

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIFIR ALTI ISIL İŞLEM İLE EKSTRÜZYON KALIPLARININ ISIL İŞLEM
SÜREÇLERİNİN KISALTILMASI VE PVD KAPLAMA İLE KALIP
ÖMRÜNÜN UZATILMASI**

DOKTORA TEZİ

Mazhar Ümit BÜYÜKFIRAT

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SIFIR ALTI ISIL İŞLEM İLE EKSTRÜZYON KALIPLARININ ISIL İŞLEM
SÜREÇLERİNİN KISALTILMASI VE PVD KAPLAMA İLE KALIP
ÖMRÜNÜN UZATILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Mazhar Ümit BÜYÜKFIRAT
(506092423)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cüneyt ARSLAN

TEMMUZ 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506092423 numaralı Doktora Öğrencisi Mazhar Ümit BÜYÜKFIRAT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SIFIR ALTI ISIL İŞLEM İLE EKSTRÜZYON KALIPLARININ ISIL İŞLEM SÜREÇLERİNİN KISALTILMASI VE PVD KAPLAMA İLE KALIP ÖMRÜNÜN UZATILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Cüneyt ARSLAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Selim YILDIRIM
İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa

Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gökhan ORHAN
İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa

Teslim Tarihi : 26 Haziran 2019
Savunma Tarihi : 31 Temmuz 2019





Aile büyüklerime ve kızıma,



ÖNSÖZ

Çalışmanın her aşamasında fikirlerinden yararlandığım, bilgi ve deneyimleriyle çalışmalarımı sürekli yönlendiren, uzun ve zorlu doktora süreci boyunca sağladığı disiplinli çalışma ortamının beni aydınlattığı ve yol gösterdiği, her zaman yakın ilgi ve desteğini gördüğüm çok değerli hocam Prof.Dr. Cüneyt ARSLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez çalışmam sırasında desteğini esirgemeyen ve deneylerim sırasında görüş ve önerilerinden faydalandığım çok kıymetli hocalarım Prof. Dr. E. Sabri KAYALI ve Prof. Dr. Sakin ZEYTİN'e içtenlikle teşekkür ederim. Doktora tez çalışmam boyunca desteğini hiç esirgemeyen Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN ve Dr. Fahir ARISOY'a da çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar için malzeme ve teçhizat temin eden, endüstriyel deneyler ve uygulamalar için fabrika ortamında çalışmalara desteğini esirgemeyen ONAT Profil ve Alaşım San. ve Tic. A.Ş. sahipleri Dr. Tanju ÇELİKER, Ayhan ÇELİKER ve Orhan ÇELİKER'e ve tüm mesai arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Borçelik Ar-ge Laboratuvarında çalışma imkanı sağlayan Sayın Uğur ŞAHİNOĞLU'na, Sayın Ömer YILDIRIM'a, ve Borçelik Ar-Ge Yönetimine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam sırasında desteklerini esirgemeyen Dr. Selim ERTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Laboratuvar ve verdiği manevi destekle bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENİNOĞLU'na teşekkür ederim.

Uzun doktora çalışmalarım boyunca bana varlığıyla destek veren, her daim yanımda olan ve 2015 yılında sonsuzluğa uğurladığım sevgili annem Necla YENER'e sonsuz teşekkür ederim.

Olabildiğince özlü ve anlaşılabilir bir dille hazırlamaya çaba gösterdiğim doktora çalışmamın, konuyla ilgilenen kurumların gereksinimlerini karşılayacağını ve araştırma yapan diğer kişilerin konuya ilişkin beklentilerine karşılık vereceğini umuyor ve diliyorum.

Haziran 2019

Mazhar Ümit BÜYÜKFIRAT
(Metalurji Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	6
2. ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON TEKNOLOJİSİ	7
2.1 Alüminyum Profil İmalatında Kullanılan Alaşımlar	9
2.2 Alüminyum Profillerin Ekstrüzyon Yöntemi ile İmalatı	11
2.2.1 Ekstrüzyonda termodinamik	15
2.3 Alüminyum Ekstrüzyon Kalıpları	21
2.4 Kalıp Malzemesi Seçimi	25
2.4.1 AISI H13 (DIN 1.2344) sıcak iş takım çeliği	28
2.4.2 AISI H10 (DIN 1.2365) sıcak iş takım çeliği	28
3. EKSTRÜZYON KALIPLARINDA KARŞILAŞILAN HASAR TÜRLERİ..	29
3.1 Kırılma	33
3.2 Korozyon	34
3.3 Aşınma	35
3.3.1 Adhezif aşınma	39
3.3.2 Abrasif aşınma	41
3.3.3 Yorulma aşınması	42
3.3.4 Eroziyon aşınma	43
3.4 Yorulma	43
4. EKSTRÜZYON KALIPLARINDA AŞINMA DAYANIMINI ARTTIRMA YÖNTEMLERİ	45
4.1 Ekstrüzyon Kalıplarında Isıl İşlemler ve Yüzey Sertleştirme Teknikleri	45
4.1.1 Nitratasyon	45
4.1.2 Sert ince film kaplama teknikleri	48
4.1.3 Kriyojenik ısıtma işlemi	53
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
5.1 Deneysel Malzemeler	57
5.2 Uygulanan Isıl İşlem Reçeteleri	58
5.2.1 Geleneksel ısıtma işlemi	58
5.2.2 Kriyojenik ısıtma işlemi	59
5.2.3 Kriyojenik ısıtma işlemi + 1 menüviş	59
5.3 Gaz Nitratasyon	60

5.4 “Sert İnce Film Kaplama	60
5.4.1 Krom nitrür (CrN) kaplama.....	60
5.4.2 CrN üzeri alüminyum titanyum nitrür (AlTiN) kaplama:	61
5.5 Malzemelerin Karakterizasyonu	62
5.6 Aşınma Deneyleri	63
5.7 Isıl Döngü ve Sertlik Deneyleri	65
5.8 Çekme Deneyleri	68
5.9 Darbe Deneyleri.....	68
5.10 İmalat Kalıbı Uygulaması.....	69
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	71
6.1 Mikroyapısal Karakterizasyon.....	71
6.2 Isıl İşlem-Mekanik Özellikler İlişkisi.....	79
6.3 Isıl Döngünün Etkileri	80
6.4 Aşınma Deneyleri	85
6.5 Çekme Deneyleri	104
6.6 Darbe Deneyleri.....	107
6.7 İmalat Kalıbı Uygulaması.....	115
7. SONUÇLAR.....	123
7.1 Laboratuvar Çalışmalarının Sonuçları	123
7.2 İmalat (Saha) Çalışmalarının Sonuçları	124
7.3 Çalışmanın Uygulama Alanı.....	126
KAYNAKLAR.....	127
EKLER	131
ÖZGEÇMİŞ	173

KISALTMALAR

AISI	: American Iron And Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry
EFS	: Extra Fine Structure (Çok İnce Yapı)
EN AW	: European Norm Aluminum Wrought (Avrupa Normu Alüminyum İşlem Alaşımı)
ESR	: Electro Slag Remelting (Elektro Cüruf altı Ergitme)
G	: Geleneksel
GN	: Geleneksel, nitrasyon tabakalı
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilâtı)
K	: Kriyojenik
KM	: Kriyojenik + 1 Meneviş
K2M	: Kriyojenik + 2 Meneviş
KMN	: Kriyojenik + Meneviş, nitrasyon tabakalı
KN	: Kriyojenik, nitrasyon tabakalı
PACVD	: Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition (Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme)
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD	: X-Ray Diffraction



SEMBOLLER

HR_C	: Hardness Rockwell C (Rokwell C Sertliği)
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
K_N	: Temperature Factor (Nitrasyon Sıcaklık Faktörü)
η-karbür	: eta-karbür
μ	: Mikron
N	: Newton
T	: Sıcaklık
T_{Biyet}	: Biyet Sıcaklığı
T_{Kovan}	: Kovan Sıcaklığı
T_C	: Kritik Sıcaklık



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Alüminyum profil imalatında en çok kullanılan 6XXX serisi alaşımların bileşimleri.....	10
Çizelge 2.2 : Ekstrüzyon sanayiinde kullanım alanı bulunan üç farklı sıcak iş çeliğinin mekanik özelliklerinin karşılaştırması.....	27
Çizelge 5.1 : Çalışmada kullanılan malzemelerin alaşım standartları ve analiz sonuçları.....	57
Çizelge 6.1 : Kalıntı östenit analizi sonuçları.....	78
Çizelge 6.2 : Kalıntı gerilme analiz sonuçları.....	79
Çizelge 6.3 : AISI H13 ve AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerin uygulanan ısı işlemler ve kaplamalar sonucunda ulaştıkları sertlik değerleri.....	79
Çizelge 6.4 : 25 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden elde edilen iz derinliği, iz genişliği ve iz alanları verileri.....	102
Çizelge 6.5 : 480 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden elde edilen iz derinliği, iz genişliği ve iz alanları verileri.....	103
Çizelge 6.6 : Çekme deneyi sonuçları (ön denemeler).....	105
Çizelge 6.7 : Ekstrüzyon sanayiinde kullanım alanı bulunan üç farklı sıcak iş çeliğinin mekanik özelliklerinin karşılaştırması.....	105
Çizelge 6.8 : AISI H13 oda sıcaklığında çekme deneyi sonuçları.....	106
Çizelge 6.9 : AISI H10 oda sıcaklığında çekme deneyi sonuçları.....	106
Çizelge 6.10 : AISI H13 sıcak çekme deneyi sonuçları.....	107
Çizelge 6.11 : AISI H10 sıcak çekme deneyi sonuçları.....	107
Çizelge 6.12 : 3095 numaralı boru profilinin imalatında kullanılan kalıpların toplam imalat verileri. K2M ısı işleme reçetesine göre hazırlanan ve CrN kaplama yapılan kalıp tire 9'dur.....	115
Çizelge 6.13 : K2M ısı işleme reçetesine göre hazırlanıp PVD yöntemi ile CrN kaplanan 3095-9 kalıbının imalat verileri. Profilin resim gramajı 1,378 kg/m'dir.....	116
Çizelge 6.14 : Geleneksel ısı işleme reçetesine göre hazırlanan 3095-10 kalıbının imalat verileri. Profilin resim gramajı 1,378 kg/m'dir. Altı çizili imalat numaraları yenilenmiş nitrasyon tabakası ile imalat başlangıcını göstermektedir.....	117



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Basit ve karmaşık şekilli profil tasarımlarına örnekler; (a) Farklı tiplerde halı ve parke kenarı profilleri, (b) soğutucu profili.	8
Şekil 2.2 : Çeşitli sektörlerin hizmetine sunulan profil çeşitleri; (a) Makine imalatı, (b) mimari uygulamalar ve (c) elektronik alanlarında kullanılan çeşitli profiller.	9
Şekil 2.3 : Alüminyum biyet.	11
Şekil 2.4 : Ekstrüzyon presi.	12
Şekil 2.5 : Ekstrüzyon kalıbı.	12
Şekil 2.6 : Direkt ekstrüzyon prensip şeması.	12
Şekil 2.7 : Direkt ve endirekt ekstrüzyon yöntemlerinde zımba hareketiyle basıncın değişimi.	13
Şekil 2.8 : Biyet önısıtma; (a) Biyet önısıtma fırını, (b) ısıtılmakta olan biyet.	15
Şekil 2.9 : Ekstrüzyon işleminde sürtünme mekanizmalarının olduğu bölgeler.	16
Şekil 2.10 : Ekstrüzyonda ısı dengesi akış şeması.	17
Şekil 2.11 : Çıkış sıcaklığının ürüne ve kalıba etkileri.	17
Şekil 2.12 : 6063 alaşımlı iki farklı biyet boyu için zımba hızı-sıcaklık ilişkisi.	19
Şekil 2.13 : 6063 alaşımının ekstrüzyonunda iki farklı kalıp geçiş yüzeyi kalitesi için zımba hızı-sıcaklık ilişkisi.	19
Şekil 2.14 : 6063 alaşımının ekstrüzyonunda iki farklı figür dış kenar toplam uzunluğu için zımba hızı-sıcaklık ilişkisi.	20
Şekil 2.15 : Ekstrüzyon kalıpları; a) porthole (zıvanalı) kalıp, b) solid kalıp.	21
Şekil 2.16 : Solid ve porthole kalıpların karşılaştırmalı yapıları.	22
Şekil 2.17 : Kalıp zıvanasındaki geçiş bölgelerinde fren-akışa göre geçiş boyunun değişimi.	22
Şekil 2.18 : Ekstrüzyon kalıplarında metal akışları; a) Solid kalıpta metal akışı. Porthole kalıpta metal akışı; b) Biyetin köprülerde dört ayrı kola ayrılmaya başlaması ve boşaltma odasına doğru akışı, c) Ayrılan kolların boşaltma odasını doldurması ve kaynama odasına girişi, d) Kaynama odasına giren kolların birleşerek kaynaması, e) Kalıbın geçişlerinde figürün oluşumu ve f) Figürün kalıptan çıkışı.	23
Şekil 2.19 : AISI H13 sıcak iş çeliğinin ideal ve ideal olmayan mikroyapıları. Siyah çizginin üzerinde kalan yapılar ideal yapılardır.	26
Şekil 2.20 : AISI H13 sıcak iş çeliğinde yüksek sıcaklıkta tutma süresinin sertliğe etkisi.	27
Şekil 3.1 : Ekstrüzyon kalıplarında genel olarak karşılaşılan hasar türlerinin dağılımı.	31
Şekil 3.2 : Solid kalıplarda hasar türleri ve dağılımları.	32
Şekil 3.3 : Porthole kalıplarda hasar türleri ve dağılımları.	32
Şekil 3.4 : Kalıp türüne bağlı olarak kırılma ve aşınma hasarlarının oranları.	32
Şekil 3.5 : Porthole kalıp zıvanasında köprü kısımlarındaki çatlaklar.	34
Şekil 3.6 : Kalıp geçişinin giriş tarafındaki aşınma izleri.	34

Şekil 3.7 : Aşınma terimleri ve temas tipleri.....	35
Şekil 3.8 : Kalıp geçişinde ağır aşınma izleri.....	37
Şekil 3.9 : Aşınan yüzeylerin birbiri üzerinde kayma hareketi esnasında oluşan parçacıkların, olası hareket mekanizmaları. 1-) Dönen, 2-) Bağlı Kayan, 3-) Yuvarlanan ve 4-) Adhezyon veya Sinterlenme tesirli yuvarlanma mekanizması.	38
Şekil 3.10 : Farklı sıcaklıklar için aşınma süreçlerini göstren Jiang Diyagramının geliştirilmiş versiyonu.	38
Şekil 3.11 : Adhezif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi.	39
Şekil 3.12 : Abrazif aşınma türleri.	41
Şekil 3.13 : Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi. a) kuvvet ile hareketin aynı yönde olduğu hal, b) kuvvetin yüzeye dik olduğu hal.	42
Şekil 3.14 : Yorulma çatlağının aşamaları.	44
Şekil 4.1 : Nitrasyon potansiyel diyagramı.	47
Şekil 4.2 : Nitrasyon tabakasının genel yapısı.	47
Şekil 4.3 : ϵ ve γ' nitrürlerin oluşumunun şematik gösterimi.	48
Şekil 4.4 : ● Demir ve ya yer alan atomlar, ● karbon atomu. a) Martenzit düzlemi. b) Latisin distorsiyonu ve karbon atomunun yer değiştirmesi ile HMK latisten ortorombik latise dönüşüm. c) HMK-ortorombik dönüşümün şematik gösterimi.	54
Şekil 4.5 : Kriyojenik ısıtım işlem düzeneğinin şematik gösterimi.	55
Şekil 5.1 : Geleneksel ısıtım işlem reçetesinin aşamaları.	58
Şekil 5.2 : Kriyojenik ısıtım işlem reçetesinin aşamaları.	59
Şekil 5.3 : KM ısıtım işlem reçetesinin aşamaları.	60
Şekil 5.4 : a)Nikon Eclipse L150 Optik mikroskop, b) Zeiss Evo 50 / Bruker EDS ataçmanlı SEM (Borçelik Ar-Ge Lab).	62
Şekil 5.5 : a) AreX L Kalıntı östenit tayin cihazı, b) StressX robotik kalıntı gerilme ölçüm cihazı.	63
Şekil 5.6 : CSM disk üzerinde bilye deney cihazı. a) Genel görünümü, b) Çalışma prensibi.	63
Şekil 5.7 : CSM Disk üzerinde bilye cihazının deney ekranı.	64
Şekil 5.8 : Aşınma izinin kesitten şematik görünümü.	64
Şekil 5.9 : (a) Nikon SMZ 800 stereo mikroskop ve Leica DM 6000 M optik mikroskop.	65
Şekil 5.10 : Isıl döngü deneylerinde kullanılan AISI H10 ve AISI H13 nitrasyonlu sıcak iş çeliği numuneler.	66
Şekil 5.11 : (a) Isıl döngü deneyleri için kullanılan fırın ve (b) Metkon MH-6 Mikro Vickers sertlik cihazı.	66
Şekil 5.12 : DuroScan 50 G5 Micro Vickers sertlik ölçüm cihazı.	67
Şekil 5.13 : DIN 50190-3'e göre nitrasyon tabakasının derinliğinin tespiti.	67
Şekil 5.14 : Çentikli darbe deneyi numunesinin ASTM E23 standartına göre şekli ve boyutları.	68
Şekil 5.15 : 3095 numaralı boru profilinin (a) teknik resmi, (b) kalıp kapağı ve (c) kalıp zıvanası.	69
Şekil 5.16 : (a) Romidot Romishape/DT profil ölçüm cihazı ve (b) Mitutoyo SJ-400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.	70
Şekil 6.1 : Üç farklı ısıtım işlem reçetesine göre hazırlanan AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin nitrasyon tabakalarının ve merkez yapılarının karşılaştırılması.	71

Şekil 6.2 : Üç farklı ısıt işlemlerine göre hazırlanan DIN 1.2344 sıcak iş çeliği numunelerin beyaz tabaka kalınlık ölçümleri.	72
Şekil 6.3 : Isıt işlemleri yurtiçinde yapılan AISI H13 numunelerin yüzeye yakın yapılarıyla merkez yapılarının karşılaştırılması.	73
Şekil 6.4 : Isıt işlemleri yurtiçinde yapılan AISI H10 numunelerin yüzeye yakın yapılarıyla merkez yapılarının karşılaştırılması.	73
Şekil 6.5 : Geleneksel ısıt işlemlerine göre hazırlanmış Geleneksel (G), sonrasında nitrasyon yapılmış (GN) ve üç defa ısıt döngüye girmiş (GN-3) AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin XRD paternleri.	75
Şekil 6.6 : Kriyojenik ısıt işlemlerine göre hazırlanmış Kriyojenik (K), sonrasında nitrasyon yapılmış (KN), Kriyojenik işlemden sonra menevişlenmiş (KM) ve nitrasyon yapıp iki defa ısıt döngüye girmiş (KMN-2) AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin XRD paternleri.	76
Şekil 6.7 : Kalıntı östenit tayini için numune planı ve analiz sonuçları.	77
Şekil 6.8 : AISI H13 kriyojenik numunenin AreX kalıntı östenit cihazı ile kalıntı östenit analizi sonucunda elde edilen XRD paterni.	78
Şekil 6.9 : Sıcak iş çeliği numunelerin işlemler grupları bazında sertlik değerlerinin karşılaştırılması.	80
Şekil 6.10 : Isıt döngüye girmemiş numunelerin sertlik ölçümü sonrası fotoğrafları. (a) GN, (b) KN ve (c) KMN.	81
Şekil 6.11 : Isıt döngüye girmeden önce numunelerin kesitten ölçülen sertlik değerlerinin karşılaştırılması.	82
Şekil 6.12 : Üçüncü ısıt döngünün ardından yapılan sertlik ölçümü fotoğrafları. (a) GN, (b) KN ve (c) KMN.	82
Şekil 6.13 : Üçüncü ısıt döngüye girmiş numunelerin kesitten ölçülen sertlik değerlerinin karşılaştırılması.	83
Şekil 6.14 : Beşinci ısıt döngünün ardından yapılan sertlik ölçümü fotoğrafları. (a) GN, (b) KN ve (c) KMN.	83
Şekil 6.15 : Beşinci ısıt döngüye girmiş numunelerin kesitten ölçülen sertlik değerlerinin karşılaştırılması.	83
Şekil 6.16 : Numunelere uygulanan 5 adet ısıt döngü sonucunda elde edilen sertlik değerlerinin ortalamaları ve sapmaları.	84
Şekil 6.17 : Isıt işlemsiz ve GN ısıt işlemlerine göre işlemler görmüş numunelerin ortam ve ekstrüzyon sıcaklığındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.	86
Şekil 6.18 : K ısıt işlemlerine göre işlemler görmüş nitrasyonsuz ve nitrasyonlu numunelerin ortam ve ekstrüzyon sıcaklığındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.	86
Şekil 6.19 : KM ısıt işlemlerine göre işlemler görmüş nitrasyonsuz ve nitrasyonlu numunelerin ortam ve ekstrüzyon sıcaklığındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.	87
Şekil 6.20 : Isıt işlemsiz, K ve KM numunelerin ekstrüzyon şartlarındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.	87
Şekil 6.21 : GN, KN ve KMN numunelerin ekstrüzyon sıcaklığındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.	88
Şekil 6.22 : Isıt işlemsiz ve G ısıt işlemleri AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) İşlemsiz, b) GN.	89

