

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KRİYOJENİK İŞLEMDE 321 KALİTE PASLANMAZ
ÇELİĞİN MEKANİK PERFORMANS VE ÖZELLİKLERİNİN
DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER ÖZEL

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Murat PAKDİL

BOLU, NİSAN - 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ömer ÖZEL tarafından hazırlanan “**KRİYOJENİK İŞLEMDE 321 KALİTE PASLANMAZ ÇELİĞİN MEKANİK PERFORMANS VE ÖZELLİKLERİNİN DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oy birliği/ oy çokluğuyla** kabul edilmiştir. 26/04/2023

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. Murat PAKDİL
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye

Prof. Dr. Sabri ÖZTÜRK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye

Doç. Dr. Fevzi Çakmak BOLAT
Kocaeli Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin 10/05/2023 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 24 olarak tespit edilmiştir.

.....
ÖMER ÖZEL

ÖZET

KRİYOJENİK İŞLEMDE 321 KALİTE PASLANMAZ ÇELİĞİN MEKANİK PERFORMANS VE ÖZELLİKLERİNİN DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER ÖZEL

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MURAT PAKDİL)

BOLU, NİSAN - 2023

XIII + 72 sayfa

Bu çalışmada, sıvı azot ile doğrudan soğutma yöntemi kullanılarak derin kriyojenik işlem uygulanan AISI 321 kalite paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzeme numunelerine -196 °C sıcaklıkta 24 saat, 36 saat ve 48 saat bekleme süresi ile kriyojenik işlem sonunda 450 °C sıcaklıkta temperleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemlere maruz kalan numuneler ile kontrol numunesine korozyon, aşındırma ve çekme-kopma deneyleri yapılmıştır. Bunun yanında kriyojenik işlem uygulanan ve korozyon deneyi yapılmış numune yüzeylerinin elektron mikroskobu ile 100x, 500x ve 1000x görüntüleri incelenmiştir. Kriyojenik işlem uygulanan numunelerin deney sonuçları ile kontrol numunesinin deney sonuçları karşılaştırıldığında korozyon ve aşındırma deney sonuçları beklenildiği şekilde iyi olmaktan ziyade malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Çekme-kopma deneyinde ise numunelerin mukavemetinde bir miktar iyileşme gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlem uygulanan numuneler kontrollü bir şekilde olmadan aniden soğutulduğu için önceki çalışmalardan farklı sonuçlar elde edilmiştir. Elektronik mikroskop görüntüleri incelendiğinde aniden soğutma ile uygulanan kriyojenik işlemin numune yüzeyinde oluşturduğu etkilerin görsel analizi yapılmıştır. Bunlara bağlı olarak, son bölümde 321 kalite paslanmaz çelikte bu kriyojenik işlemin etkileri değerlendirilmekte ve bundan sonraki çalışmalarda nelere dikkat edilmesi gerektiğine yer verilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Paslanmaz çelik, AISI 321, kriyojenik işlem, aşınma, korozyon, mikro yapı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE CHANGE OF MECHANICAL PERFORMANCE AND PROPERTIES OF THE 321 QUALITY STAINLESS STEEL IN THE CRYOGENIC PROCESS

MSC THESIS

OMER OZEL

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. MURAT PAKDIL)

BOLU, APRIL 2023

XIII + 72 pages

In this study, the mechanical properties of AISI 321 quality stainless steel, which is deep cryogenically treated using liquid nitrogen direct cooling method, were investigated. The material samples were tempered at 450 °C at the end of the cryogenic treatment with 24 hours, 36 hours and 48 hours at a temperature of -196 °C. Corrosion, abrasion and tensile-rupture tests were performed on the samples exposed to these processes and the control sample. In addition, 100x, 500x and 1000x images of the cryogenically treated and corrosion-tested sample surfaces were examined by electron microscopy. When the test results of the cryogenically treated samples are compared with the test results of the control sample, the corrosion and abrasion test results have adversely affected the mechanical properties of the material rather than being good as expected. In the tensile-rupture test, some improvement was observed in the strength of the samples. Different results from previous studies were obtained, as cryogenically treated samples were abruptly cooled without a controlled manner. When the electronic microscope images were examined, a visual analysis of the effects of the cryogenic process applied with sudden cooling on the sample surface was made. Accordingly, in the last section, the effects of this cryogenic process on 321 grade stainless steel are evaluated and what should be considered in future studies is given.

KEYWORDS: Stainless steel, AISI 321, cryogenic treatment, wear, corrosion, microstructure

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	x
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Çeliklere Yapılan Kriyojenik İşlem İle İlgili Çalışmalar	3
2.2 Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi	12
3. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	15
3.1 Paslanmaz Çeliklerin İç Yapısı.....	18
3.2 Paslanmaz Çeliklerin İç Yapılarına Göre Sınıflandırılması: AISI/ ASTM/ UNS	19
3.3 Ferritik Paslanmaz Çelikler	22
3.4 Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	24
3.5 Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	26
3.6 Östenitik-Ferritik (Dupleks) Paslanmaz Çelikler	28
3.7 Çökelme Sertleşmesi (Yaşlandırma) Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler	31
3.7.1 AISI 321 (1.4541) Paslanmaz Çelik.....	34
4. KRİYOJENİK İŞLEM	39
4.1 Tanımı ve Tarihçesi	39
4.2 Kriyojenik İşlemin Uygulanması ve Yöntemleri.....	40
4.2.1 Doğrudan Soğutma Yöntemi	42
4.2.2 Dolaylı Soğutma Yöntemi	43
4.3 Çeliklerin Mekanik Performansına ve Mikro Yapısına Etkisi	44
4.4 Uygulamalı Alanları	46
5. MATERYAL VE YÖNTEM	48
5.1 Materyal.....	48
5.1.1 Malzeme	48
5.1.2 Malzemelerin Hazırlanması.....	48
5.2 Yöntem	51
5.2.1 Deneylerin Yapılışı.....	51

5.2.1.1 Korozyon Deneyi	51
5.2.1.2 Aşındırma Deneyi.....	53
5.2.1.3 Çekme-Kopma Deneyi	55
5.2.1.4 Mikro Yapının Görüntülenmesi	56
5.2.2 Deneylerin Sonuçları	57
5.2.2.1 Korozyon Deneyinin Sonuçları	57
5.2.2.2 Aşındırma Deneyinin Sonuçları	59
5.2.2.3 Çekme-Kopma Deneyinin Sonuçları.....	61
5.2.2.4 Mikro Yapının Görüntü Sonuçları	61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	66
7. KAYNAKLAR.....	68
8. EKLER.....	72



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Demir içerisinde bulunan Krom elementinin korozyon oranına göre etkisini gösteren diyagram (Aydın,2019).....	15
Şekil 3.2. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları	19
Şekil 3.3. Schaeffler diyagramı (ASM, 2001)	22
Şekil 3.4. Tam ferritik yapı gösteren ferritik taneli AISI409 paslanmaz çelik sacın mikroyapısı. (Voort, 2017).....	23
Şekil 3.5. 316L paslanmaz çeliğin mikroyapısı (Disegi vd., 2003).....	26
Şekil 3.6. Bir martensitik mikroyapının görüntüsü (Hilditch, 2015).....	28
Şekil 3.7. Östenit ve ferrit tanelerinden oluşan iki fazlı bir mikro yapıya sahip dubleks paslanmaz çelik (IMAO, 2014)	29
Şekil 3.8. Bazı paslanmaz çelik türlerinin içyapıları (Aran,2004).....	31
Şekil 3.9. Çökelme sertleşmesinin belirli bir zamanda oluşum aşamaları.....	32
Şekil 3.10. Yaşlandırma işlemi sonucu oluşan aşırı doymuş α fazı içerisinde meydana gelen β faz çökeltileri (Yılmaz, 2018)	34
Şekil 3.11. 1020 ° C'de çözelti içerisine koymak üzere soğutulduktan sonra AISI 321 alaşımının mikroyapısı; a) 200x; b) 1000x. (Baitanu, 2016) ..	37
Şekil 4.1. Kriyojenik işlem çevrimi (Reitz vd.,2001).....	41
Şekil 4.2. Doğrudan soğutma yöntemi ile çalışan kriyojenik işlem sistemi (Tekin, 1982).....	42
Şekil 4.3. Dolaylı soğutma yöntemi ile çalışan kriyojenik işlem sistemi (Tekin, 1982).....	43
Şekil 4.4. Kriyojenik işlem döngüsünde oluşan malzeme mikroyapıları (Das, 2011).....	45
Şekil 5.1. Numunelere yapılan ısı işlemlerin süreci	49
Şekil 5.2. Çekme-Kopma deneyi için numune boyutları	55
Şekil 5.3. Soğutma sonrası çelik kafes yapısı (Pürçek,2007)	62

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Bazı Paslanmaz Çelik Kaliteleri ve Kimyasal Bileşimleri.....	20
Tablo 3.2. Oda sıcaklığında 321 paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri	35
Tablo 3.3. 321 kalite paslanmaz çeliklerin yüzde kimyasal bileşimi değerleri	36
Tablo 4.1. Derin ve Sığ kriyojenik işlemin farklı celikler için aşınma etkisi...	46
Tablo 5.1. Numunelerin korozyon deneyi sonrası ağırlıklarının değişimi.....	59
Tablo 5.2. Aşındırma deneyi sonrası aritmetik ortalama pürüzlülük değerleri	60
Tablo 5.3. Aşındırma deneyi sonrası maksimum pürüzlülük değerleri	60
Tablo 5.4. Numunelerin sertlik değerleri	61
Tablo 5.5. Deney sonrası numunelerin mekanik değerleri.....	61



FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 5.1. Kriyojenik işlemin yapıldığı cihaz	50
Fotoğraf 5.2. Çekme-kopma deneyi için kalan 321 paslanmaz çelik mumune	50
Fotoğraf 5.3. Numunelerin hazırlandığı bilgisayar kontrollü makine	51
Fotoğraf 5.4. Kalibrasyonu yapılmış hassas terazi	52
Fotoğraf 5.5. Çözelti içerisine daldırılan numuneler	53
Fotoğraf 5.6. Aşındırma deneyi için kullanılan matkap tezgahı	54
Fotoğraf 5.7. Deneyde kullanılan zımparalar.....	54
Fotoğraf 5.8. Çekme-Kopma deneyi için bilgisayar kontrollü cihaz.....	55
Fotoğraf 5.9. Mikro yapının incelenmesi için SEM görüntüleme cihazı.....	56
Fotoğraf 5.10. Numunelerin çözeltiye daldırılmadan önceki görüntüleri a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune.....	57
Fotoğraf 5.11. Numunelerin çözeltiye daldırılmadan sonraki görüntüleri a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune.....	58
Fotoğraf 5.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.....	59
Fotoğraf 5.13. Numunelerin SEM görüntüleme cihazında 100 x yüzey görüntüleri a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune.....	63
Ayrıca tane boyutları küçüldüğü için malzeme daha homojen bir yapıya dönüşmüştür. Malzemenin SEM görüntüleme cihazı ile yüzeyi incelendiğinde yüzeydeki taneler arası boşlukların azaldığı görüldü. Fakat malzeme çok hızlı soğutulduğu için yüzeyde hasarlar oluştu (Fotoğraf 5.14).	63
Fotoğraf 5.15. Numunelerin SEM görüntüleme cihazında 500 x yüzey görüntüleri a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune.....	64
Fotoğraf 5.16. Numunelerin SEM görüntüleme cihazında 1000 x yüzey görüntüleri a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune.....	65

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

Cr	: Krom
Cr₂O₃	: Kromyum (III) Oksit
C	: Karbon
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
S	: Sülfür
Ti	: Titanyum
Cu	: Bakır
V	: Vanadyum
Nb	: Niobyum
N	: Nitrojen
W	: Wolfram
Mn	: Mangan
Si	: Silisyum
Al	: Alüminyum
O	: Oksijen
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
UNS	: Birleşik Numaralandırma Sistemi
GP	: Guinier Preston
TiN	: Titanyum Nitrür
WC-Co	: Tungsten Karbür-Kobalt
DÜBİT	: Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi
N1	: 1. Numune
N2	: 2. Numune
N3	: 3. Numune
N4	: 4. Numune

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken desteklerini hiç esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Murat PAKDİL başta olmak üzere, tez boyunca kullandığım numuneleri karşılıksız bağışlayan Er Paslanmaz Metal Sanayi Tic. Ltd. Şti. firmasına ve tez içinde geçen deneyleri gerçekleştirmeme izin veren başta Arçelik olmak üzere diğer kuruluşlara teşekkür ederim.

Saygılarımla,

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle makinelerde kullanılan malzemelerin geliştirilmesi için yeni imkanlar ortaya çıkmaktadır. Gerekli araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla paslanmaz çelik ve dökme demir gibi dayanıklı malzemelerin mekanik özellikleri geliştirilebilir. Bu çalışmanın amacı, kimyasal bileşeni en yaygın olarak kullanılan 304 kalite paslanmaz çeliğe benzeyen ve ek olarak içerisinde titanyum (Ti) barındıran 321 kalite paslanmaz çeliğe belirli şartlarda kriyojenik işlem uygulandıktan sonra bu malzeme üzerindeki etkilerinin incelenmesidir.

Seçilen paslanmaz çeliğin başlıca kullanım alanları; kimyasal proses tesisleri, yüksek basınçlı borular, motor türbinleri ve nükleer reaktörler için gereken ısı eşanjörleri olduğu için malzeme devamlı olarak yüksek korozyon ve aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu nedenle malzeme üzerinde yapılacak tüm iyileştirmeler malzemenin kullanım ömrünü artıracaktır.

Paslanmaz çelik ve dökme demirlerin sertlik, aşınma direnci ve mukavemetini artırmak için üretimde uygulanan geleneksel ısı işlemleri ve su verme yöntemi bilinen en eski ve en yaygın yöntemlerdir. Ancak 1900'lu yılların ortalarından itibaren uygulanmaya başlayan ve özellikle son yirmi yılda üretim proseslerine de eklenen kriyojenik işlem ile malzemelerin aşınma dirençlerinin iyileştiği görülmüştür.

Başta Amerika, Avrupa ve Çin gibi ağır sanayisi gelişmiş ülkeler, rakiplerine üstünlük sağlamak için malzemelerin boyutsal kararlılığı ve aşınma direnci için çalışmalarını sürdürmekte ve sanayi endüstrisinde kriyojenik işlemi yaygınlaştırmaya devam etmektedir.

Kriyojenik işlem, malzemenin en düşük -196 °C sıcaklığa kadar kontrollü bir şekilde soğutulması ve bu sıcaklıkta belirli süre bekletildikten sonra malzeme tekrardan ortam sıcaklığına çıkmasıyla gerçekleşir. İşlem sonrasında ihtiyaca göre temperleme işlemi de yapılabilir. Kriyojenik işlem, derin veya sıkı olarak doğrudan ve dolaylı soğutma yöntemleri olacak şekilde sıvı azotla yardımıyla iki yöntemle de uygulanabilir.

Malzemeye göre kriyojenik işlemin ideal bekleme sürelerinde değişiklik gösterdiği için her malzeme için ayrı bir çalışma yapılması gerekmektedir. Bu tezin

içerisinde önceden yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilecektir. Bu çalışmalara göre bekleme süreleri belirlenerek 321 kalite paslanmaz çeliğe kriyojenik işlem uygulanmıştır. Bu işlem sonrasında kriyojenik işlemin etkileri, yapılan deneyler ile ölçülmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında, 3. Bölümünde paslanmaz çelikler genel başlıklar altında anlatılırken AISI 321 çeliği hakkında detaylı bilgiler verilmektedir. Kriyojenik işlem ve tarihçesi 4. Bölümde yöntemleri ve uygulama alanları ile birlikte anlatılmaktadır. Kriyojenik işlem ile ilgili çalışmalar 2. Bölümde anlatılırken malzemenin bekleme süresi bu bölüme göre belirlenmiştir.

Malzemeye kriyojenik işlemin nasıl etki ettiği 5. Bölümde yapılan deneylere göre değerlendirilirken deneyden çıkan sonuçlara göre en ideal süreye ulaşılmaya çalışılmıştır. Son bölümde ise çıkan sonuçların değerlendirilmesi ve bu sonuçlara göre daha sonra izlenecek yol ile ilgili görüşler belirtilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çelik endüstrinin kriyojenik işleme talebi, 1950’li senelerde başlayan ilk uzay programıyla ve çelik üreten firmaların bu uzay programı sırasında teşvik edilmesi ile olmuştur. İlk başlarda bu firmalar, çelikleri sıvı azot içerisinde daldırma yöntemiyle kriyojenik işlemi denemişlerdir. Fakat bu yöntem çeliklerin termal şoka maruz kalması sonucu malzemenin zarar gördüğü tespit edilmiştir. Bundan dolayı, termal şok etkilerini azaltılması için ayarlanabilir sıcaklık denetleyicilerini, sıvı asot akışını kontrol edilmesini sağlaya bir selenoid vana ve malzeme sıcaklığını görülmesini sağlayan bir sıcaklık sensörü de bulunduran daha kontrollü ve etkin sistemler geliştirilmiştir.

2.1 Çeliklere Yapılan Kriyojenik İşlem İle İlgili Çalışmalar

Kriyojenik işleme yakın olarak ilk uygulama 1920 li yıllarda yüksek hız çeliklerine yapılmış ve konvansiyonel ısıtılardan sonra çelik içerisinde kalan ve malzene dayanımını olumsuz şekilde etkileyen yumuşak fazda bulunan kalıntı östenitin, sert fazda bulunan martensite dönüşmesinden dolayı bu çeliklerde mekanik performansın iyileştiği görülmüştür (Dowdell vd., 1927).

Gordon ve Cohen, çalışmalarında -196 °C sıcaklıkta sıvı azot içerisinde sertleştirilmiş 18-4-1 çeliğini belli bir süre tutarak malzemenin iç yapısındaki kalıntı östenitin değişimlerini incelemişlerdir. Sonrasında 93 °C ila 468 °C sıcaklık değerleri arasında temperleme işlemi yapıldığında, kalıntı östenitte herhangi bir değişim gerçekleşmediği; fakat 468 °C sıcaklığın üzerine çıkıldığında, yeterli miktarda karbür çökmesinin meydana geldiği ve kalıntı östenit değişiminin gerçekleştiği görülmüştür. Böylelikle kriyojenik işlem ile bu çeliğin; sertlik, dayanım ve süneklik gibi mekanik özellikleri, geleneksel sertleştirme ve temperleme işlemleri ile mümkün olamayacak kadar iyileştirildiği tespit edilmiştir (Gordon vd., 1942).

Kuzmenko ve Grishakov yaptıkları deneylerde, yapı çeliklerinin dayanımını -196 °C ve oda sıcaklığında incelemişlerdir. Çekme deneyleri yapıldığında -196 °C sıcaklıktaki çeliklerin çekme gerilme değerlerinin arttığı; yüzde uzamasının da

azaldığı saptanmıştır. Bununla birlikte düşük sıcaklıktaki çeliklerin yorulma direncinin arttığı gözlemlenmiştir (Kuzmenko vd., 1974).

Tavadze ve ekibi, yaptıkları bir deneyde östenitik krom-mangan çeliğini oda ve farklı sıcaklık değerlerinde (+20 °C, -78 °C, - 196 °C ve -253 °C) sıvı azot içerisinde belli bir süre beklettikten sonra mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu malzemelere yapılan çekme ve darbe tesleri sonuçlarında, deney sıcaklığı azaldığında çeliğin mukavemetinin arttığı, sünekliğinin azaldığı görülmüştür (Tavadze vd., 1975).

Stepanov ve Lokhankina, -196 °C sıcaklıkta kriyojenik işlemin krom-mangan alaşımlı çeliğine mekanik özellikleri bakımından etkisini incelemişlerdir. Çeliğin yorulma direnci ile çekme değerlerinde kayda değer artış olduğu görülmüştür (Stepanov vd., 1979).

Smolnikov ve Kossovitch yaptıkları çalışmalarda, kriyojenik işleme maruz kalan takım çeliklerinin kullanım ömüründe % 10 ile % 40 arasında değişen artış olduğunu kayıt etmişlerdir (Smolnikov vd., 1980).

Strife ve Passoja, kriyojenik işlemin 5 Ni (%5 Nikel) ve 9Ni (%9 Nikel) çeliklerin mikroyapısı ile kırılma özellikleri üzerinde oluşacak etkileri araştırmışlardır. Her iki malzemeye -196 °C sıcaklıkta kriyojenik işlem uygulandıktan sonra kırılma tokluğuna olumlu etki ettiği gözlemlenmiş, bu etkinin kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi ile oluştuğu görülmüştür (Strife vd., 1980).

Barron ve Mulhern yaptıkları çalışmada, kriyojenik işlem uygulanan Sınıf T8 takım çeliği ve C45 karbon imalat çeliğinin aşınma direnci ile sertlikleri incelemişlerdir. Bu çalışmalarda her iki tür çeliği, 1 dakika, 1 saat, 4 saat ve 24 saat bekleme sürelerinde ve -73 °C, -117 °C, -151 °C ve -196 °C sıcaklıklarında kriyojenik işlem uygulanmıştır. Bu işlemten sonra her iki tür çeliğin de aşınma direncinin iyileştiği; ancak takım çeliğinde daha fazla iyileşme olduğu görülmüştür. T8 takım çeliğinde en iyi aşınma direncinin 24 saat ve -196 °C sıcaklıkta uygulanan kriyojenik işlem ile meydana geldiği gözlemlenmiştir (Barron vd., 1980).

Barron başka bir çalışmasında, -84 °C ve -196 °C sıcaklıkta yapılan kriyojenik işlemin 12 tür takım çeliği, 3 tür paslanmaz çelik ve başka 4 farklı tür

elikten olmak üzere toplam 19 tür çelikten oluşan 19 çeşit malzemeye aşınma direnci üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için; her bir malzemeye işlem uygulandı. Takım eliklerine uygulanan -196 C sıcaklıktaki işlem sonrasında aşınma direncinde ciddi bir artış görülürken, -84 C sıcaklıktakinde daha az artış olmuştur. Paslannaz elik türleri için her iki sıcaklık değerindeki islemden sonra aşınma dirençlerinde birbirleri arasında % 10'u geçmeyen bir farkla artış olduğu görülmüştür. Sadece karbon bulunan elik ve dökme demirde iki sıcaklıkta uygulanan kriyojenik işlemden sonra aşınma dirençlerinde herhangi bir artış görülmemiştir (Barron, 1981).

Frey yaptığı deneyde, kriyojenik işlem uygulanan P/M celikleri ve matıkapların mekanik özelliklerindeki etkiyi incelemek için -196 C sıvı azot içerisine koyarak numuneleri 20 saat tutarak deneyler yapmıştır. Yüksek hız çeliği ve kobalt (Co) içeren matkaplar ile yapılan deneyler sonrasında; kriyojenik işlem uygulanan matkapların ömründe sırasına göre % 282 ve % 341 oranında bir artış meydana gelmiştir. Deneyin devamında ise iki farklı P/M eliğinin yapısındaki östenit miktarı, sertlik değeri ve aşınma direnci üzerindeki etkileri yapılan test ve ölçümlerle incelenmiştir. Kriyojenik işlem sonrasında; her iki farklı P/M eliğin de kalıntı östenit miktarı benzer oranda azalmış; sertlik değerleri ve aşınma dirençlerindeki artış farklı oranda olmuştur (Frey, 1983).

Pillai yaptığı çalışmasında, aşınma dirençlerini inceleyebilmek için rulman ve takım çelikleri ile kaplamasız karbür kesici takımlara -196 C sıcaklıkta kuru sogutma ile kriyojenik işlem uygulamış ve daha sonra aşınma dirençlerine etkisini ölçmek için testler yapılmıştır. AISI 52100 rulman çeliği ile AISI A2, AISI D2, AISI M2 ve AISI O1 takım çelikleri için aşınma dirençleri sırasıyla %500, %620, %380, %200 ve %400 civarında artış olurken, kaplamasız karbür kesici takımlarda sadece %37 artış olduğu görülmüştür (Pillai, 1986).

