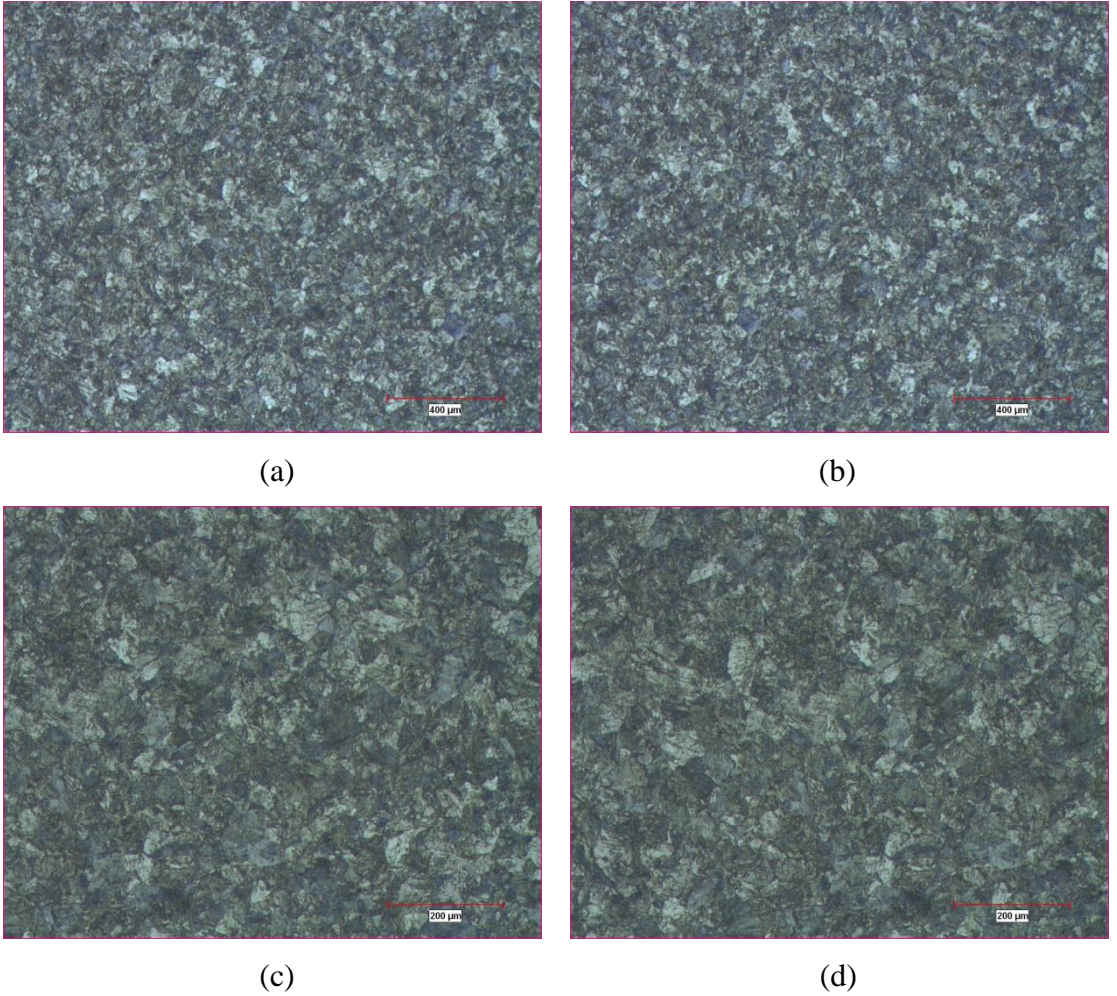
Şekil 4.10: Aşınma test cihazının şematik görünümü ve veri toplama.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

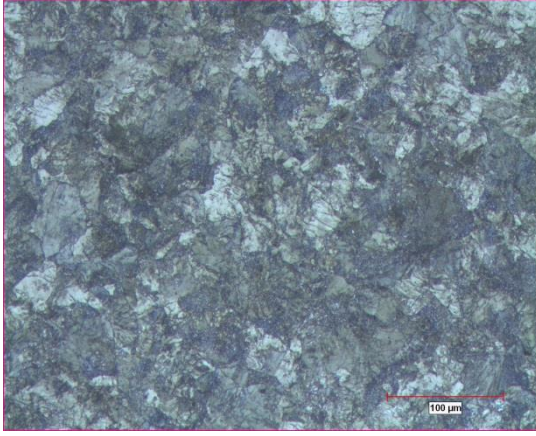
5.1 Mikroyapılar

5.1.1 Ham Numunenin Mikroyapı İncelemesi

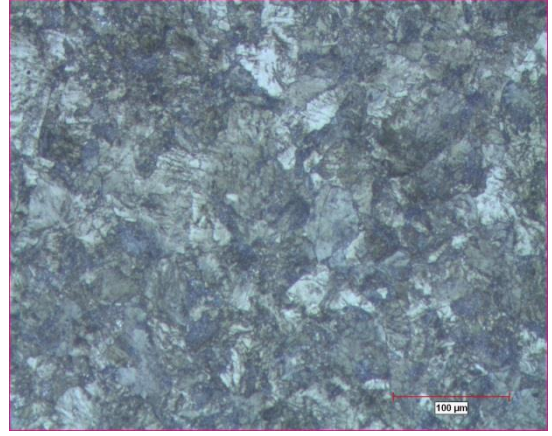
Ham haldeki 100Cr6 numunenin iç yapı görüntüleri 50, 100, 200 ve 500 büyütmelerde Şekil 5.1’de verilmiştir. 100Cr6 malzemenin, mikroyapı incelemesinden perlitik faz yapılı olduğu görülebilmektedir. Aynı zamanda yapı içerisinde karbür fazlar da yer almaktadır.



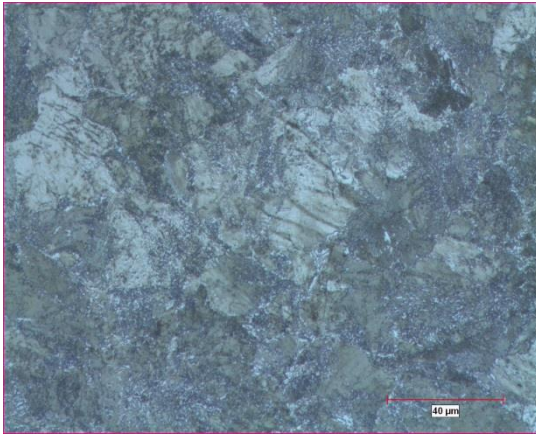
Şekil 5.1: Ham haldeki 100Cr6 çeliğinin mikroyapı görüntüleri a-b) 50X, c-d) 100X.