Şekil 6.23 :	Isıl işlemsiz ve G ısıtılmalı AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) İşlemsiz, b) GN....	90
Şekil 6.24 :	Isıl işlemsiz ve G ısıtılmalı AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) İşlemsiz, b) GN.....	91
Şekil 6.25 :	Isıl işlemsiz ve G ısıtılmalı AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) İşlemsiz, b) GN.	92
Şekil 6.26 :	K ısıtılmalı reçetesine göre hazırlanmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) Nitrasionsuz, b) nitrasyonlu.	93
Şekil 6.27 :	K ısıtılmalı AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) Nitrasionsuz, b) nitrasyonlu.	94
Şekil 6.28 :	K ısıtılmalı reçetesine göre hazırlanmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) Nitrasionsuz, b) nitrasyonlu.	95
Şekil 6.29 :	K ısıtılmalı AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) Nitrasionsuz, b) nitrasyonlu.	96
Şekil 6.30 :	KM ısıtılmalı reçetesine göre hazırlanmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) Nitrasionsuz, b) nitrasyonlu.	97
Şekil 6.31 :	KM ısıtılmalı AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) Nitrasionsuz, b) nitrasyonlu.	98
Şekil 6.32 :	KM ısıtılmalı reçetesine göre hazırlanmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) Nitrasionsuz, b) nitrasyonlu.	99
Şekil 6.33 :	KM ısıtılmalı AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) Nitrasionsuz, b) nitrasyonlu.	100
Şekil 6.34 :	İşlemsiz, K ve KM ısıtılmalı reçetelerine göre hazırlanmış nitrasionsuz numunelerin ekstrüzyon sıcaklığındaki aşınma iz kesitlerinin karşılaştırılması.	101
Şekil 6.35 :	G, K ve KM ısıtılmalı reçetelerine göre hazırlanmış nitrasyonlu numunelerin ekstrüzyon sıcaklığındaki aşınma iz kesitlerinin karşılaştırılması.	102
Şekil 6.36 :	PVD kaplamalı numunelerin aşınma izlerinin karşılaştırılması.	103
Şekil 6.37 :	a) Numunelerin 480 °C'taki aşınma davranışlarının karşılaştırılması. b) Sertlik-rölatif aşınma direnci ilişkisi.....	104
Şekil 6.38 :	Nitrasionsuz ve nitrasyonlu AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtılmalı reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi	

numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma yüzeylerinin karşılaştırılması.....	109
Şekil 6.39 : Nitrasjonsuz ve nitrasyonlu AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtım işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma yüzeylerinin karşılaştırılması.....	110
Şekil 6.40 : Çeliklerin tavlama renklerinin karşılık geldiği sıcaklıklar.....	111
Şekil 6.41 : Nitrasjonsuz ve nitrasyonlu AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtım işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma şekillerinin karşılaştırılması.....	111
Şekil 6.42 : Nitrasjonsuz ve nitrasyonlu AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtım işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma şekillerinin karşılaştırılması.....	112
Şekil 6.43 : Nitrasjonsuz ve nitrasyonlu AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtım işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma yüzeylerinin stereo mikroskop ile çekilmiş genel ve detay görüntülerinin karşılaştırılması.....	113
Şekil 6.44 : Nitrasjonsuz ve nitrasyonlu AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtım işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma yüzeylerinin stereo mikroskop ile çekilmiş genel ve detay görüntülerinin karşılaştırılması.....	113
Şekil 6.45 : Ortam sıcaklığında ve çalışma sıcaklığında (480 °C) nitrasjonsuz ve nitrasyon şartlarında bekletilen AISI H13 numunelerin darbe enerjilerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 6.46 : Ortam sıcaklığında ve çalışma sıcaklığında (480 °C) nitrasjonsuz ve nitrasyon şartlarında bekletilen AISI H10 numunelerin darbe enerjilerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 6.47 : 3095-9 numaralı kalıbın hiç imalat yapmamış ve son baskıdan hemen önceki durumunun karşılaştırması; a) Zıvananın ilk durumu, b) kapağın ilk durumu, c) zıvananın son durumu, d) kapağın son durumu.....	118
Şekil 6.48 : Geçiş boyunun yarısına kadar aşınma.....	118
Şekil 6.49 : (a) 3095-9 ve (b) 3059-10 kalıpları ile imal edilen profillerin ekstrüzyon yönüne dik dış yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	119
Şekil 6.50 : 3095-9 ve 3059-10 kalıpları ile imal edilen profillerin ekstrüzyon yönünde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri. 3095-9 (a) Profilin dış yüzeyi ve (b) profilin iç yüzeyi; 3095-10 (c) Profilin dış yüzeyi ve (d) profilin iç yüzeyi.....	120
Şekil A.1 : DIN 1.2714 sıcak iş çeliği teknik veriler.....	133
Şekil A.2 : DIN 1.2344 sıcak iş çeliği teknik veriler.....	134
Şekil A.3 : DIN 1.2365 sıcak iş çeliği teknik veriler.....	135
Şekil B.1 : AISI H13 numunelerin ısıtım işlem şartlarına bağlı olarak mikroyapılarının karşılaştırılması.....	137
Şekil B.2 : AISI H10 numunelerin ısıtım işlem şartlarına bağlı olarak mikroyapılarının karşılaştırılması.....	138
Şekil B.3 : AISI H13 numunelerin SEM fotoğrafları (Sakarya Üni. Merkez Lab.).....	139

Şekil B.4 : AISI H13 numunelerin SEM fotoğrafları (Sakarya Üni. Merkez Lab.).	140
Şekil B.5 : AISI H13 numunelerin SEM fotoğrafları	141
Şekil B.6 : AISI H10 numunelerin SEM fotoğrafları.	142
Şekil C.1 : AISI H13 GN numunenin EDS Analiz raporu	143
Şekil C.2 : AISI H13 KMN numunenin EDS analiz raporu.	144
Şekil C.3 : AISI H10 KMN numunenin EDS analiz raporu.	145
Şekil C.4 : AISI H10 KMN numunenin EDS analiz raporu.	146
Şekil D.1 : AISI H13 (DIN 1.2344) numunenin östenitleme sonrası kalıntı östenit miktarı.	147
Şekil D.2 : AISI H13 numunenin G ısıt işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.....	148
Şekil D.3 : AISI H13 numunenin K işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.....	149
Şekil D.4 : AISI H13 numunenin KM işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.	150
Şekil D.5 : AISI H10 (DIN 1.2365) numunenin östenitleme sonrası kalıntı östenit miktarı.	151
Şekil D.6 : AISI H10 numunenin G ısıt işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.....	152
Şekil D.7 : AISI H10 numunenin K işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.....	153
Şekil D.8 : AISI H10 numunenin KM işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.	154
Şekil E.1 : AISI H13 (DIN 1.2244) numunenin östenitleme sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.	155
Şekil E.2 : AISI H13 numunenin G ısıt işlem sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.	156
Şekil E.3 : AISI H13 numunenin kriyojenik işlem sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.	157
Şekil E.4 : AISI H13 numunenin KM işlem sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.	158
Şekil E.5 : AISI H10 numunenin östenitleme sonrası kalıntı gerilme raporu.	159
Şekil E.6 : AISI H10 numunenin G ısıt işlem sonrası kalıntı gerilme analiz raporu.	160
Şekil E.7 : AISI H10 numunenin kriyojenik işlem sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.	161
Şekil E.8 : AISI H10 numunenin KM işlem sonrası gerilme analizi raporu.	162
Şekil F.1 : AISI H13 GN numunelerin ısıt döngüler sonunda elde edilen sertlik profilleri.....	163
Şekil F.2 : AISI H13 KMN numunelerin ısıt döngüler sonunda elde edilen sertlik profilleri.....	164
Şekil F.3 : AISI H10 GN numunelerin ısıt döngüler sonunda elde edilen sertlik profilleri.....	165
Şekil F.4 : AISI H10 KMN numunelerin ısıt döngüler sonunda elde edilen sertlik profilleri.....	166
Şekil G.1 : Aşınma izi profilleri 25 °C. a) İşlemsiz-1, b) İşlemsiz-2, GN-1, d) K-1, e) KN-1, f) KN-2, g) KN-3, h) KN4.	167
Şekil G.2 : Aşınma izi profilleri 25°C. a) KM-1, b) KM-2, c) KM-3, d) KMN-1, e) KMN-2, f) KMN-3.....	168
Şekil G.3 : Aşınma izi profilleri 480 °C. a) İşlemsiz -1, b) işlemsiz-2, c)İşlemsiz 3, d) İşlemsiz 4, e) GN-1, f) GN-2, g) GN-3, h) GN-4.	169
Şekil G.4 : Aşınma izi profilleri 480 °C. a) K-1, b) K-2, c) K-3, d) K-4, e) KN-1, f) KN-2, g) KN-3, h) KN-4.	170
Şekil G.5 : Aşınma izi profilleri 480 °C. a) KM-1, b) KM-2, c) KM-3, d) KM-4, e) KMN-1, f) KMN-2, g) KMN-3, h) KMN-4.....	171

SIFIR ALTI ISIL İŞLEM İLE EKSTRÜZYON KALIPLARININ ISIL İŞLEM SÜREÇLERİNİN KISALTILMASI VE PVD KAPLAMA İLE KALIP ÖMRÜNÜN UZATILMASI

ÖZET

Belli bir kesite sahip olan ve kesit/boy oranı küçük olan, başka bir deyişle, boyu eninden çok daha fazla olan şekillendirilmiş malzemeler profil olarak tanımlanır. Profil üretimi için birçok metal gibi alüminyum da çekme veya ekstrüzyon metotları ile işlenir. Ancak, karmaşık şekilli profiller için en çok kullanılan yöntem ekstrüzyondur.

Ekstrüzyon, alüminyum biyetin, presin sağladığı büyük kuvvet ile kalıp içerisinden geçirilerek, kalıbın şekline sahip olan profilin elde edilmesi olarak tanımlanabilir.

Alüminyum ekstrüzyonu sıcak olarak yapılır. Alüminyum biyetler alaşımına bağlı olarak 420-480 °C'a ısıtılır, kalıplar en az 450 °C civarına ısıtılmış olmalıdır ve ekstrüzyon presinden çıkan profilin sıcaklığı 500 °C'ın üzerindedir.

Rekabete dayalı ekstrüzyon piyasasında hızlı teslimat, maliyet ve kalite en önemli olgular halini almıştır. Kalite gereksinimini karşılamak için ekstrüzyon kalıbının performansı kritik öneme sahiptir. Kalıp performansı ürün kalitesini, verimliliği, ıskarta miktarını ve ürün tasarımını etkilemektedir. Özellikle otomotiv ve ileri teknoloji gerektiren uygulamalar için talep edilen ürün miktarının artması ile birlikte toleransların çok daha dar sınırlara girmesi ve çok daha üstün yüzey özelliklerinin istenmesi sonucunda kalıp ömürleri ve performansı ön plana çıkmıştır.

Bir ekstrüzyon kalıbının en önemli kısmı *Kalıp Geçişi* olarak adlandırılan bölgedir. Kalıp geçişi, ürünün ölçülerinin, geometrisinin ve yüzey kalitesinin sağlanmasını, ekstrüzyon sırasında farklı kesitlerin debilerinin kontrolü ile ürünün geometrik bütünlüğünün korunmasını sağlar. Kalıp geçişinin aşınma ve deformasyon direnci kalıbın imalat ömrünü belirleyen kısımdır. Kalıp içindeki sürtünme, metal akış hızını belirleyen mekanizmadır. Kalıp figürünün herhangi bir yerindeki kalıp geçişinin boyu (kalınlığı), bu noktadan akan metalin ne kadar frenleneceğini ya da serbest bırakılacağını belirler.

Tüm dünyada alüminyum ekstrüzyon kalıbı konusunda en yaygın ve çok iyi tanınan malzeme sıcak iş takım çeliği olan AISI H13 çeliğidir. Bir ekstrüzyon kalıbının performansı kalıp malzemesinin göstereceği performansa bağlıdır. Alüminyum ekstrüzyonunda en yaygın karşılaşılan kalıp hasar türleri sıcak aşınma, plastik deformasyon ve çatlamadır.

Kalıptan malzeme akışı sırasında özellikle kalıp geçişlerinde aşınma nedeniyle ölçüsel ve geometrik bozulmalar, kalıp malzemesinde sürünme ve yorulma sonucunda deformasyon ve hasarlar oluşmaktadır.

Kalıbın aşınma direncini iyileştirmek ve bunun sonucunda kalıp maliyetlerini azaltmak amacıyla ekstrüzyon firmaları tarafından çok sayıda yüzey işleme tekniği

denenmektedir. Kalıp aşınmasını önlemek amacıyla yapılan yüzey işlemleri kalıp ömrünün artması ve ürün yüzey kalitesinin iyileşmesi açısından son derece önemli konulardır.

Geleneksel olarak ekstrüzyon sanayiinde nitrasyon işlemi uygulanmaktadır. Nitrasyon, sertleştirilmiş yüzey elde etmek için metal malzemenin yüzeyine azotun difüze etmesinin sağlandığı ısıtma işlemidir.

Özellikle kalıp geçişinde gerçekleşen, başta adhezif ve abrazif aşınma türlerinin ağırlık kazandığı aşınma hasarını önlemek ya da aşınma sürecini geciktirmek için PVD kaplamalar umut vaat etmektedir.

Aşınma direncini arttırmanın bir diğer yolu da kriyojenik ısıtma işlemidir. Kriyojenik ısıtma işlemi yüksek aşınmaya maruz kalan takımlarda aşınma direncini artırma amaçlı uygulanan modifiye edilmiş bir soğutma işlemidir. Takım çeliklerine uygulanan geleneksel sertleştirme yöntemlerinde çelik östenitleme işleminin ardından çelik cinsine bağlı olarak çeşitli soğutma ortamlarında minimum mümkün sıcaklık olan oda sıcaklığına kadar soğutulur ve martenzitik yapı elde edilir. Yüksek alaşımlı çeliklerde ise sertleşmeyi sağlayan martenzitik dönüşüm belirli bir sıcaklıkta başlar ve oda sıcaklığında sona ermez. Oda sıcaklığına kadar yapılan konvansiyonel soğutmayla bu tür çeliklerin bünyesinde yüksek oranda kalıntı östenit olarak adlandırılan kararsız faz bulunur.

Kriyojenik ısıtma işlemi takiben uygulanan menevişleme işleminde ise konvansiyonel sertleştirme işleminde gözlenmeyen η -karbürler çelik matrisinde çöker. Böylece hem kalıntı östenitin giderilmesi hem de η -karbür çökmesine bağlı olarak yüksek alaşımlı çeliklerde maksimum aşınma direnci kazanımı sağlanmış olur.

Kalıp malzemelerine geleneksel ısıtma işlemde uygulanan üç adet meneviş kademesinin kriyojenik ısıtma işlemi vasıtası ile tek kademeye düşürülmesi ve uygulanacak ince film sert kaplama ile kalıbın aşınma direncinin arttırılması, sürtünme katsayısının düşürülmesi ile kalıp ömrünün ve verimliliğinin arttırılması hedeflenmektedir.

Bu bilgiler ışığında, geleneksel ısıtma işlemi reçetesi ile kriyojenik ısıtma işlemi de içeren alternatif ısıtma işlemi reçetelerinin alüminyum ekstrüzyon kalıplarının aşınma direncine ve mekanik özelliklerine olan etkilerinin araştırılacağı deneysel ve saha çalışmaları planlanmıştır.

Bu amaçla farklı alaşımdaki iki sıcak iş çeliği kütükten numuneler alınarak ısıtma işlemi reçetelerine göre ısıtma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bu numune parçalarından oluşturulan plana uygun olarak aşınma diskleri, darbe deneyi numuneleri, çekme deneyi numuneleri, ısıtma döngü ve sertlik numuneleri hazırlanmıştır. Sonrasında bir grup numune nitrürlendikten sonra içlerinden bir kısmı ayrılarak CrN PVD kaplama uygulanmıştır. Darbe numuneleri nitrasyon işleminden olumsuz etkilendikleri için nitrasyon ile eş süre ve sıcaklıkta bir ısıtma işlemi tabi tutularak değerlendirmeye alınmıştır.

Hazırlanan numune gruplarından metalografi ve SEM numuneleri alınarak incelenmiştir.

Farklı ısıtma işlemi reçetelerine göre hazırlanmış kaplamasız, nitrasyonlu ve nitrasyon üzerine ince sert film kaplamalı aşınma diskleri ile oda sıcaklığında ve çalışma sıcaklığında disk üzerinde bilye cihazı kullanılarak aşınma deneyleri gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yine aynı şekilde oda ve çalışma

sıcaklığı şartlarında çentikli darbe testi yapılarak, numunelerin kırılma şekilleri ve darbe enerjileri mukayese edilmiştir.

Ekstrüzyon prosesi sırasında kalıpların karşı karşıya kaldığı ısı döngülerin, basınç ve aşınma etkileri göz ardı edilerek, özellikle nitrasyon tabakasına etkilerini gözlemlemek amacıyla sertlik profilleri oluşturulmuştur.

Laboratuvar deneyleri verilerine göre iyi sonuçlar alınan kriyojenik işlem ve sonrasında tek meneviş kademesinden oluşan reçeteye göre alüminyum profil imalatı kalıbı denemesi yapılması kararlaştırılmıştır. Atölye güvenliği açısından bu reçeteye bir meneviş kademesi ilave edilmesi gerekmiştir.

Aynı sıcak iş çeliği kütükten ekstrüzyon kalıbı imal edilerek kararlaştırılan kriyojenik ısı işlem reçetesi uygulandıktan sonra CrN kaplanarak, kalıp iptal edilene dek alüminyum profil imalatı yapılarak kayıt altına alınmıştır. Geleneksel metot ile imal edilmiş, aynı profile ait bir kalıbın verileri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu deneme sonucunda aşağıdaki özet veriler elde edilmiştir:

- CrN kaplamalı deneme profil kalıbı ile yapılan imalatın verilerine bakıldığında, geleneksel kalıplara göre toplam imalat miktarının ortalama iki katına çıktığını söyleyebiliriz.
- Geleneksel profil kalıbının nitrasyon tabakası, imalat sürecinde iki defa yenilenmiştir.
- CrN kaplamalı deneme profil kalıbına imalat sürecinde herhangi bir işlem yapılmamıştır.
- Kriyojenik ısı işlemli ve CrN kaplamalı kalıp ile teorik (teknik resim) gramajının altında imalat yapıldığı için benzer imalata göre daha az alüminyum kullanılarak (yaklaşık 460 kg) profil imalatı gerçekleştirilmiştir.
- İmalat iki katına çıktığı için yaklaşık olarak bir kalıp maliyeti, geleneksel ısı işlem süreci ve beş nitrasyon işlemi tutarında tasarruf sağlanmıştır.