Moore ve Collins deneylerinde, farklı bekleme süreleri ile farklı bekleme sıcaklıklarında yapılan kriyojenik işlemin ve temperleme sıcaklığının AISI H13, AISI D2 ve Vanadis 4 takım çelikleri üzerinde sertlige etkisini incelemislerdir. Numunelerin sertlik değerleri; bekleme sıcaklığının artması ile yükselmiş, ancak temperleme sıcaklığının artışı ile düşmüştür. İki hafta gibi uzun süre kriyojenik

işleme maruz kalan numunelerin sertliği hiç işlem uygulanmayan numunelerin sertliğinden daha olumsuz etkilenmiştir (Moore vd., 1993).

Meng ve arkadaşları, Fe-12-Cr-Mo-V-1.4C takım çeliğine -80 °C ve -180 °C kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış olarak; mikro yapısı ve aşınma dirençleri üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda, kriyojenik işlem uygulanan numunelerin aşınma dirençlerinde sırasıyla % 110 ila %600 oranda ciddi bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bu duruma neden olarak, kriyojenik işlemin numune mikro yapısındaki kalıntı östeniti martenzite dönüştürmesi ile ilişkilendirilmiştir (Meng vd., 1994).

Jung ve arkadaşları ile yaptığı çalışmada, karbürlenmiş SAE 4320 ve SAE 9310 alaşımlı çeliklerine kriyojenik işlem sonrasında eğilme yorulması üzerinde oluşan etkiyi incelemişlerdir. Karbürleme işleminden sonra numuneler -73 °C ve -196 °C sıcaklıkta kriyojenik işleme maruz bırakılmıştır. Eğilme dayanımı yanında aynı numuneler için kalıntı gerilmesi, mikro yapısında kalıntı östenit miktarı ve yüzey sertliği ölçümleri yapılmıştır. Kriyojenik işlemten sonra; kalıntı östenitin hacminde martenzite dönüşmesi nedeniyle azalma, numunelerin kalıntı gerilmeleri ve yüzey sertlik değerlerinde iyileşme olmuştur. Fakat eğilme dayanımında yaklaşık %10 oranında düşüş meydana gelmiştir (Jung vd., 1996).

Collins ve Dormer, derin kriyojenik işlemin AISI D2 soğuk iş takım çeliği üzerinde sertlik, tokluk ve aşınma direncine olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyde, malzeme -140 °C ile -196 °C sıcaklıkları arasında belirli bir süre bekletilmiş; işlemten sonra sertlik, tokluk ve aşınma direnci değerlerinin arttığı görülmüştür. Sertliğin artmasının nedeni olarak, yumuşak bir faz halde bulunan kalıntı östenitin sert bir faz halde bulunan martenzite dönüşmesi ile; tokluk ve aşınma direncinin artmasının nedeni ise, mikro yapıda karbür tanelerinin daha ince halde olup boşluklara dağılması ve yapının daha homojen bir hale gelmesi ile ilişkilendirilmesidir (Collins vd., 1997).

Yun ve ekibi yaptıkları çalışmada, -196 °C sıcaklıkta ve farklı bekleme sürelerinde (24 saat ve 48 saat) derin kriyojenik işlem uygulanan AISI T1 ve AISI M2 yüksek hızlı takım çeliklerinin mekanik özellikleri üzerinde etkisini incelemişlerdir. Bu işlemin numunelerin mekanik özelliklerine olumlu etki ettiği,

ayrıca 48 saat işleme maruz kalan numunenin 24 saatlik işleme göre mekanik özelliklerinde daha olumlu etki ettiği görülmüştür (Yun vd., 1998).

Mohan arkadaşları ile yaptığı çalışmada, kriyojenik işlem uygulanan takım çeliklerinde ve kaplamalarda aşınma direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda, kriyojenik işlemin takım çeliklerinde aşınma direncini geliştirerek malzeme ömründe % 110 oranında uzama ile TiN kaplamalardan daha verimli olduğu gözlenmiştir (Mohan vd., 2001).

Huang ve ekibi yaptığı çalışmalarda, kriyojenik işlemin AISI M2 takım çeliğinin mikroyapısı üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, kriyojenik işlemin karbon kümelenmesinin artmasını hızlandığı ve sonra yapılan ısıtıl işlemlerde karbür yoğunluğunu arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle çeliklerin aşınma dayanımının yükseldiği, kriyojenik işlemin sonrası martensit matrisdeki karbür olmasını desteklediği ve buna bağlı karbür miktarı ile hacim oranını artırmıştır. Böylece malzeme mikro yapısında daha homojen karbür dağılımı olduğu görülmüştür (Huang vd., 2003).

Prabhakaran ve arkadaşları yaptıkları bir deneyde, EN 353 çeliğini geleneksel ısıtıl işlem ile -80°C sıcaklıkta sığ kriyojenik işlem ve -196°C sıcaklıkta derin kriyojenik işlemin darbe dayanımına olan etkileri kıyaslanmıştır. Geleneksel ısıtıl işlem ile kıyaslandığında kriyojenik işlemlerin numunenin darbe dayanımını iyileştirdiği; ancak sığ kriyojenik işlem ile derin kriyojenik işlem kıyaslandığında darbe dayanımları arasında ciddi bir derecede fark oluşmadığı tespit edilmiştir (Prabhakaran vd., 2004).

Babu ve ekibi yaptıkları çalışmada, farklı sıcaklıklar (-20 °C, -40 °C, -80 °C ve -190 °C) ile kriyojenik işlemin En19 (4140) alaşımlı çelik, AISI M1 yüksek hız çeliği ve H13 sıcak iş takım çeliklerinin aşınma direnci üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Aşınma deneyleri sonucunda; kriyojenik işlem uygulanan numunelerde sıcaklığının düşmesi ile aşınma direncinin daha fazla iyileştiği gözlemlenmiştir. M1, H13 ve En19 çeliklerinde sırasıyla aşınma direnci artış oranları %382, %335 ve %315 olduğu kaydedilmiştir (Babu vd., 2005).

Zhirafar ve arkadaşları, kriyojenik işlem uygulanan AISI 4340 çeliğin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki değişimler incelenmiştir. Yorulma, darbe ve sertlik testlerinden oluşan mekanik testler ile numunelerin kırılma davranışları; farklı sıcaklıklarda kriyojenik işlem ve temperleme işlemi uygulanmış numuneler üzerinde incelenmiş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Çoğunlukla geleneksel ısıtma işlemi uygulanan çeliklerle kıyaslandığında kriyojenik işlem gören numunelerin sertlik değeri ve yorulma dayanımı biraz daha fazlayken; tokluğun daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmaya göre kriyojenik işlem ve temperlemenin sertlik ve yorulma dayanımı üzerindeki olumlu etkisinin temel unsurunun kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile oluştuğu nötron kırılımı ile gösterilmiştir (Zhirafar vd., 2007).

Bensely ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; konvansiyonel ısıtma işlemi uygulanan, sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanan En353 sementasyon çeliğin ayrıca bunun üzerine uygulanan menevişleme işleminin etkilerini incelemişlerdir. Menevişleme işlemi öncesi ve sonrası numune yüzeyinde meydana gelen basma kalıntı gerilmeleri ölçülerek kıyaslama yapılmıştır. Üstelik ayrı ayrı yapılan üç işlem için mikro yapısındaki kalıntı östenit hacim oranları konvansiyonel ısıtma işlemi, sığ ve derin kriyojenik işleme göre sırasıyla %28, %22 ve %14 olarak ölçülmüşlerdir. Kalıntı gerilmeleri de bilindikten sonra bu üç işlem kıyaslandığında, derin kriyojenik işlemde numunenin basma kalıntı gerilmeleri artmıştır; ancak derin kriyojenik işlemden sonra uygulanan menevişleme işlemi ile durum tam tersine dönmüş kalıntı gerilme değerleri azalmıştır. Bu gerilim giderme durumunun, derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde ağırlıklı olarak menevişleme işleminden sonra ince karbürlerin çökmesindeki artma ile ilişkili olduğu konusunda görüş bildirilmiştir (Bensely vd., 2008).

Bensely ve arkadaşları yaptıkları devamı sayılabilecek bir çalışmada, derin ve sığ sıfır altı işlem görmüş çeliğin, konvansiyonel ısıtma işlemi görmüş çeliklere göre yorulma dayanımı sırasıyla %71 artmış ve %26 azalmış olduğu tespit edilmiştir. Kalıntı östenitin ile karbürlerin birlikte olması, sığ kriyojenik işlem gören numunelerin, geleneksel ısıtma ve derin sıfır altı işlem gören numunelere göre yorulma dayanımının daha yüksek olmasına sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır (Bensely vd., 2009).

Baldissera ve Delprete yaptıkları deneyde, dişli çeliği olan 18NiCrMo5 sementasyon çeliğinin derin kriyojenik işlem sonrasında statik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini, optik kırılmanın fotoğraf görüntüleri ile sertlik ve çekme testleri sonucuna göre değerlendirmişlerdir. Deneyde konvansiyonel olarak yapılan karbürizasyon işleminden sonra uygulanan derin kriyojenik işlem ve menevişlemenin sertlik ve çekme değerleri üzerindeki etkileri kıyaslanmış; bekleme süresi etkisi, ön menevişleme ve derin kriyojenik işlem sonuçları sayısal olarak tahlil edilmiştir. Sonuçlara göre tüm kriyojenik işlem uygulanan numuneler için sertlik değerlerinde yüksek artışlar (+0,6 HRC'den +2,4 HRC'ye kadar) ve kayda değer çekme değerinde artış (+%11) görülmüştür. Mikroyapısal değişimler bakımından deney sonuçları, literatürdeki benzer çeliklere uygulanan derin kriyojenik işlem ile bulunan sonuçlara benzerlik göstermektedir (Baldissera, 2009).

Dhokey ve Nirbhavne bir çalışmalarında, AISI D3 soğuk iş takım çeliğine kriyojenik işlem uygulandıktan sonra çok aşamalı temperlemenin etkisini görebilmek için pin-on-disk test cihazı yardımıyla aşınma testine tabi tutulmuştur. AISI D3 takım çeliği üzerindeki aşınma direnci iyileşmesini; aşınan yüzeyin sertlik değerleri, mikro yapının değişimi, aşınma hasarı ve SEM analizine bağlı olarak açıklamışlardır. Aşınma hızının tek aşamalı temperleme ile AISI D3 çeliğinde en düşük olduğu ve konvansiyonel ısıtılma işleminin aşınma hızına göre %93 oranında daha az olduğu ölçülmüştür. Kriyojenik işlem sonrasında yapılan iki ve üç aşama temperleme işlemi, takım çeliğinin aşınma direncini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiş, bu durumun nedeni çift ve üç aşamalı temperleme durumunda karbur boyutunun büyümesine bağlanmıştır (Dhokey vd., 2009).

Amini ve diğerleri, -80 °C sıcaklıkta sıg ve -196 °C derin kriyojenik işlem uygulanan 80CrMo12-5 soğuk iş takım çeliğinin aşınma direnci üzerinde oluşan etkisini altı farklı işlem süresi (0, 6, 24, 48, 72 ve 168 saat) belirlenerek incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, her iki kriyojenik işlem uygulanan numunelerin aşınma direncinde önemli derecede bir artış görülmüş ve sertliğin iyileştiği görülmüştür. Aşınma direncine etki eden en ideal işlem süresinin 48 saat olduğu kaydedilmiştir (Amini vd., 2010).

Akhbarizadeh ve diğerleri, altı farklı bekleme süresinde (24, 36, 48, 72, 96 ve 120 saat) derin kriyojenik işlem uygulanan AISI D3 soğuk iş takım çeliği

üzerinde yaptıkları incelemelerde; kriyojenik işlem bekleme süresinin numunenin mikro yapısında, karbür dağılımında, makro ve mikro sertlik değerlerinde oluşturduğu etkiyi incelemişlerdir. Yapılan çalışmaya göre, 36 saat bekleme süresinde mikroyapının en homojen hale geldiği, karbür yüzdesinin en çok arttığı, makro ve mikro sertlik değerlerinin optimum seviyeye geldiği deneyler ile görülmüştür (Akhbarizadeh vd., 2012).

Kerscher ve Lang yaptıkları çalışmada, AISI 52100 rulman çeliğine dört farklı bekleme süresinde (24, 65, 100 ve 1000 saat) uygulanan derin kriyojenik işlemin mikro yapısındaki kalıntı östenit miktarı ve yorulma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Numunede konvansiyonel ısıtma işlemi ve sonrasında yapılan menevişleme ile kalıntı östenit hacim miktarı ve mikro sertlik değeri %11,3 oranında artış olduğu, ardından uygulanan derin kriyojenik işlem ile %4 oranında azalmış olup bekleme süresindeki uzamanın etki etmediği görülmüştür. Fakat derin kriyojenik işlem ile birlikte yorulma dayanımının konvansiyonel ısıtma işlemine göre %20 ile %30 arası oranda arttığı görülmüştür. En yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu bekleme süresinin 100 saat olduğu tespit edilmiştir (Kerscher vd., 2010).

Koneshlou ve diğerleri, kriyojenik (sıfır altı) işlem uygulanan AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin mikro yapısı ve mekanik özelliklerinde oluşan değişimleri incelemişlerdir. -72 °C sıcaklıkta sıg kriyojenik işlem ve -196 °C sıcaklıkta derin kriyojenik işlem sonucunda AISI H13 takım çeliğinin mikro yapısında bulunan kalıntı östenitin martenzit faza geçtiği görülmüştür. Uygulama sıcaklığı düştükçe daha fazla miktarda kalıntı östenitin martensite geçtiği ve bunun yanında mikro yapıda daha ince karbür ve daha homojen dağılım olduğu gözlemlenmiştir. Derin kriyojenik işlem uygulanmış AISI H13 takım çeliğinin mikro yapısında daha homojen dağılım ve çok ince karbür parçacıklarının çökmesi meydana gelmiştir. Takım çeliğindeki bu değişimlere bağlı olarak mekanik özelliklerinin ciddi ölçüde geliştiği tespit edilmiştir (Koneshlou vd., 2011).

Senthilkumar ve diğerleri yaptıkları çalışmada, kriyojenik işlem uygulanan AISI 4140 çeliğinin artık gerilmeleri üzerinde oluşan etkilerini incelemişlerdir. Su verme ve menevişleme işlemi arasında -80 °C sıcaklıkta 5 saat süren sıg kriyojenik işlem ve -196 °C sıcaklıkta 24 saat süren derin kriyojenik işlem olarak iki farklı şartlarda işlem uygulanmıştır. Bu çalışmaya göre kriyojenik işlem sıcaklığındaki

düşüşün daha fazla kalıntı östenitin martenzite geçmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak, konvansiyonel ısıtma işlemi ve sıg kriyojenik işlem uygulanan çelikte gözlenen çekme artık gerilmeleri ile kıyaslandığında; derin kriyojenik işlem sonrasında basma artık gerilmelerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Üstelik derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerin sertlik değerlerinde %10 oranda bir iyileşme gözlenmiştir (Senthilkumar vd., 2011).

Sri Siva ve arkadaşları yaptıkları deneyde, derin kriyojenik işleme maruz kalan AISI 52100 rulman çeliğinin aşınma direnci üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneylerinde derin kriyojenik işleme maruz kalan rulman çeliklerinin aşınma direncindeki iyileşmenin geleneksel ısıtma işlemi tutulan numunelere göre %37 civarında daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Bunun nedeni olarak, kriyojenik işlem gören numunenin kalıntı östenitin martenzit faza geçmesi, ince karbürlerin boşluklara çökmesi ve karbürlerin daha homojen dağılım göstermesi ile ilişkilendirilmiştir (Sri vd., 2012).

Yan ve Li yaptıkları çalışmada, kriyojenik işleme tabi tutulan W9Mo3Cr4V yüksek hız çeliğinde mikro yapısının, mekanik özelliklerinin ve aşınma direncinin nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Numuneler, 4 saatlik süre boyunca -80 °C, -120 °C, -160 °C ve -196 °C sıcaklıkta kriyojenik işleme maruz bırakıldılar. Bütün numunelerin sertlik ve aşınma direncinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu iyileşmenin sebebi, kriyojenik işlem sonrasında kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi ve ikinci karbür çökeltme oluşması ile ilişkilendirilmiştir (Yan vd., 2013).

Arslan ve diğerleri yaptıkları çalışmada, AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac delme işlemleri sırasında kaydedilen verilere göre kriyojenik işlem uygulanan AISI D3 takım çeliğinden olan zımbanın delinmiş parçanın kesme geometrisi ve aşınma direnci üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Kriyojenik işlem sonrasında zımbadaki karbür parçaları dağılımının daha homojen olduğu ve karbür hacminin iki kata kadar arttığı görülmektedir. Bunun yanında, karbür artması ile matris malzemedeki alaşım elementlerinin ve karbonun oranını düşürerek matris malzemenin sünekliğini iyileştirmektedir. Takım çeliğinde kriyojenik işlem ile mikroyapı içinde bulunan beyaz karbürlerin yeniden dağılması, kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi ve bunlara bağlı olarak sertliğin artması, malzemenin aşınma direncini artırarak ömrünü uzatmıştır (Arslan vd., 2013).

Han ve diğerkleri yaptıkları çalışmada, 316LN paslanmaz çeliğı kriyojenik sıcaklıklarda önemli ölçüde sertleşmeye maruz kalmıştır. Geleneksel çekme testlerinde, martenzit hem 77 K hem de 4.2 K' da oluşturulabilirken, 4.2 K testi alt üst akma noktası olan akma sergilemiştir (Han vd., 2018).

Akıncıoğlu yaptığı çalışmasında, AISI 410 kalite paslanmaz çeliğe sığ kriyojenik işlem uygulanması sonrası mikroyapı, sertlik ve elektrik iletkenliğı üzerinde oluşan etkiyi incelemiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda; sığ kriyojenik işlem uygulanan 410 kalite paslanmaz çeliğın mikroyapısı daha homojen hale geldiğı görülmüştür, sertlik değerlerinde artış olduğı tespit edilmiştir. En çok sertliğın arttığı numune ise 96 saatlik süre boyunca işlemde tutulan N4 numunesinde 67,08 HRB sertlik değeri ile %4 artış hesaplanmıştır. Sığ kriyojenik işlemin sonrasında elektrik iletkenliğı artmıştır ve bu kriyojenik işlem sonrasında numunelerde yaklaşık %300'e varan elektrik iletkenliğinde artışlar meydana gelmiştir. Sığ kriyojenik işlem uygulanmış paslanmaz çelik numuneleri içerisinde 96 saat ile en uzun bekleme süresine sahip olan N4 numunesinde sertlik ve elektrik iletkenliğı en çok artış göstereni olmuştur (Akıncıoğlu, 2019).

2.2 Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kriyojenik işlem ile yapılan çalışmalar sonucunda; çeliklerde mekanik özelliklerin olumlu yönde değişmesine, östenit kalıntılarının martenzite dönüşmesine ve karbür çökelmeleri ile daha homojen yapı gözlemlenmektedir. Hatta elektrik iletkenliğinde artış görülmüştür.

Bu çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla derin kriyojenik işlem uygulanan malzemelerin, sığ kriyojenik işlem ve konvansiyonel ısıl işlem uygulanan malzemelere istinaden daha iyi performans gösterdiği tespit edilmesine rağmen; bazı literatür çalışma sonuçlarına göre sığ kriyojenik işlem uygulanan bazı malzemelerin derin kriyojenik işlem uygulanan aynı malzemelerden daha iyi sonuçlar alındığı da görülmüştür. Bensely ve arkadaşlarının 2009 yılında yapmış olduğı çalışmada, derin ve sığ sıfır altı işlem uygulanan çeliklerin, geleneksel ısıl yöntem uygulanan çeliklere bakıldığında yorulma dayanımında sırasına göre %71 artış ve %26 azalma saptanmıştır. Bunun nedeni olarak kalıntı östenitin ve ince karbürlerin birlikte olması, sığ kriyojenik işlem uygulanan çeliklerin, geleneksel ısıl

yöntem ve derin sıfır altı yöntem uygulanan çeliklere göre daha yüksek yorulma dayanımına sahip olması görülmüştür (Bensely vd. 2009).

Literatur çalışma sonuçlarına göre nerediyse tüm kriyojenik işlemlerden sonra sertliğin arttığı görülürken Kerscher ve Lang yaptıkları çalışmada kriyojenik işlemten sonrasında sertliğin azaldığı görülmüştür. Ancak bu çalışmada yorulma dayanımında artış olduğundan mekanik özelliklerin tamamen olumsuz etkilendiğini söylenemez (Kerscher vd., 2010).

Kriyojenik işlemdeki en önemli parametrelerden biri olan bekleme süresidir. Bununla ilgili çalışmalarda 2' den 1000 saate kadar çok geniş yelpazede süreler görülmektedir. Birden fazla bekleme süresinde yapılan çalışmalarda genellikle en iyi sonuç 36 saat kriyojenik işleme maruz kalan numunelerde görülse de bazı çalışmalarda ideal sürenin 40 ve 48 saat olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmalara göre kriyojenik işlemin tam bir ideal bekleme süresi olmamasına rağmen ideal zamanın hangi zaman aralığında yoğunlaştığı ile ilgili bilgiler verdiği görülmektedir.

Yapılan birçok çalışma sonucunda; çelik malzemelerin aşınma direnci ve yorulma ömrünün kriyojenik işlem uygulanarak iyileştirilebileceği ortaya konmuştur. Çelik imalatçıları için konvansiyonel ısıtma işlemi prosesi içerisine kriyojenik işlem eklenmesi, çelik yüzeylerinin daha yüksek aşınma direnci göstermelerine yardımcı olduğu tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem üzerine uygulanan temperleme işlemi ile tamamlanan çelikte basma kalıntı gerilmeyi arttırmasında en etkili yöntemlerden biri olduğunu ortaya çıkmış; özellikle derin sıfır altı yöntem uygulanan malzemeler için bekleme süresi ve sonrasında ısıtma vaktinin son derece kritik etkenler olduğu anlaşılmıştır.

Son yıllarda yapılan bütün çalışmalarda, paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirebilmek için sıfır altı işlem ile ilgili parametrelerde en iyi kombinasyonun bulunmaya çalışıldığı görülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar mevcut olan bilimsel literatür ile kısıtlıdır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kriyojenik işlemin çelik malzemelerinde sağladığı gelişmelerin arkasındaki prensip tamamen açıklanamadığı halde çelik mikroyapıda gerçekleşen değişimler ile bağlantılı olarak aşağıda madde madde gösterilen hipotezler öne sürülmüştür.

Bu hipotezler;

- Mikroyapıda bulunan karbürlerin incilmesi sonucu boşluklara çökmesi ve daha homojen bir yapının oluşması,
- Yumuşak bir faz kalıntı östenitin sert bir faz martensite geçmesi,
- Malzemedeki kalıntı gerilmelerin giderilmesidir.

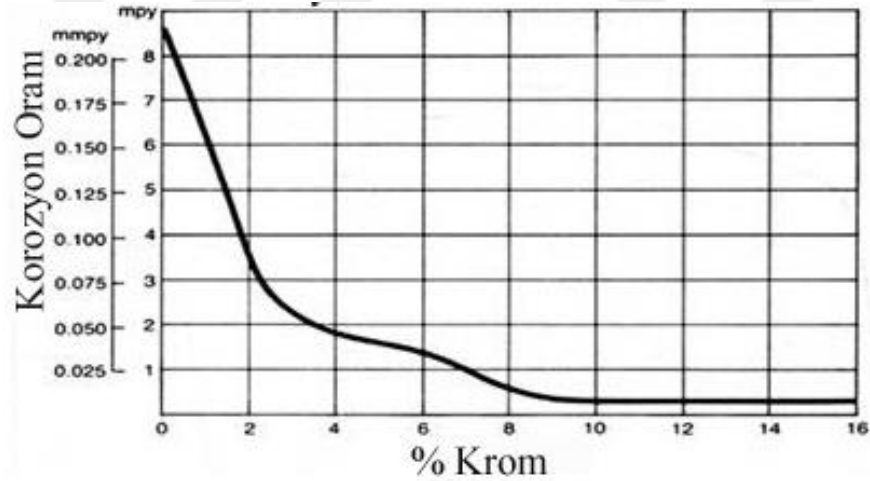
Yukarıda da belirtildiği üzere kriyojenik işlem uygulanan malzemeler ile ilgili yapılan çalışmalarda; aşınma direnci, sertlik, çekme dayanımı, yorulma ömrü, kırılma tokluğu, mikro yapının homojenliği ve kalıntı gerilmelerinde gelişmeler gözlemlenmiştir. Konu ile ilgili literatür araştırmalarına bakıldığında, sığ ve derin kriyojenik işlem uygulanmış farklı cinsteki çelikler ile birçok çalışma yapıldığı halde paslanmaz çeliklere uygulanmış kriyojenik işlemler ile ilgili yeterince çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Sonuç olarak, literatürde östenitik ve martenzitik paslanmaz çeliklere kriyojenik işlem uygulanmış yeterince çalışma bulunmamaktadır. Genel olarak bakıldığında 36 saat boyunca kriyojenik sıcaklıklarda bekletilen çeliklerde en iyi sonuç alınmasına rağmen paslanmaz çelikler için en ideal zamanın bulunması için daha çok çalışma yapılması gerekmektedir.