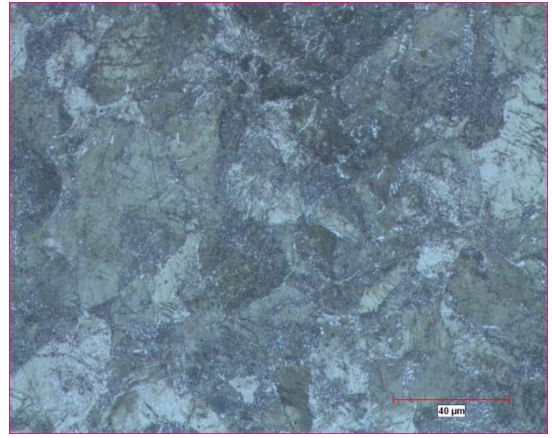
(e)



(f)



(g)

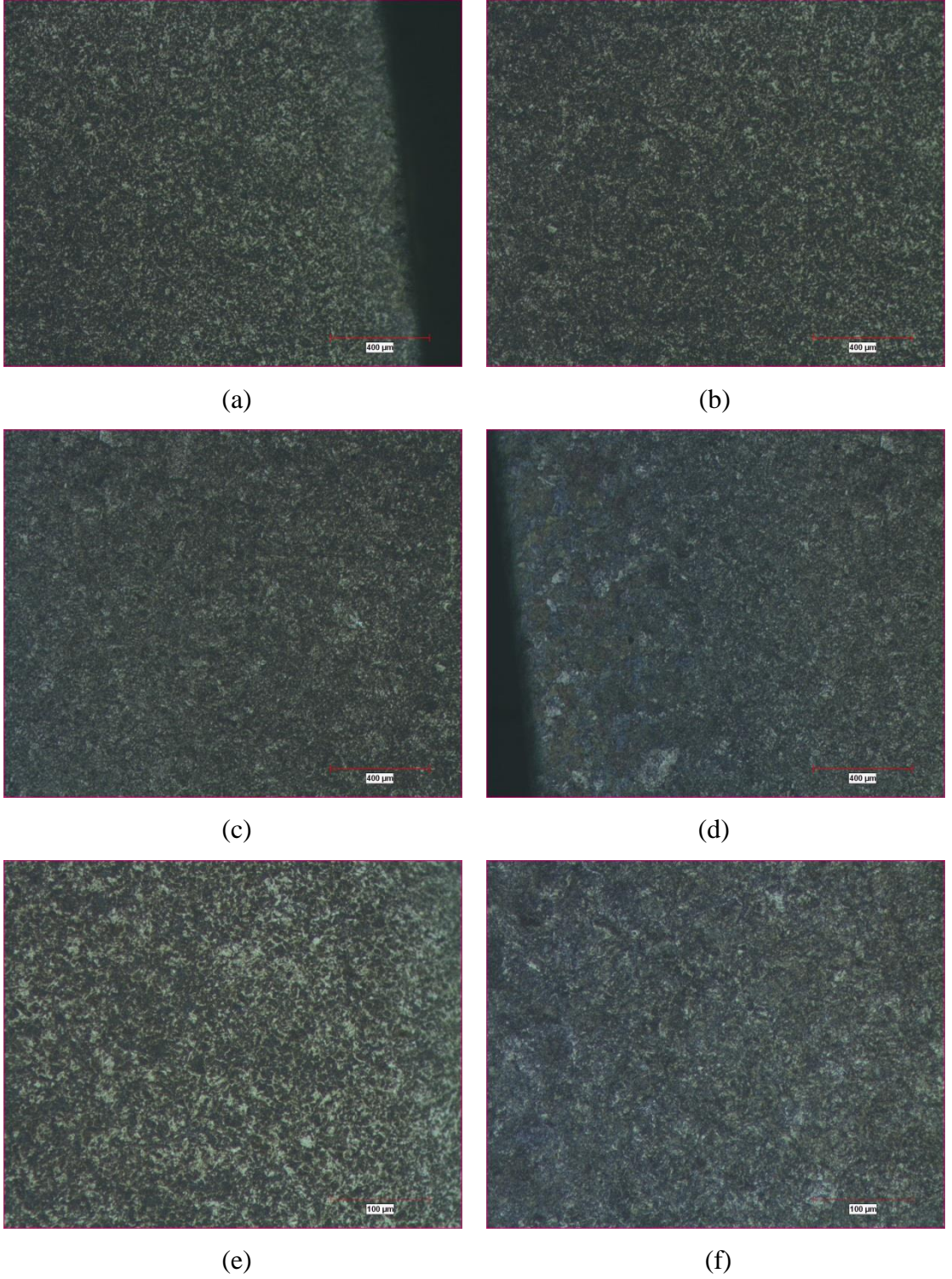


(h)

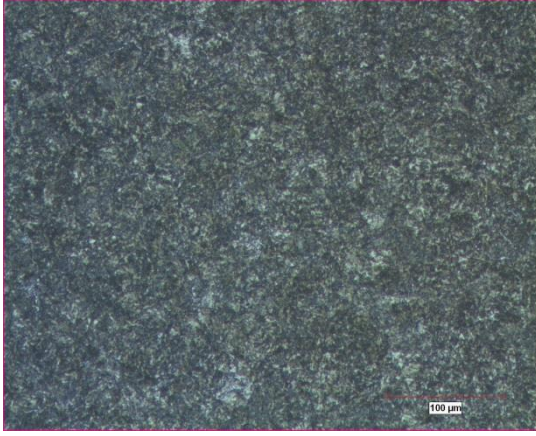
Şekil 5.1 (devam): e-f) 200X, g-h) 500X.

5.1.2 İndüksiyonla Sertleştirilmiş Numunenin Mikroyapı İncelemesi

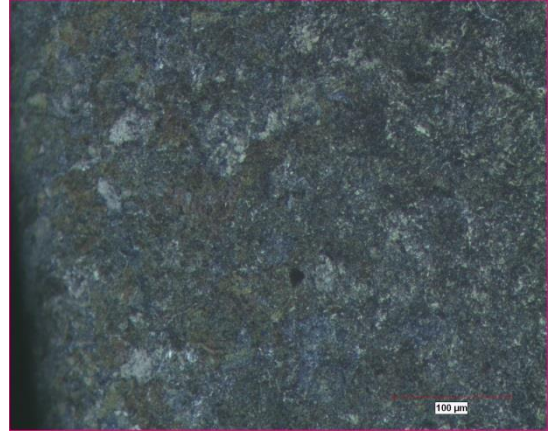
İndüksiyonla yüzeyi sertleştirilen numunenin yüzeyden merkeze (dış, orta ve iç kısım) doğru iç yapı incelemeleri Şekil 5.2’de verilmiştir. İyapıda; dış kısımlarda martenzit fazı, iç kısımlarda ise perlit fazının olduğu görülebilmektedir. Yapı içerisinde az miktarda (yaklaşık % 5-6 oranında) kalıntı östenit ve yine az miktarda (% 3-4 oranında) sementit (Fe_3C) [58], tane sınırlarında açık bölge şeklinde sıralanmış yapının ise çözünmemiş karbürler [59] olabileceği söylenebilir.