SHORTENING OF HEAT TREATMENT PROCESSES OF EXTRUSION DIES BY USING CRYOGENIC HEAT TREATMENT AND EXTENDING THE EXTRUSION DIE LIFE WITH PVD COATING

SUMMARY

Shaped materials having a certain cross-section and having a small cross-section / length ratio, i.e., much larger in length, are defined as profiles. Like most metals, aluminum is processed by drawing or extrusion methods for profile production. However, extrusion is the most commonly used method for complex shaped profiles.

Extrusion can be defined as passing the aluminum billet through the extrusion die with the great force provided by the press to obtain the profile having the shape of the die.

Aluminum extrusion is processed at elevated temperatures. The aluminum billets are heated to 420-480 °C, depending on the alloy, the extrusion dies must be heated to at least 450 °C, and the profile that is coming out of the extrusion press is above 500 °C.

In the competitive extrusion market, fast delivery, cost and quality have become the most important aspects. The performance of the extrusion die is critical to meet the quality requirement. Extrusion die performance, affects product quality, efficiency, scrap quantity and product design. Extrusion die life and performance have come to the forefront as tolerances have entered narrower limits and superior surface properties have been demanded with the increase in the amount of product demanded, especially for automotive and high technology applications.

The most important part of an extrusion die is its so-called Die Bearing. The extrusion die bearing ensures that the dimensions, geometry and surface quality of the product are maintained, and that the geometric integrity of the product is maintained by controlling the flow rates of the different sections during extrusion. The wear and deformation resistance of the die bearing is the point that determines the service life of the extrusion die. Friction in the die is the mechanism that determines the metal flow rate. The length (thickness) of the die bearing at any location of the die figure determines how much braking or release of the metal flowing at this point.

The most common and well-known material for the die production for aluminum extrusion all over the world is AISI H13 hot work tool steel. The performance of an extrusion die depends on the performance of the die material. The most common types of die damage in aluminum extrusion are hot wear, plastic deformation (deflection) and cracking.

During the flow of the material from the extrusion die, especially due to wear in the die bearings dimensional and geometric deterioration occurs. Because of creep and fatigue failures related with cycling process of extrusion, deformation and damage of the extrusion die occur.

Extrusion companies to improve the wear resistance of the extrusion dies are trying numerous surface treatment techniques and consequently to reduce die costs. Surface treatments to prevent die wear are extremely important issues in terms of increasing extrusion die life and improving product surface quality.

Traditionally nitriding is applied in the extrusion industry. Nitriding is the heat treatment process in which nitrogen is diffused to the surface of the metal material to obtain a hardened surface.

PVD coatings are promising in order to prevent wear damage or delay the wear process, especially in the die bearing section of the die, in which mainly adhesive and abrasive wear types occur.

Another way to increase the abrasion resistance is cryogenic heat treatment. Cryogenic heat treatment is a modified cooling process for increasing wear resistance in tools exposed to high wear. In conventional hardening methods applied to tool steels, after austenitizing the steel, it is cooled to room temperature, which is the minimum possible temperature in various cooling environments depending on the type of steel. With this process, martensitic structure is obtained. In high alloyed steels, the martensitic transformation, which enables hardening, starts at a certain temperature and does not end at room temperature. With conventional cooling to room temperature, these steels have a highly metastable phase called residual austenite.

In the tempering process followed by cryogenic heat treatment, ϵ carbides, which are not observed in the conventional hardening process, precipitate in the steel matrix. Thus, both the removal of residual austenite and the ϵ carbide deposition result in maximum wear resistance gain in high alloy steels.

It is aimed to reduce the three tempering stages applied to extrusion die materials in conventional heat treatment to single stage by means of cryogenic heat treatment and increase the wear resistance of the die by thin film hard coating to be applied, to increase the die life and efficiency by decreasing the friction coefficient.

By the help of this information, experimental and field studies were planned to investigate the effects of conventional heat treatment recipe and alternative heat treatment recipes including cryogenic heat treatment on the wear resistance and mechanical properties of aluminum extrusion dies.

For this purpose, samples were taken from two hot work steel billets of different alloys and heat treatments were carried out according to heat treatment recipes. Wear discs, impact test specimens, tensile test specimens, thermal cycling and hardness specimens were prepared in accordance with the plan formed from these sample pieces. Then a group of samples was nitrided and then CrN PVD coating was applied. Since the nitration process negatively affected the impact samples, they were evaluated by being subjected to a heat treatment at the same time and temperature as the nitration.

Metallography and SEM samples were taken from the prepared sample groups and examined.

The results were compared by using uncoated, nitrided and thin hard film coated wear test specimen discs prepared according to different heat treatment recipes. By using the ball-on-disc test device, wear tests performed at room temperature and extrusion process temperatures. Similarly, fracture patterns and fracture energies of

the samples were compared by performing the V notched impact test at room and operating temperature conditions.

In order to observe the effects of the thermal cycles on the nitration layer that the extrusion dies are exposed to during the extrusion process, excluding the effect of the pressure and abrasion, hardness profiles were formed.

According to the data obtained from the laboratory experiments, it was decided to perform the aluminum profile production with an extrusion die that is produced according to the recipe consisting of cryogenic process and single tempering stage. For the safety of the workshop, a tempering level had to be added to this recipe.

The same hot work steel billet was used to produce the extrusion die. After the cryogenic heat treatment recipe was applied, the extrusion die nitride and then CrN PVD coating is applied. The aluminum profile production continued with this extrusion die until the die was deflected. All the production data was recorded and compared with the data of a traditionally produced extrusion die of the same aluminum profile.

The following summary data was obtained as the results of this experiment:

- By the help of the data of manufacturing with CrN coated test profile die, we can say that the total production amount is doubled on average compared to the traditional extrusion dies.
- The nitration layer of the traditional profile die was renewed twice during the manufacturing process.
- CrN coated test profile die was not subjected to any maintenance process like re-nitration or re-coating during the manufacturing process.
- Since cryogenic heat treatment and CrN coated extrusion dies were produced under tolerances of the drawing unit weight (kg/m), profile production was realized by using less aluminum (approximately 460 kg) compared to similar production.
- As the manufacturing doubled, a cost of an extrusion die, plus a conventional heat treatment process and five nitration processes costs were saved.



1. GİRİŞ

Metaller, medeniyetin gelişmesinde önemli görev yapmaktadır. Bu gelişme sürecinde, alüminyum kadar önemli rol oynayan az sayıda metal bulunur. Alüminyum kendine has özellikleri ile çok eski çağlardan beri bilinen, ağaç, bakır, demir ve çelik gibi birçok malzemeden daha önem kazanmış bulunmaktadır. 19. yüzyılın ikinci yarısından beri endüstriyel çapta üretilen çok genç bir metal olmasına rağmen, bugün bakır ve alaşımları, kurşun, kalay ve çinko gibi tüm demir dışı metallerin toplam kullanımından daha çok miktarda kullanılmaktadır.

Belli bir kesite sahip olan, (bu kesitin şekli basit ve düz veya amaca uygun girift tasarımlar olabilir) ve kesit/boy oranı küçük olan, başka bir deyişle, boyu eninden çok daha fazla olan şekillendirilmiş malzemeler profil olarak tanımlanır. Profil üretimi için birçok metal gibi alüminyum da çekme veya ekstrüzyon metotları ile işlenir. Ancak, karmaşık şekilli profiller için en çok kullanılan yöntem ekstrüzyondur [1].

Genel olarak ekstrüzyon, alüminyum biyetin, presin sağladığı büyük kuvvet ile kalıp içerisinden geçirilerek, kalıbın şekline (figür) sahip olan profilin elde edilmesi olarak tanımlanabilir.

Alüminyum ekstrüzyonu sıcak olarak yapılır; biyetler 420-480 °C'a ısıtılır, kalıplar 450 °C civarına ısıtılmış olmalıdır ve presten çıkan profilin sıcaklığı 500 °C'ın üzerindedir [1].

Rekabete dayalı ekstrüzyon piyasasında hızlı teslimat, maliyet ve kalite en önemli olgular halini almıştır. Kalite gereksinimini karşılamak için ekstrüzyon kalıbının performansı kritik öneme sahiptir. Kalıp performansı ürün kalitesini, verimliliği, ıskarta (araiş) miktarını ve ürün tasarımını etkilemektedir. Özellikle otomotiv ve ileri teknoloji gerektiren uygulamalar için talep edilen ürün miktarının artması ile birlikte toleransların çok daha dar sınırlara girmesi, dikişli boru sınıfına giren ürünlerden daha yüksek beklentilerin oluşması ve çok daha üstün yüzey özelliklerinin istenmesi sonucunda kalıp ömürleri ve performansı ön plana çıkmıştır [2].

Dolu kesitli ve içi boş kesitli ürünleri üretmek için iki temel tipte kalıp kullanılmaktadır. Dolu kesitli ürünlerin kalıpları *Solid*, içi boş kesitli ürünlerin kalıpları da *Porthole (Zıvanalı)* kalıplar olarak adlandırılmaktadır.

Bir ekstrüzyon kalıbının en önemli kısmı *Kalıp Geçişi* olarak adlandırılan bölgesidir. Kalıp geçişi, ürünün ölçülerinin, geometrisinin ve yüzey kalitesinin sağlanmasını, ekstrüzyon sırasında farklı kesitlerin akış debilerinin kontrolü ile ürünün geometrik bütünlüğü ile doğrusallığının korunmasını, en sonunda da kalıbın imalat ya da servis ömrünü belirleyen kısımdır. Kalıp içindeki sürtünme, metal akış hızını belirleyen mekanizmadır. Kalıp figürünün herhangi bir yerindeki kalıp geçişinin boyu (kalınlığı), bu noktadan geçen alüminyumun, diğer kısımlara göre ne kadar frenleneceğini ya da serbest bırakılacağını belirler [2].

Kalıp imalatının en önemli konusu kalıp malzemesinin özellikleri ve buna bağlı olarak malzeme seçimidir. Alüminyum ekstrüzyon işlemi ortalama olarak 565 °C civarında yapılan sıcak şekil verme işlemidir. Tüm dünyada alüminyum ekstrüzyon konusunda en yaygın ve çok iyi tanınan malzeme sıcak iş takım çeliği olan AISI H13 (DIN 1,2344; X40CrMoV51) çeliğidir [2].

Bir ekstrüzyon kalıbının performansı kalıp malzemesinin göstereceği performansa bağlıdır. Alüminyum ekstrüzyonunda en yaygın karşılaşılan kalıp hasar türleri sıcak aşınma, plastik deformasyon ve çatlamadır [2].

Kalıptan malzeme akışı sırasında özellikle kalıp geçişlerinde aşınma nedeniyle ölçüsel ve geometrik bozulmalar, kalıp malzemesinde sürtünme ve yorulma sonucunda deformasyon ve hasarlar oluşmaktadır.

Kalıpta gerçekleşen bu olaylar sonucunda üründe ölçüsel bozukluklar, fonksiyon bozuklukları (ürünün montajı, çalışması vb.), yüzey hataları ile karşılaşılmaktadır.

Tüm bu olaylar zinciri, işletmede:

- Malzeme kayıplarına (kalıp ömrünün kısalması sonucunda hurdaya çıkan kalıplar ve daha fazla kalıp üretimine gerek duyulması, hatalar nedeniyle sakat parça oluşumu ve buna bağlı olarak alüminyum geri dönüşüm sürecindeki malzeme kayıpları vb.),
- Enerji kayıpları (geri dönüşüm için gerekli enerji, yeni kalıp yapımı, iş gücü vb. kayıplar),

- Kapasite kayıpları (doğru sonucu alana kadar yenilenen imalat süreçleri, mamul tashihati için tezgâh/atölye/alan meşgul etme ve fazladan iş gücü gereksinimi),
- Zaman kaybı
- Toplam verimliliğin düşmesine neden olmaktadır.

Kalıp hasarlarına karşı dayanımı yüksek olması istenen kalıp malzemesinin sıcak sertliğinin yüksek (sıcakta akma dayanımı), meneviş dayanımının yüksek, aşınma dayanımının iyi (nitrasyon ve yüzey işlemlerine uygun) ve tokluğunun yüksek olması gerekmektedir.

Ekstrüzyon ürününün yüzey kalitesi çok sayıda faktöre bağlıdır. Ancak bunların içinde en önemli ve kritik olanı kalıp geçişlerinin yüzeyinde meydana gelen aşınmanın türüdür. Ekstrüzyon kalıplarının en yaygın hasar mekanizmaları adhezif ve abrazif aşınmalardır. Adhezif aşınma kalıp geçişinde oyuklanma şeklinde kraterlere neden olduğu için diğer aşınma türlerine kıyasla hiç arzulanmayan bir aşınma türü olarak karşımıza çıkar [2].

Kalıp geçişindeki tribolojik olaylar (sürtünme ve aşınma) kalıptaki sıcaklık artışı, kalıbın geometrisi ve şekli, kalıp geçişi boyu, kalıp geçişinin yüzey kalitesi, kalıp çeliği ve ekstrüzyon hammaddesinin özellikleri gibi çok sayıda faktör tarafından etkilenmektedir [2].

Kalıp geçişindeki sıcaklık artışı ya da azalması diğer faktörleri doğrudan etkilediği için, kalıp aşınması ya da sürtünme koşullarının değişiminde sıcaklık unsuru birinci derecede öneme sahiptir [2].

Tribolojik etkiler sonucunda ortaya çıkan kalıp aşınması “kalıp yüzeyinden malzeme kaybı” olarak tanımlanmaktadır. Malzeme akışını ve şeklini değiştirdiği için ve ayrıca kalıp yüzeyinin bozulmasına neden olduğundan, aşınma teknolojik ve ekonomik olarak son derece büyük öneme sahiptir. Aşınma genel olarak adhezif, abrazif, korozif, yorulmalı, erozyonlu, kazımalı ve darbeli aşınma olarak sınıflandırılmaktadır [2].

Ekstrüzyonda şekil değişikliği; yüksek basınç, biyet ve kovan arasındaki bağıl hız, kalıp ile akan malzeme arasındaki hız faktörleri ve bunlarla birlikte oluşan adhezif ve abrazif etkileşimler, ani sıcaklık değişimleri, uzun süre yüksek sıcaklığa maruz

kalma gibi nedenlerden dolayı oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Kalıplar oldukça ağır şartlar altında çalışmaktadır. Dar ve uzun kesitlerin ekstrüzyonunda kalıbın sıcaklığı kalıp malzemesinin yumuşama sıcaklığına kadar çıkabilmekte ve bunun sonucunda da özellikle kalıptaki dil bölgeleri (ince kanallara şekil veren, üç tarafı açık, bir kenarından kalıba bağlı kısımlar *kalıp dili* olarak isimlendirilmektedir) deforme olabilmekte ve kalıbın geçiş bölgesinin çıkış ağızları genişleyebilmektedir. Tüm bu olayların sonucunda da nihai ürünün boyutsal hassasiyeti kaybolmaktadır. Abrasif aşınma adhezif aşınmaya kıyasla daha yavaş meydana gelmektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda oda sıcaklığına göre çok daha hızlı ilerlemektedir. Bu tarz kalıp aşınması, adhezif aşınma ile birlikte oluştuğunda çok daha şiddetli gerçekleşmektedir [2].

Alüminyum çelik yüzeyine kuvvetli yapışma eğiliminde olduğundan kalıp geçiş yüzeyine yapışmış bir tabaka oluşur. Kalıp geçişine bu tabakanın yapışması, geçişte sıcaklığın yükselmesi, ekstrüzyon hızı, kalıp şekli ve geometrisi, kalıp geçişinin boyu, geçiş yüzey pürüzlülüğü ve geçişin yüzey sertliği gibi çok sayıda faktörle ilişkilidir [2].

Bu faktörlerin içinde en önemlisi sıcaklık ve ekstrüzyon hızıdır. Ekstrüzyon hızı ile kalıp geçişindeki ısınma ile doğrudan birbirlerine bağlıdır. Aynı biyet sıcaklığı için, ekstrüzyon hızı arttıkça gerilme miktarı ve kalıp geçişindeki kayma şekil değişikliği arttığından (yapışmalı sürtünme) sıcaklık artışı daha fazla olacaktır. Kalıp geçişinin sıcaklığı arttıkça adhezif yapışma tabakasının oluşma eğilimi de artış gösterecektir. Sıcaklık artışıyla birlikte adhezif tabaka oluşumu başlar ve her baskıda bu tabaka büyüyerek tüm geçişi kaplar ve tabakanın kalınlığı gittikçe artar. Art arda tabaka yapışması ve tabakaların koparak ayrılması kalıbın aşınmasına ve ürün yüzeyinde ince çapak görünümlü kirliliğe neden olur [2].

Kalıbın aşınma direncini iyileştirmek ve bunun sonucunda kalıp maliyetlerini azaltmak amacıyla ekstrüzyon firmaları tarafından çok sayıda yüzey işlemi tekniği denenmektedir. Kalıp aşınmasını önlemek amacıyla yapılan yüzey işlemleri kalıp ömrünün artması ve ürün yüzey kalitesinin iyileşmesi açısından son derece önemli konulardır [2].

Geleneksel olarak ekstrüzyon sanayiinde nitrasyon işlemi uygulanmaktadır. Nitrasyon, sertleştirilmiş yüzey elde etmek için metal malzemenin yüzeyine azotun

difüze etmesinin sağlandığı ısıtıl işlem prosesidir. Genelde çeliklerde uygulanan bir yöntem olmasına rağmen Titanyumun, Alüminyumun ve Molibdenin sertleştirilmesinde de kullanılmaktadır [3].

Proses, ismini işlemin yapılması için kullanılan ortamdan alır. *Tuz Banyosu*, *Gaz Nitrasyon* ve *Plazma Nitrasyon* olmak üzere üç ana yöntem kullanılmaktadır.

Son yirmi yılda sert kaplama teknolojisinde en önemli gelişme sert metal ve yüksek hız çeliği takımlarının kullanıldığı kesici takım endüstrisinde olmuştur. Sert kaplamalar, endüstriyel olarak etkili tribolojik korunma için bir yüzey modifikasyonudur. Bu alandaki gelişmeler, kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile başlamış fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve türevleri ile devam etmiştir [4].

PVD teknolojisinin CVD'ye göre en büyük avantajı sert metal ve yüksek hız çeliklerinin özelliklerini etkilemeden düşük sıcaklıklarda kaplama yapılabilmesidir. CVD'de gerekli olan yüksek kaplama sıcaklıkları (850-1000 °C), normalde çeliklerin meneviş ve hatta östenitleme sıcaklıklarını aşmaktadır. Bu nedenle takım çeliklerinde CVD kullanmak imkânsızdır. Sert metal altlıkların, özellikle tokluk gibi özellikleri temperleme sıcaklıklarında süreye bağlı olarak düşmektedir. Diğer yandan PVD teknolojisinde kaplama, 200-500 °C aralığında gerçekleştirilir. Bu sıcaklık aralığı takım uygulamalarında kullanılan altlıkların özelliklerini etkilemez. PVD ile sert metal kaplama endüstriyel uygulamalarda sıfırdan başlayarak büyümekte olan bir pazar oluşturmuştur ve bazı uygulamalarda CVD ile rekabet halindedir. PVD uygulamalarında en geniş olarak kullanılan kaplama TiN'dür. Takım uygulamaları için yeterli sertlikleri, çatlak yayılmasına karşı etkili olan basma-kalıntı gerilmeleri, kaplama-altlık arasındaki tutunma-yapışma özellikleri, kesme işlemi esnasında sağladıkları uygun ara yüzey geometrileri ve çok ilginç olarak altına benzeyen renkleri, bu kaplamaların her zaman tercih edilmesini sağlamıştır. Ancak sürekli gelişen teknoloji sürekli bir değişimi de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle takım endüstrisindeki kaplama araştırmalarında TiN kaplamalara alternatif arayışlar devam etmektedir. Geçiş metallerinin oluşturduğu nitürler (TiN, TiAlN, CrN, ZrN vb.) halen çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadırlar. NbN kaplamalar da yıllardır elektronik endüstrisinde kullanılmalarına rağmen tribolojik özellikleri yeni fark edilmiştir [4].