3. PASLANMAZ ÇELİKLER

Metalurjiye göre paslanmaz çelik, en az %10,5 krom elementi barındıran bir demir-karbon alaşımından meydana gelmektedir. Demir içerisindeki Krom elementi aşağıda belirtilen şekilde de görüldüğü üzere çeliğin paslanmaya karşı dayanımını artıran temel bileşendir. Bu çelikler ismini, diğer çelikler gibi paslanmaması, korozyona uğramaması ve lekelenmemesinden dolayı almaktadır. Bu Krom içeren demir-karbon alaşımlı malzemeler, kalite ve alaşım tipleriyle detaylandırılmamış biçimiyle, özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde korozyona karşı dayanıklı çelik olarak da bilinmektedir. Günümüzde, malzemenin ömrü boyunca uygulanan ağır ortam şartlarında hatasız bir şekilde çalışan çok farklı çeşitlerde ve ulaşılması kolay kalitelere ve özellikle yüzeylerinde paslanmaz çeliklere ulaşması zor değildir. Günlük hayatımızda paslanmaz çelikler, mutfak malzemelerinden otomobil malzemelerine kadar geniş bir yelpazede kullanıldığı görülmektedir (Aydın, 2019).

Paslanmaz çelik içinde bulunan Krom elementinin miktarı Şekil 3.1’de korozyon oranını göstermektedir.



Şekil 3.1. Demir içerisinde bulunan Krom elementinin korozyon oranına göre etkisini gösteren diyagram (Aydın,2019)

Paslanmaz çeliklerin çok yüksek korozyon dirençleri ile birlikte, çeşitli mekanik özellikleri bulunan türlerinin olması, düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinde kullanılmaya elverişli olması, kolayca şekil verilebilmesi, estetik

görünümüne sahip olma gibi özellikler barındırırlar. Kullanım alanları zaman içinde yaygınlaşan paslanmaz çeliklerin üretimi ve tüketimi, günümüzde toplumlar tarafından refahlık seviyesinin bir göstergesi sayılmaktadır (Aran, 2004).

Çelik yüzeyindeki Krom (Cr) elementi pasif özellikte ve yenilenebilir krom oksit (Cr_2O_3) tabakası oluşmasını sağlamaktadır. Krom oksit tabakası paslanmaz çeliğin korozif ortamlara karşı oksitlenme direncini yükseltmektedir (ASM, 1998).

Paslanmaz çelikler, mükemmel korozyon dayanımlarına sahip olmasının yanında mekanik özelliklerine göre birçok çeşidi bulunur. Kimyasal bileşenine; Karbon (C), Mangan (Mn), Nikel (Ni), Molibden (Mo), Titanyum (Ti), Bakır (Cu), Vanadyum (V), Niobyum (Nb), Nitrojen (N), Sülfür (S), Wolfram (W) gibi elementlerin eklenmesi özelliklerini değiştirmek mümkündür.

Krom (Cr) paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımını artıran en önemli elementtir. Ferrit dengeleme özelliğine sahip bir metaldir, bu sebeple oda sıcaklığında yalın Fe-Cr alaşımları %20 Cr değerine kadar hep ferritli bir iç yapıya sahiptir. Krom (Cr) %20 Cr değerini aşınca sigma evresi baş gösterir. Krom (Cr) kuvvetli bir karbür oluşturunur.

Karbon (C) östeniti dengeleyen bir elementtir. Akma dayanımı ve çekme dayanımı değerlerini artmasını sağlayarak paslanmaz çelik malzemenin sertlik ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerini iyileştirir.

Nikel (Ni) östeniti dengeleyen bir elementtir. Nikel (Ni) oranı %8'e ulaştığı zaman östenit bölgesi daha fazla artar ve malzeme iç yapısı östenitli olur. Korozyon ve oksidasyona karşı dayanımı daha fazla artar. Yüksek veya düşük ısılarda malzeme mukavemetini ve darbe direncini artırır.

Silisyum (Si) oksitlenmeye karşı direnci artırır, özellikle ısıya dayanıklı olan kalitelerde kullanılır, ferrit dengeleyen bir elementtir.

Alüminyum (Al) da ısıya dayanıklı alaşımlara Oksijeni (O) gidermek için katılır ve Silisyumun (Si) etkisini artırır.

Molibden (Mo) paslanmaz çeliğin asitli ve klorürlü ortamların içerisinde pasifliğini güçlendirir ve korozyon dayanımını artırır.

Wolfram (W) bir ferriti dengeleme özelliğine sahiptir ve karbür oluşturmaya yardımcı olur. Malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirme sağlamak için alaşıma katılırlar.

Titanyum (Ti) ve Niobyum (Nb) çok dengeli karbürler oluşturulmasını sağlarlar, östenitli paslanmaz çelikler içerisinde duyarlılaşmayı engellemek amacıyla eklenirler.

Mangan (Mn) da Nikel (Ni) gibi östeniti dengeleyen bir elementtir. Paslanmaz çelikte mukavemet ve dayanıklılık gibi mekanik özellikleri iyileştirir. Bazı kalitelere ucuz olduğu için maliyeti düşürme adına Nikel (Ni) azaltıldığında onun yerine eklenir.

Nitrojen (N) temelinde östeniti dengeleyen bir elementtir ve etkisi Karbon (C) elementine benzerdir. Maliyeti düşürmek amacıyla bazı östenitli paslanmaz çelikler içerisinde Nikel (Ni) azaltıldığında onun yerine eklenir.

Bakır (Cu) östeniti dengeleme özelliği oldukça zayıftır. Bazı durumlarda östenitli paslanmaz çelikler içerisinde korozyon dayanımını arttırmak amacıyla eklenirler.

Sülfür (S) paslanmaz çeliklerde işlenebilirlik özelliğini arttırmak için katılır. Fakat korozyon dayanımını ve kaynaklanma kabiliyetini olumsuz etkiler.

Paslanmaz çelik içerisinde bulunan alaşım elementlerinin her birinin etkisi bellidir. Çeliğin yapısını belirleyen, alaşım elementlerinin üzerinde oluşturduğu toplu etkiler mevcuttur. Farklı çeşitten paslanmaz çeliklerin diğer çeliklerden farkını anlayabilmek için, alaşım elementlerinin yapı ve niteliklerine olan tesirlerinin bilinmesi gereklidir (Odabaş, 2004).

Düşük sıcaklıklarda olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda da kullanıma uygun paslanmaz çelik türleri mevcuttur. Normal östenitik paslanmaz çelik kaliteleri ısı değerleri 700°C ye kadar çıksa dahi yapılarını korurken, Nikel (Ni) ve Krom (Cr) gibi alaşım elementlerinin çelikteki miktarı artırılarak malzeme kalitelerinde ısıya karşı dayanımı 1150°C'ye kadar çıkartılabilir (ASM, 2001).

3.1 Paslanmaz Çeliklerin İç Yapısı

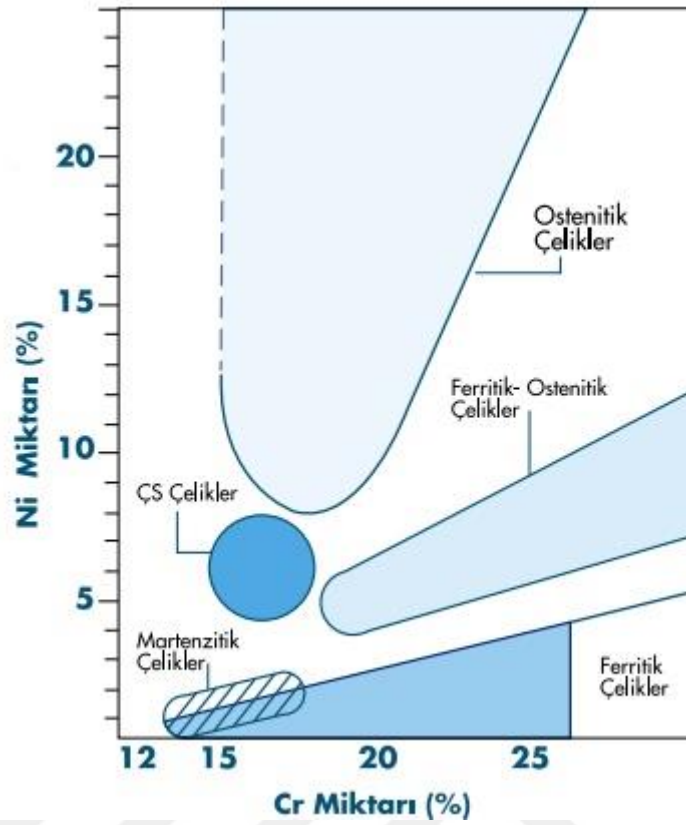
Paslanmaz çeliklerin içinde bulunan kimyasal bileşim miktarları değiştirilerek farklı özellikler gösteren alaşımlar elde edebilmek mümkündür. Çeliklerde krom miktarını artırarak veya ek olarak nikel, molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyona karşı dayanımı iyileştirilebilir. Bunların dışında bakır, azot, alüminyum, niyobyum, titanyum, kükürt, silisyum ve selenyum gibi bazı bileşim için uygun elementler ile olumlu etkiler görülebilir. Buna göre makine tasarımı ve imalatı yapan kişiler değişik kullanım yerlerine en uygun paslanmaz çeliği bulma imkanına sahip olurlar. Paslanmaz çeliklerin içyapısını oluşturan en önemli alaşım elementleri, sırası ile krom, nikel, molibden ve mangandır. Bu elementlerden öncelikle krom ve nikel miktarları çelik içyapısının ferritik veya östenitik olduğunu belirler (Aran,2004).

Paslanmaz çelikler 5 ana gruba ayrılırlar:

- Ferritik
- Östenitik
- Martenzitik
- Ferritik-Östenitik (dubleks)
- Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen alaşımlar

Bu gruplandırma çeliklerin içyapısına göre belirlenmiştir. Bunların içinde en fazla kullanım yerine sahip olanlar östenitik ve ferritik çelikler olup, bunların kullanım alanları tüm paslanmaz çelikler içinde yaklaşık %95'e ulaşır (Aran, 2004).

Nikel, günümüzde imal edilen paslanmaz çeliklerin yaklaşık olarak üçte ikisinin içinde bulunan önemli bir alaşım elementidir. Bu elementin birincil işlevi, malzemenin östenitik olan yapısını oda sıcaklığı ve altındaki derecelerde sağlamlaştırmaktır. Krom ile bu element paslanmaz çeliklerde grupların oluşmasında en önemli alaşım elementleridir. Paslanmaz çeliklerin içinde bulunan alaşım elementlerinden krom ve nikel oranlarına göre Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi gruplara ayrılır.



Şekil 3.2. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları

(ÇS: Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen alaşımlar) (Aran, 2004)

3.2 Paslanmaz Çeliklerin İç Yapılarına Göre Sınıflandırılması: AISI/ ASTM/ UNS

Bu üç sistem ABD merkezli olup bir veya daha fazla standartlar kurumu tarafından desteklenmektedir. AISI ve ASTM paslanmaz çelikler için üç basamaklı gösterimleri geliştirdi. Bu sistem, üç adet seri tanımlamaktadır:

200 serisi – östenitik krom mangan alaşımlı paslanmaz çelikler

300 serisi – östenitik krom nikel paslanmaz çelikler (en çok kullanılan çelik serisi)

400 serisi – ferritik ve martensitik krom paslanmaz çelikler

Sistem yeni çıkan çelikleri göstermede yetersiz kaldığından UNS sistemi kullanılmaya başlandı: Örn: ‘S 30400 çeliği’ (Batıgün, 2017)

Tablo 3.1. Bazı Paslanmaz Çelik Kaliteleri ve Kimyasal Bileşimleri

(<http://www.serkon.com.tr/urunler/masoneilan/10%20Teknik%20Dokumanlar/Paslanmaz%20celiklerin%20ic%20yapilari%20ve%20turleri.pdf>)

ASTM	EN	Kimyasal Bileşim, ağı. % max									
	Malzeme No.	C	Cr	Mn	S	Si	P	Ni	N	Mo	Diğer
Ferritik Paslanmaz Çelikler											
409	1.4512	0.08	10.5-11.75	1.0	0.03	1.00	0.045	-	-	-	(6xC)Ti
430	1.4016	0.12	16.0-18.0	1.0	0.03	1.00	0.04	-	-	-	-
430Ti	(1.450)	0.10	16.0-19.5	1.0	0.03	1.00	0.04	0.75	-	-	(5xC)Ti
439	1.4510	0.07	17.0-19.0	1.0	0.03	1.00	0.4	0.5	-	-	0.2+4(C+N)Ti
Martenzitik Paslanmaz Çelikler											
410	1.4006	0.15	11.5-13.0	1.0	0.03	1.00	0.04	-	-	-	-
420	1.4021	0.15 min	12.0-14.0	1.0	0.03	1.00	0.04	-	-	-	-
440A	-	0.6-0.75	16.0-19.5	1.0	0.03	1.00	0.04	-	-	0.75	-
440C	1.4125	0.95-1.2	16.0-18.0	1.0	0.03	1.00	0.04	-	-	0.75	-
Duplex Paslanmaz Çelikler											
2205*	1.4462	0.03	21.0-23.0	2.0	0.02	1.0	0.03	4.5-6.5	0.08-0.2	2.5-3.5	-
329	1.4460	0.20	23.0-28.0	1.0	0.03	0.75	0.04	2.5-5.0	-	1.0-2.0	-
Ostenitik Paslanmaz Çelikler											
201	1.4372	0.15	16.0-18.0	5.5-7.5	0.03	1.0	0.06	3.5-5.5	0.25	-	-
301	1.4310	0.15	16.0-18.0	2.0	0.03	1.0	0.045	6.0-8.0	-	-	-
304	1.4301	0.08	18.0-20.0	2.0	0.03	1.0	0.045	8.0-10.5	-	-	-
304L	1.4306	0.03	18.0-20.0	2.0	0.03	1.0	0.045	8.0-12.0	-	-	-
304LN	1.4311	0.03	18.0-20.0	2.0	0.03	1.0	0.045	8.0-12.0	0.1-0.16	-	-
309	1.4828	0.20	22.0-24.0	2.0	0.03	1.0	0.045	12.0-15.0	-	-	-
309S	1.4833	0.08	22.0-24.0	2.0	0.03	1.0	0.045	12.0-15.0	-	-	-
310	1.4841	0.25	24.0-26.0	2.0	0.03	1.0	0.045	19.0-22.0	-	-	-
310S	1.4845	0.08	24.0-26.0	2.0	0.03	1.0	0.045	19.0-22.0	-	-	-
316	1.4401	0.08	16.0-18.0	2.0	0.03	1.0	0.045	10.0-14.0	-	2.0-3.0	-
316L	1.4404	0.03	16.0-18.0	2.0	0.03	1.0	0.045	10.0-14.0	-	2.0-3.0	-
316LN	1.4406	0.03	16.0-18.0	2.0	0.03	1.0	0.045	10.0-14.0	0.1-0.16	2.0-3.0	-
316Ti	1.4571	0.08	16.0-18.0	2.0	0.03	1.0	0.045	10.0-14.0	-	2.0-3.0	5x(C+N)Ti
321	1.4541	0.08	17.0-19.0	2.0	0.03	1.0	0.045	9.0-12.0	-	-	(5xC)Ti
347	1.4550	0.08	17.0-19.0	2.0	0.03	1.0	0.045	9.0-13.0	-	-	(10xC)Nb
Çökeltme Sertleşme Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler											
631	1.4568	0.09	16.0-18.0	1.0	0.04	1.0	0.04	6.5-7.5	-	-	0.75-1.5 Al
632	1.4532	0.09	14.0-16.0	1.0	0.03	1.0	0.04	6.5-7.5	-	2.0-3.0	0.75-1.5 Al

Tablo 3.1’ de gösterildiği üzere 200 ve 300 serisi östenitik paslanmaz çelikler içerir ve 304 bunların içinde en fazla kullanılan çeliktir. Bu paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementleri ise krom ve nikeldir. Ferritik paslanmaz çelikleri ise sertleştirilemeyen Fe-Cr alaşımları olarak tanımlanır. 405, 409, 430, 422 ve 446 kalite çelikler bu grupta bulunan en tipik malzemelerdir. Martensitik paslanmaz çelikler ile ferritik paslanmaz çelikler birbirine benzer kimyasal analize sahiptirler fakat daha fazla oranda karbon ve daha az oranda krom bulundurlar. Bu yüzde ısıtma işlemiyle sertleştirilebilmesi mümkündür. Martensitik çeliklerde 403, 410, 416 ve 420 kalite olanlar bu grupta en tipik malzemelerdir. Çift fazlı paslanmaz çelikler neredeyse aynı miktarda östenit ve ferrit bulunduran bir mikroyapı sayesinde oluşturulur. Bu paslanmaz çelikler tam olarak % 24 krom ve % 5 nikel alaşım elementi içerirler. Numaralama sistemi ile gösterilen 200, 300 veya 400 gruplarının hiç birisinde bulunmaz. Çökme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler ise yaşlandırma ısıtma işlemi ve katı çözeltiye girebilmesi ile çeliği sertleştirme olanağı tanıyan alüminyum gibi alaşım elementleri içerirler. Bu paslanmaz çelikler ayrıca; östenitik, yarı östenitik ve martensitik tip çökme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler olacak şekilde alt gruplara ayrılırlar (Odabaş, 2004).

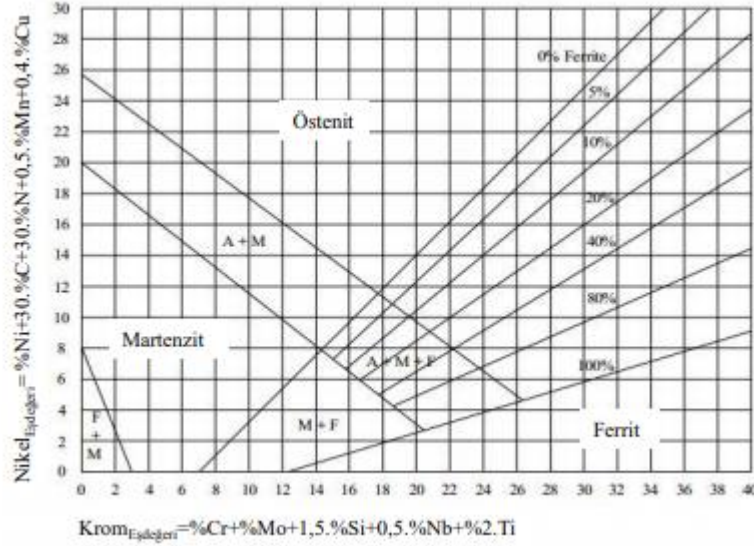
Paslanmaz çelikler içinde karbon oranı %0,02 ile 1 arasında değişebilir, düşük karbon oranları daha tipiktir, martensitik çeliklerde yüksek oranlar söz konusudur. Çünkü bu paslanmaz çelikler içerisinde karbonun varlığına bağlı krom karbür meydana gelir ve genellikle yapının tane sınırlarında krom karbür şeklinde çöker, buna bağlı olarak kafes içinde çözünmüş krom miktarının azalmasının önüne düşebilir ve çelik korozyona dayanıklılık özelliğini yitirir. Dolayısıyla çelik bileşimindeki karbon oranı yükseldikçe;

- Krom oranı artırılmalı veya

- Kromdan fazla karbür yapma eğilimi olan elementler katılarak krom karbürün oluşması ve kafes içinde çözünmüş krom miktarının azalmasının önüne geçilmelidir (stabilize etme) (Aran, 2004).

Östenit yapıcı olarak kullanılan nikel önemli bir alaşım elementi olmanın yanında östenit yapının kararlılık özelliğini artırır. Paslanmaz çeliklerin içerisindeki diğer alaşım elementlerinin östenit stabilitesine katkıları ise nikel

eşdeğer formülünde gösterilmektedir. Krom alaşım elementi ise önemli bir ferrit yapıcı özelliğe sahiptir. Krom eşdeğerinde bulunan diğer alaşım elementleri yapının içindeki ferrit kararlılığını arttırmaktadır.



Şekil 3.3. Schaeffler diyagramı (ASM, 2001)

Şekil 3.3’ te gösterilen Schaeffler diyagramında kararlı faz nikel ve krom eşdeğerine göre gösterilmektedir. İhtiyaç duyulan kalite ve fazın belirlenebilmesi için gereken alaşım elementleri oranı Schaeffler diyagramı ile gösterilmektedir (ASM, 2001).

3.3 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler dünyada en fazla kullanılan ikinci paslanmaz çelik türü olup atomik yapısı HMK (hacim merkezli kübik) tir. Kimyasal bileşimindeki krom miktarı %10-30 arasında değişmektedir. Bu paslanmaz çeliklerde krom alaşım metali başlıca alaşım elementidir. Korozyona karşı dayanımını arttırılması için molibden, kaynak edilebilirliğinin geliştirilmesi içinde titanyum, alüminyum ve niyobyum gibi alaşım elementleri bileşiminde kullanılmaktadır (ASM, 2001).

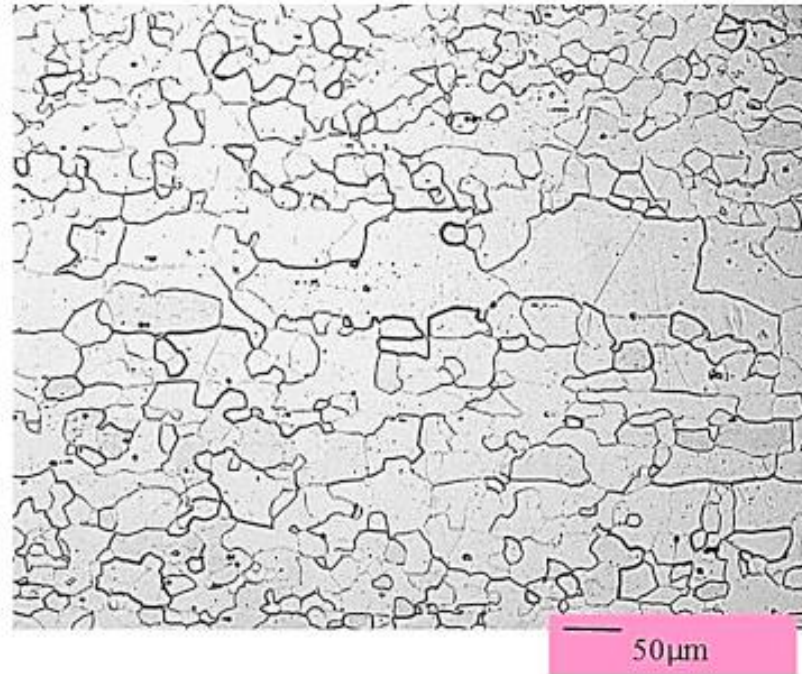
Başlıca özellikler:

- Orta ila iyi derecede olan korozyon dayanımı, krom miktarının artması ile iyileşir.

- Isıl işlemle dayanım artırılmaz ve sadece tavllanmış durumda kullanılır.
- Manyetikler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
- Östenitik çelikler kadar kolay şekillendirilemezler.

Bazı Kullanım Yerleri: Mutfak gereçleri, dekoratif uygulamalar, otomobil şasi parçaları, egzoz elemanları, sıcak su tankları (Aran, 2004).