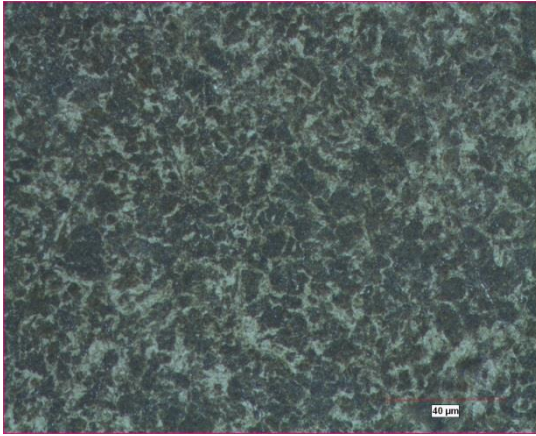
Şekil 5.2: İndüksiyonlu 100Cr6 çeliğinin mikroyapı görüntüleri a) Dış kısım 50X, b) Dışa yakın kısım 50X, c) Orta kısım 50X, d) İç cidar kısmı 50X, e) Dış kısım 200X, f) İç (orta) kısım 200X.



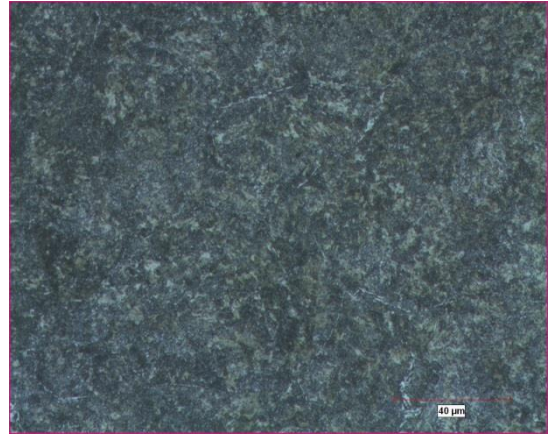
(g)



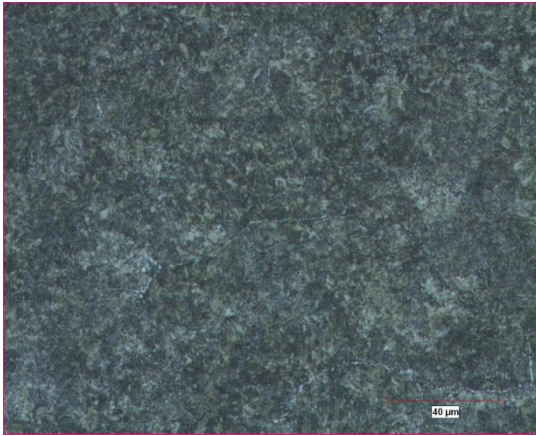
(h)



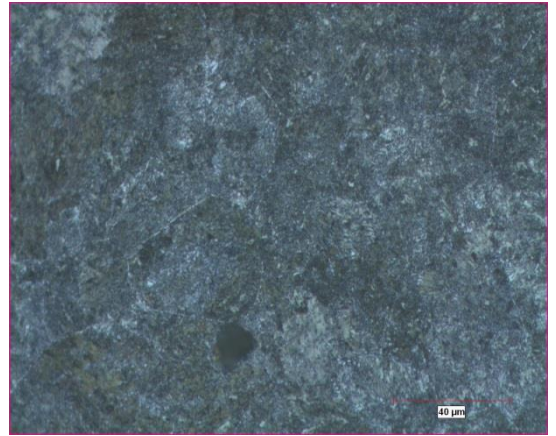
(i)



(i)



(j)



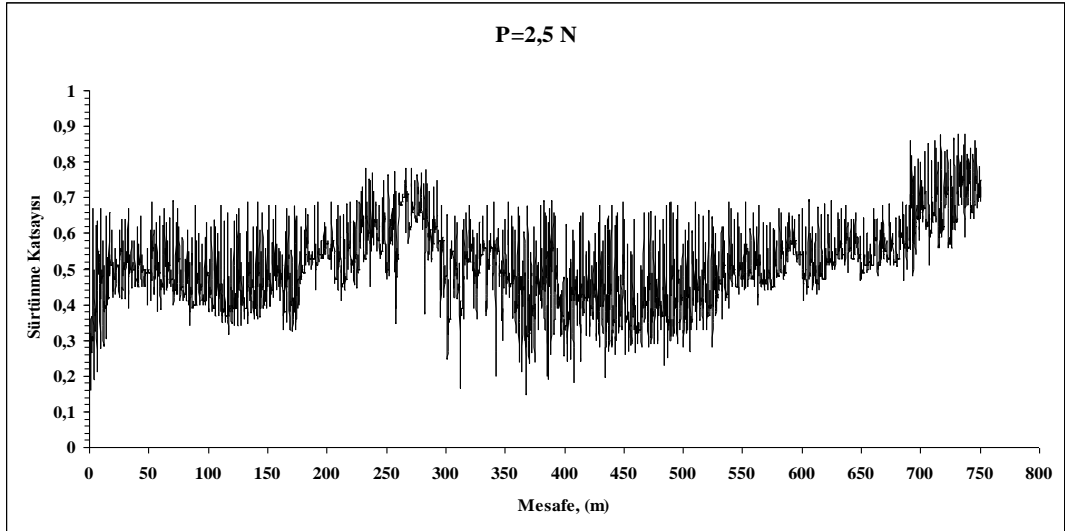
(k)

Şekil 5.2 (devam): g) Geçiş bölgesi 200X, h) İç cidar kısmı (perlitik) 200X, i) Dış kısım 500X, i) Orta kısım 500X, j) Geçiş bölgesi 500X, k) İç kısım (perlitik) 500X.

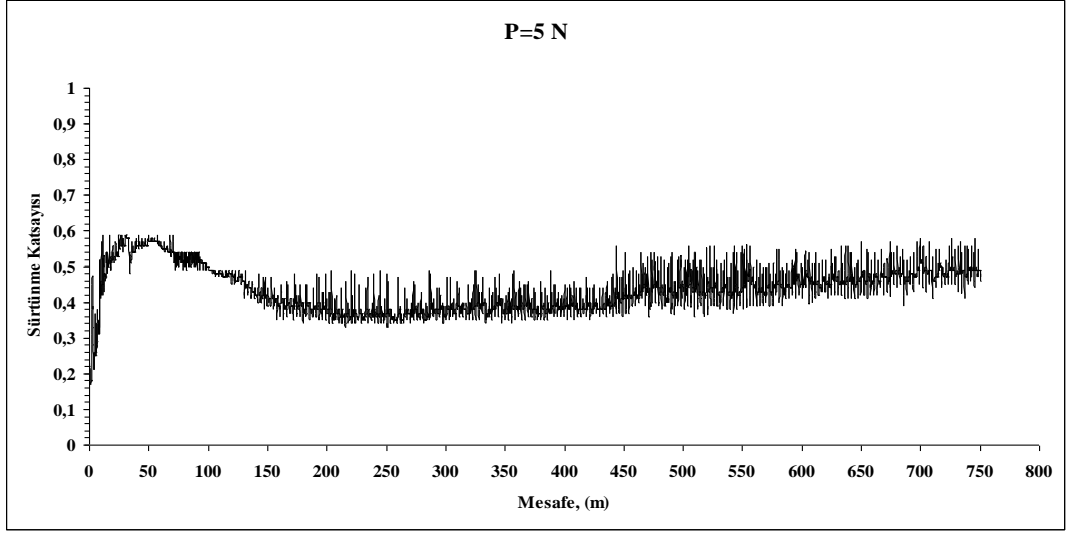
5.2 Aşınma Deneyi Sonuçları

Yüzeyi indüksiyonla sertleştirilmiş numunelere uygulanan ball on disk tipi aşınma deneyleri sonucu elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri; aşınma kuvvetlerine (2,5, 5 ve 10 N), ve kayma mesafesine bağlı olarak Şekil 5.3-5 arasında verilmiştir.