Aşınma direncini arttırmanın bir diğer yolu da kriyojenik işlemdir. Kriyojenik ısıt işlem yüksek aşınmaya maruz kalan takımlarda aşınma direncini artırma amaçlı uygulanan modifiye edilmiş bir soğutma işlemidir. Takım çeliklerine uygulanan geleneksel sertleştirme yöntemlerinde çelik östenitleme işleminin ardından çelik cinsine bağlı olarak çeşitli soğutma ortamlarında minimum mümkün sıcaklık olan oda sıcaklığına kadar soğutulur ve martenzitik yapı elde edilir. Yüksek alaşımlı çeliklerde ise sertleşmeyi sağlayan martenzitik dönüşüm belirli bir sıcaklıkta (150-300 °C) başlar ve oda sıcaklığında sona ermez [5,6].

Oda sıcaklığına kadar yapılan konvansiyonel soğutmayla bu tür çeliklerin bünyesinde yüksek oranda kalıntı östenit olarak adlandırılan kararsız faz bulunur (Örneğin DIN 1.2379 çeliğinde sertleştirme sıcaklığına bağlı olarak kalıntı östenit miktarı %12-20 arasında değişim gösterir). Takımın aşınma direncini kötü etkileyen kalıntı östenit fazını gidermenin en etkili yolu konvansiyonel soğutmadan sonra kriyojenik ısıt işlemin uygulanmasıdır. Kriyojenik ısıt işleminde parçalar sıvı azotun buharlaştırılmasıyla -185 °C'ye kadar soğutulur maksimum oranda aşırı doymuş martenzitik yapı elde edilir [5,6].

Kriyojenik ısıt işlemi takiben uygulanan menevişleme işleminde ise konvansiyonel sertleştirme işleminde gözlenmeyen η -karbürler çelik matrisinde çöker, hem kalıntı östenitin giderilmesi hem de η -karbür çökmesine bağlı olarak yüksek alaşımlı çeliklerde maksimum aşınma direnci kazanımı sağlanır [5,6].

1.1 Tezin Amacı

Alüminyum ekstrüzyon kalıp malzemelerine hali hazırda uygulanmakta olan geleneksel ısıt işlem sürecinde (östenitleme + üç meneviş) bulunan üç adet meneviş kademesinin, kriyojenik ısıt işlem vasıtası ile tek kademeye düşürülmesi ve bu aşamadan sonra nitrasyon ile yapılacak yüzey sertleştirme işleminden sonra uygulanacak ince film sert kaplama ile kalıbın aşınma direncinin arttırılması, sürtünme katsayısının düşürülmesi sonucunda kalıp verimliliğinin ve ömrünün uzatılması hedeflenmektedir.

2. ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON TEKNOLOJİSİ

Gelişmiş sanayilerde alüminyum ekstrüzyon teknolojisi hala araştırmalara konu olmaya devam etmekte ve çeşitli alanlarda yeni uygulamaları ele alınmaktadır. İnşaat ve otomotiv sektörlerinde, küçük makine parçalarında, yük taşıyan profillerde ve özellikle havacılık sanayiinde alüminyum ekstrüzyon ürünlerinin kullanımı ve bu ürünlere olan talep önemli miktarda artmıştır ve bu sektördeki rekabet oldukça fazladır. Günümüz itibarıyla ekstrüzyon sanayii 100 yıldan daha eski bir geçmişe sahiptir.

Fiziksel, kimyasal ve mekanik davranış olarak değerlendirildiğinde alüminyum da çelik, bronz, bakır, çinko, kurşun veya titanyum gibi metal sınıfında değerli bir maddedir. Alüminyum metal olarak değerli yapan özelliklerin başında hafifliği, mukavemeti, geri dönüşüm özelliği, korozyon dayanımı, dayanıklılığı, sünekliği, şekil verilebilirliği ve elektrik-ısı iletkenliği gelir. Diğer ticari metaller gibi ergitilebilir, dökülebilir, makinada işlenebilir ve ayrıca kolaylıkla dövülebilir. Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri vardır. Alüminyumdan imal edilmiş yapısal bileşenler uzay ve havacılık sanayisi için vazgeçilmezdir[1].

Hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri gerektiren taşımacılık ve inşaat sanayiinde geniş kullanım alanı bulur. Alüminyum kolay soğuyup ısıyı emen/ileten bir metal olması özelliği nedeniyle özellikle soğutma sanayiinde, bakırdan daha ucuz ve daha kolay işlenir alternatif malzeme olduğu için, yaygın olarak kullanılan bir metaldir.

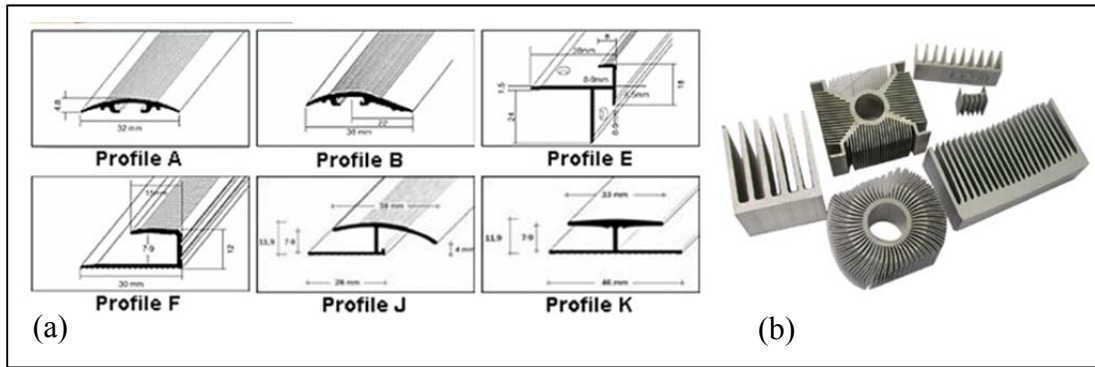
Alüminyumun genel özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Alüminyum hafiftir. Aynı hacimdeki bir çelik malzemenin ağırlığının ancak üçte biri kadar ağırlıktadır.
- Alüminyum, hava şartlarına, yiyecek maddelerine ve günlük yaşamda kullanılan pek çok sıvı ve gazlara karşı dayanıklıdır.
- Alüminyum'un yansıtma kabiliyeti yüksektir. Gümüşü beyaz renginin bu özelliğe olan katkısı ile beraber gerek iç gerekse dış mimarî için cazibeli bir

görünümüne sahiptir. Alüminyumun bu güzel görünümü, anodik oksidasyon (eloksal), lâke maddeleri vs. gibi uygulamalar ile uzun müddet korunabilir. Hatta birçok uygulamada tabii oksit tabakası bile yeterli olur.

- Çeşitli alüminyum alaşımlarının mukavemeti, normal yapı çeliğinin mukavemetine denk veya daha yüksektir.
- Alüminyum elastik bir malzemedir. Bu nedenle ani darbelere karşı dayanıklıdır. Ayrıca, dayanımı düşük sıcaklıklarda azalmaz (Çeliklerdeki darbe geçiş sıcaklığı nedeniyle gerçekleşen mukavemet değişikliği Alüminyumda yoktur).
- Alüminyum, işlenmesi kolay bir metaldir. Öyle ki, kalınlığı 0,01 mm. den daha ince olan folyo veya tel haline getirilebilir.
- Alüminyum ısı ve elektriği bakır kadar iyi iletir.
- Alüminyum'a şekil vermek için döküm, dövme, haddeleme, presleme, ekstrüzyon, çekme gibi metotlar uygulanabilir [1].

Belli bir kesite sahip olan, (bu kesitin şekli basit ve düz veya amaca uygun karmaşık geometriye sahip tasarımlar olabilir) ve kesit/boy oranı küçük olan, başka bir deyişle, boyu eninden çok daha fazla olan şekillendirilmiş malzemeler *profil* olarak tanımlanır (Şekil 2.1). Profil imalatı için birçok metal gibi alüminyum da çekme veya ekstrüzyon metotları ile işlenir. Ancak, karmaşık şekilli profiller için en çok kullanılan metot ekstrüzyondur.

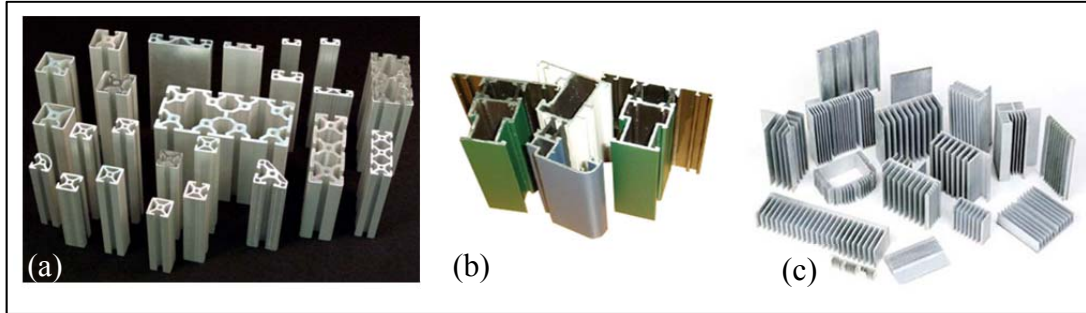


Şekil 2.1 : Basit ve karmaşık şekilli profil tasarımlarına örnekler; (a) Farklı tiplerde halı ve parke kenarı profilleri, (b) soğutucu profili [7,8].

Ekstrüzyon ile imal edilen alüminyum profillerin kullanım alanları (Şekil 2.2):

- Ulaşım araçları (otomobil, gemi, tren, metro, uçak ve uzay araçları),
- Mimari uygulamalar ve inşaat sektörü (binaların cephe giydirme sistemleri, pencereler, kapılar, vb. çeşitli konstrüksiyonlar),

- Elektrik-elektronik sanayii,
- Makine ve ekipman imali,
- Kimya ve gıda endüstrisi uygulamaları [1].



Şekil 2.2 : Çeşitli sektörlerin hizmetine sunulan profil çeşitleri; (a) Makine imalatı, (b) mimari uygulamalar ve (c) elektronik alanlarında kullanılan çeşitli profiller [9,10,11].

2.1 Alüminyum Profil İmalatında Kullanılan Alaşımlar

Alüminyum alaşımlarının ekstrüzyonu prosesi, alaşım imalatı, pres tasarımı, kalıp ve kalıp takımları tasarımları konularında en gelişmiş teknolojileri kapsamaktadır. Uygulamaların ihtiyaçlarına göre alaşımlar belirlenmekte ve biyet dökümleri gerçekleştirilmektedir. 6XXX serisi alaşımlar, ekstrüzyon kabiliyetlerinin yüksek olması nedeniyle boşluklu ve karmaşık şekillerin kolayca verilebilmesi, ısı işlemlerinin nispeten kolay ve basit olması, iyi elektrik iletkenliği, tatminkâr mekanik özelliklere sahip olması, nihai üründe iyi yüzey kalitesi sağlaması, yüksek korozyon direnci ve pek çok uygulama için iyi kaynak kabiliyetine sahip olması gibi teknik ve ekonomik özellikleri sayesinde yaygın kullanım alanına sahiptirler [2].

Mimari, elektronik, otomotiv, mobilya ve makine sanayii için üretilen profiller, genellikle 6XXX serisi alaşımlarından, ekstrüzyon yöntemi ile üretilir ve özellikle mimari uygulamalarda kullanılacak olanlar ve dekoratif amaçlı profiller görünümünün bozulmaması, yıllarca korunması için anodik oksidasyon (eloksal) ile renkli veya renksiz, mat veya parlak olarak kaplanırlar. Bu alaşımlar arasında da en yaygın kullanılanlar, birbirlerine son derece yakın kimyasal bileşime ve fiziksel özelliklere sahip olan 6063, 6060 veya AlMgSi0,5 alaşımlarıdır [1].

Taşıyıcı eleman olarak kullanılacağı zaman yüksek mukavemet değerlerine sahip olması gereken alaşımlarda yüksek miktarda alaşım elementi kullanılmaktadır. Genel olarak 6061 (Al-Mg-Si-Cu) ve 6082 (Al-Si-Mg-Mn) alaşımları yüksek mukavemet

gerektiren uygulamalarda en çok kullanılan alaşımlardır. 6061 alaşımı özellikle taşıyıcı uygulamaları açısından önem taşıyan yüksek tokluk değerine sahiptir. Her iki alaşım da kaynak uygulamaları için idealdir [2].

Çizelge 2.1’de en çok kullanılan 6XXX alaşımlarının kimyasal bileşim limitleri gösterilmiştir [1].

6XXX serisi alaşımlar, Magnezyum (Mg) ve Silisyum (Si) ihtiva ederler. Bu elementlerin ve içindeki diğer empüritelerin (Fe, Cu, Mn, Zn, gibi) belirli sınırlar içinde farklı değerlerde olmaları, alaşımların kullanılma yerine göre farklı özelliklerde profil imalatını sağlarlar. Demir (Fe) miktarı 0,20 % veya daha düşük olan 6XXX serisi alaşımlarda, profil polisaj yapıldığında parlak yüzey elde edilir. Fe miktarının bu değerden yüksek olması durumunda, profilin rengi grileşmeye başlar, parlaklık donuklaşır. Mat yüzey elde edilmesi için de Fe miktarı en az 0.18 % olmalıdır. Fe miktarı yükseldikçe o ölçüde rahat ve cazibeli mat yüzey elde edilir. Fe miktarının %0.30'dan fazla olması ise eloksal sonrasında donuk bir görünüme neden olacağı gibi, ekstrüzyon prosesini de zorlaştırır [1].

Çizelge 2.1 : Alüminyum profil imalatında en çok kullanılan 6XXX serisi alaşımların bileşimleri [1].

Element	EN AW 6060	EN AW 6063	EN AW 6005	EN AW 6005A	EN AW 6082
Si	0,30 - 0,6	0,20 - 0,60	0,6-0,9	0,50-0,9	0,7-1,3
Mg	0,35 - 0,6	0,45 - 0,90	0,40-0,6	0,40-0,7	0,6-1,2
Fe	0,10 - 0,30	0,35 maks.	0,35	0,35	0,50
Cr	0,05	0,10 maks.	0,10	0,30	0,25
Cu	0,10	0,10 maks.	0,10	0,30	0,10
Zn	0,15	0,10 maks.	0,10	0,20	0,20
Mn	0,10	0,10 maks.	0,10	0,50	0,40-1
Ti	0,10	0,10 maks.	0,10	0,10	0,10
Diğer	Her biri 0.05 % maks.	Her biri 0.05 % maks.	Her biri 0.05 % maks.	Her biri 0.05 % maks.	Her biri 0.05 % maks.
	Toplam 0.15 % maks.	Toplam 0.15 % maks.	Toplam 0.15 % maks.	Toplam 0.15 % maks.	Toplam 0.15 % maks.

Mg ve Si miktarlarının, profilin yapay yaşlandırma ısıtma işlemi (termik) sonrası sertliğinde büyük önemi vardır. Ancak, ısıtma işlemi sonrası maksimum sertlik temini için bu elementlerin üst sınırlarda olması ise, üretimin düşük hız ile yapılmasını gerektirir. Çünkü kullanılan alüminyum kütük (biyet-billet) de aynı oranda serttir [1].

Sonuç olarak, profillerin kullanılma yerine göre, mümkün olduğu ölçüde amaca uygun alaşım ile üretim yapılması faydalıdır. Profilin bir özelliğinin iyi olması istenirken, diğer bir özelliğinden fedakârlık edilmesi gerekmektedir [1].

2.2 Alüminyum Profillerin Ekstrüzyon Yöntemi ile İmalatı

Ekstrüzyon, biyet adı verilen metal bir bloğun basma kuvveti etkisiyle kendisinden daha küçük kesitli bir kalıp boşluğundan geçmesinin sağlandığı plastik şekillendirme yöntemidir. Ekstrüzyon dolaylı basma işlemidir. Dolaylı basma kuvvetleri, kovan kalıp ve iş parçası (biyet) arasındaki tepkiden ortaya çıkmakta ve oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Biyet, kalıp ve kovan arasındaki tepki sonucunda malzeme içerisinde oluşan yüksek basma gerilmeleri biyetin şekil değiştirmesi sırasında malzeme içerisinde çatlak oluşumunu önlemede son derece etkilidir. Ekstrüzyon işlemi, biyetin döküm yapısını değiştirmede kullanılabilecek en iyi yöntemdir. Çünkü biyet sadece basma gerilmelerine maruz kalmaktadır [2,12].

Alüminyum profillerin ekstrüzyon yöntemi ile üretimi için 3 esas gereklidir.

1. Alüminyum kütük (billet, biyet) (Şekil 2.3),
2. Ekstrüzyon presi (Şekil 2.4),
3. Ekstrüzyon kalıbı (Şekil 2.5).



Şekil 2.3 : Alüminyum biyet [13].

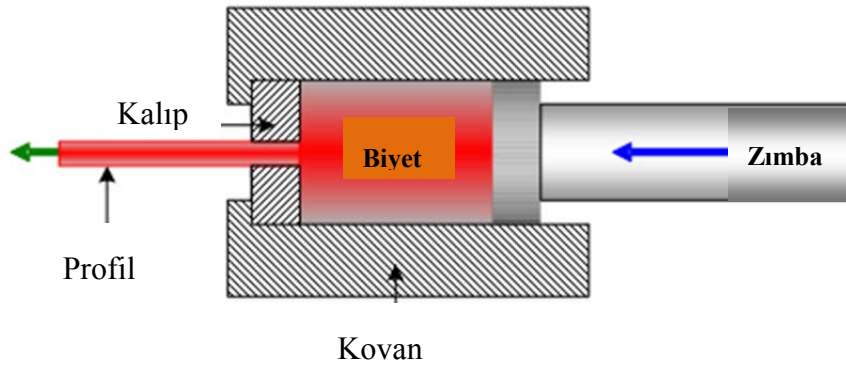


Şekil 2.4 : Ekstrüzyon presi [14].



Şekil 2.5 : Ekstrüzyon kalıbı [15].

Genel olarak, ekstrüzyon, alüminyum biyetin, presin sağladığı büyük kuvvet ile kalıp içerisinde geçirilerek, kalıbın sekline sahip olan profilin elde edilmesi olarak tanımlanabilir (Şekil 2.6).

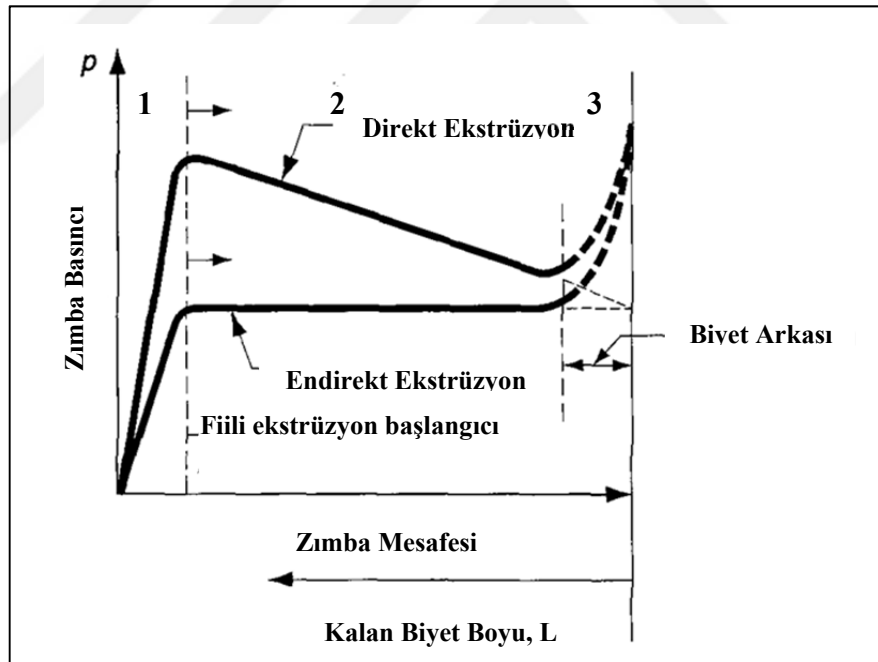


Şekil 2.6 : Direkt ekstrüzyon prensip şeması [16].

Ekstrüzyon yöntemi kullanılan alaşıma ve işlemin yapılış şekline bağlı olarak sıcak veya soğuk yapılabilir [2].