Bu paslanmaz çeliklerin kaynak edilmesinde seçilen dolgu metalindeki krom miktarının ana metalteki ile eş ya da ona benzer miktarda olmasının faydası vardır. 409 cinsi kaynakta kullanılan malzemeler dolu olarak, 430 cinsi malzemeler ise her forma uygun üretilirler. Östenitik tip olan 309 ve 312 cinsi kaynakta kullanılan malzemeler ise özellikle birbirine benzemeyen metallerin kaynakla yapılan bağlantılarında kullanılabilir. Malzemedeki tane büyümesini minimum seviyede tutmak için kaynak dikişine giren ısı az olmalı ve ön ısıtma aralığı 300-450°C sınırını aşmamalı, hatta sadece gerekli görüldüğü durumlarda uygulanmalıdır (Odabaş, 2004).



Şekil 3.4. Tam ferritik yapı gösteren ferritik taneli AISI409 paslanmaz çelik sacın mikroyapısı. (Voort, 2017)

Tavlama dışında, ferritik paslanmaz çeliğin özelliklerini iyileştirmeye yardımcı olabilecek başka anlamlı bir ısıtım işlem uygulaması yoktur. Tamamen ferritik yapıya sahip bir paslanmaz çeliğin mikro yapısı Şekil 3.4 'te gösterilmektedir (Banerjee, 2017).

Bununla birlikte, bu çelik 400–500 ° C arasındaki bir sıcaklıkta tutulursa, gevrekleşmeye oldukça yatkındır. Bu kırılganlık, darbe özelliklerinde keskin bir bozulmaya yol açar ve bu nedenle tavlama işlemi, östenitin oluşma olasılığı bulunan sıcaklığa kadar 500 ° C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta gerçekleştirilmelidir (Banerjee,2017).

3.4 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Bu paslanmaz çeliğin kimyasal bileşiminde yeterince nicel bulunduğu durumda, oda sıcaklığında bile iç yapısı östenitik olur. Östenitik paslanmaz çeliklerinde %18 krom ve %8 nikel temel bileşimi oluşturur. Bu paslanmaz çelikler, şekillendirme, mekanik özellikler ve korozyona karşı dayanım açısından çok uygun bir kombinasyona sahiptir. Düşük sıcaklıkta dahi süneklikleri toklukları ve şekillendirme kabiliyetleri mükemmeldir (Aran, 2004). Bu çelikler, geniş bir sıcaklık aralığında gösterdikleri yüksek tokluk ve dayanım değerleri ile öne çıkarlar ve 540°C'a kadar olan sıcaklık değerlerinde oksidasyona karşı dayanıma sahip olduğu görülmüştür (Odabaş, 2017).

Östenitik paslanmaz çelikler grubunda en yaygın kullanımı olan alaşım ise AISI 304 kalite türüdür (Aran, 2004). AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik, mekanik özelliğinin, kimyasal bileşiminin, korozyon-oksidasyon direncinin ve kaynak yapılabirliğinin fiyattına oramla çok iyi olması nedeniyle tercih edilir. Bu paslanmaz çelik kalitesi kolay şekil verilebilmesi, piyasada kolay bulunabilmesi ve kaynak yapılabirliğinin zor olmamasından dolayı en çok tercih edilen paslanmaz çelik kalitelerinden birisidir. Fiyat-performans açısından değerlendirildiğinde en iyi paslanmaz çelik kalitelerinden birisi olan AISI 304 neredeyse her alanda kullanıma uygun olmasından dolayı günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bundan dolayı kullanım yerlerine göre bu çeliklerin çoğu zaman kendi aralarında veya farklı çelikler ile birleştirilmelerine ihtiyaç duyulur (Kahraman vd., 2017).

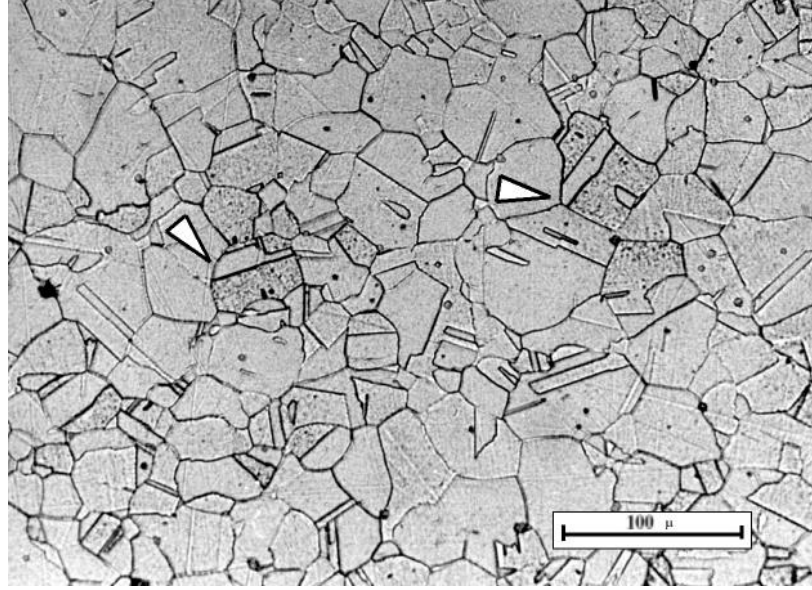
Başlıca Özellikleri:

- Mükemmel korozyon direncine sahip olurlar.
- Kaynak yapılabilme yetenekleri mükemmeldir.
- Sünnek olduklarından kolay şekillendirilme yetenekleri vardır.
- Hijyeniktir, bakımı ve temizliği kolaydır.
- Yüksek sıcaklık değerlerinde iyi mekanik özelliklere sahip olurlar.
- Düşük sıcaklıklar değerlerinde mekanik özellikleri çok iyidir.
- Manyetik değildir. (tavlanmış halde)
- Dayanımları sadece peklesme ile artırılabilirler.

Bazı Kullanım Alanları: Makina ve imalat sanayinde çeşitli uygulamalar, asansörler, bina ve dış cephe kaplamaları, mimari uygulamalar, gıda işleme ekipmanları, mutfak gereçleri, kimya tesisleri ve ekipmanları, bilgisayar klavye yayları, mutfak evyeleri (Aran, 2004).

Alaşım elementi olan Manganez (Mn) oda sıcaklığında paslanmaz çelikte östenitik yapının kararlılığının sürdürülmesini sağlamaktadır. Manganez (Mn) alaşımlı östenitik paslanmaz çelik olarak tanımlanan AISI 200 serisinde %2-5 arası oranda nikel (Ni) ve %6-10 arası oranda manganez (Mn) alaşım elementi içermektedir. Azot (N) ve bakır (Cu) gibi alaşım elementleri içeren AISI 200 serisi paslanmaz çeliklerin korozyon direnci artmakta olup mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Bu seriye ait paslanmaz çeliklerde akma ve çekme mukavemet değerleri AISI 300 serisi paslanmaz çeliklerin değerlerine yakındır. Kaynak kabiliyeti nikel içeren östenit paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. Klorürlü ortamlarda korozyon direncinin düştüğü ve incelemelerde oyuk korozyonu ile aralık korozyonu görülmektedir (Charles vd., 2012).

En bilinen östenitik paslanmaz çeliklerden biri olan 316L kalite çeliğin yüzey merkezli kübik mikroyapısı Şekil 3.5' de gösterilmiş olup sünneklik, şekillendirme özelliği ve korozyon dirençleri yüksektir.



Şekil 3.5. 316L paslanmaz çeliğin mikroyapısı (Disegi vd., 2003)

Yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip olan östenit paslanmaz çelikler, faz diyagramında γ -fazı (gama) olarak adlandırılan demir alaşımlarıdır. Bunlar, yüksek sıcaklıklardan kriyojenik koşullara kadar γ -fazını koruyabilen alaşım elementlerinin bir sonucu olan tek fazlı alaşımlardır (Singh vd., 2017).

Östenitik paslanmaz çelikler, iyi korozyon direncine, mükemmel kaynak kabiliyetine, üstün darbe tokluğuna, ısı kararlılığına ve işlenebilirliğe sahip çekici mühendislik alaşımlarıdır. Bununla birlikte, yumuşak YMK yapı γ -fazının varlığından kaynaklanan düşük akma dayanımına sahiptirler. Östenitik faz manyetik olmadığından, bu nedenle bazen bu çelikler manyetik malzemelerin kabul edilmediği uygulamalarda kullanılır. Yapısal uygulama için, bir malzemenin yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahip olması gerekir. Östenitik paslanmaz çelikler ağırlıklı olarak tek fazlı olduklarından, tane inceltme, katı çözelti alaşımlama, dislokasyon güçlendirme ve işle sertleştirme ile güçlendirilebilirler (Singh vd., 2017).

3.5 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik kafes yapısı olan östenitin hızla soğutulması sonucunda hacim merkezli tetragonal katese sahip olan martensit yapıya dönüşmesi ile meydana gelir (ASM, 2001).

Karbon oranı % 0,1 den fazla olan paslanmaz çelikler yüksek sıcaklık değerlerinde östenitik içyapıya sahiptirler. Çeliğin cinsine göre östenitleme sıcaklığı 950-1050°C arasındadır. Bu yüksek sıcaklık seviyelerinde tutulan çeliğe su verildiği taktirde martenzitik bir içyapıya kavuşur. Bu yöntemle elde edilen mekanik dayanım ve yüksek sertlik, karbon miktarına bağlı olarak artar. Malzeme cinsine göre martensitik celikler tavlannış olarak veya ıslah edilmiş şekilde piyasaya şunulur. Tavlannış şekilde şatın alınan malzemeler bicim veriltikten hemen sonra ıslah işlemine (řu verne + menevişleme) tabı tuttutulur. Tenperleme sıcaklık değerleri degistirilerek farklı özellikleri barındıran malzeme elide edilebilir. Korozyon dayanımını en iyi seviyeye çıkartabilmek için önerilen ısııl işlem sıcaklık değerlerine uyulması fazla ehemmiyetlidir (Aran, 2004).

Su verme ve menevişleme işlemi sonrasında mekanik ozellikler tenelde carbon yüzdesine bağlıdır. Elide edilen mukavemet ve sertlik değerleri, carbon miktarı ile artar. Kimyasal bileşimindeki Cr yüzdesi % 16 ve C yüzdesi % 0,6-% 1,1 olan paslanmaz celikler 1900 MPa akma dayanımı ve 60 HRC sertlik değerleri görülür (Odabaş, 2004).

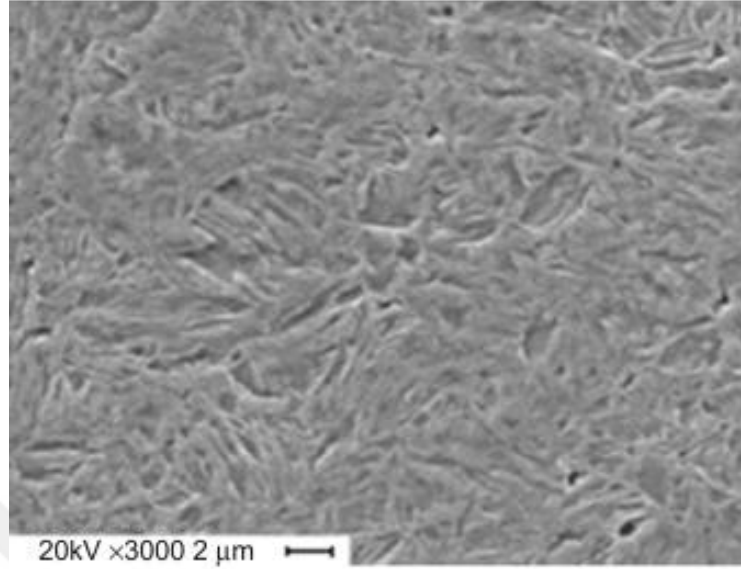
Başlıca zellikleri:

- Orta derecede korozyon dayanımına sahiptirler.
- ısııl işlem uygulanabilir, böylece yüksek dayanım ve sertlikler elde edilebilir.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
- Manyetikler.

Bazı Kullanım Alanları: Bıcaklar, aneliyat aletleri, miler, pımler, valv yuvaları (Aran, 2004).

Martenzitik elikler, şekil 3.6' da gösterildiği gibi ağırlıklı olarak bir çıta martenzit mikroyapısına sahiptir ve östenit bölgesinde sürekli tavlama ve ardından çeliğin hızlı bir şekilde söndürülmesi ile oluşturulur. Daha yüksek sertleşebilirlik, tipik olarak ağırlıkça yüzde 0,25 oranında karbon içeriğinin artırılmasıyla elde edilir. Manganez içeriği de oldukça yüksektir, yaklaşık 1.5 Mn'dir ve sertleşebilirliği daha da artırmak için küçük bor ilaveleri de dahil edilebilir.

Alaşımlama yoluyla artan sertleşebilirlik, tam martenzitik bir yapı elde etmek için gerekli olan su verme süresini azaltır.



Şekil 3.6. Bir martensitik mikroyapının görüntüsü (Hilditch, 2015)

Olağanüstü yüksek akma gerilimi ve düşük süneklik nedeniyle martensitik çeliklerin şekillendirilmesi zordur. Oda sıcaklığında, merdaneli şekillendirme birincil şekillendirme yöntemidir. Rulo şekillendirme, martensitik çeliklerin kullanıldığı parça tasarımının karmaşıklığını sınırlandırarak martensitik çeliklerin potansiyel kullanımlarını sınırlar (Hilditch, 2015).

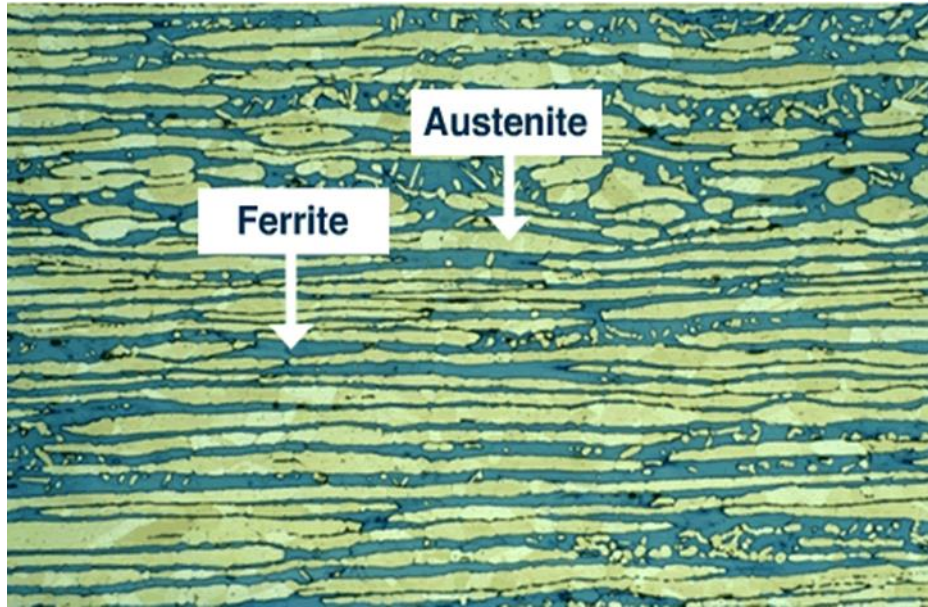
3.6 Östenitik-Ferritik (Dupleks) Paslanmaz Çelikler

Bu paslanmaz çelikler, %18-28 oranında krom ve %4,5-8 oranında nikel içeren çeliklerdir. Nikel oranı en fazla %8 olup, malzeme içyapısının tamamının östenitik olması için yeterli değildir. İçyapısının ferit ve östenit fazlarından oluşması nedeni ile dupleks çelikler olarak tanımlanır. Bu çeliklerin çoğu türünde %2,5-4 oranında molibden bulundurulur. Bu tür çelikler hem iyi süneklik hem de iyi mukavemet özelliklerini bir arada sağlamışlardır. Bunun yanında korosif ortamlarda bile yorulma dayanımları çok yüksektir. Tavsiyelere göre uygulanması halinde kaynak edilebilirliği oldukça kolaydır (Aran, 2004).

Bu çeliklerin içyapısında ferit ile östenit faz birlikte bulunur ve bu sebepten dolayı östenitik ve ferritik çeliklerin ikisinden de öte daha iyi seviyede

özellikler barındırırlar. Boylece östenitik celiklere göre daha yüksek gerilme korosyonu dayanımı gösterirler, feritik celiklerle karşılaştırıldığında ise daha iyi tokluk ve süneklik değerlerine sahiptirler. Üstelik iki fazın birlikte bulunması halinde tavllanmış durumda akma dayanımı değeri 550 ile 690 MPa gösterirler ki, bu değer bile sadece bir fazın bulunduğu çeliklerin yaklaşık iki katıdır (ASM, 2001).

İlk nesil olarak kabul edilen dubleks paslanmaz çelikler, düşük yapısal kararlılıklarının olması sebebiyle kaynaklanabilirlik açısından iyi bir performans göstermiyordu. Kaynak yapıldığında ısıdan etkilenen bölgede yüksek miktarda ferrit oluşması hem bölgenin tokluğuna olumsuz bir etkisi oluyordu, hem de ana malzemeye göre daha kötü bir korozyon dayanımı performansı gösteriyordu (Kısaöz vd., 2012). Fakat 1968 yılı sonrasında paslanmaz çelik teknolojisinde keşfedilen argon oksijen dekarburizasyon (AOD) yöntemi, çelikler için yeni bir sayfa açtı. Bu teknoloji ile azotun bölge içerisine bir alaşım elementi gibi dahil edilmesini ve azot miktarını hassas bir şekilde kontrol edebildiği için, ısıdan etkilenen kaynak bölgesindeki tokluk seviyesindeki düşüşün engel olunmasını ve bu bölgenin baz metale benzer derecede bir korozyon dayanımı sergilemesini sağlayabiliyor (IMAO, 2014). Dupleks paslanmaz çeliklerin mikro yapısı östenit ve ferrit tanelerinin oluşturduğu katmanlardan oluşur (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Östenit ve ferrit tanelerinden oluşan iki fazlı bir mikro yapıya sahip dubleks paslanmaz çelik (IMAO, 2014)

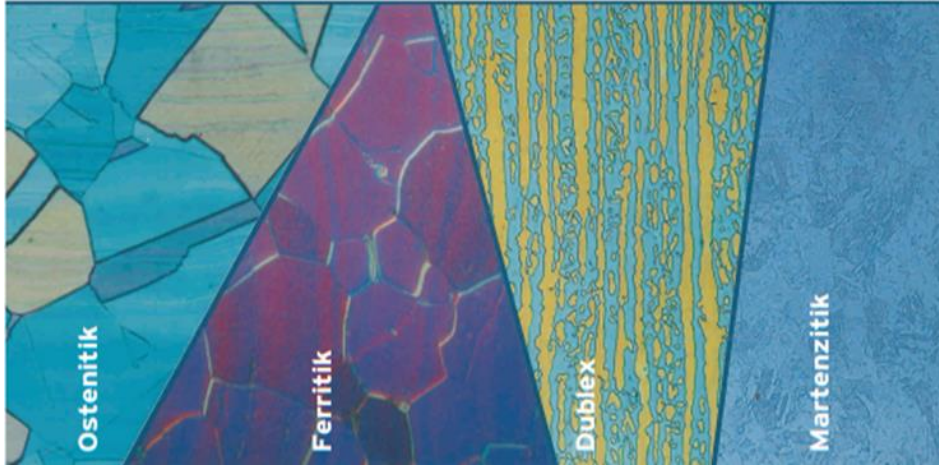
Dubleks paslanmaz çelikler, benzer korozyon direncine sahip östenitik muadillerinden daha düşük nikel ve molibden içeriğine sahiptir. Düşük alaşım içeriğı nedeniyle, dubleks paslanmaz çeliklerin maliyeti, özellikle yüksek alaşım ek ücretleri zamanlarında daha düşük olabilir. Ek olarak, östenitik paslanmaz çeliğe kıyasla artan akma mukavemeti nedeniyle dubleks paslanmaz çeliğin kesit kalınlığını azaltmak çoğu zaman mümkün olabilir. Kombinasyon, stenitik paslanmaz çeliklerdeki bir çözüme kıyasla önemli ölçüde maliyet ve ağırlık tasarrufu sağlayabilir (<https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php>).

Başlıca zellikleri:

- Gerilmeli korozyon karşısında yüksek dayanıklılık gösterir.
- Klor elementinin olmadığı ortamda daha yüksek korosif dirençleri var olduğu bilinmektedir.
- Östenitik ve feritik çeliklerden daha yüksek mekanik dirençleri vardır.
- İyi kaynak yapılabilirlik ve şekillenme zellіğine sahiptirler.

Bazı Kullanım Alanları: Petrokimya tesislerinde, tuzlu su ortamlarında, ısı değiştiricilerinde (Aran, 2004).

Bu elikler son zamanlarda ülkemizde ve dünyada kullanım alanı oldukça yaygınlaşan bir paslanmaz elik kalitesidir. 304 ve 316 kalite östenitik paslanmaz çeliklere yakın özellikler gösteren dubleks paslanmaz çelikler bunun yanında, kopma, akma ve burulma gibi mekanik değerleri oldukça yüksek derecede bulunduğu için hafifliğin ve sağlamlığı ihtiyaç duyulduğu birçok kullanım alanında görülmeye başlandığı bilinmektedir (Odabaş, 2004).



Şekil 3.8. Bazı paslanmaz çelik türlerinin içyapıları (Aran,2004)

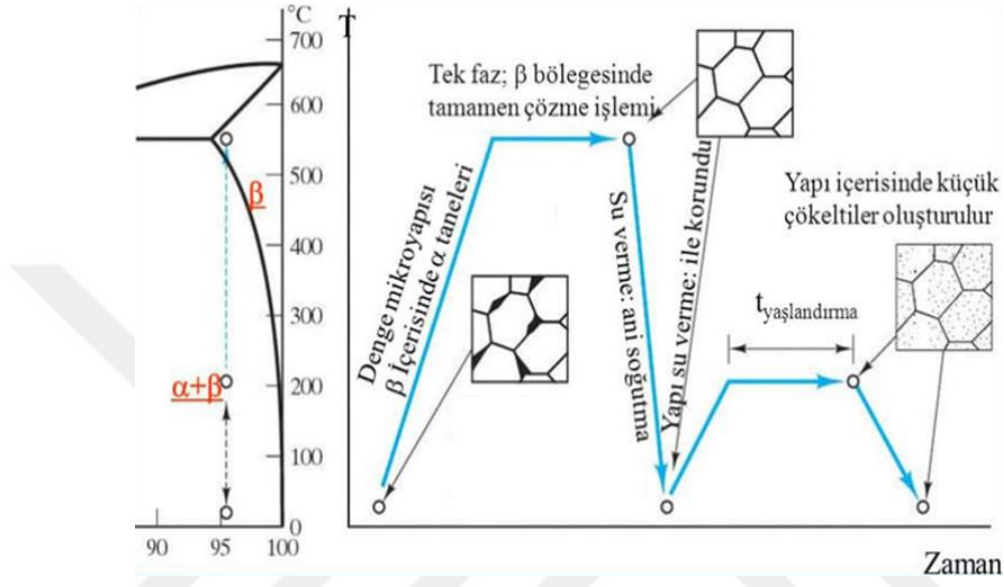
3.7 Çökelme Sertleşmesi (Yaşlandırma) Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler

Bu çeliklerin temel mikro yapıları östenitik, yarı-östenitik veya martensitik yapılardan olabilirler. Çökelti oluşmasını sağlamak için bazı durumlarda ilkinde soğuk şekil vermeye ihtiyaç duyulabilir. Çökelme oluşturması için titanyum, alüminyum, bakır ve niobyum elementleriyle alaşımlama yapması gerekir. Bu sayesinde mukavemet değerleri 1700 MPa kadar olan paslanmaz çelikler elde edilmesi mümkündür. Piyasadan çözme tavı işlem uygulanmış şekilde satılırlar; çelik bu durumunda daha yumusak olup, imalat sürecinde işlemlerin uygulanması daha kolay olur ve sonrasında tek aşamalı düşük bir sıcaklık yaşlandırması ile malzeme sertleştirilmiş olur (Aran, 2004).