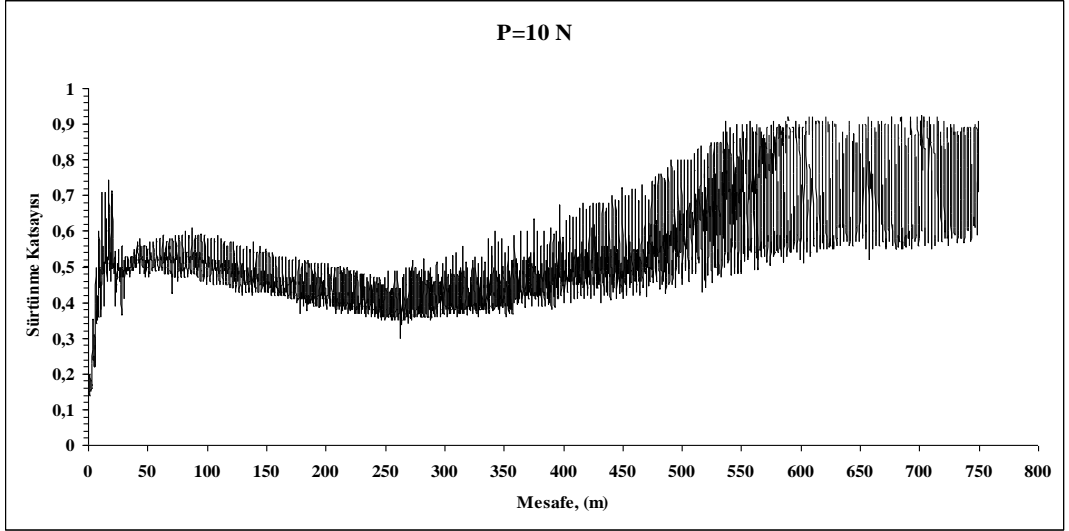
Aynı aşınma kuvvetlerinde kayma mesafesine (Şekil 5.3-5) bağlı olarak elde edilen sürtünme katsayıları grafiklerinde herhangi bir farklılık gözlenmemiştir. Bunun yanında aşınma kuvvetlerinin değişmesiyle birlikte sürtünme katsayılarının değişiminde belirgin farklılıklar olmuştur. 2,5 N kuvvet uygulandığında sürtünme katsayıları geniş aralıkta (0,15-0,75) değişim göstermiştir. Sürtünme katsayısı 5 N kuvvette aşınmanın başlangıcında belirgin bir artış gösterdikten sonra yaklaşık 0,4 civarında kararlı bir değere ulaşmıştır. Kararlı değere ulaştıktan sonra 5 N kuvvette sürtünme katsayıları 2,5 N kuvvetine göre daha dar aralıkta (0,35-0,5) değişim göstermiştir. 10 N kuvvette ise sürtünme katsayılarının değişimi 2,5 N kuvvette olduğu gibi geniş aralıklarda (0,35-0,85 arasında) değişmiştir.



Şekil 5.3: 2,5 N kuvvette sürtünme katsayısının mesafeye göre değişimi.



Şekil 5.4: 5 N kuvvette sürtünme katsayısının mesafeye göre değişimi.

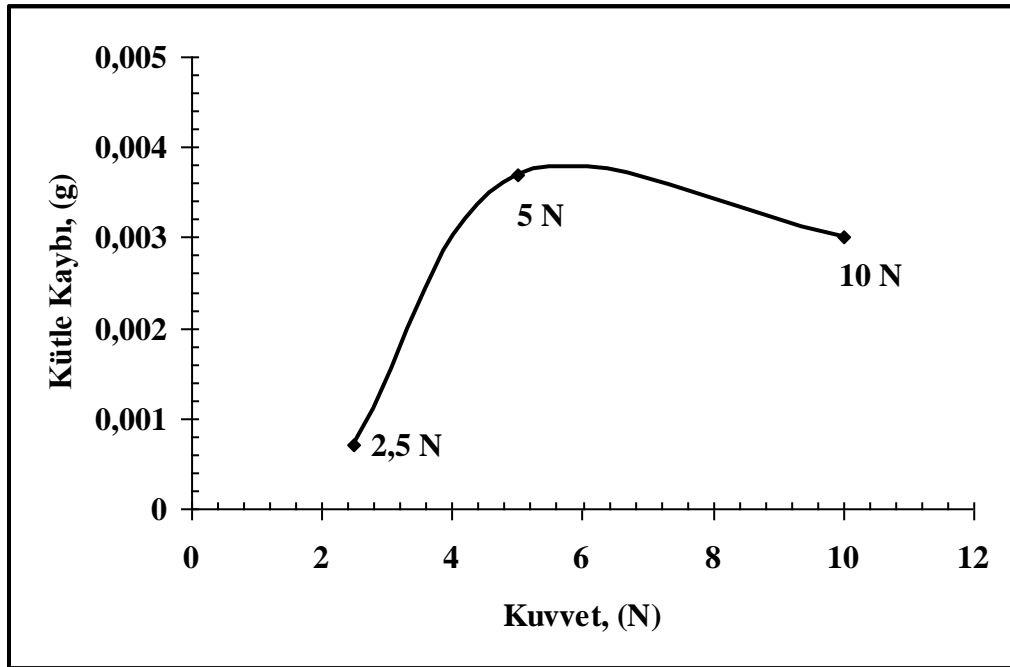


Şekil 5.5: 10 N kuvvette sürtünme katsayısının mesafeye göre değişimi.

Uygulanan kuvvetlere göre ölçülen kütle kayıpları tablo ve şekil olarak Tablo 5.1 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. 2,5 N kuvvette en az, 5 N kuvvette ise en fazla kütle kaybı elde edilmiştir. 10 N kuvvette ölçülen kütle kaybı 5 N kuvvette ölçülenden daha düşük elde edilmiştir.

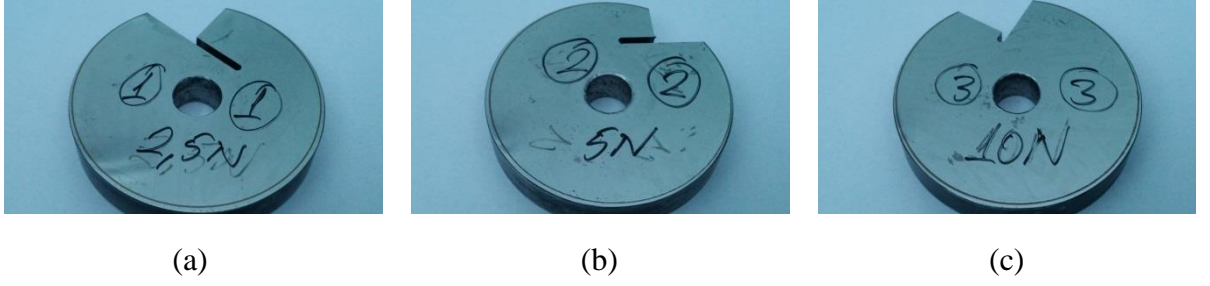
Tablo 5.1: Numunelerin aşınma deneyleri sonrasındaki kütle kayıpları.