Alüminyum ekstrüzyonunda kullanılan en önemli ve yaygın yöntem direkt ekstrüzyon tekniğidir. Kovan içerisine yerleştirilen biyetin zimba adı verilen itici vasıtasıyla kalıp boşluğuna doğru sıkıştırılarak kalıp boşluğundan geçirilmesi esasına dayanan bu yöntem şematik olarak Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Bu yöntemde metalin akış yönü ile zımbanın hareket yönleri aynıdır. Baskı esnasında biyet, kovan içinde ileriye doğru hareket etmektedir. Bu hareket nedeniyle oluşan sürtünme kuvvetlerinden dolayı zımbanın uygulaması gereken basınç oldukça yüksektir. Direkt ekstrüzyon sırasında zımbanın hareketiyle birlikte basınçtaki değişim genel olarak Şekil 2.7’de verilen formdadır. Geleneksel olarak bu proseste üç farklı evre tanımlanmaktadır [2,12].

1. Biyet sıkışmaya başlar ve basınç hızla artarak en yüksek değerine ulaşır.
2. Ekstrüzyon işlemi başladığında basınç azalır, bu bölge rejim hali olarak isimlendirilmektedir.
3. Basıncın en düşük değerine inmesinin ardından biyetten arta kalan biyet arkası sıkışmaya başladığından basınç aniden yükselmeye başlar [2].



Şekil 2.7 : Direkt ve endirekt ekstrüzyon yöntemlerinde zimba hareketiyle basıncın değişimi [2].

Alüminyum ekstrüzyonu sıcak olarak yapılır; biyetler 420-470 °C’a ısıtılır (Şekil 2.8), kalıplar en az 450 °C’a ısıtılmış olmalıdır ve prestan çıkan profilin sıcaklığı 500 °C’ın üzerindedir [1].

Ekstrüzyon, aynı zamanda, bir kesit düşürme işlemidir. Alüminyum biyetin kesiti, alüminyum profilin kesitine dönüştürülmektedir. Bu nedenle, kullanılan biyetin kesiti, üretilecek profil kesitine yüzey ölçümü olarak ne kadar yakın ise, işlem o kadar kolay olur. Bu gerçek, profil kalıplarının tasarımına, üretim yapılan presin seçimine (kuvvetine, kovan çapına) gibi birçok teknik alternatifi ortaya çıkarır. Sonuç olarak, ince ve küçük kesitli profillerin üretimi için küçük ölçüde biyet ve dolayısı ile ona uygun kuvvette pres gereklidir. Büyük profiller için de büyük ölçülerde kalıp, biyet ve pres gereklidir. Küçük profiller, büyük preslerde, büyük biyetler kullanılarak üretilmek istendiğinde, zaman ve enerji kaybına, verim düşüklüğüne neden olur. Buna karşılık, büyük kesitli profiller ise küçük preslerde, küçük biyetler ile çoğu zaman hiç üretilemez [1,12].

Alüminyum alaşımları yumuşak olmaları ve deformasyon kabiliyetleri nedeniyle sıcak ekstrüzyon için ideal malzemelerdir. Bu nedenle sıcak ekstrüzyon değişik şekillerde boru, tel ve çubuklar gibi alüminyum ürünlerin imalatında sıklıkla kullanılan yöntemdir. Alüminyum biyet kovanın içine yerleştirilir ve kalıp açıklığından hidrolik presin pistonuna bağlı zımba vasıtasıyla itilerek arzu edilen formda çıkmaya zorlanır. Ekstrüze edilebilmesi için biyet önceden ısıtılarak yumuşatılmalıdır. Tipik silindir basıncı 150-200 bar mertebesinde dir. Ekstrüze edilen alüminyumun kesit şekli kalıbın figür profili ile belirlenir. Kalıp çelik disklerden oluşur ve proses öncesinde 450-500 °C aralığına ısıtılması gerekmektedir. Proses yarı süreklidir. Bir biyet yaklaşık 60-120 saniyede şekillendirilir ve sistem yeni biyeti yüklemek ve hazır hale gelmek için 15-25 saniye kadar bekler (ölü zaman). Bu süreç başlama-durma döngüsü olarak adlandırılır. Ekstrüze edilen alüminyum alaşımlarının tipik çıkış hızları 2,5-35 m/dk'dır [17,18,19,20].

Ekstrüzyondan önce biyet genellikle 460-500 °C civarına ısıtılır. Ekstrüzyon anında profil şekillendirilirken biyetin kesit alanındaki büyük azalma (ekstrüzyon oranı) sırasında deformasyon miktarı ile bu sıcaklık ortalama 550 °C civarına ulaşır. Profil yüzeyi, alüminyumun geçiş bölgesinden kalıp malzemesi ile yağlayıcı olmadan kayma hareketiyle sürtünerek geçmesi ile oluşur [19,21].



Şekil 2.8 : Biyet önısıtma; (a) Biyet önısıtma fırını, (b) ısıtılmakta olan biyet [14].

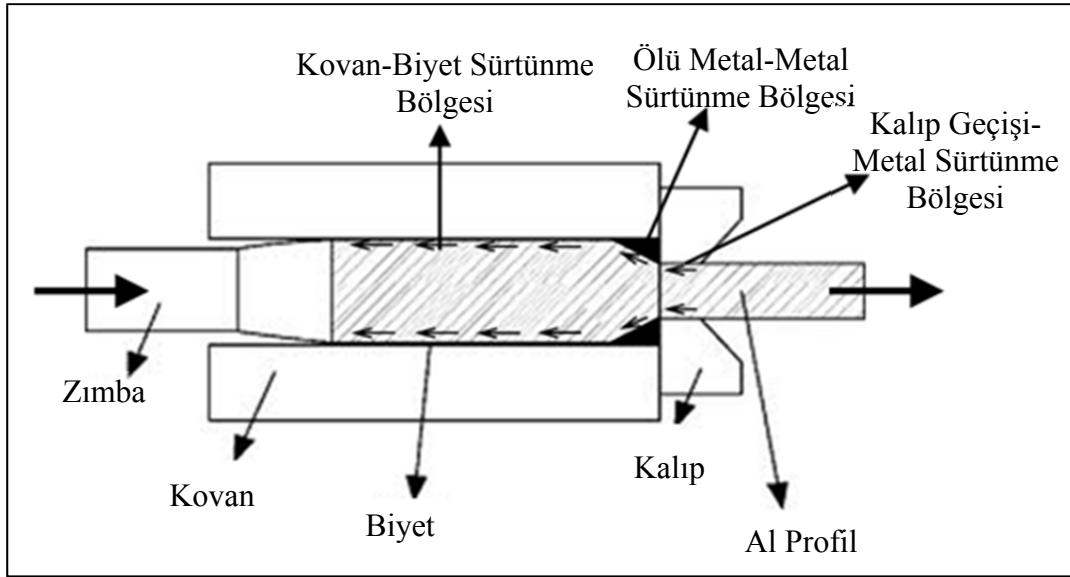
2.2.1 Ekstrüzyonda termodinamik

Tüm termodinamik sistemlerde ısının sistemde sıcaklık yükselmesine sebep olabilmesi için en az bir enerji kaynağına ve bu ısıyı transfer edebilecek bir ortama ihtiyaç bulunmaktadır. Ekstrüzyon işleminde ısı üreten mekanizmalar sürtünme ve malzemenin şekil değiştirme işidir. Isının üretilmesi ve transferi ekstrüzyonun başlangıcından itibaren eşzamanlı olarak meydana gelmektedir. Oluşan ısının bir kısmı şekillenen ürünle uzaklaşırken, bir kısmı kovana ve kalıba transfer olmakta ve bir kısmı da biyetin henüz şekillenmemiş kısmının sıcaklığını bir miktar yükseltmektedir [2,22].

Ekstrüzyon sırasında biyetlerdeki sıcaklık dağılımı; baskı basıncını, ekstrüzyon hızını, ürün yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini etkileyen kritik bir proses parametresidir [2].

Ekstrüzyon sırasında ısı oluşum kaynakları Şekil 2.9’da gösterilmektedir. Malzemenin şekil değiştirme enerjisinin büyük bir bölümü ısıya dönüşmektedir. Malzemede plastik şekil değiştirme nedeniyle oluşan sıcaklık yükselmesi birkaç yüz dereceye varabilmektedir. Üç farklı bölgede etkin olan sürtünme kuvvetleri de hem biyette hem de kalıptan çıkmakta olan üründe toplam sıcaklık değişimini etkilemektedir [2,22].

Ekstrüzyon işleminde sıcaklık en kritik parametrelerden biridir. Sıcaklık yükseldiğinde malzemenin akma dayanımı düşmekte ve bu nedenle şekil verme işlemi de kolaylaşmaktadır. Ancak aynı zamanda azami ekstrüzyon hızı da düşüş göstermektedir. Çünkü bölgesel sıcaklık artışları bazı alaşımlarda kısmi ergimelere neden olabilmektedir [2,22].



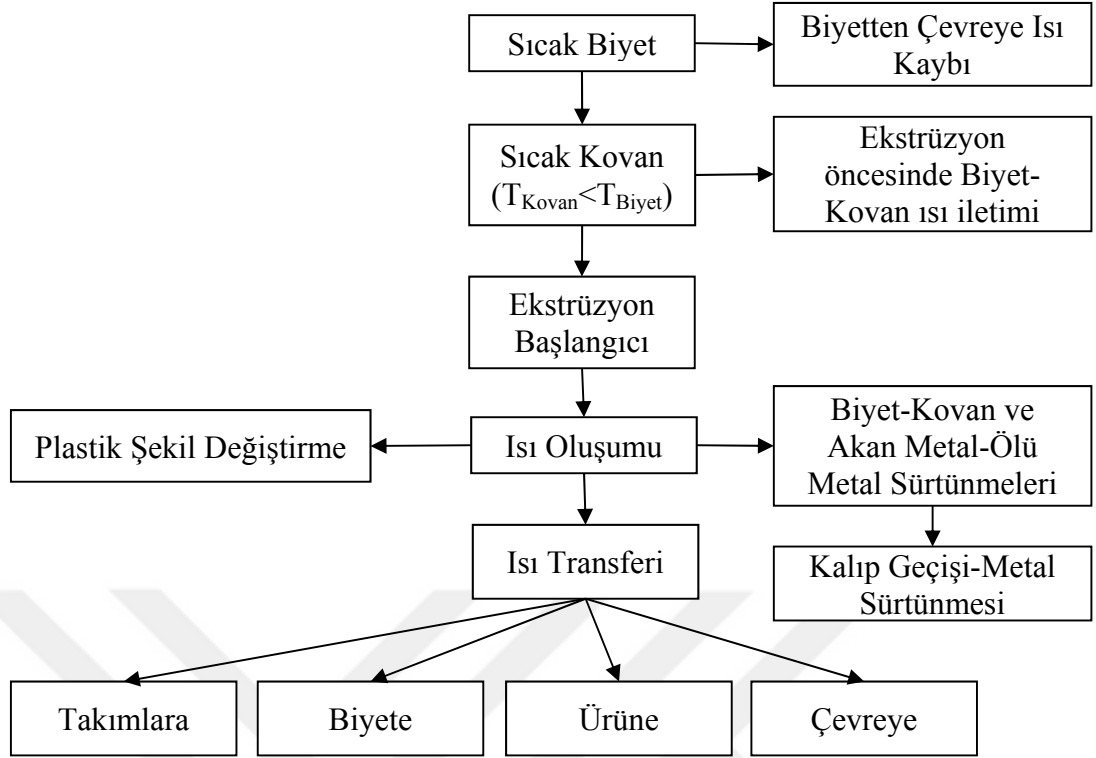
Şekil 2.9 : Ekstrüzyon işleminde sürtünme mekanizmalarının olduğu bölgeler [2].

Ekstrüzyon sırasındaki sıcaklık değişimleri pek çok değişkene bağlıdır. Bunlardan en önemlileri şu şekilde sıralanabilir:

1. Başlangıç biyet sıcaklığı,
2. Alaşımın belirli bir sıcaklık-gerilme-uzama hızındaki akma mukavemeti,
3. Plastik şekil değişikliği,
4. Biyet ile kovan arasındaki sürtünme, akan metal ile ölü metal (hareketsiz kalan metal) arasındaki sürtünme ve kalıp geçişi ile akan metal arasındaki sürtünme,
5. Isı transferi (hem iletim yoluyla, hem de taşınım yoluyla) [2,22].

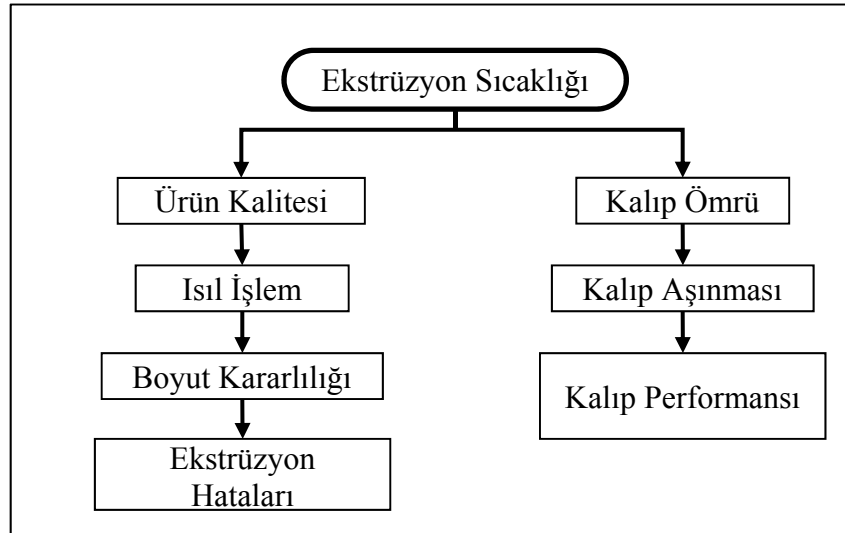
Endüstriyel uygulamalarda sıcak biyet, biyet ön ısıtma fırınından alınıp sürekli belirli bir sıcaklıkta tutulan kovana yerleştirilene kadar geçen zamanda ve ekstrüzyon işlemi sırasında oldukça karmaşık ısı transferi mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.10'da ekstrüzyon işlemindeki ısı dengesi modeli gösterilmektedir [2,22].

Ekstrüzyon açısından kritik sıcaklık metalin kalıptan çıktığı andaki sıcaklıktır. Şekil değiştirme ve sürtünme enerjilerinin ortaya çıkardığı ısı enerjisi, ısı kayıplarından daha fazlaysa malzemenin sıcaklığı yükselecektir. Kayıpların fazla olası durumunda ise malzemenin sıcaklığı düşecektir. İletim yoluyla ısı kaybı için belirli bir süre gereklidir, bu nedenle şekillendirilen alaşıma ve ekstrüzyon işlem koşullarına bağlı olarak belirli bir zimba hızının üzerinde ısı oluşumu daha baskın hale gelmektedir [2,22].



Şekil 2.10 : Ekstrüzyonda ısı dengesi akış şeması [22].

Alüminyumun kalıbı terk ettiği andaki çıkış sıcaklığı pek çok nedenden dolayı önem arz etmektedir. Şekil 2.11’den de görüleceği üzere ekstrüzyon sıcaklığının ürün kalitesine ve kalıp ömrüne iki farklı açıdan etkisi söz konusudur. Ürün kalitesi açısından, çıkış sıcaklığı ısıtma proseslerini ve boyut kararlılığını etkilemektedir.



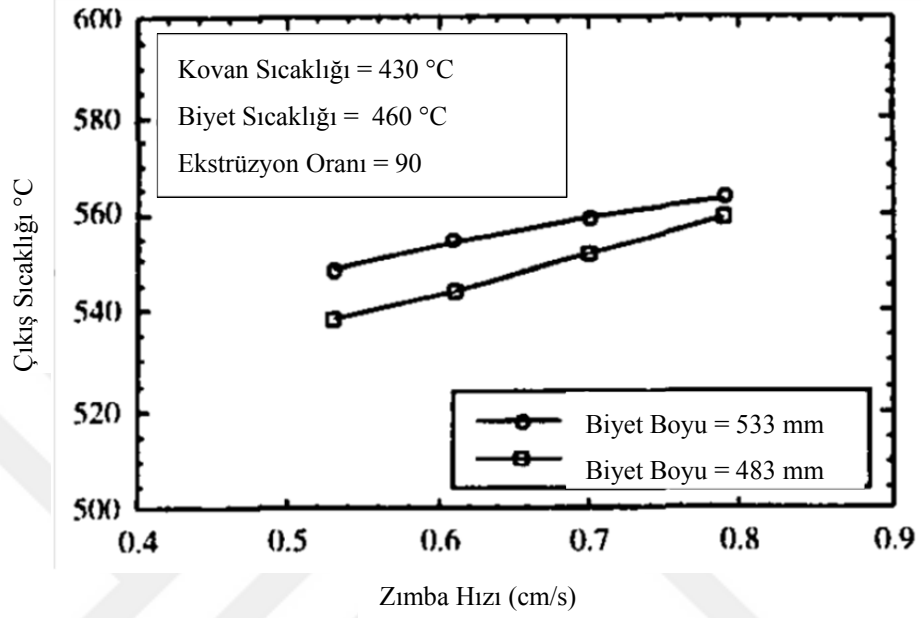
Şekil 2.11 : Çıkış sıcaklığının ürüne ve kalıba etkileri [22].

Aynı zamanda ekstrüzyon kusurlarına da yol açabilmektedir. Ekstrüzyon sıcaklığı kalıp ömrü açısından da kritik bir konudur. Ürünün kalıptan çıkış sıcaklığı sonuç itibarı ile kalıp geçişindeki sıcaklık artışı ile ilintilidir. Bu nedenle ürün çıkış sıcaklığı kalıp aşınması ve kalıp performansı için de kıstas olabilmektedir [2,22].

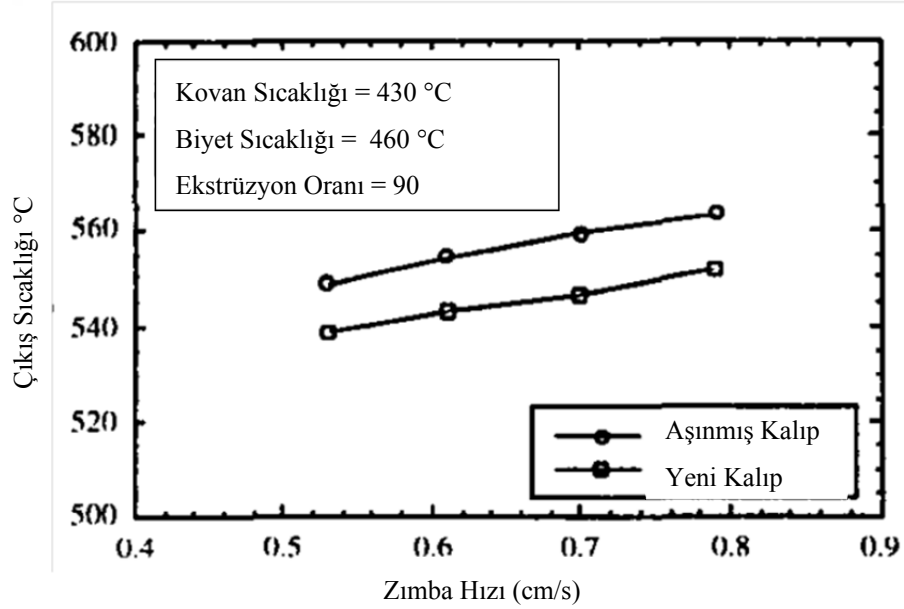
Biyetin alaşım özellikleri, kovan-biyet ve biyet-kalıp ara yüzeyindeki sürtünme koşulları, zimba hızı, ekstrüzyon oranı, figürün dış kenar toplam uzunluğu ve kalıp tasarım parametreleri (örneğin kalıbın türü) gibi çok sayıdaki faktör ekstrüzyon sırasında biyette meydana gelecek sıcaklık dağılımını etkilemektedir. Bu parametrelerin etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. **Malzeme Özellikleri:** Biyet malzemesinin mekanik özellikleri şekil değiştirme veya ara yüzey sürtünmeleri nedeniyle oluşan ısı miktarı üzerinde önemli derecede etkili olmaktadır. Şekil değiştirme nedeniyle açığa çıkan ısının miktarı belirli bir sıcaklık, gerilme ve uzama hızı için malzemenin akma gerilmesi ile orantılıdır. Malzemenin ısı özellikleri de sıcaklık artışını ve aynı zamanda ısı iletimini etkileyen parametrelerdir.
2. **Sürtünme:** Diğer koşulların sabit kalması şartıyla, ürünlerdeki sıcaklık dağılımı, biyet-kovan ve biyet-kalıp arayüzeylerindeki sürtünme faktörleri tarafından belirlenmektedir. Ölü metal bölgesi arayüzeyinde sürtünme-kayma gerilmesinin yüksek olması nedeniyle de sıcaklık artışı meydana gelmektedir.
3. **Zimba Hızı:** Ekstrüzyon sırasında ısı oluşumu zimba hızıyla birlikte artmaktadır. Bu artışın nedeni gerilme hızının doğrudan zimba hızıyla orantılı olmasıdır. Bu şekilde oluşacak ısının miktarı, gerilme hızıyla orantılı olacaktır. Zimba hızı düştükçe oluşan ısının dağılması için daha fazla süre olacaktır. Zaten yüksek ısı iletkenliği nedeniyle alüminyumda ısının dağılması diğer metallere oranla daha fazladır.
4. **Ekstrüzyon Oranı:** Yüksek ekstrüzyon oranlarında daha yüksek gerilme ile yoğun plastik şekil değişikliği söz konusu olduğundan çıkış sıcaklığı daha yüksek olmaktadır.
5. **Figürün Dış Kenar Toplam Uzunluğu:** Figürün dış kenar uzunluğu arttıkça çıkış sıcaklığı da artmaktadır. Bu artış, sabit bir kalıp geçişi boyu için figür dış çevresinin artması sonucunda kalıp geçişi sürtünme alanının büyümesinden kaynaklanmaktadır [2,22].