Bazı metal ve alaşımların sertlik ve dayanımı, uygun ısı işlemler sonrasında son derece küçük ikinci faz parçacıklarının matris faz içinde uniform şekilde dağıtılması yoluyla artırılabilir. Yapıda dağılmış haldeki küçük yeni faz parçacıkları ‘çökelti’ olarak isimlendirildiği için, bu işleme de “çökelme sertleşmesi” adı verilmiştir. Alaşımın dayanımı zamanla geliştiği ve bu süre zarfında alaşım bir anlamda yaşlanmış olduğu için, bu işlem aynı zamanda “yaşlandırma sertleştirilmesi” olarak da bilinir. Nasıl insanoğlu yaşlandıkça tecrübe kazanıp olgunlaşırsa malzemede güçlenir ve mukavemetini artırır. Çökelme sertleşmesi uygulanarak dayanımı arttırılan alaşımlara örnek olarak alüminyum-

bakır, bakır-berilyum, bakır-kalay ve magnezyum-alüminyum ile bazı demir esaslı alaşımlar gösterilebilir. Çökelme sertleşmesi ısıl işleminin 3 aşaması vardır:

1. Çözeltiye Alma
2. Su Verme
3. Yaşlandırma



Şekil 3.9. Çökelme sertleşmesinin belirli bir zamanda oluşum aşamaları

(<https://malzemebilimi.net/yaslandirma-sertlestirmesi.html>)

Çökelme sertleşmesinin uygulanabilmesi için, alaşım sistemi iki önemli ön şartı sağlamalıdır. Bunlar;

1. Bir elementin diğer element içinde kayda değer miktarda, yani yüzde birkaç oranında çözünebilmesi,
2. Ana element içindeki çözünen elementin çözünme sınırının, sıcaklığın düşmesi ile birlikte hızla azalmasıdır.

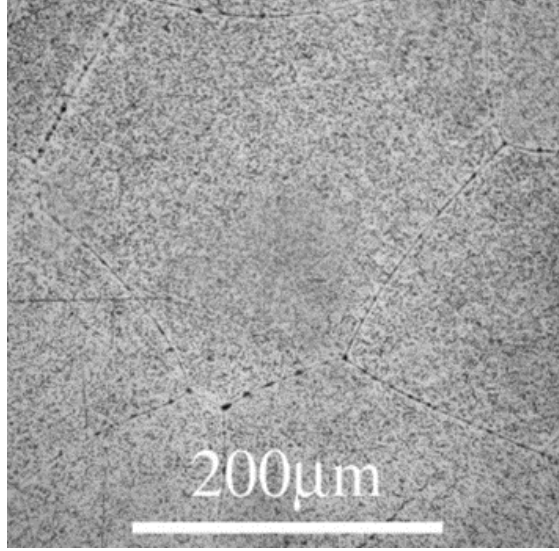
Yaşlandırma ısıl işlemi ile alaşımın sertlik ve mukavemet değerleri artarken; süneklik değerlerinde azalma görülür. Eğer alaşım aşırı yaşlandırılırsa; GP bölgelerinin birleşmesi ve kafes uyumsuzluğunun ortadan kalkması nedeniyle mukavemet ve süneklikte ters etki yaşanır. Aşırı yaşlanma; insanların çok yaşlanıp bunamasına benzetilebilmektedir (<https://malzemebilimi.net/yaslandirma-sertlestirmesi.html>).

Başlıca Özellikleri:

- Orta ila iyi derecede korozyon dayanımı vardır.
- Çok yüksek mekanik dayanım gösterirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir.
- Manyetikdirler.

Bazı Kullanım Alanları: Pompa ve vana şaftları (Aran, 2004).

Uygun bileşimde bir alaşım yaşlandırma sertleşmesi için α tek fazlı bir yapı oluşturmak amacıyla 500 °C'nin üzerindeki istenen sıcaklığa kadar ısıtılır ve alaşım içinde bulunan tüm fazların tek faz içerisinde çözününceye kadar bekletilir. Bu yapılan işleme çözeltiye alma veya çözündürme işlemi adı verilir. Alaşım çözündürme işleminden sonra hızlı bir şekilde su verme ile soğutularak aşırı doymuş bir α katı çözeltisi oluşturulur. Fakat aşırı doymuşluk ile kararsız bir yapı elde edilir, yapıyı kararlı hale geçebilmesi için yaşlandırma işlemine tabi tutulur. Yaşlandırma işleminin gerçekleşmesi ya oda sıcaklığında veya oda sıcaklığı ile kısmi katı çözünürlük gösteren bir sıcaklık aralığında olur. Oda sıcaklığında yapılan işleme doğal yaşlandırma, diğerine ise yapay yaşlandırma olarak adlandırılır. Yaşlandırma işlemi; hazırlık aşaması, yaşlandırma aşaması ve aşırı yaşlandırma aşaması olarak toplam üç aşamadan oluşur. Kuluçka aşaması da denilen hazırlık aşamasında, fazla bulunan atomların toplanıp kümelenmesi ile ilk çekirdeği oluştururlar. Yaşlandırma sırasında ise çekirdeklenme mekanizması daha belirgin ihale gelir, yanı fazlaca bulunan atomlar β fazının çekirdeklerini meydana getirir. Yaşlandırma işlemi esnasında ortaya çıkan geçiş kafesi veya ara kristal yapısı ile matrisin kafes yapısı uyumludur. Bu aşamada çökelen β fazın kafes parametresi, matrise benzemeyen bir kafes parametresine sahip olmasıdır. Bu fazın matris şekline uyumlu oluşu sebebiyle matrisin kafes şeklinde çarpılma olur. Kafes şeklinde oluşan çarpılmanın dislokasyon hareketine engel olması sebebiyle sertlik ve mukavemet değerleri hızlı bir şekilde yükselir. Yaşlandırma işlemi sonrasında aşağıdaki Şekil 3.10' da gösterilen bir içyapı meydana gelir.



Şekil 3.10. Yaşlandırma işlemi sonucu oluşan aşırı doymuş α fazı içerisinde meydana gelen β faz çökeltileri (Yılmaz, 2018)

3.7.1 AISI 321 (1.4541) Paslanmaz Çelik

321 paslanmaz çelik kalitesi başta Rusya ve Alman pazarı için geliştirilmiş olup, ülkemizde de kullanımı yaygınlaşmış bir paslanmaz çelik kalitesidir. Bu paslanmaz çelik kalitesi iyi bir korozyon direncine sahip olması ve yaklaşık 800 derecelik sıcaklıklara dayanabilmesi sayesinde, fiyat performans açısından oldukça iyi bir paslanmaz çelik kalitesidir. İçerik bakımından 304 kalitenin Ti (titanyum) ilave edilmiş ve 304'ün korozyona ve sıcaklığa daha dayanıklı versiyonu olarak ta söyleyebileceğimiz 321 kalite paslanmaz (1.4541) çok aşırı sıcaklıklarda kullanılması kesinlikle tavsiye edilmez. (Örneğin 1100 derece gibi sıcaklıklarda kullanılması tavsiye edilmez) Ayrıca limit olan 800 derece gibi yüksek sıcaklıklarda sadece kısa süreler kullanılması uygundur, bu sıcaklıklarda uzun süre kullanmak malzemenin mekanik değişimine yol açacaktır (<https://bircelik.com/tr/kategori/321-1-4541->).

Tip 321 östenitik paslanmaz çelik, Tip 304 paslanmaz çeliğe benzer halojenürlerde gerilme korozyonu çatlamasına karşı hassastır. Bu, nikel içeriğindeki benzerliklerinden kaynaklanır. Gerilme korozyonu çatlamasına neden olan koşullar şunlardır:

- halojenür iyonunun varlığı (genellikle klorür),

- artık çekme gerilimleri ve
- yaklaşık 120 ° F'yi (49 ° C) aşan ortam sıcaklıkları.

Gerilmeler, şekillendirme işlemleri sırasında soğuk deformasyondan veya kaynak işlemleri sırasında karşılaşılan termal döngülerden kaynaklanabilir. Soğuk deformasyonun ardından tavlama veya gerilim giderici ısıtma işlemleri ile gerilim seviyeleri azaltılabilir. Tip 321, aksi takdirde stabilize olmayan alaşımlar için taneler arası korozyona neden olabilecek ortamlarda gerilimden arındırılmış koşullarda servis için iyi bir seçimdir (<https://www.metalshims.com/t-321-Stainless-Steel-technical-data-sheet.aspx>).

Stabilize edilmiş Tip 321 alaşımının klorür iyonu varlığında çukurlaşma ve çatlak korozyonuna direnci, benzer krom içeriği nedeniyle Tip 304 veya Tip 304L paslanmaz çeliklerinkine benzerdir. Genel olarak, sulu ortamlarda 100 ppm klorür, özellikle çatlaklar mevcutsa, hem stabilize olmayan hem de stabilize edilmiş alaşımlar için sınır olarak kabul edilir. Daha yüksek seviyelerde klorür iyonu çatlak korozyonuna ve oyulmaya neden olabilir. Daha yüksek klorür seviyesi, daha düşük pH ve / veya daha yüksek sıcaklık gibi daha ağır koşullar için, Tip 316 gibi molibdenli(Mo) alaşımlar dikkate alınmalıdır. Stabilize edilmiş Tip 321 alaşımı, numunelerde paslanma veya lekelenme olmaksızın 100 saatlik,% 5 nötr tuz püskürtme testini (ASTM-B-117) geçer. Bununla birlikte, bu alaşımların okyanustan gelen tuz sislerine maruz kalmasının, şiddetli renk değişikliğinin eşlik ettiği çukurlaşma ve çatlak korozyonuna neden olması beklenir. Tip 321 alaşımı, deniz ortamlarına maruz kalma için tavsiye edilmez (<https://www.metalshims.com/t-321-Stainless-Steel-technical-data-sheet.aspx>).

Tablo 3.2. Oda sıcaklığında 321 paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri

(<https://bircelik.com/tr/kategori/321-1-4541->)

Oda Sıcaklığındaki Mekanik Özellikleri	
Kalite	321 (1.4541) X6CrNiTi18-10
Kopma mukavemeti	515 ile 700 MPA arası
Akma mukavemeti, (%0.2)	Min 205 Mpa
Sertlik (HRC) (HB)	Max 22 HRC veya 215 HB

Her alaşım elementinin etkisi, AISI 321 paslanmaz çeliğe zğ fiziksel, kimyasal, mekanik ve teknolojik özelliklerin basılmasıyla çevrilir. Bu durumda, korozyon direnci yapıdan krom ve nikel ile sağlanır. İlave ve diğer elementler, ıslak ortamlarda (molibden ve bakır) korozyon direncini, yüksek sıcaklıklarda (silikon, alüminyum, tungsten ve molibden) oksidasyon direncini, düşük ve yüksek sıcaklıklarda (tungsten, molibden, niyobyum) mekanik özellikleri geliştirmek için yapılmıştır. ve kobalt). Paslanmaz elikler genellikle 800   C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılır (Baitanu vd., 2016).

Tablo 3.3. 321 kalite paslanmaz çeliklerin yüzde kimyasal bileşimi değerleri
(Szubzda vd., 2016)

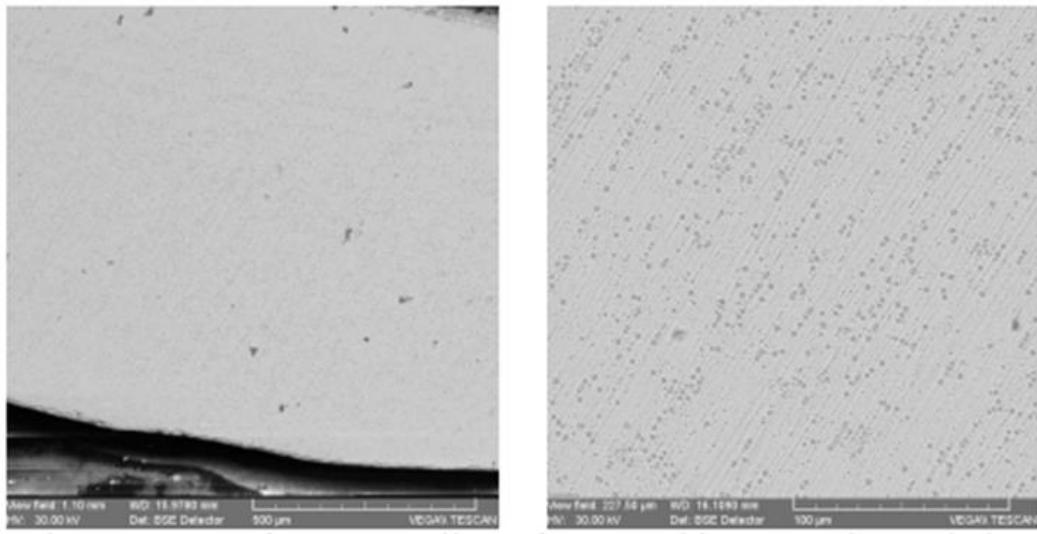
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Ti
AISI 321	max 0,08	max 2,00	max 1,00	max 0,045	max 0,030	17,00 19,00	9,00 12,00	max 0,70

Korozyon direnci, kimyasal ve nükleer santrallerin imalatında kullanılan malzemelerin seçiminde önemli bir kriterdir. Bunun nedeni, korozyona bağlı malzeme bozulmasının maliyetinin ve buna bağlı çevresel etkinin oldukça büyük olmasıdır. Genel olarak, östenitik paslanmaz çeliklerin bileşimi (rneğin, AISI 304 ve diğer benzer sınıflar), çeşitli korozif ortamlarda servis gereksinimlerini karşılayacak şekilde ayarlanır. Mkemmek korozyon direnci, genellikle yüksek sıcaklıkta tane sınırlarında krom bakımından zengin M23C6 tipi karbürün çökelmesiyle engellenir ve böylece taneler arası gerilme korozyonunu teşvik eder. İstenmeyen tane sınırı ayrışmasını (hassaslaşmayı) engellemek için Ti-stabilize edilmiş bir AISI 321 stenitik paslanmaz elik (AISI 304'n bir türevi), TiC çökeltilerinin tercihli oluşumunu desteklemek ve böylece kromu korozyona karşı koruma için çözelti içinde tutmak için geliştirildi (Min vd., 2002).

Yapılan bir çalışmada; gerçekleştirilen ısıl işlemlerin ısıtma ve muhafaza işlemleri, UTTIS modeli sabit ocaklı ısıl işlem için elektrikli fırın üzerinde gerçekleştirilmiştir. AISI 321 eliğine uygulanan ısıl işlem, çözelti haline getirmek

için su verme işlemidir ve elik yapıda bulunan krom ve nikel bazında kompleks karbürlerin özölmesi için ana kapsama sahiptir.

Çalışmanın sonucunda; fırın içinde 1020° C'ye kadar ısıtılıp sonrasında su ile soğutulan AISI 321 eliğın mikro sertlik değerlerinde iyileşmeler olduğu gözlemlenmektedir. Deney sonrası malzemenin mikro yapısının şekil 3.11'de olduğu gibi homojenleştiği görölmüştür. Hatta aynı çalışmada 1060 ° C ve 1100° C'ye kadar ısıtılıp soğutulan AISI 321 eliklerin mikro sertlik değerleri bir öncekinden daha iyi olduğu saptanmıştır (Baitanu, 2016).



şekil 3.11. 1020 ° C'de çözelti içerisine koymak üzere soğutulduktan sonra AISI 321 alaşımının mikroyapısı; a) 200x; b) 1000x. (Baitanu, 2016)

Bu nedenle AISI 321 eliği, kimyasal proses tesisleri, yüksek basınçlı borular, otomobiller ve uçaklar için motor türbinleri ve ayrıca nükleer reaktörler için ısı eşanjörlerinin üretiminde seçim malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Min vd., 2002; Guan vd., 2005).

Mekanik özellikler bakımından ortalama düzeyde bir dayanıma sahip olan bu paslanmaz elik kalitesi, çok yüksek mekanik değerlere sahip değildir. Mekanik özellikleri bakımından dünyada en yaygın kullanılan diğer östenitik paslanmaz elik kalitelerine benzeyen 321 kalite paslanmaz elik, 304 ve 316L kalite ile neredeyse eş değerde mekanik bir dirence sahiptir. 321 paslanmaz malzeme dövülebilme için orta-düşük seviyede uygundur ancak 1.4541 kalite paslanmaz

malzemeyi dövmek şart ise bunun 1075 ile 1125 derece arasında yapılması daha uygun olarak hesaplanmaktadır. Daha soğuk ve sıcak anlarda dövölme işlemi malzemenin bozulmasına neden olabilir (<https://bircelik.com/tr/kategori/321-1-4541->).



4. KRIYOJENİK İŞLEM

4.1 Tanımı ve Tarihçesi

Kriyojenik işlem anlam olarak, malzemeleri eksi derecedeki sıcaklıklara kontrollü bir şekilde belirlenmiş hızlarda soğutmak, belli bir süre bu sıcaklık değerinde bekletmek ve yine belirlenmiş hızlarla oda sıcaklığına kadar ısıtılmasıdır. Kriyojenik işlem yapılmasının amacı malzemenin mikroyapısında değişikliklere neden olarak mekanik özelliklerin istenilen seviyeye getirilmesini sağlamaktır (Thornton vd., 2011).

Son yıllarda kriyojenik işlem metallerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılan geleneksel ısıtma işlemin yanında tanımlayıcı bir işlem şeklinde geliştirilmiştir. Kriyojenik işlem kendi içerisinde malzemeye uygulanacak sıcaklık değerine göre sığ kriyojenik ve derin kriyojenik olacak şekilde 2 ana gruba bölünmektedir. Sığ kriyojenik işlem, malzemeye su verme işlemi yapıldıktan sonra -50°C ila -80°C aralığında malzemeden nitrojen gazıyla dolu ortamda bekletilme işleminden oluşur. Derin kriyojenik işlemse malzemelerin -125°C den daha az sıcaklık değerlerinde soğutma işlemine denir (Çiçek vd., 2012).

Kriyojenik işlemin keşfi bilim adamlarının II. Dünya Savaşı sonrasında donmuş metalleri incelediklerinde yıpranmaya karşı daha dayanıklı olduğunu fark etmeleri ile olmuştur. Bu teoriye uygun ticari olarak kriyojenik işlem endüstrisi Ed Busch tarafından 1966 yılında gerçekleştirildi. Busch ısıtma işlem endüstrisi ile birlikte Detroit'te 1966 yılında CryoTech adıyla bilinen bir şirket kurdu. Kurulan bu şirket 1999 yılında ticari kriyojenik işlem yapan dünyanın en eski ve en büyük şirketi olmuştur. Busch ilk olarak metal malzemelerin ömür sürelerini %200-%400 oranında uzatma amacıyla deneyler yaptı. Bu deneyler gerçekleştirildiği sırada ısıtma işlemi yerine kriyojenik işlemi tercih etmiştir. Daha sonraki süreçte sıvı nitrojen gibi kriyojenler soğutma ve dondurma uygulamalarında sıklıkla kullanılmaya başlandı. Kolesterol düşürücü statin ilaçlarının aktif bileşenlerini üreten bazı kimyasal tepkimeler -100°C gibi düşük sıcaklık seviyelerinde meydana gelmektedir. Özel kriyojenik kimyasal reaktörler, tepkime için gereken ısıyı çıkarmak ve tepkime için düşük sıcaklık ortamı oluşturur. Bazı gıdaların ve aşılarda gibi biyoteknolojik malzemelerin dondurulması için tutulma veya patlamalı dondurucu sistemlere

ihtiyaç duyulur. Bazı yumuşak ya da elastik malzemeler çok düşük sıcaklıklarda katı ve kırılgan şekle dönüşürler. Bu durumda kriyojenik işlemi yüksek sıcaklıklarda döndürülemeyen bazı malzemeler için bir alternatif olarak göstermektedir (Haselden, 1971).

Kriyojenik işlem uygulaması ile 1960lı yılların sonlarına kadar çatlak parçalarının sonuçları üzerine testler yapılmıştır. Kriyojenik işlem yöntemi Ed Busch tarafından 1960ların son zamanlarında geliştirilmiştir ve daha sonraki süreçte Peter Paulin tarafından ısıtma ve soğutma oranlarına göre sıcaklık geri besleme sistemleri ile iyileştirilmiştir. Çok düşük sıcaklık seviyelerinde yapılan çalışmaların sonucunda 1980li yıllarda, takım tezgahlarında ilk defa kriyojenik işlem yapılmasının talep edilinesi üzerine artık bu işlemin geçerliliği onaylanmış oldu (Baldissera vd., 2008). Daha sonraki yıllarda araştırma ve geliştirmeler ile, kriyojenik işlem uygulanan malzemelerde çatlak oluşmasını önleme gibi maksimum faydalar sağlamak için bilgisayar ile ayarlanan sıcaklık kontrol sistemleri geliştirilmiştir (Mazur, 1964).

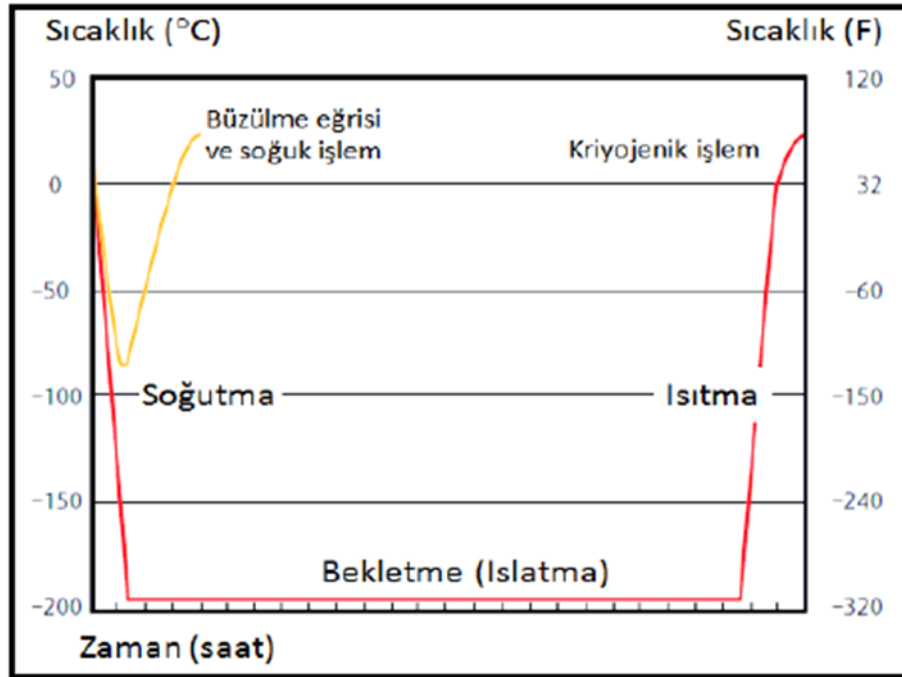
4.2 Kriyojenik İşlemin Uygulanması ve Yöntemleri

Kriyojenik işlem malzemelere sadece bir kez uygulanan devamlı bir işlem türüdür ve genel olarak konvansiyonel ısıtma işlemi sonunda ancak temperlemeden önce uygulanan malzemenin bütün kesitlerini etkileyen bir işlemidir. Bununla beraber ısıtma işlemi yerine geçen bir işlem olmayıp, konvansiyonel olan ısıtma işlemleri tanımlayıcı olarak yapılan bir işlemidir. Üretim sektöründe kriyojenik işlem, henüz üretilecek malzemeler için düzenli ısıtma işlem süreçlerinde yerini almamıştır. Bu da işlem hakkındaki yeterince bilgi olmaması, tam açıklanmamış mekanizmalarının olması ve malzemeler üzerinde oluşan olumlu etkilerinin bilinmemesinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanında Amerika, Çin gibi sanayisi gelişmiş ülkeler başta olmak üzere; diğer gelişmiş Avrupa ülkelerindeki çeşitli uzay, otomotiv ve elektronik sanayi sektörleri, rakiplerinden üstün konuma geçmek ve malzemelerin aşınma direnci ile boyutsal kararlılığını geliştirebilmek için üretim süreçlerine bu işlemi dahil etmişlerdir (Çiçek vd.,2012).

Kriyojenik işlemin işlevini tam olarak anlamak ve yorumlamak için öncesinde konvansiyonel ısıtma işlemiyle olan bağlantısını bilmemiz gerekmektedir.

Kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi, zamana bağlı olmadan sadece sıcaklık ile alakalı bir durumdur. İşte bu duruma göre kriyojenik işlem uygulanan malzemeler, su verme işleminin sonrasında martenzit bitiş sıcaklık değerinin daha altında soğutulması mümkündür. Böylece kalıntı östenit yapının büyük bir kısmı martenzit yapıya dönüştürülmektedir. Örneğin; % 0,83 C bulunduran bir alaşımlı çelikte kriyojenik işlem uygulanması sonrasında kalıntı östenitin miktarı başta % 42 iken % 0,90'lara kadar düştüğü görülmüştür. Yapı içerisinde bulunan kalıntı östenitin yaklaşık bir saatlik zamanda kararlı hal durumuna geçmeye başlaması ve bu durumda martenzite dönüşmesini zorlaştırmasından dolayı su verme işleminin hemen sonrasında kriyojenik işlem uygulanmalıdır (Arslan, 2010).

Soğutma evresinde parçalar oda sıcaklığından kriyojenik sıcaklıklara belli bir hızda önceden belirlenmiş bir zaman aralığında $^{\circ}\text{C}$ /dakika veya saat olacak şekilde soğutulmaktadır. Soğutma evresinin, işlem uygulanan malzemenin son özelliklerine çok fazla bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bundan dolayı, malzemelerin istenen kriyojenik sıcaklığına, işlem zamanını düşürerek ve böylece daha az maliyet için malzemede termal şoklara olmasını engelleyerek mümkün olduğu kadar hızlıca soğutulması istenmektedir (Yıldız, 2010).



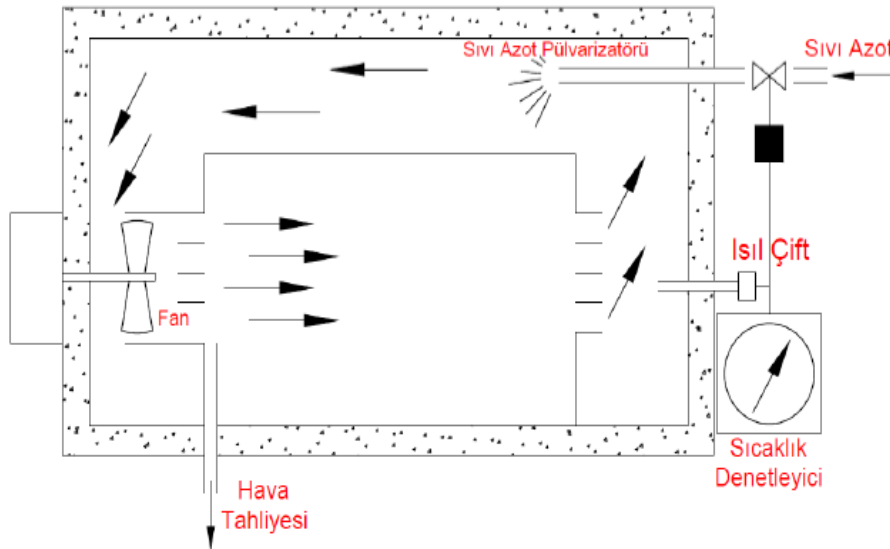
Şekil 4.1. Kriyojenik işlem çevrimi (Reitz vd.,2001)

Bekletme evresinde, Şekil 4.1’ de grafiğe göre saat cinsinden belirli sürede parçaların kriyojenik sıcaklık değerinde bekletilmesi sağlanmaktadır. Bekletme evresinin, işleme maruz kalan malzemenin son özellikleri bakımından önemli olduğu gösterilmiştir ve bu evreye malzene içerisinde bulunan atomların yeni alanları yayılması için ihtiyaç duyulmaktadır (Reitz vd.,2001).

Kriyojenik işlem sırasında gereken sıcaklıklara düşebilmek ve hızlı soğuma sağlamak için sıvı halde bulunan azotu son derece verimli şekilde kullanan dondurucu cihazlar geliştirilmiştir. Kriyojenik işlemlerinde kullanılan sistemler, doğrudan ve dolaylı soğutma olmak üzere iki ana grupta değerlendirilebilirler (Arslan, 2010).

4.2.1 Doğrudan Soğutma Yöntemi

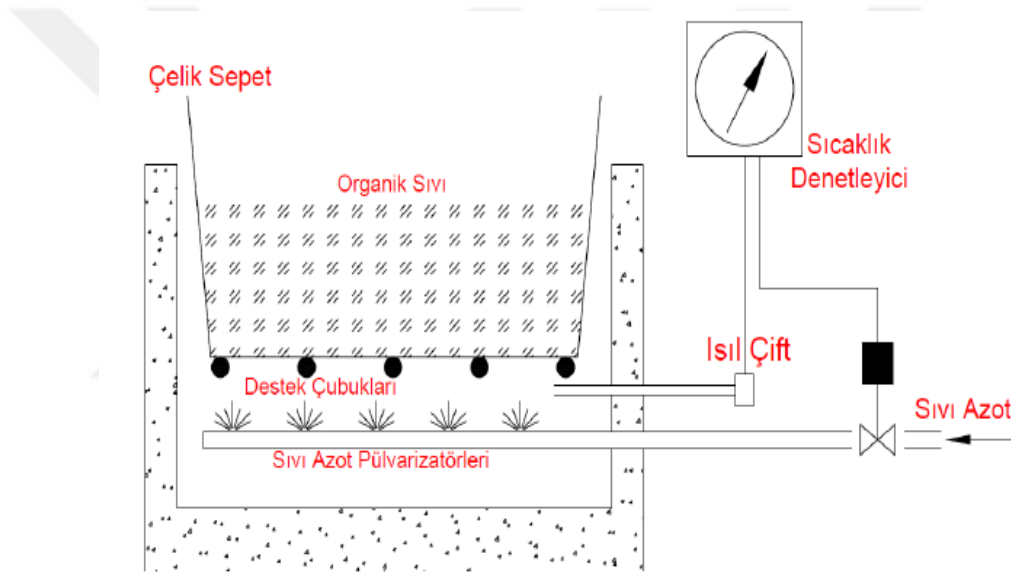
Bu grup içinde bulunan sistemler malzemenin hızlı soğutulmasını sağlamak için sıvı azotu etkili bir biçimde kullanır. En fazla uygulanan yöntem olup azotun atomize edilmesi için siprey püskürtme sistemi kullanarak ve çok düşük sıcaklıkta gaza dönüşerek buharlaşması sırasında malzemenin soğutulması şeklinde bir işleyişi vardır (Şekil 4.2). Ayrıca, azot debisi kontrol edilerek sıcaklığı ayarlanması mümkün kılınmış ve akış kontrolü sayesinde de soğutma hızının kontrolü sağlanmıştır (Arslan, 2010).



Şekil 4.2. Doğrudan soğutma yöntemi ile çalışan kriyojenik işlem sistemi (Tekin, 1982)

4.2.2 Dolaylı Soğutma Yöntemi

Sıvı azot kullanılarak bir alkol tankının dış kısmından soğutulması ve malzemelerin sıfır altı işlem için bu alkol tankına daldırılması şeklinde uygulanılmaktadır (Şekil 4.3). Bu yöntem ile en düşük sıcaklık -120°C değerine ulaşılabilir. Kriyojenik işlem sistemlerinde konulan sıvı asot, uygun depolana tankları içerisinde muhafaza edilmelidir. Sıvı asot tanklarına ait iki adet cidar bulundurulmaktadır ve bunlardan içteki cidar kriyojenik sıcaklığa dayanabilecek paslanmaz çelikten üretilmeli, dıştaki cidar ise carbon çeliğinden üretilmelidir. Bu iki cidar arasındaki ısı geçişini önlemek amacıyla özel yalıtım malzemesi yerleştirilir ve vakum ortamı sağlanmış olur (Arslan, 2010).



Şekil 4.3. Dolaylı soğutma yöntemi ile çalışan kriyojenik işlem sistemi
(Tekin, 1982)

Kriyojenik işlemden sonra uygulanan temperleme işlemi, genel olarak işlemden geçen malzemelerin darbe mukavemetini iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Temperleme işlemi, malzeme karakteristikleri ve ihtiyaç duyulan özelliklere bağlı bulunarak tek, çift veya üçlü döngü olacak şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Fakat, son etki için kriyojenik işlem sürecinden önce herhangi bir temperleme işleminin uygulanması tavsiye edilmemektedir. Üstelik, en önemli faydanın, sertleştirme ve temperleme işlemlerinin arasında olan kriyojenik işlem ile üretildiği belirtilmiştir (Yıldız, 2010).

4.3 Çeliklerin Mekanik Performansına ve Mikro Yapısına Etkisi

Kriyojenik işlem uygulanan malzeme özellikleri üzerindeki tesirini belirleyen en önemli unsurlardan birisi bekletme süresidir. Malzemenin türüne göre değişen bekletme süreleri olmasına rağmen, çoğu zaman kriyojenik işlem uygulanacak malzeme için 24-36 saat gibi uzun bekletme süreleri tavsiye edilmektedir. Bu işlem sürecinde malzemelerin belirli düşük sıcaklıklarda bekletme sürelerinin artması ile mekanik özelliklerinde iyileştirme olduğu bilinmektedir.

Kriyojenik işlemlerin piyasada bulunan birçok malzemeye olumlu etkileri olduğu bilinmektedir. Uygulandığı malzemeye göre etkisi değişmesinin yanında çoğunlukla kriyojenik işlemler ile aşağıdaki gelişmeleri elde etmek mümkün olmaktadır. Bunlar;

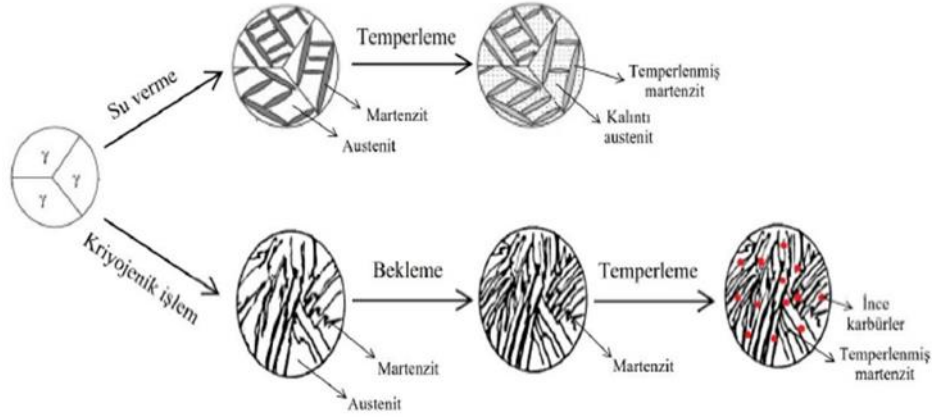
- Daha fazla aşınma dayanımı,
- Yorulma mrnde uzama,
- Boyutsal kararlı olma ve gerilimi nleme,
- İletkenlik değerinde iyileşme,
- İşlenebilirlik gelişmesi,
- Sertlik değeri artışı,
- Daha fazla korozyon dayanımı şeklinde sıralanır (iek, 2011).

Kriyojenik işlemlerin uygulandıkları malzeme türlerine göre değişiklik göstermesinin yanında düzenli bir mikroyapı elde etmek ve mekanik özelliklerini geliştirmek mümkündür. Bu işlem ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda, birbirinden farklı malzemelerin mikro yapılarında oluşan üç değişik etki ile görülmüştür;

- Kalıntı stenit fazların martenzit fazına geçmesi,
- Yeni karbürlerin oluşması ve dağılımının homojenleşmesi,
- Tane yapısının incelmesidir.

Östenit yapı, yüksek sıcaklık değerlerinde oluşan, yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapıdan meydana gelen bir demir fasıdır. Çeliğin yapısında bulunan yüksek sıcaklıklardan ani bir şekilde soğutulduğunda başka bir faza geçmeden kalan östenit fazına “kalıntı östenit” adı verilir. Östenit yapı, martenzit yapıya

kıyasla daha sünek bir yapı gösterir ve çekme mukavemeti değerleri daha düşüktür. Kriyojenik işlem den sonra malzemenin mikro yapılarında bulunan kalıntı östenitler daha sert ve mukavemeti yüksek bir yapı olan martenzit fazına dönüşmektedir.



Şekil 4.4. Kriyojenik işlem döngüsünde oluşan malzeme mikroyapıları (Das, 2011)

Ayrıca bu işlem sonrasında kalıntı östenit fazının martenzit fazına dönüşmesiyle matrisin içerisinde homojen karbür dağılımı görülür ve ince karbür oluşumları gözlemlenir. Düşük sıcaklık değerlerinde yeni karbürlerin oluşumu, kafes içinde bulunan karbür yapıcı alaşım elementlerindeki çekme gerilmeleri sonucunda kafesten dışarı çıkması ile meydana gelir. Yeni oluşan karbür tanelerine ikincil karbür adı verilir ve yapı içindeki birincil karbürlere göre çok daha küçüktürler (Nalbant, 2018).

Kriyojenik işlemin malzeme üzerindeki başka bir faydalı etkisi de çekme mukavemetinde görülür. Yapılan çalışmalarda sertlik ve aşınma dayanımı ile birlikte çekme mukavemetinin de değiştiği görülmüştür. AISI 4140 çelikte yüzde 16 oranında bir iyileşme görülürken, M2 çeliğinde %30'lara kadar iyileşmelerin olduğu saptanmıştır (Das, 2011).

Patil ve R.G Taed, kriyojenik işlem uygulayarak yaptıkları çalışmalarda, farklı cins çelikler için uygulanan sıg ve derin kriyojenik işlemler sonucu malzemelerde meydana gelen aşınma oranı değişikliklerini aşağıdaki bulunan Tablo 4.1'de özetlemiştir (Patil vd., 2012).

Tablo 4.1. Derin ve Sığ kriyojenik işlemin farklı celikler için aşınma etkisi

(Patil vd., 2012)

ABD çelik tanımı ve ilgili Alman standartları		Tanımı	-79 °C (-110 °F)	-190 °C (-310 °F)
AISI (USA)	DIN (BRD)	Gelişme gösteren malzemeler	%	%
D2	1.2379	Yüksek karbonlu/kromlu çelik	316	817
S7		Silikonlu takım çeliği	241	503
52100	1.3505	Rulman çeliği	195	420
O1	1.2510	Yağ sertleştirmeli soğuk iş kalıp çeliği	221	418
A10		Grafitli takım çeliği	230	264
M1	1.3346	Molibdenli yüksek hız çeliği	145	225
H13	1.2344	Sıcak iş takım çeliği	164	209
M2	1.3341	Tungstenli/molibdenli yüksek hız çeliği	117	203
T1	1.3355	Tungstenli yüksek hız çeliği	141	176
CPM 10V		Alaşımlı çelik	94	131
P20	1.2330	Kalıp çeliği	123	130
440		Martenzitik paslanmaz çelik	128	121
		Önemli gelişme olmayan malzemeler		
430		Feritik paslanmaz çelik	116	119
303	1.4305	Östenitik paslanmaz çelik	105	110
8620	1.6523	Sertleştirme çeliği	112	104
C1020	1.0402	%0.20 karbonlu çelik	97	98
AQS		Gri dökme demir	96	97
T2		Tungstenli yüksek hız çeliği	72	92

4.4 Uygulamalı Alanları

Kriyojenik işlem yaklaşık 80 yıldır bilinmesi ve incelenmesine rağmen, bu işleme olan ilginin ve farkındalığın artması ile 60 lı yıllardan sonra kriyojenik işlem endüstrisinin oluştuğu görülür. Bu endüstriye ait şirketlerin çoğunluğu İngiltere, ABD ve Avrupa Birliği ülkelerinde bulunurken, Çin ve Hindistan gibi hızla büyüyen, ağır sanayi ekonomisi gelişmiş ülkelerinde ilgisi artmaktadır.

Dünya genelinde yaygınlaşan kriyojenik işlem şirketleri bulunmaktadır. Bunların büyük bir kısmı Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunmasına rağmen, Avrupa ve Avustralya kıtasında da önemli şirketler bulunmaktadır. Bu şirketlerin çoğunun son otuz yıl içinde kurulduğu görülür ve en büyüğü olan, 1966 yılında Ed Busch tarafından Detroit'te (CryoTech) kurulmuştur. Bu sebeple endüstride hem küçük hem de orta ölçekli birçok şirket bulunmaktadır.

Bu endüstride yer alan şirketler, ticari işlem ve üretim sonrasında yapılan işlemlerin bir birleşiminde giderek daha fazla pay almaktadır. İlk başlarda kriyojenik işlemler neredeyse üretimi tamamlanmış formlardaki malzemelere uygulanmış olmasına rağmen, günümüzde üretim aşamalarının bir parçası haline geldiği görülmektedir. Bunun bir örneği olarak, kriyojenik islemin Titanyum Nitrür (TiN) gibi kaplamalar üzerinde olumsuz etkileri görülmesinden dolayı; kaplama yapılmadan öncesinde kesiçi takım malzemelerine uygulanmasıdır. Bunun yanında, spor ekipmanları, fren diskleri ve ses kaplıları gibi malzemelere genelde nihai olarak veya kısmi parçalara ayrılmış şekilde kriyojenik işlem uygulandıkları görülmektedir (Nalbant, 2018).

Kriyojenik işlem uygulamaları çoğunlukla takım çelikleri üzerinde yapılmasına rağmen krom oranı yüksek olan beyaz dokme demirlerde, motor blokları, fren dişli gibi sürekli aşınmaya maruz kalan malzemelerde, kaynak elektrotlarında, özellikle Tungsten Karbür Kobalt (WC-Co) gibi karburlu kompozit malzemeler üzerinde de uygulamaları mevcuttur (Patil vd., 2012).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Materyal

Bu bölümde, deneyler için seçilen malzeme ile ilgili bilgiler verilmiş ve malzemelerin deneylere nasıl hazırlandığından bahsedilmiştir. Deneylerde kullanılan AISI 321 kalite paslanmaz çeliğin özellikleri Bölüm 3.7.1’de detaylı olarak anlatılmıştır.

5.1.1 Malzeme

Deneylerde, kullanımı yaygın olan AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimine benzer ve ek olarak Ti ilave edilmiş olan 321 kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. Paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 3.3’te gösterildiği gibi olup Titanyum içerdiği için korozyon ve sıcaklığa AISI 304’den daha dayanıklıdır.

Paslanmaz çelik levhalar, Er Paslanmaz Metal Sanayi Tic. Ltd. Şti. firmasından tedarik edildi. Malzemeye ait olan kontrol raporuna EK 1’den ulaşabilirsiniz. Malzemenin kalınlığı yaklaşık 1,2 mm dir.

Mekanik özellikler bakımından ortalama düzeyde bir dayanıma sahip olan bu paslanmaz çelik kalitesi, çok yüksek mekanik değerlere sahip değildir. Mekanik özellikleri bakımından dünyada en yaygın kullanılan diğer östenitik paslanmaz çelik kalitelerine benzeyen AISI 321 kalite paslanmaz çelik, 304 ve 316L kalite ile neredeyse eş değerde mekanik bir dirence sahip olduğu görülmüştür (<https://bircelik.com/tr/kategori/321-1-4541->).

5.1.2 Malzemelerin Hazırlanması

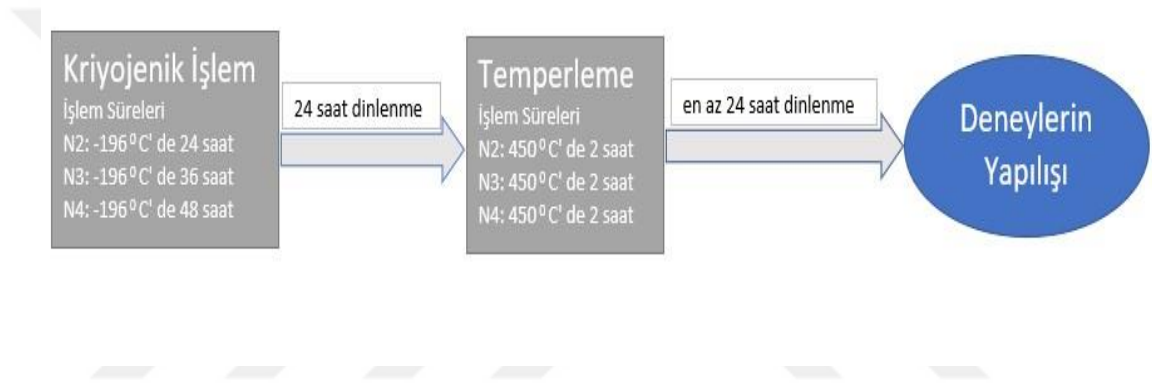
Malzemeler için öncelikle kriyojenik işlem süreleri belirlendi. Bunu belirlerken Bölüm 2’deki Literatür Araştırması başlığı altındaki çalışmalar incelendi. Yapılan incelemeler sonucunda ‘36 saat’ ideal zaman olarak belirlendi.

Örneğin; Akhbarizadeh ve ekibi yaptıkları bir çalışmada, derin kriyojenik işlem uygulanan AISI D3 takım çeliğinin 36 saat bekleme süresinde mikroyapı

homojenliği, karbür yüzdesi, makro ve mikro sertliğin optimum değerlere ulaştığını belirlemiştir (Akhbarizadeh vd., 2012).

Malzemeler bir tanesi örnek olmak üzere 4 gruba ayrıldı;

- 1. Numune (N1):** örnek numune (işlemsiz numune)
- 2. Numune (N2):** 24 saat kriyojenik işlem + 2 saat 450°C temperleme
- 3. Numune (N3):** 36 saat kriyojenik işlem + 2 saat 450°C temperleme
- 4. Numune (N4):** 48 saat kriyojenik işlem + 2 saat 450°C temperleme



şekil 5.1. Numunelere yapılan ısııl işlemlerin süreci

Numuneler, Cryomech markalı cihaz ile doğrudan soğutma yöntemi ile kriyojenik işleme maruz kalmıştır. Numunelere bu yöntem ile derin kriyojenik işlem Abant İzzet Baysal Üniversitesi'nin Fen-Edebiyat Fakóltesi'ne ait laboratuvarında gerçekteşirilmıştir.

Kriyojenik işlem uygulandıktan sonra numunelerde basma kalıntı gerilmesini azaltmak için numuneler 450°C sıcaklık değerinde 2 saat boyunca temperleme işlemine maruz bırakılmışlardır. Bu işlemden sonra soğuktan dolayı büzülen levha yüzeylerinin tekrar düzelđiđi görölmüştür.



Fotoğraf 5.1. Kriyojenik işlemin yapıldığı cihaz

Numuneler 4 grupta yukarıda belirtildiği gibi ayrıldıktan sonra korozyon, aşınım testleri ve mikro yapıyı görüntüleme için 60 x 80 mm ebatlarında kesildi. Çekme- kopma deneyi için 200 x 220 mm ebatlarında malzeme kaldı.



Fotoğraf 5.2. Çekme-kopma deneyi için kalan 321 paslanmaz çelik numune

Çekme-kopma deneyi için çelik levha kısıtlı olduğu için sadece birer adet numune kesilebilmiştir. Kesme işlemi için numuneler Arçelik PCİ fabrikasına verildi. Numuneler, çekme-kopma deneyi için bilgisayar kontrollü lazer kesici makine ile Fotoğraf 5.3'teki gibi özel boyutlarda kesildi.



Fotoğraf 5.3. Numunelerin hazırlandığı bilgisayar kontrollü makine

5.2 Yöntem

Malzemeler hazırlandıktan sonra bazı testler standart gereksinimlerine göre yapıldı. Numune ve imkanlar kısıtlı olduğu için deney sonuçlarında sapmalar olabilir.

5.2.1 Deneylerin Yapılışı

Deneylerin yapılmasında belirli metotlar ve standartlar göz önünde bulunduruldu. Deneyler, neredeyse hepsi farklı yerlerde yapılmış olup 4 farklı gruba ayrılan numunelere yapılan testler ayrı ayrı başlıklar altında anlatıldı.

5.2.1.1 Korozyon Deneyi

Numunelerin korozyona karşı dayanımını inceleyebilmek için ASTM G48 standardına uygun olarak deney yapılmıştır. Öncelikle standartta belirtildiği şekilde %10'luk Demir Klorür çözeltisi hazırlandı. Numuneler çözeltiye batırılmadan önce SNOWREX EQ-1200 marka hassas terazi ile ağırlıkları ölçüldü ve resimleri çekildi.