	Numune Kütlesi (g)		
Kuvvet (N)	Test Öncesi	Test Sonrası	Kütle Kaybı
2,5 N	148,3622	148,3615	0,0007
5 N	147,0649	147,0612	0,0037
10 N	146,5121	146,5091	0,0030

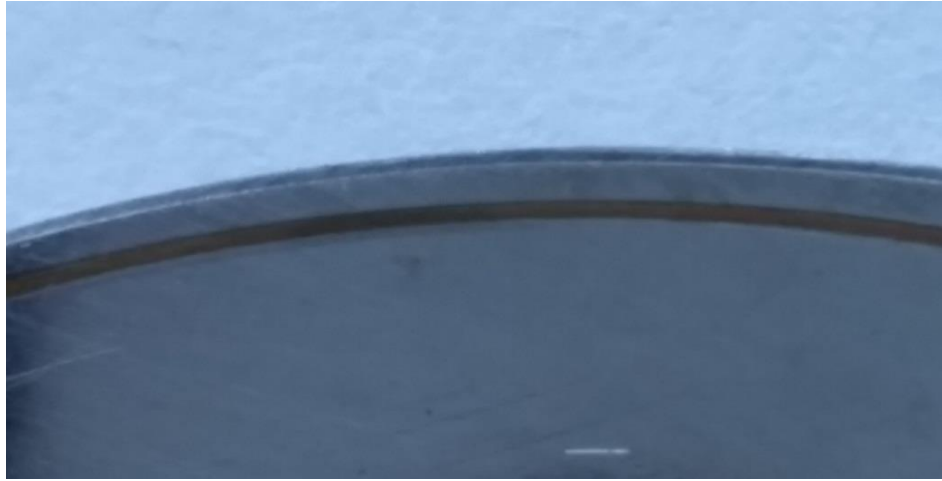


Şekil 5.6: Kütle kayıplarının uygulanan kuvvetlere göre değişim grafiği.

İndüksiyonla yüzeyleri sertleştirilen disk tipi numunelerin aşınma deneyleri sonrasındaki görüntüleri Şekil 5.7’de verilmiştir. Disk üzerinde meydana gelen aşınma yolu ayrıntılı olarak Şekil 5.8’de verilmiştir.



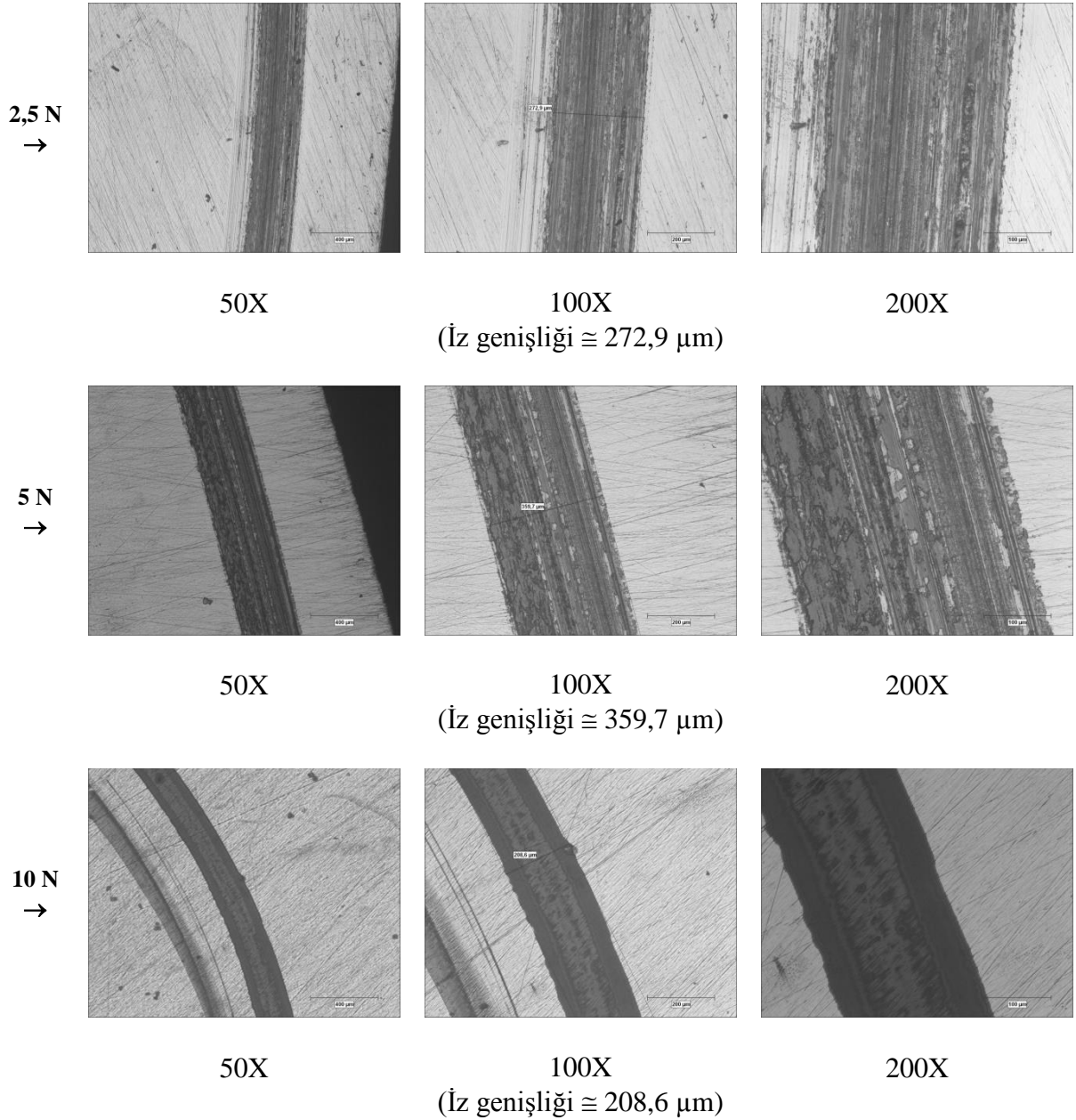
Şekil 5.7: Aşınma deneyine tabi tutulan numuneler a) 2,5 N, b) 5 N, c) 10 N.



Şekil 5.8: Aşınma yolu.