Şekil 2.12, Şekil 1.13 ve Şekil 2.14’te, kesit alanı 229 mm^2 ve et kalınlığı $0,762 \text{ mm}$ olan 6063 alaşımından içi boş kare kesitli bir profil (kutu profil) ile yapılan deney sonuçları, az önce değinmiş olduğumuz parametreler ile ilgili bazı somut bilgiler vermektedir [2,22].



Şekil 2.12 : 6063 alaşımlı iki farklı biyet boyu için zımba hızı-sıcaklık ilişkisi [22].



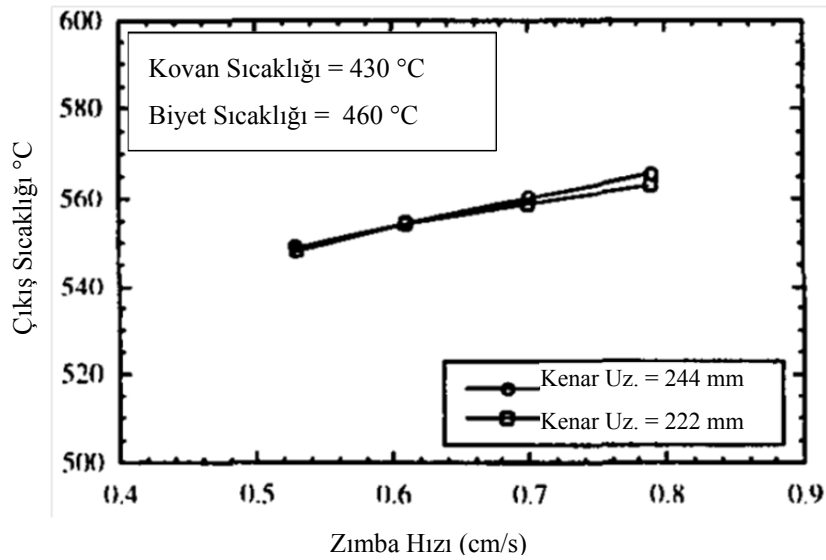
Şekil 2.13 : 6063 alaşımının ekstrüzyonunda iki farklı kalıp geçiş yüzeyi kalitesi için zımba hızı-sıcaklık ilişkisi [22].

Şekil 2.12’de söz konusu kutu profilin çıkış sıcaklığının diğer değişkenler sabit tutulduğunda, zımba hızı arttıkça nasıl değiştiği gösterilmektedir. Sonuçlar farklı iki

biyet boyu için verilmiştir. Biyet boyunun artışı ile baskı süresinin uzamasına karşın, asıl belirgin etki artan biyet boyu ile birlikte çıkış sıcaklığının artışı şeklinde olmuştur. Bunun nedeni uzun biyetlerde kovan-biyet arasındaki sürtünmenin daha fazla olmasıdır [2,22].

Şekil 2.13'te ise iki farklı kalıp geçişi yüzey kalitesi için zımba hızına bağlı olarak çıkış sıcaklığının değişimi gösterilmektedir. Alüminyum, yeni nitrürlenmiş kalıp yüzeyine, aşınmış kalıp yüzeyine göre daha az yapışmaktadır. Alüminyum yapışmasının şekline bağlı olarak eski kalıp yüzeyindeki sürtünme daha çok yapışma nedeniyle oluşmakta, yeni kalıp yüzeyinde ise büyük oranda kayma sürtünmesi biçiminde gerçekleşmektedir. Yeni kalıp yüzeyinde sürtünme kuvvetleri daha az olduğundan ısı oluşumu daha az olmakta, bunun sonucunda sıcaklık artışı eski kalıba göre daha az oluşmaktadır [2,22].

Şekil 2.14'te de farklı toplam dış kenar uzunluklarına sahip iki profilin kalıplarının, zımba hızına bağlı olarak çıkış sıcaklığının değişimi gösterilmektedir. Büyük dış kenar uzunluğuna sahip profile sürtünme alanı daha fazla olduğundan, bu profile sıcaklık artışı bir miktar daha fazla olmuştur. Kenar uzunlukları arasındaki fark arttıkça sıcaklık artışı da daha fazla olacaktır [2,22].

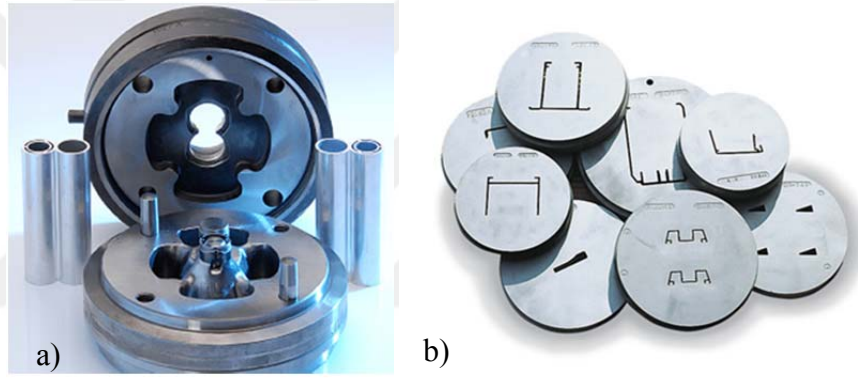


Şekil 2.14 : 6063 alaşımının ekstrüzyonunda iki farklı figür dış kenar toplam uzunluğu için zımba hızı-sıcaklık ilişkisi [22].

2.3 Alüminyum Ekstrüzyon Kalıpları

Rekabete dayalı ekstrüzyon piyasasında hızlı teslimat, maliyet ve kalite en önemli olgular halini almıştır. Kalite gereksinimini karşılamak için ekstrüzyon kalıbının performansı kritik öneme sahiptir. Kalıp performansı ürün kalitesini, verimliliği, ıskarta miktarını ve ürün tasarımını etkilemektedir. Özellikle otomotiv ve ileri teknoloji gerektiren uygulamalar için talep edilen ürün miktarının artması ile birlikte toleransların çok daha dar sınırlara girmesi ve çok daha üstün yüzey özelliklerinin istenmesi sonucunda kalıp ömürleri ve performansı ön plana çıkmıştır [2].

Dolu kesitli ve içi boş kesitli ürünleri üretmek için iki temel tipte kalıp kullanılmaktadır. Dolu kesitli ürünlerin kalıpları *solid*, içi boş kesitli ürünlerin kalıpları da *porthole* (zıvanalı) kalıplar olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.15) [2].

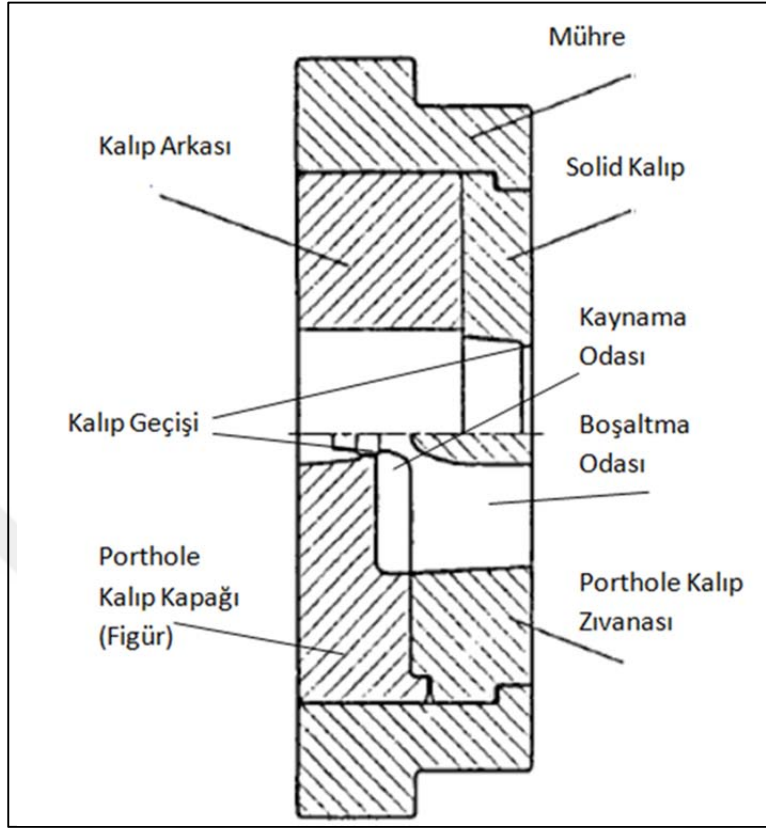


Şekil 2.15 : Ekstrüzyon kalıpları; a) porthole (zıvanalı) kalıp, b) solid kalıp [23,24].

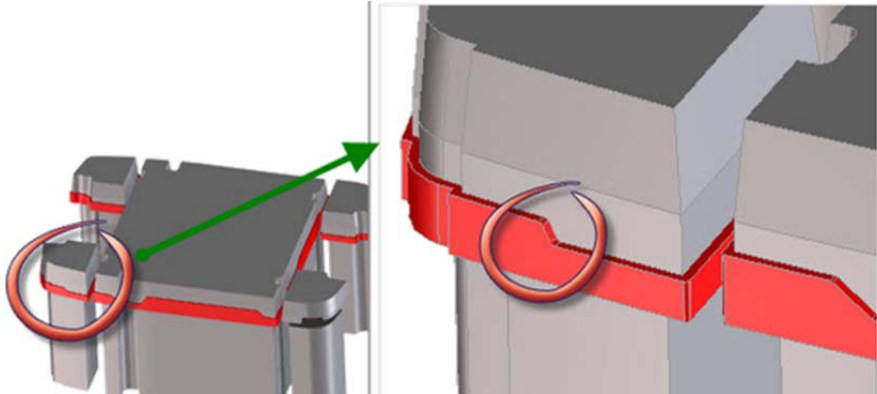
Şekil 2.16’da solid ve porthole kalıpların karşılaştırmalı yapıları gösterilmiştir. Bir ekstrüzyon kalıbının en önemli kısmı *kalıp geçişi* olarak adlandırılan yeridir. Kalıp geçişi, ürünün ölçülerinin, yüzey kalitesinin sağlanmasını, ekstrüzyon sırasında farklı kesitlerin debilerinin kontrolü ile ürünün geometrik bütünlüğünün korunmasını, en sonunda da kalıbın kullanım ömrünü belirleyen kısımdır. Kalıp geçişi aşınarak hasar gördüğünde kalıbın onarılması mümkün olmaz ve iptal edilerek hurdaya ayrılır. Kalıp içindeki sürtünme, metal akış hızını belirleyen mekanizmadır. Kalıp figürünün herhangi bir yerindeki kalıp geçişinin boyu (kalınlığı), bu noktadan akan metalin, kesitin diğer bölgelerine göre ne kadar frenleneceğini ya da serbest bırakılacağını belirler (Şekil 2.17) [2].

Ekstrüzyonda biyet-kovan ara yüzeyi sürtünmesi biyet dışına yakın bölgede akışın yavaş, merkezindeki akışın da hızlı olmasını sağlar. Biyetin merkezinin bu hızlı akışı

göz önüne alındığında, metal akışını dengelemek için kalıp geçişinin kalınlığı biyet merkezine olan mesafeye göre ters orantılı olmalıdır [2].



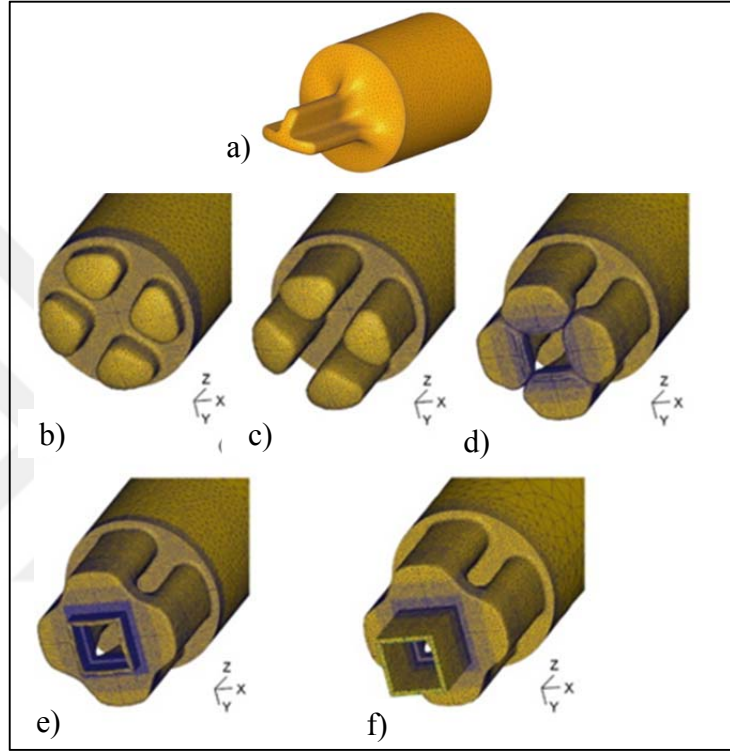
Şekil 2.16 : Solid ve porthole kalıpların karşılaştırmalı yapıları [25].



Şekil 2.17 : Kalıp zıvanasındaki geçiş bölgelerinde fren-akışa göre geçiş boyunun değişimi.

Ürünün et kalınlığının az olduğu yerlerde akış yavaşlayacağı için, bu bölgelerde akış hızını dengelemek için kalıp geçiş boyu kısa tutulur. Kesitin kalın olduğu kısımlarda da kalıp geçiş boyu uzatılarak, akış hızı düşürülür [2].

Porthole kalıplarda malzeme akışı, solid kalıplara göre çok daha karmaşıktır. Porthole kalıplarda ekstrüzyon işlemi üç aşamada meydana gelmektedir. Birinci aşamada metal biyetten kalıp haznesine (boşaltma haznesi) akmakta, ikinci aşamada da kaynama odasına geçmektedir. Üçüncü ve son aşamada da metal kaynama odasından kalıp kapağı ve zıvananın birlikte oluşturduğu figür boşluğundan geçerek son şeklini almaktadır (Şekil 2.18). Kaynama odası köprülerin bitiminden başlayarak kalıp ön yüzüne kadar uzanan boşluktan oluşmaktadır [2].



Şekil 2.18 : Ekstrüzyon kalıplarında metal akışları; a) Solid kalıpta metal akışı. Porthole kalıpta metal akışı: b) Biyetin köprülerde dört ayrı kola ayrılmaya başlaması ve boşaltma odasına doğru akışı, c) Ayrılan kolların boşaltma odasını doldurması ve kaynama odasına girişi, d) Kaynama odasına giren kolların birleşerek kaynaması, e) Kalıbın geçişlerinde figürün oluşumu ve f) Figürün kalıptan çıkışı [26,27].

Alüminyum sıcak imalat sanayiinde ekstrüzyon kalıplarının aşınması önemli bir konudur. 520-580 °C'a ulaşan sıcaklıklar, yüksek basınç, oksitleyici ortam ve sert parçacıkların varlığı gibi faktörler zorlu çalışma şartlarını oluşturur [2,28].

Ekstrüzyon kalıp malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken en önemli unsurlar yüksek sıcaklıkta yüksek sertlik, akma mukavemeti, sürünme direnci ve tokluktur. Bu özelliklerle birlikte iyi aşınma ve korozyon dirençlerinin de olması gerekmektedir. Kalıp malzemesi yüzey işlemlere ve kaplama yapılmasına da uyum göstermelidir. Bütün bu ihtiyaçlar sıcak iş çeliklerinde bir arada bulunmaktadır ve bu

malzemeler ekstrüzyon kalıbı imalatında çok yaygın olarak tercih edilerek kullanılmaktadır [2,19,21,28,29].

Ekstrüzyon kalıpları yaygın olarak AISI H13 çeliği başta olmak üzere sıcak iş çeliklerinden imal edilmektedirler. Yüksek sıcaklıklarda uygulanan ısıtma işlemleri sonucunda elde edilen iyi tokluk ve makul sertlik değerlerine (genellikle 48 ± 2 HR_C) rağmen bu malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi ile birlikte termal çatlak oluşumu direncinin artırılması amacıyla yüzey işlemlerinin yapılması gerekmektedir [2,21,28,29,30].

Ekstrüzyon ürününün alaşıma bağlı olarak tipik çıkış hızı 2,5-100 m/dk aralığındadır. Kalıplar ve biyetler 450-500 °C aralığında ön ısıtmaya tabi tutulurlar, fakat alüminyum biyet dâhilinde ve biyet yüzeyi ile ortam arasında gerçekleşen sürtünme ve deformasyon olayları neticesinde (Şekil 2.9) ekstrüzyon proses sıcaklığı kalıp geçişlerinin çıkışında 520-570 °C aralığına rahatlıkla ulaşabilir [18,19].

Kalıplar zımbanın kuvveti ile deforme olmayacak şekilde 20-40 mm kalınlığında imal edilirler. Ekstrüzyon kuvvetinin ve alüminyum akışının en çok etkilediği, ürünün yüzey kalitesinin ve ölçü hassasiyetinin belirlendiği kalıp geçişleri tipik olarak 5-10 mm kalınlığındadır. Ürünün yüzey pürüzlülüğünü azalttığı için çok daha kısa kalıp geçişlerinin uygulanmasına doğru bir eğilim başlamıştır [19].

Giriş kısmında alüminyum kalıp yüzeyine yapışarak kararlı bir alüminyum filmi oluşturur. Oksitlenmemiş alüminyum özellikle yüksek sıcaklıklarda (500 °C) çok reaktif bir malzeme olduğu için kalıp malzemesiyle reaksiyona girmesi beklenebilir. Eğer reaksiyon ürünleri alüminyuma yapışarak kalıp yüzeyinden ayrılırsa aşınma gerçekleşecektir [18].