Fotoğraf 5.4. Kalibrasyonu yapılmış hassas terazi

Deney için Başoğlu Kablo fabrikasının Laboratuvar bölümünde 600 ml'lik beherde çözelti hazırlandıktan sonra 4 adet numune çözeltinin içerisine daldırılmıştır. İlgili standartta belirtildiği şekilde; numuneler 22° C sıcaklıkta 72 saat boyunca bekletildi (ASTM G48-11,2020).

Numunelerin hepsi birlikte çözelti içerisine daldırılmış olup ayırt edilmesi için etiketlendi. Bu yüzden etiketli kısımlar daha az korozyona uğramıştır. Fakat hepsinde aynı boyutlarda etiket kullanıldığı için hepsinde sapma payı aynıdır.



Fotoğraf 5.5. Çözelti içerisine daldırılan numuneler

Numuneler çözelti içerisine ilk batırıldıklarında çözeltinin renginin açık sarı olmasına rağmen zamanla çözeltinin rengi koyulaşmıştır. Numuneler çözeltiden çıkartıldıktan sonra temizlenip ağırlıkları hassas terazi ile tekrar ölçüldü.

5.2.1.2 Aşındırma Deneyi

Bu deney için Başoğlu Kablo fabrikasındaki Bakım bölümünde matkap tezgahından faydalanıldı. Tiryaki marka matkap tezgahının ucuna her aşındırma deneyi için Fotoğraf 5.8 ‘deki gösterilen zımparalar yerleştirildi. Tezgâhın yaklaşık 20 dakika boyunca çalıştırılması ile numunenin üzerinde yapacağı aşındırma etkisi incelendi. Zımparalar aşındığı için her bir numuneye yeni zımpara kullanıldı.



Fotoğraf 5.6. Aşındırma deneyi için kullanılan matkap tezgahı

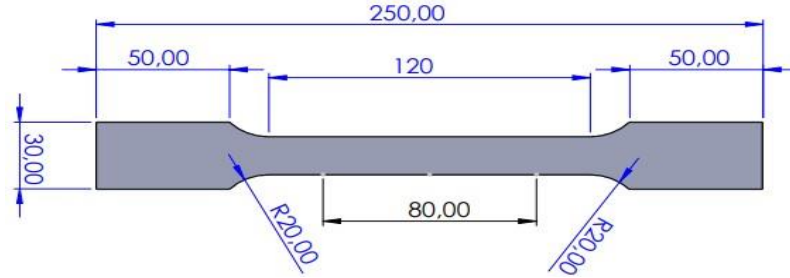
Deney sonrasında numunelerin yüzeyindeki aşındırma etkisini görebilmek için numuneler Abant İzzet Baysal Üniversitesinde Mühendislik Fakültesindeki laboratuvarında incelendi.



Fotoğraf 5.7. Deneyde kullanılan zımparalar

5.2.1.3 Çekme-Kopma Deneyi

Bu deneyi gerçekleştirebilmek için 200x220 mm ebatlarındaki paslanmaz çelik levhalar Şekil 5.2' te gösterildiği gibi özel boyutlarda lazer ile kesildi. Deney ISO 6892-1 standardına uygun olarak yapıldı.



Şekil 5.2. Çekme-Kopma deneyi için numune boyutları

Kesme işleminde olduğu gibi deneyin gerçekleştirilebilmesi için numuneler Arçelik PCİ fabrikasındaki laboratuvara verildi. Numuneler, standarda uygun olarak Zwick marka bilgisayar kontrollü test cihazında test edildi.



Fotoğraf 5.8. Çekme-Kopma deneyi için bilgisayar kontrollü cihaz

5.2.1.4 Mikro Yapının Görüntülenmesi

Malzemelerin kriyojenik işlem sonrasında nasıl etkilendiğini daha detaylı görebilmek için elektron mikroskobu altında 100 x, 500 x ve 1000 x büyütülmüş görüntüleri incelendi. Görüntüleri alabilmek için DÜBİT (Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi) den randevu alınmıştır.



Fotoğraf 5.9. Mikro yapının incelenmesi için SEM görüntüleme cihazı

Aynı şekilde korozyon deneyine tabii tutulan 4 adet numunenin çözelti içerisinde oluşan korozyon çukurcuklarını inceleyebilmek için ilk numunelerdeki gibi 100 x, 500 x ve 1000 x büyütülmüş görüntüleri incelendi.

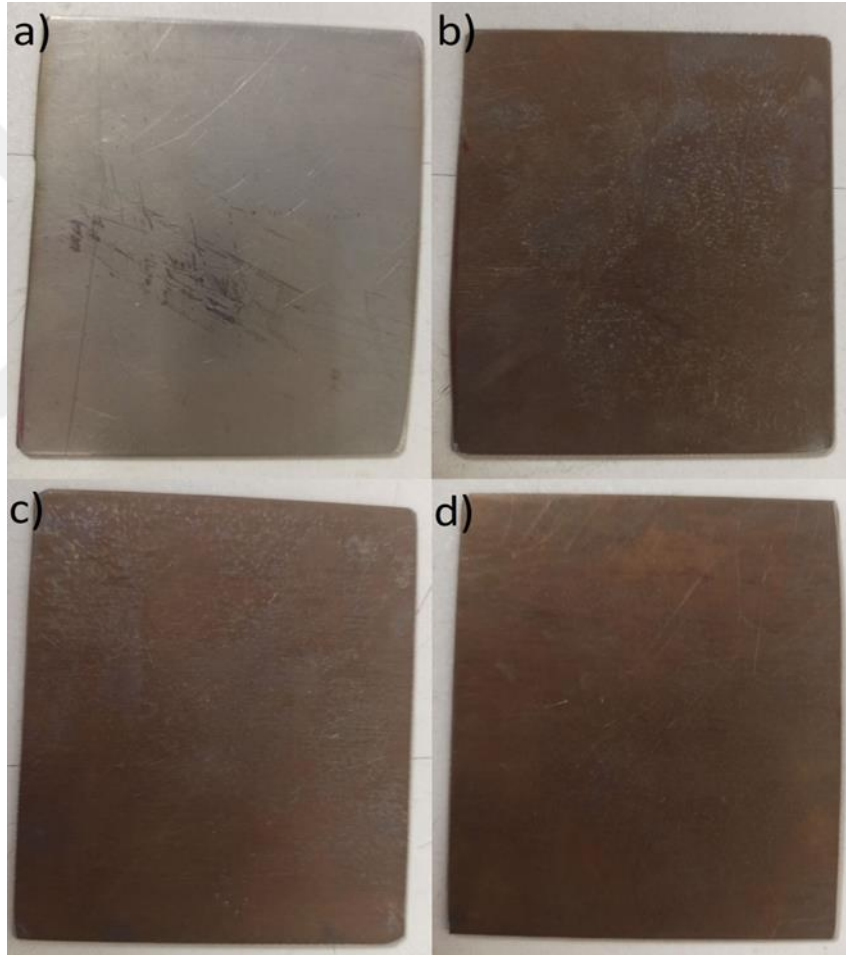
Numunelerin kriyojenik işleme maruz kaldıktan sonra, yüzeylerinde daha homojen yapı görülmesi ve Şekil 4.4' te gösterildiği gibi yapıya kavuşması amaçlanmaktadır. Böylece literatür çalışmalarında olduğu gibi numunenin mikro yapısındaki kalıntı östenit fazından martenzit fazına geçişin mümkün olduğu ispatlanmış olacaktır.

5.2.2 Deneylerin Sonuçları

Yapılan deneylerin sonuçları, öncelikle kriyojenik işleme maruz kalan numuneler ile maruz kalmayan numunenin karşılaştırılması ve sonraki adımda kriyojenik işleme maruz kalan numuneler arasında karşılaştırma şeklinde olacaktır.

5.2.2.1 Korozyon Deneyinin Sonuçları

Numunelerin çözelti içerisine daldırılmadan öncesi görüntüleri Fotoğraf 5.10' da gösterilmiştir. Numunelerin çözeltiye daldırılmadan önce hassas terazi ile ağırlıklarının ölçüldüğünden bahsedilmiştir.

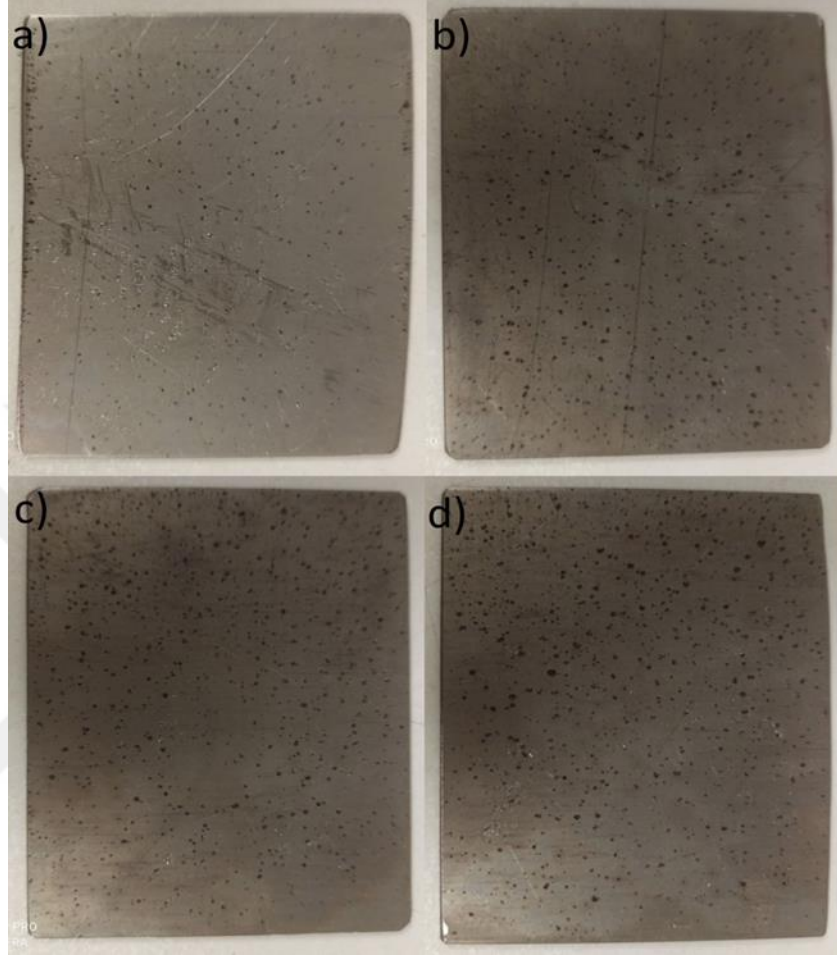


Fotoğraf 5.10. Numunelerin çözeltiye daldırılmadan önceki görüntüleri

a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune

Numuneler ASTM G48-11 standardına uygun olarak çözeltinin içerisinde çıkartıldıklarında yüzeylerinde çukurcukların oluştuğu görülmüştür. Yüzeydeki çukurcukların numunelere nasıl etki ettiğini anlayabilmek için numunelerin

ağırlıkları tek tek ölçölüp birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Kriyojenik işleme maruz kalan numunelerde Fotoğraf 5.11’de görüldüğü üzere çukurcuk çapı ve miktarında, işlem görmeyen numuneye göre kayda değer bir artış olduğu görülmüştür.



Fotoğraf 5.11. Numunelerin çözeltiye daldırılmadan sonraki görüntüleri
a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune

Numunelerin çözelti sonrası yüzeylerine bakıldığında, kriyojenik işlem süresinin artmasına bağlı olarak korozyon miktarının arttığını görüyoruz. Ayrıca işlem süresi arttıkça daha büyük çukurcuklara rastlanılmıştır.

Deneyden önceki numuneler ile çözelti içerisinde 22° C sıcaklıkta 72 saat boyunca bekletildikten sonra çıkartılan numunelerin ağırlıkları Tablo 5.1’ deki tabloda gösterilmiştir. Numunelerin ağırlıklarındaki değişimin kriyojenik işlem süresi ile arttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.1. Numunelerin korozyon deneyi sonrası ağırlıklarının değişimi

	Test Öncesi (gr)	Test Sonrası (gr)	Değişim yüzdesi (%)
N1	47,07	45,97	2,34
N2	47,33	45,24	4,42
N3	46,26	44,11	4,65
N4	46,70	44,01	5,76

Deney sonucunda; kriyojenik işlemin AISI 321 paslanmaz çeliğin korozyona karşı olumlu etki etmediğine, aksine korozyona karşı malzemeyi daha olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

5.2.2.2 Aşındırma Deneyinin Sonuçları

Bu deneyin sonucunda; çeliğin yüzeyinde oluşan ortalama pürüzlülük (R_a) ve maksimum derinlik (R_z) değerlerine bakıldı. Numunelerin yüzeyinin ölçümü Mahr marka ölçüm cihazı ile yapılmıştır.



Fotoğraf 5.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Numunelerin yüzeyinde oluşan aritmetik ortalama pürüzlülük (R_a) değerleri Tablo 5.2’ de dört gruba ayrılan numunelerin her grubundan üçer tanesine ölçüm yapılmıştır.

Aşındırma deneyi sonrasında, numunelerin aşındırma direncinin düştüğü ve literatürde belirtilen çalışmaların aksine aniden soğutma ile yapılan kriyojenik işlemin numuneleri olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.

Tablo 5.2. Aşındırma deneyi sonrası aritmetik ortalama pürüzlülük değerleri

	Aritmetik Ortalama Pürüzlülük (R_a)			
	1. ölçüm (μm)	2. ölçüm (μm)	3. ölçüm (μm)	Ortalama (μm)
N1	2,377	2,106	2,419	2,301
N2	2,459	2,754	2,658	2,624
N3	2,680	3,111	3,076	2,956
N4	3,765	4,178	3,795	3,913

Aşındırma deneyinin aritmetik ortalama pürüzlülük derinliğe ile maksimum pürüzlülük derinliğine olumsuz etki ettiği Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’ de gösterilmiştir. Özellikle 48 saat bekleme süresi kriyojenik işleme maruz kalan N4 numunesinde olumsuz etki daha fazla görülmektedir.

Tablo 5.3. Aşındırma deneyi sonrası maksimum pürüzlülük değerleri

	Maksimum Pürüzlülük Derinliği (R_z)			
	1. ölçüm (μm)	2. ölçüm (μm)	3. ölçüm (μm)	Ortalama (μm)
N1	12,57	11,72	13,82	12,70
N2	13,84	16,53	15,81	15,39
N3	16,17	17,73	15,69	16,53
N4	23,73	25,36	21,84	23,64

Aşındırma deneyinde N2 ve N3 numunelerinde aşındırma direnci N1 numunesine göre %10 ila %30 arasında düşerken, N4 numunesinde ise %70 ila %90 arasında düşmektedir. Aşınma direncinin düşüşü ile bekleme süresinin doğru orantılı olmadığı N4 numunesinin sonuçlarından hesaplanmaktadır.

5.2.2.3 Çekme-Kopma Deneyinin Sonuçları

Numunelere Zwick marka bilgisayar kontrollü cihazda yapılan deneylerin detaylı sonuçlarını gösteren verilere tablodan ulaşabilirsiniz. Deneye başlamadan önce numunelerin sertlik değerleri üçer kez ölçüldükten sonra Tablo 5.4’ de ortalaması ile birlikte verilmiştir.

Tablo 5.4. Numunelerin sertlik değerleri

	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
N1	65,7	65,2	66,2	65,7
N2	79,2	77,3	76,6	77,7
N3	86,8	87,7	84,9	86,5
N4	89,8	89,1	88,8	89,2

Deney sonucunda, numunelerin tokluğu bir miktar arttığı görülmüştür. Numunelerin çekme mukavemeti (R_m), akma mukavemeti ($R_{p0,2}$), sertlik ortalaması (HB) ve uzama değerleri Tablo 5.5’ de gösterilmiştir. Çelik levhalardan sadece bir numune alınabildiğinden her bir numunede bir değer alınmıştır. Bu yüzden değerler tam değerlendirme için yetersiz olsa da kriyojenik işlemin numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin olumlu ya da olumsuz olduğu hakkında sonuç bildirir.

Tablo 5.5. Deney sonrası numunelerin mekanik değerleri

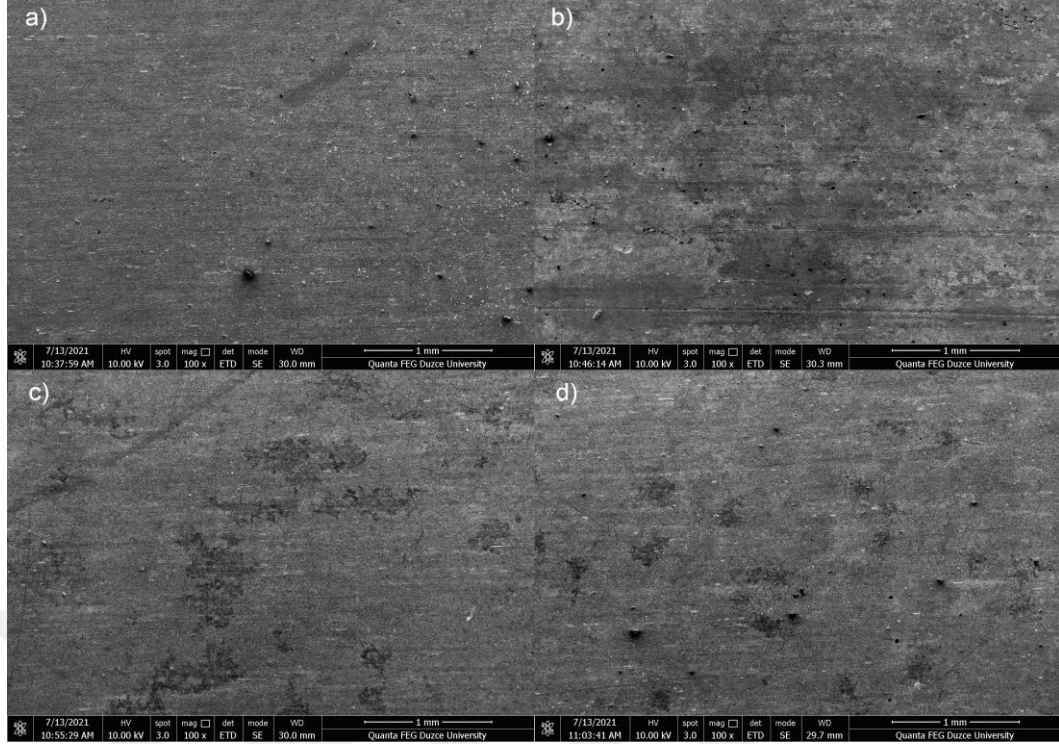
	Sertlik (HB)	$R_{p0,2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	Uzama oranı (%)
N1	65,7	242	575	51,2
N2	77,7	281	645	40,2
N3	86,5	291	670	42,4
N4	89,2	304	665	21,2

Tabloya göre numunelerin çekme dayanımının arttığı, uzama oranının özellikle N4 numunesinde azaldığı görülmüştür. Sertlik değeri, malzemenin dayanımının (mukavemetinin) ölçüsüdür. Bu yüzden kriyojenik işlem sonrasında numunelerin mukavemetinin arttığını söyleyebiliriz.

5.2.2.4 Mikro Yapının Görüntü Sonuçları

Malzemenin mukavemetinin artması mikro yapısında bulunan kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi sonucu oluşmuştur. Martenzitin dönüşümü, karbon

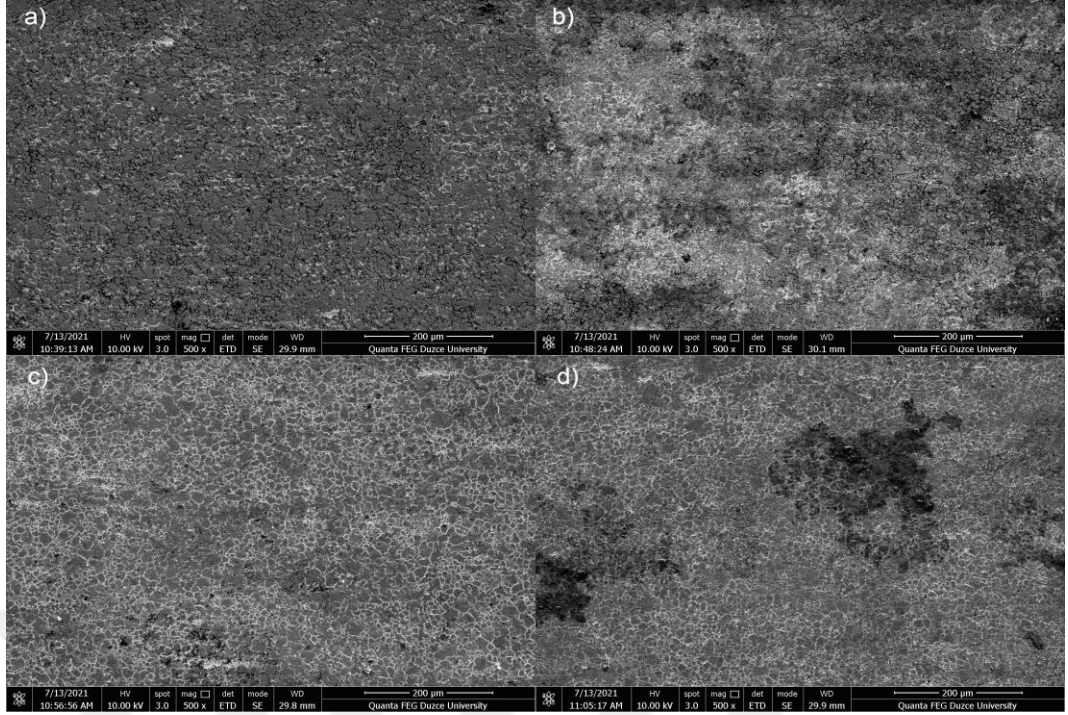
Kriyojenik işlem sonrasında sadece kafes yapısı değişmekle kalmayıp tane boyutları da değişmiştir. Metaller içerisinde tane boyutlarının büyüklüğü, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkisi vardır. Ortam sıcaklığında tanenin boyutu küçüldükçe genel olarak çekme dayanımı, akma sınırı ve sertlik değerleri artış gösterirken süneklik de ise azalma olur. Hızlı soğutmanın yanında mekanik, ısıl ve termomekanik uygulamalar ile tane yapısının küçültülmesi mümkün olabilmektedir. Ortam sıcaklığında incelmış tane yapısı bulunduran malzemenin mukavemetinin artmasına bağlı olarak tokluğun yükselmesi şeklinde mekanik özelliklerinde başlıca etki görülür (Pürçek, 2007).



Fotoğraf 5.13. Numunelerin SEM görüntüleme cihazında 100 x yüzey görüntüleri
a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune

Ayrıca tane boyutları küçüldüğü için malzeme daha homojen bir yapıya dönüşmüştür. Malzemenin SEM görüntüleme cihazı ile yüzeyi incelendiğinde yüzeydeki taneler arası boşlukların azaldığı görüldü. Fakat malzeme çok hızlı soğutulduğu için yüzeyde hasarlar oluştu (Fotoğraf 5.14).