Şekil 5.9’da 2,5, 5 ve 10 N kuvvetlerde meydana gelen aşınma izleri 50, 100 ve 200X büyütmelemlerde ayrı ayrı verilmiştir. Aşınma kuvveti artışıyla beraber meydana gelen izin yüzey alanının da genişlediği görülmektedir (sırasıyla yaklaşık olarak 272,9 μm , 359,7 μm ve 208,6 μm). Bu durum uygun ve beklenen sonuçtur. Uygulanan normal gerilmenin artmasıyla birlikte sürtünme kuvveti de artış gösterir ve birbiriyle sürtünen yüzeylerde temas alanı artar. Ayrıca Şekil 5.9’da verilen aşınma izlerinden, 5 ve 10 N aşınma kuvvetlerinde yüzeyde daha fazla plastik deformasyonun meydana geldiği ve adhezif (yapışma aşınması) tipte aşınmanın gerçekleştiği görülmüştür. Bunun sebebi aşınma esnasında sürtünen yüzeylerde oluşan sıcaklıkla ilişkilendirilebilir. Sıcaklık; uygulanan normal gerilmenin büyüklüğüne, kayma hızına, sürtünen malzemelerin yapısına ve yüzey filmi özelliklerine bağlı olarak değişir [60].

Çalışmamızda normal gerilmenin dışındaki parametreler sabit tutulduğundan, uygulanan kuvvetin artmasıyla birlikte sıcaklığın da artması ve bunun sonucunda yüksek kuvvetlerde daha fazla plastik deformasyonun gözlenmesi uygun ve beklenen bir sonuçtur.

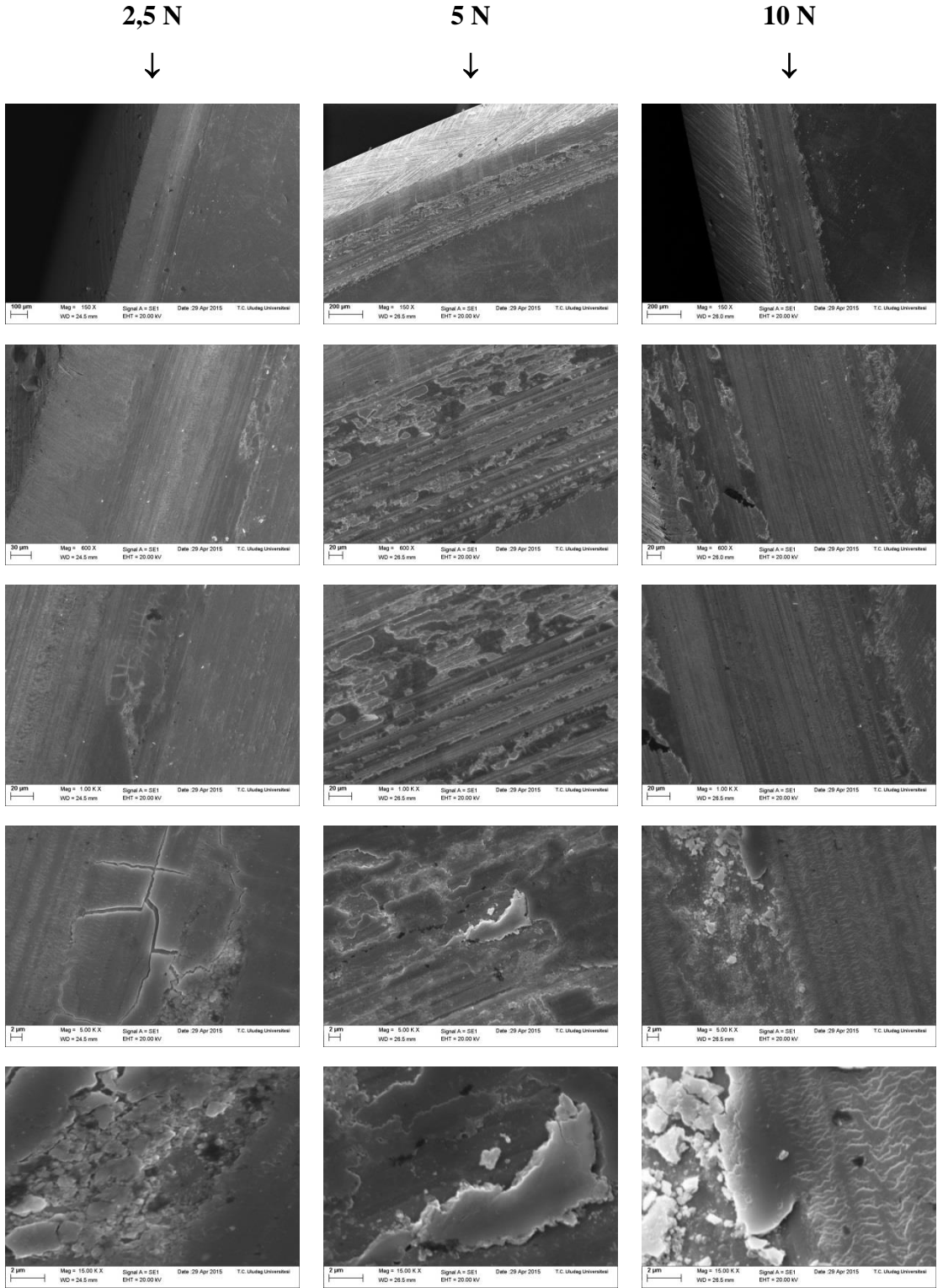


Şekil 5.9: Aşınma yüzey görüntüleri.

Aşınma grafiklerinden ve aşınma yüzey görüntülerindeki izlerden uniform (homojen) bir temas sağlanmadığı (bilyanın her bir devirde farklı faz bölgelerine temas ettiği ya da bastığı) görülmektedir (bkz Şekil 5.3-5.5, Şekil 5.7-5.9).

5.3 SEM Analizleri

Şekil 5.10'da uygulanan normal kuvvetler (2,5, 5 ve 10 N) sonucunda oluşan yüzeylerin SEM (Scanning Electron Microscope) görüntüleri değişik büyütmelerde (150, 600, 1000, 5000 ve 15000x) verilmiştir. SEM görüntüleri Şekil 5.9'da verilmiş aşınma izlerini doğrular niteliktedir. Şöyle ki; 2,5 N aşınma kuvvetinde yüzeyde çatlaklar görülmüş, çok fazla plastik deformasyon izine rastlanmamıştır. 5 ve 10 N kuvvetlerde ise plastik deformasyonun arttığı ve aşınma mekanizmasının adhezif (yapışma aşınması) tipte gerçekleştiği söylenebilir. Özellikle de 10 N kuvvette daha belirgin plastik deformasyon izleri görülmektedir. Bu sonuç, 10 N kuvvet altında ağırlık kaybının 5 N kuvvettekinden neden daha az olduğunu açıklamaktadır (bkz. Şekil 5.6). Aşırı plastik deformasyon, yüzey sünekliğinin çok azalmasına ve sertliğinin artmasına sebep olarak yüzeyin aşınmaya karşı daha dirençli olmasına yardımcı olmuş olabilir.



Şekil 5.10: 2,5-5 ve 10 N'lık kuvvetlerle aşınma testine tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri (her bir kuvvetin altında yukarıdan aşağıya sırasıyla 150X,600X,1000X, 5000X, 15000X büyütme).