100 kadar biyet ekstrüze edildikten sonra kalıp %25 NaOH çözeltisi kullanılarak kalıp odalarında bulunan alüminyum kütle çıkarılmalıdır ve ikinci aşamada çok ince silis kumu ile kumlanarak ön temizlik yapıldıktan sonra silisyum karbür zımpara kullanılarak alüminyum kalıntıları kalıptan temizlenmelidir. Kumlamada iri tane kum kullanımı sonucu nitrasyon tabakası hasar görerek işlevini yitirecektir. Zımpara kullanılarak yapılan detaylı ve nihai temizlik işlemi çok dikkatli yapılmalıdır çünkü kalıp geçiş yüzeyinde hasara neden olabilmektedir. Bu olayların haricinde kalıpta ekstrüzyon esnasında adhezif, abrazif ve termal yorulma ile aşınma oluşur. Bütün bu olayların sonucunda kalıp geçişi yüzeyinde gerçekleşen aşınma, yüzey

pürüzlülüğünü olumsuz yönde değiştirdiği için ekstrüzyon ürünlerinin yüzey kalitesinde büyük etkiye sahiptir. Ayrıca aşınma nedeniyle kalıp geçişleri arasında mesafenin değişimine ve geçiş yüzeyine yapışarak akışı etkileyen kalıntılardan kaynaklı olarak alüminyum profilin hem boyutsal ölçüleri hem de yüzey özellikleri olumsuz etkilenmektedir [18,19].

Alüminyum ekstrüzyon kalıplarında kullanılan AISI H13 sıcak iş çeliğinin yüzey işleminde en başarılı yöntem yıllarca gaz nitrasyon olmuştur. Kalıp aşınma direncini arttırmak için plazma nitrasyon, plazma sprey teknikleri ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi değişik yüzey işlem yöntemleri denenmiştir ve kısmen uygulanmaktadır. Son yıllarda PVD kaplamalar özellikle nitrasyondan sonra uygulanarak (Duplex – çift katmanlı işlem) ekstrüzyon kalıplarının korunması amaçlanmıştır. Bu tarz kaplamalar alüminyum ürünün yüzeyinde çapaklanma benzeri (pick-up) oluşumları, adhezif aşınmayı ve termal yorulmayı belirgin bir şekilde azaltmaktadır [18,19].

2.4 Kalıp Malzemesi Seçimi

Oda sıcaklığında veya düşük sıcaklıklarda şekillendirilemeyen demir, çelik ve diğer metallerin ısıtılarak şekillendirilmesi sıcak iş çeliklerine olan ihtiyacı doğurmuştur [31].

Sıcak iş çeliklerinde aranan belli başlı özellikler:

- Yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini koruyabilmesi
- Yüksek sıcaklıkta aşınma dayanımlarının yüksekliği
- Isı iletkenliğinin yüksekliği

Bu özellikler, sıcak iş çeliklerine krom, molibden, volfram, vanadyum, nikel ve kobalt elementlerinin uygun bir şekilde ilavesi ile elde edilebilir. Çelik seçiminin, talaşlı imalatın, ısıl işlemin ve kullanım şartlarının doğru seçilmesi en çok sıcak iş çeliklerinde bir arada ortaya çıkan kritik parametrelerdendir. Bu dört kademedен birinin veya birkaçının eksik/yanlış yapılması durumunda kalıpta çatlama, kırılma, öngörülenden erken aşınma gibi olumsuzluklarla karşılaşılması kaçınılmazdır [31].

Son yıllarda elektro cüruf altı ergitme (ESR) ve çok ince yapı (EFS) metotları ile üretilmiş sıcak iş çeliklerinin pazar payları ve kullanımları artmaktadır. Başta metal enjeksiyon kalıplarında çokça tercih edilen bu çelikler yüksek maliyetlerine rağmen

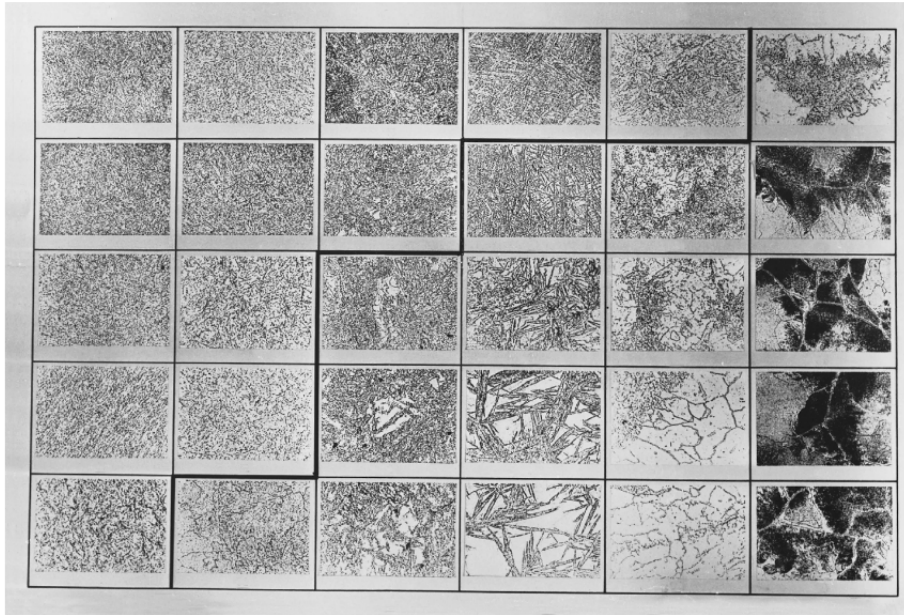
imalat süreçlerindeki ömürleri ve toplam verimlilikleri nedeniyle ön plana çıkmışlardır [31].

Yüksek sıcaklıklarda tane sınırlarına yerleşerek tane gevrekliğine neden olan kükürt bu çeliklerde çok eser miktardadır. Özellikle EFS metodu ile üretilen sıcak iş çeliklerinde, üretim sırasında uygulanan işlemler neticesinde yapı son derece ince hale getirildiği için, mekanik özelliklerin her noktada aynı olması (izotropi) sağlanmıştır [31].

Kısaca özetlemek gerekirse, kalıp çeliklerinde kullanılan sıcak iş çeliklerinin;

- Alaşım elementleri yapıya çok iyi dağıtılmıştır.
- Yüksek sıcaklıklarda tane gevrekliğine neden olan kükürt en düşük seviyededir.
- Mekanik özellikler ve çeliğin mikroyapısı yöne bağımlı değildir.
- Tavlanmış çelik yapısında son derece homojen yapı hakimdir.

Şekil 2.19'da AISI H13 sıcak iş çeliği için ideal olan ve olmayan mikro yapılar gösterilmektedir.



Şekil 2.19 : AISI H13 sıcak iş çeliğinin ideal ve ideal olmayan mikroyapıları. Siyah çizginin üzerinde kalan yapılar ideal yapılardır [31].

Ekstrüzyon kalıbının malzemesi yüksek sıcaklıklarda aşınmaya, ısıl döngülere (ön ısıtma - baskıda kalma - soğuma şeklinde birbirini takip eden tekrarlı ısıl döngüler), plastik deformasyona, korozyona dirençli olmalı ve yüksek sertliğe, akma

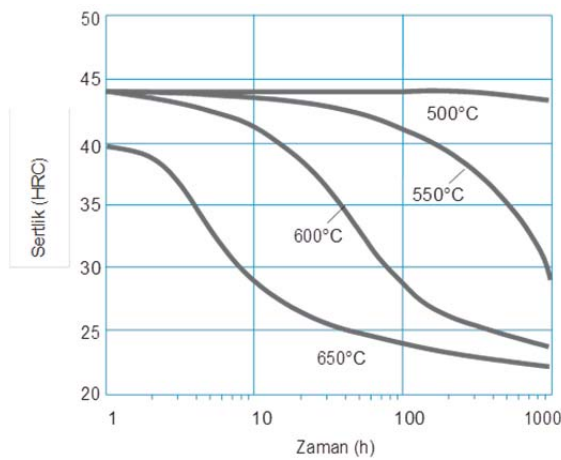
mukavemetine, sürünme direncine ve tokluğa sahip olmalıdır. Ekstrüzyon kalıp malzemesi olarak ASTM/AISI tarafından H serisi olarak gruplandırılan kromlu sıcak iş çeliği kullanılmaktadır.

Çizelge 2.2’de, ekstrüzyon sanayiinde en çok kullanılan sıcak iş çeliklerinin ortam ve çalışma sıcaklığına yakın mekanik özelliklerinin karşılaştırılması verilmektedir. DIN 1.2714 sıcak iş çeliği, ekstrüzyon kalıplarının destek parçalarının imalinde kullanılan çelik türüdür. Bu sıcak iş çeliğinden sıcak mukavemetinin düşük olması nedeniyle kalıp imal edilemez. DIN 1.2714, DIN 1.2344 (AISI H13) ve DIN 1.2365 (AISI H10) sıcak iş çeliklerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin bulunduğu teknik föylerin kopyaları sırasıyla Şekil A.1, Şekil A.2 ve Şekil A.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Ekstrüzyon sanayiinde kullanım alanı bulunan üç farklı sıcak iş çeliğinin mekanik özelliklerinin karşılaştırması [32-34].

	Sıcaklık (°C)	DIN 1.2714	DIN 1.2344	DIN 1.2365
E (GPa)	20	215	210	215
	500	176	173	176
UTS (MPa)	20	1600	1600	1600
	500	1000	1100	1150
YS (MPa)	20	1450	1460	-
	500	750	900	950

Şekil 2.20’de 500-650 °C sıcaklık aralığında AISI H13 sıcak iş çeliğinin sıcaklığa maruz kalma süresine bağlı olarak sertliğindeki değişim gösterilmektedir.



Şekil 2.20 : AISI H13 sıcak iş çeliğinde yüksek sıcaklıkta tutma süresinin sertliğe etkisi [35].

550 °C'ın ve üzerindeki sıcaklıklarda zamana bağlı olarak sertlik düşmektedir. Sıcaklık 600 °C'ın üzerine çıktığında sertlik düşüşü (yumuşama) hızlanmaktadır.

Ekstrüzyon sıcaklığı sınırlarında malzemenin sertliği sabit kalmaktadır.

2.4.1 AISI H13 (DIN 1.2344) sıcak iş takım çeliği

AISI H13 (DIN/ISO 1.2344) çeliği, yüksek sıcak sertlik, yüksek sıcak mukavemet, yüksek menevişdirenci, yüksek tokluk, iyi işlenebilirlik, ısıl işlemde mükemmel boyutsal kararlılık özelliklerine sahip olup yüzey işleminde uygun bir malzemedir. Bu nedenle başta alüminyum ve alaşımlarının şekillendirilmesi olmak üzere her tür sıcak şekillendirme kalıbı ve aparatında kullanılmaktadır. Uygulandığı farklı kalıp türlerine göre sertlikleri değişir. Sertlikleri ekstrüzyon kalıplarında 43-52 HR_C, dökme kalıplamada 44-50 HR_C, dövme kalıplamada ise 40-55 HR_C'dir. Ayrıca, sıcak kütük kesme bıçakları (hot shear) ve kalın kesitli soğuk kesmelerde kullanılan sıcak iş takım çeliğidir.

AISI H13 sıcak iş çeliği özellikle tercih edilen kalıp malzemesidir. Yüksek mukavemet ve düktilite, iyi meneviş direnci ve ortalama maliyete sahip olması (fiyat/performans oranının iyi olması) bu malzemenin en genel karakteristik özellikleridir. Nitrasyon gibi yüzey işlemleri ile uyumludur. Su verilmiş ve menevişlenmiş halde sertliği 450-500 HV civarındadır [21,29].

2.4.2 AISI H10 (DIN 1.2365) sıcak iş takım çeliği

AISI H10 (DIN/ISO 1.2365) çeliği, tıpkı AISI H13 çeliği gibi yüksek sıcak sertlik, yüksek sıcak mukavemet, yüksek meneviş direnci, yüksek tokluk, iyi işlenebilirlik, ısıl işlemde mükemmel boyutsal kararlılık özelliklerine sahiptir. Bu özelliklerin yanı sıra AISI H10 sıcak iş çeliği, ısıl işlemle tungsten çeliklerinden daha yüksek sertliklere ve tokluğa ulaşabilir. Özellikle mukavemet değerleri daha yüksek olduğu için ekstrüzyon sanayiinde bazı özel uygulamalar (yüzey özellikleri ve imalat toleransları hassasiyet gerektiren durumlarda) için tercih edilir. Maliyeti AISI H13 çeliğine göre yüksek olduğu için uygulama alanı sınırlı kalmaktadır.

3. EKSTRÜZYON KALIPLARINDA KARŞILAŞILAN HASAR TÜRLERİ

Alüminyum ekstrüzyon prosesinde, herhangi bir şekle ve boyuta sahip profil imal etmek için alüminyum biyet bir kalıbın içinden geçmeye zorlanırken sistem yüksek sıcaklığa ve yüksek yüklere maruz kalmaktadır. Kalıp geçişlerinin yüzeyleri mekanik ve termal zorlamalara, abrazif ve adhezif aşınmaya ve kimyasal reaksiyonlara karşı koymak zorundadır. Kaymalı aşınma en önemli aşınma şekli olarak görülmektedir. Ekstrüzyon ürününün yüzey kalitesi ve ölçüleri toleransların dışına çıktığında, ekstrüzyon kalıbı eğer yeterli paylar var ise onarılır, yok ise iptal edilerek hurdaya ayrılır. Ekstrüzyon kalıplarının servis ömürlerinin uzatılması, proses maliyetlerinin azaltılması için en öncelikli konudur [29].

Yüksek sıcaklık ekstrüzyonundaki tribolojik mekanizma oldukça karmaşıktır ve sürtünme, aşınma, malzeme transferi ve deformasyon olaylarını eş zamanlı olarak kapsamaktadır. Sıcak biyetle kalıp yüzeyinin teması kuvvetli adhezyona neden olur. Bu adhezyon sonucunda kimyasal reaksiyonlarla desteklenmiş yüksek sürtünme kuvvetleri kalıp yüzeyinin çözünmesine ve intermetalik bileşiklerin oluşmasına neden olur [36].

Olası tribo-oksidasyonun etkisi, temas bölgesinde oksijenin varlığına bağlı olarak, *disk üzerinde bilye* (ball on disc) test yöntemi ile (440 paslanmaz çelik ile %99,99 saflıkta alüminyum bilye çifti) vakum altında ve atmosfer şartlarında Kim ve diğerleri tarafından çalışılmıştır. Temas sırasında, kararlı hal değerine ulaşana dek sürtünme katsayısının da artmasına neden olan oksidasyon tabakasının geliştiğini görmüşlerdir [36].

Malzeme yüzeyindeki oksidasyon tabakasının görünümüne bakıldığında, atmosfer ortamındaki oksidasyonun vakum altında gerçekleşen oksidasyona göre daha fazla olduğu görülmüştür (Uygulanan vakum, oksidasyonu engelleyecek düzeyde değildir) [36].

Tercelj ve diğerleri yaptıkları çalışmada ekstrüzyon kalıbı için yüzey mühendisliği uygulamaları yapılmıştır. Sıcak iş çeliğinin davranışını, biyet ve kalıbın yüzey

etkileşimini en iyi şekilde temsil edebilecek etkin yüzey temasını hedefleyen, örneğin aşınma ile kopan parçacıkların temas alanında kalma olasılığını arttıracak şekilde, geleneksel aşınma testinden faydalanmışlardır [36].

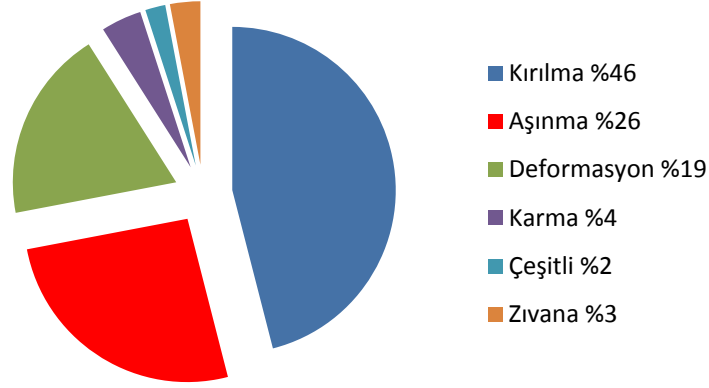
Difüzyon tabakasının sağladığı sürtünme özellikleri, nitrat tabakası kadar iyi değildir. Alüminyumun demire olan kimyasal ilgisinin çok kuvvetli olduğu bilinmektedir ve buna bağlı olarak aralarında kuvvetli adhezyon oluşacaktır. Bu nedenle nitrasyonlu çelik yüzeyinin modifikasyonu önerilmektedir. Bu amaçla PVD, CVD ve PACVD gibi sert kaplamalar önerilmektedir. Nitrasyon ve ardından uygulanan PVD ile elde edilen çift katmanlı işlemler; kaplamanın hemen altındaki sert difüzyon tabakasının yüksek yük taşıma kapasitesine bağlı olarak optimum tribolojik özellikler sergilemektedir [36].

A.F.M. Arif, A.K. Sheikh, S.Z. Qamar tarafından yapılan Alüminyum Ekstrüzyonunda Karşılaşılan Kalıp Hasarları Mekanizmaları Çalışması'nda kalıp türlerine bağlı olarak değişen yoğunluktaki hasar türleri istatistiksel olarak ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada 6063 alüminyum alaşımı ile profil imalatı yapılan 17 farklı porthole ve solid profil kalıbında karşılaşılan toplam 616 kalıp hasarı incelenmiştir [37].

Yorulma hasarları, sıcaklığa ve/veya mekanik zorlamalar sonucu gerçekleşen çatlak oluşumları *kırılma* olarak tanımlanmıştır. Çeşitli faktörlerin etkileri ile kalıp yüzeylerinde oluşan hasarlar *aşınma* olarak gruplandırılmıştır. Kalıbın bir parçasının ya da tamamının kalıcı olarak şekil değiştirmesi, bir başka deyişle plastik deformasyonu *deformasyon* olarak adlandırılmıştır. Az önce tanımlanan hasar mekanizmalarının birlikte oluşturduğu hasarlar ise *karma* olarak tanımlanmıştır. Hasarın net olarak hangi kategoriye dâhil edileceği durumlar (örneğin nitrasyon kaynaklı olarak kalıbın tamamının ya da geçiş kısmının yumuşak olması gibi) *çeşitli* kategorisine dâhil edilmiştir. Zıvananın kırılması, deformasyonu sonucu olan hasarlar da (sadece porthole kalıpları için geçerli) *zıvana* olarak gruplandırılmıştır [37].

Şekil 3.1'de değerlendirmeye alınan ekstrüzyon kalıplarında, kalıp türünden bağımsız genel olarak karşılaşılan hasar tipleri gösterilmektedir. En büyük paya açık ara kırılma/yorulma sahiptir (%46). Kırılmayı aşınma (%26) ve deformasyon (%19) takip etmektedir. Birkaç mekanizmanın birlikte etkili olduğu karma hasar türü

(%4) ile değişik hasar türlerini içeren çeşitli hasarlar (%2) oldukça düşük paya sahiptirler. Zıvanada gerçekleşen hasarlar (kırılma, aşınma ve deformasyon türündeki hasarlar) kalan %3'lük kısmı teşkil etmektedir [37].

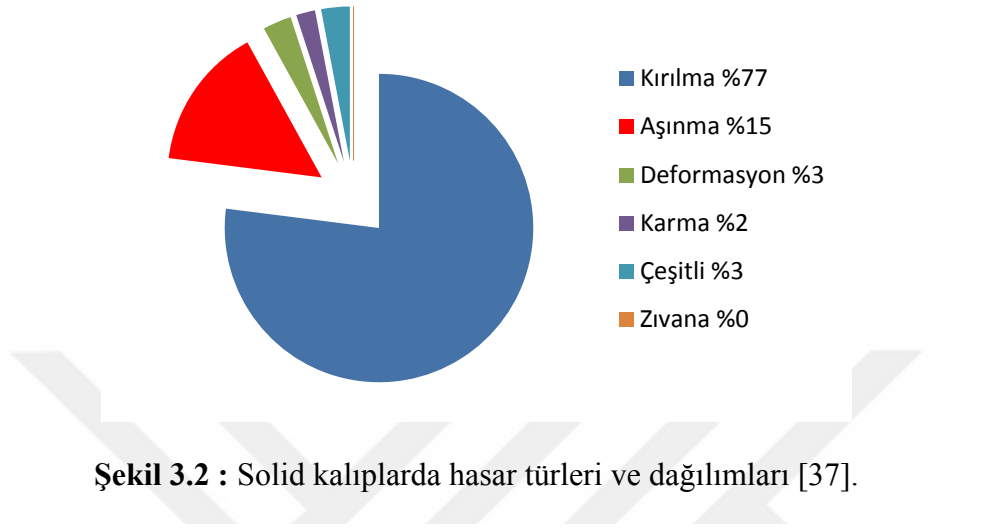


Şekil 3.1 : Ekstrüzyon kalıplarında genel olarak karşılaşılan hasar türlerinin dağılımı [37].