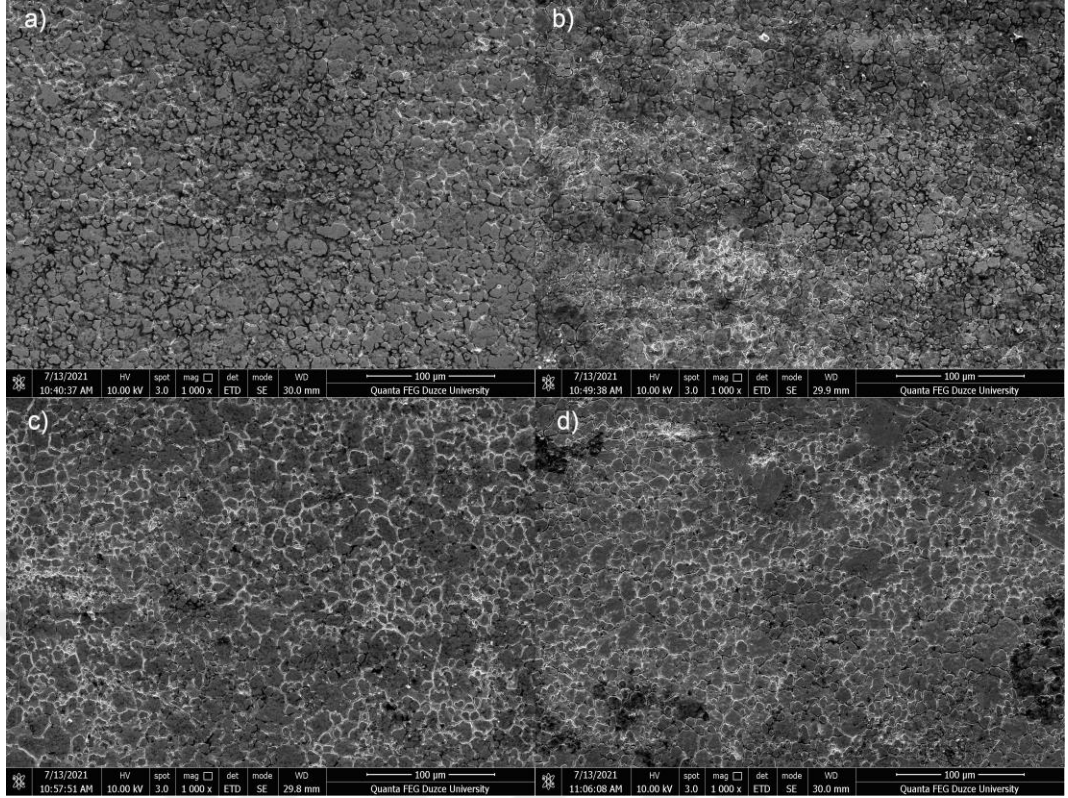
Normal koşullarda hacim merkezli kübik kafes yapısında içinde çok az sayıda karbon çözünebilirken sıfır altı ortamda çok fazla karbon atomu çözünmesinin etkisiyle yapı gerilir ve kafes yapısı biraz daha uzayarak tetragonal bir yapıya dönüşür (Şekil 5.3). Sertleşmenin asıl sebebini bu olay olmasının yanında ikinci olarak, kayma sonucunda oluşan dislokasyonlarda gösterilmektedir. Martenzit kristal kafes yapısı devamlı olarak kayma düzlemi oluşturamadığı için yapının şekil değiştirmesi mümkün değildir. Yapının her tür şekil değiştirmeye karşı yüksek derecede mukavemet göstermesi nedeniyle karşılaştığı çok büyük kuvvetlere karşı malzeme öncesinde şekil değiştirme fırsatı bulamadan kırılır.



Fotoğraf 5.15. Numunelerin SEM görüntüleme cihazında 500 x yüzey görüntüleri
a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune

Bu nedenle numunelerin yüzeyinde kriyojenik işlem sonrasında oluşan sertleşen numunelerde martenzit yapının temperlemeden sonra yüzeyden ayrıştığı görüldü. Numunenin yüzey sertliği arttıkça ayrışmanın daha fazla olduğu tespit edildi. Fotoğraflar incelendiğinde Fotoğraf 5.14’ de N4 numunenin yüzeyinde daha fazla ayrışmanın olduğu tespit edildi. Numunelerin korozyon ve aşındırma deneylerinde görülen olumsuz sonuçların nedeni yüzeydeki ayrışmalardan kaynaklandığı görülmektedir.

Kriyojenik işlem sonrasında numuneler aniden soğutulduğu için yüzey görüntüleri büyütüldükçe yüzeydeki hasarlar daha net görülmüştür. Fakat numuneler hasar görmesine rağmen özellikle SEM görüntüleme cihazında 1000 x büyütülmüş görüntüde taneler arası boşlukların azaldığı tespit edildi.



Fotoğraf 5.16. Numunelerin SEM görüntüleme cihazında 1000 x yüzey görüntüleri a) 1. Numune, b) 2. Numune, c) 3. Numune, d) 4. Numune

İncelmiş tane yapıları Fotoğraf 5.15'te daha detaylı gözükmemektedir. Kriyojenik işlem sonrasında numunelerin yüzey görüntüleri büyütüldükçe özellikle N3 ve N4 numunelerinde taneler arasında boşluğun azaldığı ve daha pürüzsüz yüzey görüntüsüne sahip olduğu görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kriyojenik işlem uygulanmasının çelikler üzerindeki en önemli etkileri, malzemenin mukavemeti artırmasının yanında aşınma ve korozyon dirençlerinde iyileştirmesidir. Ayrıca çevreye zarar vermemesi ve maliyetinin düşük olması sebebiyle imalat sektöründe yaygınlaşmaya başlamaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kriyojenik işlemin belirli şartlarda daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmalara dayanarak deney yapılacak numunelere kriyojenik işlemin bekleme süresi 24, 36 ve 48 saat olarak belirlenmiştir ve sonrasında temperleme işlemi uygulanmıştır. Numunelere yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler aşağıda maddeler halinde yazılmıştır.

- Literatür çalışmalarında kriyojenik işlem uygulanan çeliklere herhangi bir korozyon testi ile ilgili bir veri bulunmamasına rağmen AISI 321 kalite paslanmaz çelikler nükleer santral ve kimyasal proses tesisleri gibi koroziy ortam imalatında kullanıldığından ilk olarak numunelere korozyon deneyi yapılmıştır. Deney ASTM G48 standardına uygun yapılmış olup deney sonucunda kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin hiçbirisinden olumlu sonuç alınamamıştır. Bunun yanında, işlem süresinin artması ile korozyonun etkisinin daha çok görüldüğü ve en uzun işlem süresine maruz kalan N4 numunesinde kütle kaybının işlemsiz N1 numunesinin kütle kaybından %146 oranında daha fazla olduğu hesaplanmıştır.
- Kriyojenik işlem ile aşınma direncinin arttığı neredeyse tüm literatür çalışmalarında görülürken Barron'un yaptığı çalışmada sadece karbon içeren çelikler ve dökme demir numunelerinde aşınma direncinin artmadığı belirtilmiştir (Barron, 1981). Buna göre yapılan aşındırma deneyinde kriyojenik işlemin numunelerde aşındırma direncini artırmadığı gözlemlenmiştir. Deney sonucunda N1, N2 ve N3 numunelerinin değerleri birbirine yakinken N4 numunesinin aşındırma direncinin N1 numunesine göre neredeyse yarı yarıya azaldığı gözlemlenmiştir.
- Yapılan son deneyde malzeme mukavemetinin daha önce yapılan tüm çalışma sonuçlarında olduğu gibi arttığı görülmüştür. Bu konuda yapılan bütün çalışmalar incelendiğinde, işlem gören malzemelerin tamamında sertlik ve dayanım değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Numunelerin deney

sonucundaki değerleri N2 ile N3 numunelerinde yakın iken N4 numunesinin dayanımı bu iki numuneye göre daha fazla artmıştır fakat uzama oranı neredeyse yarısına dūřmektedir.

- Numune yüzeyleri SEM görüntüleme cihazında incelendiğinde kriyojenik işleme maruz kalan numunelerin yüzeylerinde ayrışmaların olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem sırasında östenit yapının martenzite geçmesi ile yüzeyin sertleşmesi ve sonrasında temperleme işleminde genleşen yüzeyden yapıların ayrışması ile yüzeyde hasarların oluştuğu dūřnlmektedir.
- Numune yüzeyinde ayrıřma sonucu oluřan hasarın ařındırma ve korozyon deneylerine de olumsuz etki ettięi dūřnlmektedir.
- Numunelerin kriyojenik işlem sırasında, kontrollü bir şekilde olmayıp aniden soğutulması ile termal şokun etkisi de hasarın boyutunu artırdığı ihtimalini ortaya çıkarır.

Bu tez çalışmasında, numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları ile literatür çalışmalarında yapılan deney sonuçlarını kıyasladığımızda sonuçlar birbiriyle pek uyumlu çıkmamaktadır. Numunelerin kriyojenik işlemde hızlı soğutma etkisinden dolayı olumsuz etkilendiği dūřnlmektedir.

Bu nedenle AISI 321 kalite paslanmaz çeliğine kontrollü bir şekilde doğrudan ve dolaylı soğutma yöntemleri ile işlem uygulanarak sonuçların incelenmesi gerekmektedir. Bunun yanında sığ ve derin kriyojenik işlem ile işlem süresi gibi şartları değiştirerek bu paslanmaz elik üzerinde en çok olumlu etki oluşturacak işlem şartlarını bulabilmek için bu konuda daha çok çalışma yapılması gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.)

- Aydın M (2019) Çelik Malzemeler, AYBİTAK Bilim ve İleri Teknolojiler Araştırma Geliştirme, 2. Baskı, İstanbul.
- Aran A (2004) Paslanmaz Çelik Yassı Mamüller; Üretimi, Kullanımı, Standartları, 2. Baskı, Sarıtaş Teknik Yayın, İstanbul
- ASM (1998) Metals Handbook Desk Edition, 2nd Edition, USA.
- Teknik Metal, Paslanmaz Çelik, <https://www.teknikmetal.com/tr/paslanmaz-celik>, 18.02.2021
- Askeland, D.R. ve Fulay, P.P. (2009). The Science and Engineering of Materials, Second Edition, USA
- Batıgün C (2017) “Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması ve Korozyon”, Endüstride Alüminyum Alaşımları ve Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Uygulamaları, 6 Ekim 2017, Ankara
- Odabaş C (2004) Paslanmaz Çelikler; Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri, Askaynak, İstanbul
- ASM (2001) Handbook Desk Edition, Vol.1, Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys, USA
- Voort G (2017) The Microstructure of Stainless Steels, Buehler Ltd.
- Banerjee M.K. (2017) Comprehensive Materials Finishing, Volume 2: Surface and Heat Treatment Processes, USA
- Kahraman F., Kasman Ş., Kahraman A ve Tunuslu O (2017), “Östenitik Paslanmaz Çelikler İle Takım Çeliklerinin Birbirleri İle Kaynağında Oluşan Kaynak Bölgesinin İncelenmesi”, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi ,Cilt: 4, No: 1,64-71
- Charles, J., Kosmac, A., KrautSchick, J., Simon, J.A., Suutala, N. ve Taulavuori, T. (2012) “Austenitic Chromium Manganese Stainless Steel”, A European Approach, Materials and Application Series, Vol.12, 2.Edition.
- Disegi, John A., Zardiackas, Lyle D. (2003) "Metallurgical and mechanical evaluation of 316L stainless steel orthopedic cable", Stainless Steels for Medical and Surgical Applications. ASTM International. s. 195
- Singh R, Deepak Sachana , Verma R, Jayaganthan R and Kumar A (2017), "Mechanical behavior of 304 Austenitic stainless steel processed by cryogenic rolling", Materials Today: Proceedings 5: 16880–16886
- Birçelik, 321 (1.4541) Paslanmaz Çelik, <https://bircelik.com/tr/kategori/321-1-4541->, 18.01.2021
- American Metals Co., 321 Stainless Steel Technical Data Sheet , <https://www.metalshims.com/t-321-Stainless-Steel-technical-data-sheet.aspx>, 04.03.2021
- Baitanu D, Galusca D, Achitei D, Minciuna M (2016), "The Analysis of Physical-Structural Properties for AISI 321 Steel", Key Engineering Materials, ISSN: 1662-9795, Vol. 700
- Szubska B, Antończak A, Koziol P, Łazarek Ł, Stępak B, Łęcka K , Szmaja A , Ozimek M (2016), "Corrosion resistance of the AISI 304, 316 and 321 stainless steel surfaces modified by laser", Materials Science and Engineering, 113
- Min, Lee, S. C, Nam, S. W (2002), Effects of TiC and Cr₂₃C₆ Carbides on Creep-Fatigue Properties in AISI 321 Stainless Steel. Mater. Trans. 43, 2808–2812

- Guan, Xu K, Xun X ve Wang (2005), Effect of aging at 700 °C on precipitation and toughness of AISI 321 and AISI 347 austenitic stainless steel welds. Nucl. Eng. Des. 235, 2485–2494
- Hilditch T.B., Hodgson P.D. (2015) Properties and automotive applications of advanced high-strength steels", Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS), 9-28
- Kısaöz A, Karaaslan A (2012) Dupleks paslanmaz çeliklerde oluşan yüksek sıcaklık fazlarına genel bir bakış, Metalurji, 162: 57
- The International Molybdenum Association (IMAO) (2014) Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels, 3rd Ed.
- IMAO, Duplex stainless steel, <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php>, 06.04.2021
- Malzeme Bilimi, Yaşlandırma Şertleştirilmesi, <https://malzemebilimi.net/yaslandirma-sertlestirmesi.html>, 07.04.2021
- Yılmaz R (2018) Çökelme Sertleşmesi, Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Sakarya
- Thornton R, Slatte T, Jones A H, Lewis R (2011) The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs, Wear, 271, 2386– 2395
- Çiçek A, Ekici E, Uygur İ, Akincioğlu Ç ve Kıvak T (2012) "AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin delinmesinde derin kriyojenik işlemin takım ömrü üzerindeki etkilerinin araştırılması," International Journal of Technologic Sciences, c. 4, s. 1, ss. 1-9, Elazığ
- Haselden G G (1971) Cryogenic fundamentals Academic Press, New York, ISBN 0-12-330550-0
- Baldissera P, Delprete C (2008) "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," The Open Mechanical Engineering Journal, vol. 2, pp. 1-11
- Mazur J (1964) "Investigation of austenite and martensite subjected to very low temperatures," Cryogenics, vol. 4, no. 1, pp. 36-38
- Arslan FK (2010) Soğuk iş takım çeliklerinde sıfırlama işlem derecesinin mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya
- Tekin E (1982). Takım çeliklerinin ısı işlemleri, Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Yayınları, 226-228, Ankara
- Yıldız Y (2010) Soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektro-erozyon işleme performansına etkileri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü, Ankara
- Reitz W and Pendray J (2001) "Cryoprocessing of materials: A review of current status," Metalerial Manufacture Process, pp. 829-840.
- Nalbant H (2018) Derin Kriyojenik İşlemin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir
- Das D (2011) Structure-Property Correlation Of Cryotreated AISI D2 Steel, Doctoral Dissertation, Department of Metallurgy and Materials Engineering Bengal Engineering and Science University
- Patil PI, Tated RG (2012) Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels: A Review
- SERKON, Paslanmaz Çeliklerin İç Yapıları ve Temel Türleri, <http://www.serkon.com.tr/urunler/masoneilan/10%20Teknik%20Dokumanlar/Paslanmaz%20celiklerin%20ic%20yapilari%20ve%20turleri.pdf>, 15.02.2021

- Dowdell RL, Harder OE (1927) "The decomposition of the austenitic structure in steel. Part II, The decomposition of austenite in liquid oxygen", *Trans. Am. Soc. Steel Treat.*, 11: 391–392
- Gordon P, Cohen M (1942) "The transformation of retained austenite in high speed steel at subatmospheric temperatures", *Trans. ASM*, 30: 569–588
- Kuzmenko VA, Grishakov SV (1974) "Influence of high loading frequency on the endurance of several structural alloys at low (-196°C) and room temperatures", *Strength Mater.*, 6 (10): 1195–1200
- Tavazde FN, Stepanov GA, Lokhankina LK, Grikurov GN (1975) "Effect of heat treatment on properties of steel 03Kh13AG19 at cryogenic temperatures", *Met. Sci. Heat Treat.*, 17 (2): 153–156
- Stepanov GA, Lokhankina LK (1979) "Low-cycle fatigue of chrome-manganese steel at +20 and -196°C", *Strength Mater.*, 11 (8): 847–849
- Smolnikov EA, Kossovitch GA (1980) "Cold treatment of cutting tools", *Metal Sci. Heat Treat.*, 22(10): 704–705
- Strife JR, Passoja DE (1980) "The effect of heat treatment on microstructure and cryogenic fracture properties in 5Ni and 9Ni steel", *Metal. Trans. A*, 11 (8): 1341–1350
- Barron RF, Mulhern C (1980) Cryogenic treatment of AISI-T8 and C1045 steels, *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, 26, 171-179
- Barron, RF (1981) Effect of Cryogenic Treatment on Corrosion Resistance, in *Advances in Cryogenic Engineering*, 36, 1375-1379
- Frey R (1983) "Cryogenic treatment improves properties of drills, P/M parts", *Indust. Heat.*, 21–23
- Pillai RM (1986) "New dry refrigerant treatments improve characteristics and wear resistance of metal parts", *Ind. Heat.*, March 1: 36–38
- Moore KE, Collins DN (1993) Cryogenic treatment of three heat treated tool steels, *Key Engineering Materials*, 86-87, 47-54
- Meng F, Tagashira K, Azuma R, Sohma H (1994) "Role of Eta-carbide precipitation's in the wear resistance improvements of Fe-12-Cr-Mo-V-1.4C tool steel by cryogenic treatment", *ISIJ Int.*, 34 (2): 205–210
- Jung SC, Medlin DJ, Krauss G (1996) "Effects of subzero treatments on the bending fatigue performance of carburized SAE 4320 and SAE-9310 steels", *SAE Tech. Pap.*, 960313: 147–158
- Collins DN, Dormer J (1997) "Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel", *Heat Treat. Metals*, 71–74
- Yun D, Xiaoping L, Hongshen X (1998) Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechanism, *Heat Treatment of Metals*, 3, 55-59
- Mohan Lal D, Renganarayanan S, Kalanidhi A (2001) "Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels", *Cryog.*, 41: 149–155.
- Huang JY, Zhu YT, Liao XZ, Beyerlein IJ, Bourke MA, Mitchell TE (2003) "Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel", *Mater. Sci. Eng. A*, 339: 241–244.
- Prabhakaran A, Bensely A, Nagarajan G, Mohan Lal D (2004) "Effect of cryogenic treatment on impact strength of case carburized steel-EN 353", *Proceedings of IMEC2004 International Mechanical Engineering Conference*, Kuwait
- Babu PS, Rajendran P, Rao KN (2005) "Cryogenic treatment of M1, En19 and H13 tool teels to improve wear resistance", *IE(I) Journal-MM*, 86, 64-67.

- Zhirafar S, Rezaeian A, Pugh M (2007) “Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel”, *J. Mater. Process. Technol.*, 186: 298–303.
- Bensely A, Venkatesh S, Mohan Lal D, Nagarajan G, Rajadurai A, Junik K (2008) “Effect of cryogenic treatment next term on distribution of residual stress in case carburized EN 353 steel”, *Materials Science and Engineering A*, 479 (5), 229–235.
- Bensely A, Shyamala L, Harish S, Mohan Lal, D, Nagarajan G, Junik K, Rajadurai A (2009) “Fatigue behaviour , fracture mechanism of cryogenically treated EN 353 steel”, *Mater. Des.*, 30: 2955–2962 .
- Baldissera P, Delprete C (2009) “Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel”, *Mater. Des.*, 30: 1435–1440.
- Dhokey NB, Nirbhavne S (2009) “Dry sliding wear of cryotreated multiple tempered D-3 tool steel”, *J. Mater. Process. Technol.*, 209: 1484–1490.
- Amini K, Nategh S, Shafyei A (2010) “Influence of different cryotreatments on tribological behavior of 80CrMo12 5 cold work tool steel”, *Mater. Des.*, 31: 4666–4675.
- Akhbarizadeh A, Amini K, Javadpour S (2012) “Effects of applying an external magnetic field during the deep cryogenic heat treatment on the corrosion resistance and wear behavior of 1.2080 tool steel”, *Mater. Des.*, 41: 114–123.
- Pürçek G (2007) *Metallerde Mukavemet Artırıcı Mekanizmalar*, Ders Notları, 44
- Kerscher E, Lang KH (2010) Increasing the fatigue limit of a high-strength bearing steel by a deep cryogenic treatment; *Journal of Physics: Conference Series*, 240.
- Koneshlou M, Meshinchi, Asl K , Khomamizadeh F (2011) “Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel”, *Cryog.*, 51: 55–61.
- Senthilkumar D, Rajendran I, Pellizzari M, Siirainen J (2011) “Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel”, *J. Mater. Process. Technol.*, 211: 396–401.
- Sri Siva R, Arockia Jaswin M, Mohan Lal D (2012) “Enhancing the wear resistance of 100Cr6 bearing steel using cryogenic treatment”, *Tribol. Trans.*, 55: 387–393.
- Yan XG, Li DY (2013) “Effects of the sub-zero treatment condition on microstructure, mechanical behavior and wear resistance of W9Mo3Cr4V high speed steel”, *Wear*, 302 (1–2): 854–862.
- Arslan Y, Uygur İ, Bayraktar H (2013) “Kriyojenik İşlem Uygulanmış Soğuk İş Takım Çeliği Zimba ile AISI 304 Paslanmaz Çelik Saç Malzemenin İşlenebilme Performansının Araştırılması”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, Cilt 2, Sayı 3, 61-75.
- Han W, Liu Y, Wan F, Liu P, Yi X, Zhan Q, Morrall D, Ohnuki S (2018) “Deformation behavior of austenitic stainless steel at deep cryogenic temperatures”, *Journal of Nuclear Materials*, 504: 29-32.
- Akıncıoğlu S (2019) “Sığ Kriyojenik İşlemin AISI 410 Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 :985-993.
- ASTM G48-11 (2020) *Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ISO 6892-1 (2019) *Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature*, CEN, Brüksel.

8. EKLER

EK 1 Malzeme Kontrol Raporu

		INSPECTION CERTIFICATE 3.1 ACCORDING TO EN 10204 CERTIFICATE NO 148448 Rev 1																	
		MANUFACTURER'S MARK BHS		INSPECTOR'S STAMP 9		MELTING PROCESS E/AOD													
CUSTOMER:												ORDER No.		ITEM No.		DELIVERY NOTE No.			
CUSTOMER ORDER No.																			
REQUIREMENTS																			
SPECIFICATIONS ASTM A240 / A240M-15a ASME BPVC-IIA SA240 / SA240M-2013 EN 10088-2-2014 EN 10028-7-2007												MATERIAL CODE 321 321 1.4541 1.4541				CASE BPSIG39722 (23310 kg)			
TOLERANCE: ISO9445-2												KURZNAME							
PRODUCT: 2B Finish, Cold Rolled, Annealed & Pickled, Skin passed												HEAT No: PIBA							
DIMENSIONS: 1.5 mm X 1500 mm X COIL				QUANTITY: 1		MASS: 23310 Kg		MATERIAL No: A0040774											
CHEMICAL COMPOSITION (%)																			
	C	S	P	U _T	Si	Cr	Ni	N	Ti										
Min						12.0	9.0												
Max	0.08	0.015	0.045	2.00	0.75	19.0	12.0	0.10	0.70										
Actual	0.02	0.001	0.030	1.07	0.42	17.2	9.1	0.02	0.29										
MECHANICAL PROPERTIES																			
TEMPERATURE	DIRECTION	POSITION	R _m MPa	R _{p0.2} MPa	R _{p1.0} MPa	A50 %	A80 %	HRBW											
Ambient	Transverse	Requirement Min	520	220	250	40	40												
		Max	700					95											
Ambient	Transverse	Head	548	256	286	33	31	79											
		Tail	531	241	269	33	30	80											
INTERGRANULAR CORROSION																			
SPECIFICATION		RESULT		This material is free from mercury contamination. The radiation level exhibited by this material is not greater than the normal background level. This document is issued without alteration or erasure and may only be reproduced in full. Tests to verify batch and quality have been made: Verwechtingsprüfung wurde durchgeführt. Visual and dimensional control: no exceptions, Beschickungen und Abmessungen ohne Beanstandung. The delivery is in accordance with the order: Die Lieferung entspricht den Bestellbedingungen. This material meets the Hardness requirement of Nuc M56075 & Nuc M56010. Material has been P.M. Tested. R _m = Tensile strength (UTS) R _{p0.2} = Yield proof strength at 0.2% strain R _{p1.0} = Yield proof strength at 10% strain A5 = Elongation with gauge length 565Sqr (cross-sectional area) A80 = Elongation with gauge length 36 mm HRBW = Rockwell hardness B scale Bahru Stainless Steels is certified with ISO 9001 & ISO 14001															
ASTM A262 Practice E		PASS																	
HEAT TREATMENT (SOLUTION ANNEALED)																			
Anneal °C		Quench		BAHRU STAINLESS															
1000-1100		AIR/SPRAY																	
Signature												SwinLe Teoh QCENGINEER							