6. GENEL SONUÇLAR

1. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi sonucunda 100Cr6 çelik malzemede yaklaşık 3 mm derinliğinde sertleştirilmiş bölge elde edilmiştir.

2. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi öncesinde ham haldeki çeliğin ortalama sertlik değeri 32,9 HR_C (327 HV) iken indüksiyon işlemi sonucunda dış bölgede yaklaşık 869 HV (66,1 HR_C) sertlik değerine ulaşılmıştır.

3. İçyapıda (mikroyapı) dış kesitte martenzit, içe doğru gidildikçe perlitik fazlar görülmüştür.

4. Aşınma deneyleri sonrasında 2,5 N'luk kuvvete maruz kalan numunede 0,0007 g, 5 N'luk kuvvete maruz kalan numunede 0,0037 g, 10 N'luk kuvvete maruz kalan numunede ise 0,0030 g kütle kaybı meydana gelmiştir.

5. 5 N'luk kuvvet altındaki sürtünme katsayı değerleri 2,5 ve 10 N'luk kuvvetler altındaki sürtünme katsayı değerlerine göre daha az değişkendir.

6. Aşınma deneylerinde adhezif (yapışma aşınması) tipte aşınma gerçekleştiği söylenebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Gündüz, S., *Metalurjide Faz Diyagramları*, Ankara: Seçkin Yayıncılık, 5, 17, (2013).
- [2] Karagöz, S. (Ed.), *Malzeme Bilgisi*, Aydın: AYMYO Yayınları Ders Notu, 28, 31, 32, 47, 48, 56-57, 59-61, 69, (2008).
- [3] Demirci, H., *Mühendislik Malzemeleri Önemli Endüstriyel Malzemeler ve Isıl İşlemleri*, İstanbul: Alfa Akademi, 25, 74-75, (2004).
- [4] Tonicello, E., Girodin, D., Sidoroff, C., Fazekas, A. and Perez, M., “Rolling bearing applications: some trends in materials and heat treatments”, *Materials Science and Technology*, Vol 28, 23-26, (2012).
- [5] Burrier Jr, H. I. (Ed.), “Bearing Steels”, *Encyclopedia of Materials Science and Technology*, Elsevier B.V., 501, (2001).
- [6] Budynas, R. G. and Nisbett, J. K., *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, New York: Mc Graw-Hill, 52, 570-573, 659, (2011).
- [7] Ballıkaya, H., “100Cr6 Çeliğinin Teğetsel Tornalama-Frezeleme Yöntemi İle İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Deneysel Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1, (2011).
- [8] Gigovic-Gekic, A., Oruc, M., Vitez, I. and Vujicic, B., “Analyse and Research of Nonmetallic Inclusions for Steel 100Cr6”, *Metalurgija* 48, 29-32, (2009).
- [9] 100Cr6, http://www.ims.it/ims/ims_spa/65ea2763385d0f5ec1256dac005af3?OpenDocument.
- [10] Faussemagne, A., “Evolution of surfaces properties for 100Cr6 steel by implantation and ionic mixing”, Ph.D Thesis, *Institut de Physique Nucleaire de Lyon-1 Univ.*, Villeurbanne, (1996).
- [11] Loewisch, G., Bomas, H., Mayr, P., Kienzier, R. and Neemann, K., “Lifetime and fatigue limit prediction for components of high strength steels”, *DFG interim colloquium*, Vol 32, 31-46, (2000).
- [12] Koçak, Ö., “Analysis of Formability of Metals”, MSc Thesis, *Middle East Technical University*, Ankara, (2003).
- [13] Chengsong, C., Fritsching, U., Schulz, A., Bauckhage, K. and Mayr, P., “Control of cooling during spray forming of bearing steel billets”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol 383, Elsevier B.V., 158–165, (2004).

- [14] Castro-Regal, G., Fernandez-Vicente, A. and Martinez, M. A., “Comparison of sliding friction and wear behaviour of overhead conveyor steels tested under dry and lubrication conditions”, *Revista de Metalurgia*, Vol 37, 212-219, (2005).
- [15] Gonzalez, L., Elvira, R., Garcia de Andoin, A., Pizarro, R. and Bertrand, C., “Influence of non-metallic second phases on fatigue behaviour of high strength steel components”, *Revista de Metalurgia*, Vol 36, 45-52, (2005).
- [16] Püttgen, W., Hallstedt, B., Bleck, W. and Uggowitzer, P. J., “On the microstructure formation in chromium steels rapidly cooled from the semi-solid state”, *Acta Materialia* 55. Elsevier, 1033–1042, (2006).
- [17] Uluğ, B., “Sıfırlı/Kreojenik Isıl İşlemin 100Cr6 ve 8620 Kalite Çeliklerinin Özellikleri Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).
- [18] Kameo, K., Nishiyabu, K., Friedrich, K., Tanaka S. and Tanimoto T., “Sliding wear behavior of stainless steel parts made by metal injection molding (MIM)”, *Wear*, Vol 260, Elsevier B. V., 674–686, (2006).
- [19] Habak, M., Lebrun, J. and Morel, A., “A study of the influence of the metallurgical state on shear band and white layer generation in 100Cr6 steel: application to machining”, *AIP Conference Proceedings*, Vol 907, Zaragoza, 691-696, (2007).
- [20] Sariıbrahimoğlu, K., Kızıl, H., Aksit, M. F., Efeoğlu, İ. and Kerpiççi, H., “Tribological Behavior of Sintered Steel under Starved Lubrication in R600a Environment”, *2nd International Conference on Advanced Tribology*, Singapore, 1-10, (2008).
- [21] Stienon, A., Fazekas, A., Buffiere, J. Y., Vincent, A., Daguiet, P. and Merchi, F. “A new methodology based on X-ray micro-tomography to estimate stress concentrations around inclusions in high strength steels”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol 513-514, 376–383, (2009).
- [22] Kara, L., “Yüzeyi İnce Film Kaplanmış 100Cr6 Çeliğinin Çeşitli Ortamlarda Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 1, (2009).
- [23] Rytberg, K., Wedel, M. K., Recina, V., Dahlman, P. and Nyborg, L., “The effect of cold ring rolling on the evolution of microstructure and texture in 100Cr6 steel”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol 527, Elsevier, 2431-2436, (2010).

[24] Rogal, L., Dutkiewicz, J., Czeppe, T., Bonarski, J. and Olszowska-Sobieraj, B., “Characteristics of 100Cr6 bearing steel after thixoforming process performed with prototype device”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol 20, 1033–1036, (2010).

[25] Hauserova, D., Dlouhy, J., Novy, Z. and Zrník, J., “Accelerated Carbide Spheroidisation In 100Cr6 Steel”, (Ed: Katalinic, B.), *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, Vol 22, No. 1, DAAAM International, Vienna, 533-534, (2011).

[26] Kananen, E. V., Eskelinen, J. J. and Haeggström, E. O., “Discriminating pores from inclusions in rolled steel by ultrasonic echo analysis”, *Measurement Science and Technology*, Vol 22, 2011 IOP Publishing, 7, (2011).

[27] Guddat, J., M'Saoubi, R., Alm, P. and Meyer, D., “Hard turning of AISI 52100 using PCBN wiper geometry inserts and the resulting surface integrity”, *Procedia Engineering*, Vol 19, 118–124, (2011).

[28] Amey, C. M., Huang, H. and Rivera-Diaz-del-Castillo, P. E. J., “Distortion in 100Cr6 and nanostructured bainite”, *Materials & Design*, Vol 35, Elsevier B.V., 66-71, (2012).

[29] Grad, P. and Kerscher, E., “Fatigue Crack Paths in the VHCF-regime of 100Cr6”, (Eds: A. Carpinteri, F. Lacoviello, L. P. Book and L. Susmel), *The 4th International Conference on Crack Paths (CP 2012)*, Gaeta, 401, (2012).

[30] Szost, B. A., Vegter, R. H. and Rivera-Diaz-del-Castillo, P. E. J., “Developing bearing steels combining hydrogen resistance and improved hardness”, *Materials & Design*, Vol 43, 499–506, (2013).

[31] Kang, J. H., Vegter, R. H. and Rivera-Diaz-del-Castillo, P. E. J., “Rolling contact fatigue in martensitic 100Cr6: subsurface hardening and crack formation”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol 607, 328–333, (2014).

[32] Martensite formation and tempering [online], <http://www.hero-m.mse.kth.se/page.php?pid=136>.

[33] Dikicioğlu, A., Kaynaklı İmalat ve Tasarım [online], <http://web.itu.edu.tr/~dikicioğlu/dersnotleri28022005.htm>, (2006).

[34] Schneider, M. J. and Chatterjee, M. S., “Introduction to Surface Hardening of Steels”, (Eds: J. Dossett and G.E. Totten), *ASM Handbook, Volume 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, ASM International, 389-397, (2013).

[35] Pekgöz, B., Sarıdemir, S., Uygur, İ. ve Aslan, Y., “Sementasyon İşleminin Farklı Çeliklerin Mikroyapı ve Sertlik Değerlerine Etkileri”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt 10, No 1, 19-24, (2013).

[36] Dereci, S., “İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1, 4-5, (2010).

[37] Haimbaugh, R. E., “Theory of Heating by Induction”, *Practical Induction Heat Treating*, ASM International, 5-10, (2001).

[38] Oktay, E., “Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme İşleminin Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15, 18, (2011).

[39] Willems, H., “Nondestructive Determination of Hardening Depth in Induction Hardened Components by Ultrasonic Backscattering”, (Eds: D. O. Thompson and D. E. Chimenti), *Review Of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol 10 B, New York: Plenum Press, 1707, (1991).

[40] MEGEP Metal Teknolojisi Yüzey Sertleştirme 1 [online] http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/metal/moduller/yuzey_sertlestirme1.pdf, (2006).

[41] Şengül, A. B., “İki Farklı Kontakt Basıncı Altında AISI 1045 Çeliğinin Fretting Yorulması Üzerinde İndüksiyonla Sertleştirme Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 32-34, (2006).

[42] İndüksiyonla-sertleştirme-avantajları, Hangi Tür Malzemeler İndüksiyonla Sertleştirilir [online], http://www.termoinduksiyon.com.tr/teknik_bilgiler.

[43] Köroğlu, S. ve Sazak, B. S., “Mutfak Uygulamaları İçin Yarım Köprü Seri Rezonans İntertörlü İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı”, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 167, (2002).

[44] Lo, C. C. H., Kinser, E. R., Melikhov, Y. and Jiles D. C., “Magnetic Nondestructive Characterization of Case Depth in Surface-Hardened Steel Components”, (Eds: D.O. Thompson and D.E Chimenti), *AIP Conference Proceedings*, Vol 25, 1253 (2006).

[45] Suarez Antola, R. and Suarez Bagnasco, D., “A Tool for Load Modeling in Induction Hardening Equipment Driven by Power Semiconductor Systems”, *INIS-UY-88*, Vol 38 (36), 1-5, (2006).

[46] Magnabosco, I., Ferro, P., Tiziani A. and Bonollo, F., “Induction heat treatment of a ISO C45 steel bar: Experimental and numerical analysis”, *Computational Materials Science*, Vol 35 (2), 98, (2006).

[47] Kim, H. C., Yoon, J. K., Doh, J. M., Ko, I. Y. and Shon I. J., “Rapid sintering process and mechanical properties of binderless ultra fine tungsten carbide”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol 435-436, 717, (2006).

[48] Durukan, İ., “Effects Of Induction Heating Parametres On Forging Billet Temperature”, MSc Thesis, *Middle East Technical University*, Ankara, (2007).

[49] Son, J. H., Yum, Y. J., Kim, W. H., Hwang, J. B., Kim, S. U., Yoo, S. J. and Lee, H. W., “Development of high strength center-pillar by high frequency induction heating”, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol 32 (6), 533-539, (2008).

[50] Thandar, S. T., Saldanah, C., Moe and W. K., “Design and Construction of Power System for Induction Heating (IH) Cooker Using Resonant Converter”, *Journal of Ministry of Science and Technology*, Vol 40 (24), 183, (2008).

[51] Nart, E. ve Sert, Ş., “İndüksiyon Isıl Yükleme İle Bir Çatlak Etrafında Oluşan Gerilmelerin Modellenmesi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, 1-7, (2009).

[52] Suzuki, D., Yatsushiro, K., Shimizu, S., Sugita, Y., Saito, M., and Kubota, K. “Development of Induction Surface Hardening Process for Small Diameter Carbon Steel Specimens”, *JCPDS-International Centre for Diffraction Data*, (1097-0002), 569, (2009).

[53] Zhang, C., Bowler, N. and Lo, C., “Magnetic Characterization of Surface Hardened Steel”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol 321 (23), 3878–3887 (2009).

[54] Sapate, S. G., Didolkar, V. K., “Metallurgical investigation of failure of coal mill drag chain pin”, *Materials and Design*, Vol 30 (7), 2623, (2009).

[55] Danda, S., “Effect of Induction Hardening on High Carbon Steel Forgings”, *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, Vol 1 (NCRAMT2011), 15, (2011).

[56] Kohli, A. and Singh, H., “Optimization of processing parameters in induction hardening using response surface methodology”, *Sadhana*, Vol 36 (2), 141-152, (2011).

[57] Fomin, A. A., Steinhauer, A. B., Lyasnikov, V. N., Wenig, S. B., and Zakharevich, A. M., “Nanocrystalline Structure of the Surface Layer of Plasma Sprayed Hydroxyapatite Coatings Obtained upon Preliminary Induction Heat Treatment of Metal Base”, *Technical Physics Letters*, Vol 38 (5), 481, (2012).

[58] Bhadeshia, H. K. D. H., *Steels for Bearings Progress in Materials Science 57* [online], <https://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2011/Bearings/#SECTION>, (2012).

[59] ASM, “Metals Handbook 8th Edition”, *American Society for Metals*, Vol 7, 52, (1973).

[60] Buckley, D. H., *Friction, Wear, and Lubrication in Vacuum*, NASA SP-277, Washington D.C.: Scientific and Technical Information Office, 18, (1971).