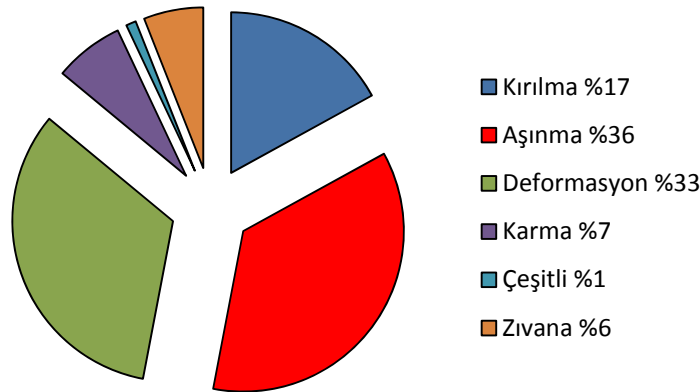
Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te kalıp türü bazında hasar dağılımları gösterilmektedir. Solid kalıplarda kırılma/yorulma %77 oranı ile açık farkla en büyük paya sahiptir. Daha sonra aşınma %15'lik oran ile ikinci büyük hasar türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Solid kalıplarda deformasyon %3'lük payla neredeyse ihmal edilebilir konumdadır. Solid kalıplarda zıvana bulunmadığı için bu hasar türü gerçekleşmez. Esasen zıvana bulunmadığı için çok daha basit yapıda olan giriş haznesinde, porthole kalıplarda gerçekleşen parçalara ayrılma-yeniden kaynama olayları gerçekleşmediği için, metal akışı çık daha rahat ve nispeten düşük baskı/basınçlarda gerçekleşmektedir. Bu nedenlerden dolayı solid kalıplarda aşınma çok daha az kritik bir konudur. Aynı şekilde basınç düşüşü ile birlikte sürtünme etkisi ile açığa çıkan sıcaklığın da etkisinin azalması sonucunda deformasyon hasarları da solid kalıplarda önemsenmeyecek kadar düşük paya sahip olmaktadır [37].

Porthole kalıplarda aşınma (%36) ve deformasyon (%33) neredeyse eşit oranda olup, kırılma (%17) hasarının önüne geçmektedirler. Zıvana ile ilişkili hasar türlerinin oranı %6 civarındadır. Porthole kalıplarda aşınma ve deformasyonun öne çıkmasının en önemli nedeni, bu kalıp türünde bulunan bir yada daha çok sayıda zıvananın, kalıp haznesinin, köprülerin ve kaynama odasının neden olduğu yoğun ve karmaşık akışın sürtünme, sıcaklık ve basıncı yükseltmesidir [37].

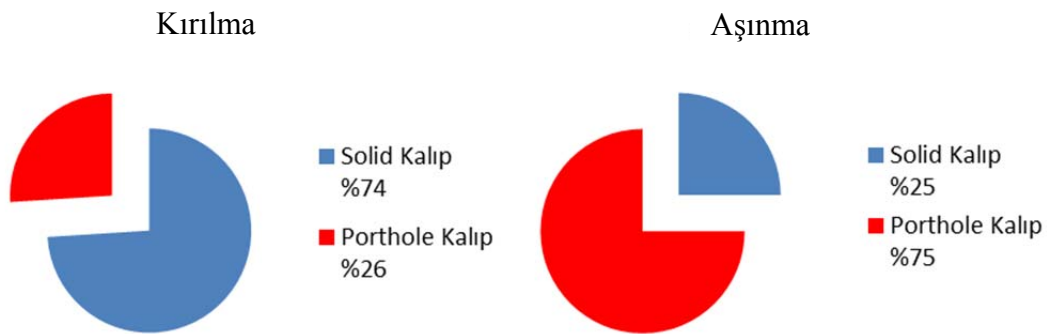
Kırılma oranının, solid kalıplara göre ciddi oranda azalmasının başlıca nedenlerinden biri, porthole kalıplarda çokça bulunan ince dillerin kırılma gerçekleşmeden önce deforme olmasıdır. Tıpkı bunun gibi, keskin köşeler, slotlar, kesit değişiklikleri gibi unsurlara karşı porthole kalıplar, solid kalıplara nazaran daha az hassastır [37].



Şekil 3.2 : Solid kalıplarda hasar türleri ve dağılımları [37].



Şekil 3.3 : Porthole kalıplarda hasar türleri ve dağılımları [37].



Şekil 3.4 : Kalıp türüne bağlı olarak kırılma ve aşınma hasarlarının oranları [37].

Şekil 3.4'te solid ve porthole kalıplarda aşınma ve kırılma/yorulma hasarlarının sahip oldukları dağılım ayrı ayrı kalıp türü bazında gösterilmektedir.

3.1 Kırılma

Ekstrüzyon kalıplarının hasar analizlerini yapmak için, kalıbın imalat sürecinin ve kullanım geçmişinin göz önüne alınması gerekmektedir. Uygun olmayan kalıp malzemesi bileşimi, su verme çatlaklarının varlığı, dengesiz malzeme akışı ve inklüzyonlar kalıp hasarı oluşumunda etkiye sahiptirler. Büyük orandaki kalıp hasarları, ısıtma işlem sorunları ile ilişkilidir. Isıtma işlem sırasında oluşan çarpılmalar, kalıbın işlenmesi ya da kullanımı sırasında oluşan sorunlar, korozyon (pitting ve/veya erozyon) gibi unsurlar da hasara neden olmaktadır. Bu nedenlerden ötürü bazı kalıplar deneme imalatı sırasında hasara uğrarlar. Deneme imalatı aşamasını geçen kalıplar yorulma/kırılma hasarı (çatlak ilerlemesi ile gevrek kırılma), aşınma (geçiş kısmındaki kademeli aşınma) ve deformasyon (plastik deformasyon) [37].

Çatlak başlangıçları genelde kesit değişimlerinin olduğu kısımlarda, keskin köşelerde, markalanan kısımlar gibi noktalarda gerçekleşir. Büyük döngüsel gerilmeler, boşluklarda yüksek gerilmelerin yoğunlaşması ile birlikte çatlak ilerlemesine neden olurlar. Kalıp ön ısıtma ve biyet ön ısıtma işlemleri ile birlikte ekstrüzyon esnasındaki sürtünme sıcaklığın en az 480 °C civarına çıkmasına neden olmaktadır. Alüminyum biyetin kalıp boşluğundan geçmesi için uygulanan 150-200 bar aralığındaki yüksek basınç, biyet-kovan ile biyet kalıp arasındaki sürtünme bu ısı artışına etki eden önemli faktörlerdir. Yüksek mukavemete sahip sertleştirilmiş sıcak iş çeliği malzeme, gevrek kırılma ile hasara uğrar [37].

Simetrik olmayan profil figürleri akış dengesini bozar. Bu durum sıcaklık ve yüksek basınç ile birleştiğinde kalıpta zıvana deformasyonuna neden olabilir. Ayrıca geçiş kısımlarında ekstra gerilmelere yol açar [37].

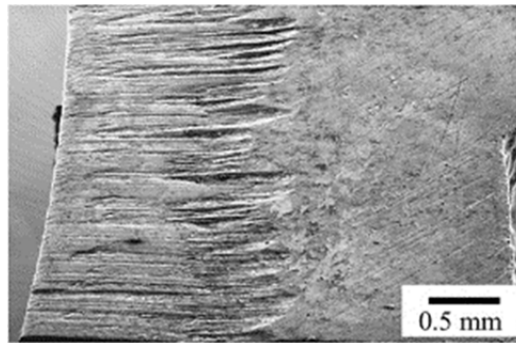
Şekil 3.5'te porthole bir kalıba ait zıvananın köprü kısımlarındaki çatlaklar görülmektedir. Oluşan bu çatlaklar ve plastik deformasyon nedeniyle zıvana ileri doğru hareket etmiş ve kalıbın kapak kısmındaki geçişler ile zıvananın geçişlerinin hizaları bozulmuştur.



Şekil 3.5 : Porthole kalıp zıvanasında köprü kısımlarındaki çatlaklar.

3.2 Korozyon

Ekstrüzyon kalıplarında korozyonun etkisi ayrı öneme sahiptir. Korozyon dar tolerans aralıklarında imalat gerçekleştirildiği için özellikle geçiş bölgelerindeki hassas ölçüleri etkileyecektir. Ayrıca korozyon ürünleri olan oksitler elmas tozuna yakın sertlikleri nedeniyle, imalat sırasında kalıp içinden geçmekte olan alüminyumla birlikte hareket ederken, kalıp yüzeylerinde aşındırıcı etkiye sahip olacaklardır. Bu durumdan da en çok ve hızlı şekilde kalıp geçişleri olumsuz etkilenecektir.



Şekil 3.6 : Kalıp geçişinin giriş tarafındaki aşınma izleri [21].

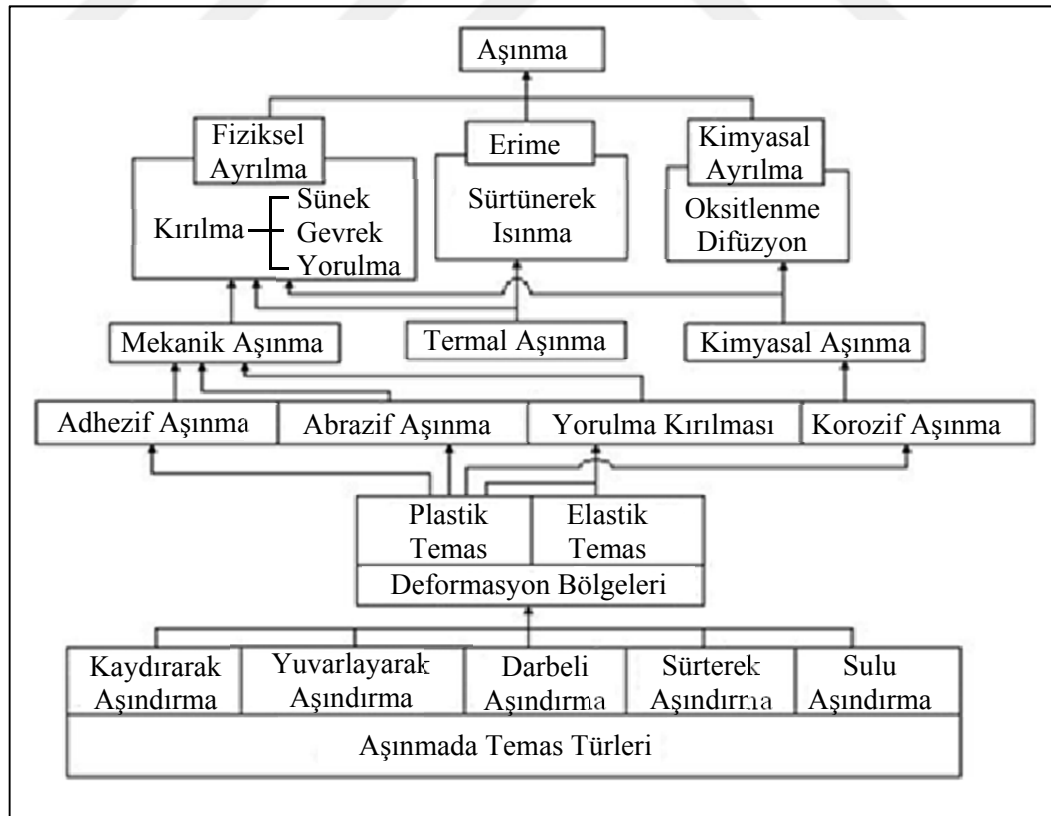
Şekil 3.6’da kalıp geçişinin giriş kısmında gerçekleşmiş aşınma görülmektedir. Bu aşınma hasarı, imalat sırasında ilerleyerek geçiş boyunun yarısına ulaştığında kalıbın akış dengelerinin ve ürünün ölçülerinin bozulmasına neden olacaktır.

Korozyon ürünleri sadece kalıp kaynaklı değildir. Sıvı metal hazırlanırken ve döküm esnasında iyi filtre edilmeyen ve ayrıştırılmayan cüruf ile alüminyum oksit kalıntıları da kalıp hasarlarına neden teşkil etmektedir. Tozlu ve kirli ortamlarda stokta tutulan ve yüzeyleri temizlenmeden imalata alınan biyetlerin üzerinde bulunan kirliliklerin bir kısmı da aşındırıcı özelliğe sahiptir.

3.3 Aşınma

Aşınma, genellikle temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. DIN 50320 normunda “Kullanılan malzemelerin katı-sıvı-gaz fazında bulunabilen diğer malzemeler ile teması sonucunda oluşan ve arzu edilmeyen yüzey bozulması olarak tanımlanmaktadır [38].

Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç farklı şekilde gerçekleşebilir. Bölgesel erimeler, kimyasal çözülme ve yüzeyden fiziksel kopmalar/ayrılmalar olarak sınıflandırılabilir (Şekil 3.7). Pratikte yüzeyden fiziksel olarak ayrılan malzemelerin neden olduğu hasar *aşınma* olarak isimlendirilmektedir [38].



Şekil 3.7 : Aşınma terimleri ve temas tipleri [39].

Bir aşınma sistemi;

- Aşınan malzeme
- Aşındıran malzeme
- Ara malzeme
- Yük
- Hareket

bileşenlerinden oluşmaktadır. Bütün bu bileşenlerin oluşturduğu sistem *Tribolojik Sistem* olarak adlandırılmaktadır. Bağlı hareketle birbirlerini etkileyen yüzeylerin arasında meydana gelen olayların incelenmesi olarak tanımlayabileceğimiz *Triboloji*, malzemelerin aşınma mekanizmalarını inceleyerek, bu olumsuz olgunun önlenmesi için yöntemler arayarak çok önemli bir rol üstlenmektedir [38,40].

Bir aşınma sistemindeki en önemli etkenlerden biri de ortam şartlarıdır. Tribolojik sistemin etkileşim içinde olduğu ortamdaki nem, sıcaklık, basınç, korozyon etmenleri gibi unsurlar aşınma şiddetini artırır [38].

Kalıp geçişi yüzeyi ile ekstrüzyon ürünü arasındaki tribolojik şartlar 480-570 °C aralığında bağlı olarak oksijensiz ve yağlamasız ortamda sürtünme olarak tanımlanmaktadır. Kalıp geçişi normal gerilmelere ve bunların sonucunda kesme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bu gerilmeler geçiş çıkışına doğru azalmaktadır. Bir tane alüminyum biyetin ekstrüzyonu 45-120 saniye kadar sürmektedir yeni biyet yükleme sürecinde sistem 15 saniye kadar durup beklemektedir. Bu duruş ve daha sonrasındaki çalışmanın, kalıp geçişinin aşınmasında hayati rol oynadığı düşünülmektedir [20].

Biyet yüzeyinde doğal olarak bulunan ve biyet önısıtma işleminde daha da kalınlaşan alüminyum oksit filmi (Al_2O_3) ve yine biyet kalitesine bağlı olarak yapıda bulunabilen Al_2O_3 yapısındaki kalıntılar neredeyse bazı yapay elmas aşındırıcılara yakın sertliktedir. Benzer şekilde kalıp yüzeylerinde bulunabilen pas kalıntıları da aşındırıcı karakterdedir. Biyet ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünme, kullanıma bağlı olarak alüminyumun içerdiği bu tarz aşındırıcı bileşikler nedeniyle ağır aşınma ile sonuçlanabilmektedir (Şekil 3.8) [37].

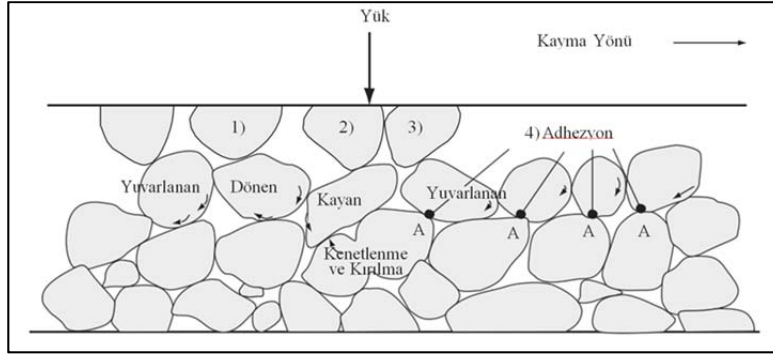


Şekil 3.8 : Kalıp geçişinde ağır aşınma izleri.

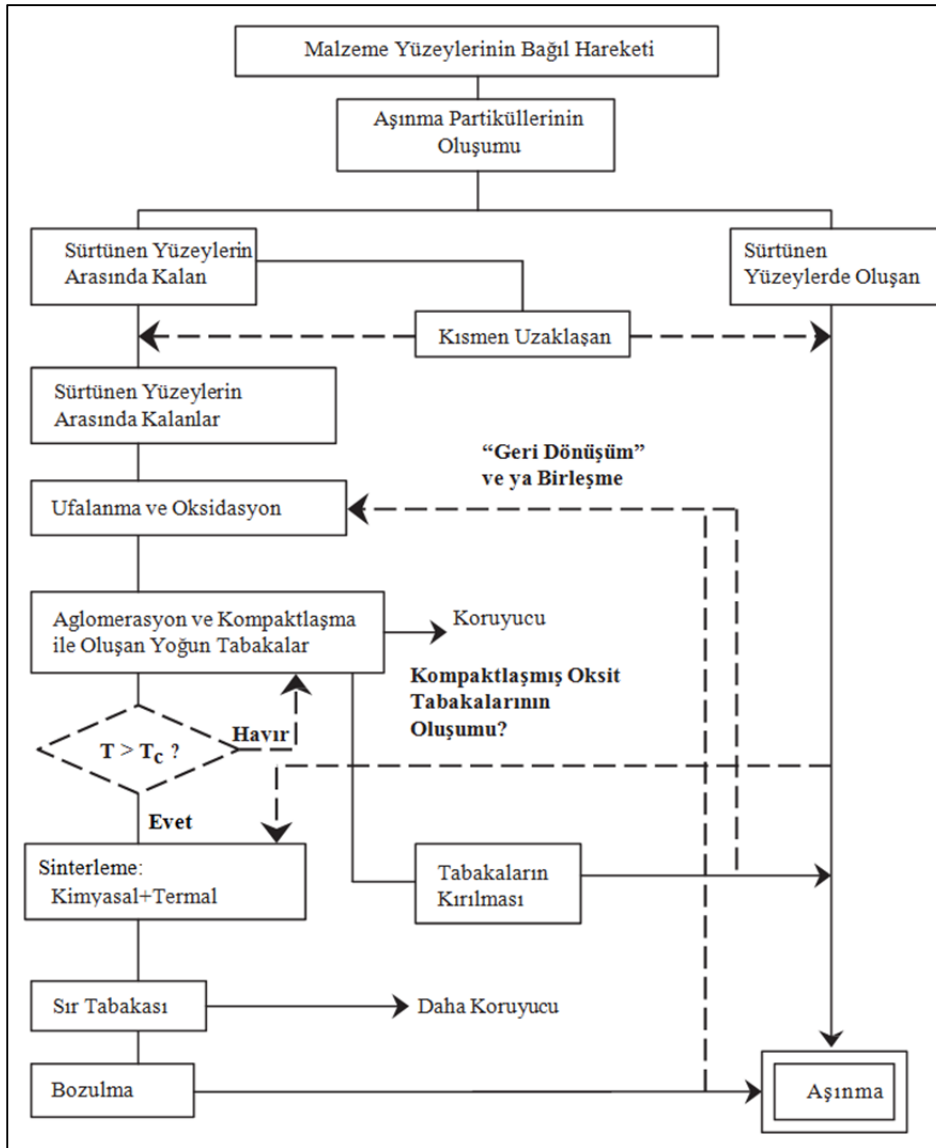
Bu tarz aşınmaların gözlemlenmesi ve sonuçlarının mukayese edilmesi için, pin-on-disc ve ball-on-disc yöntemleri bu konuda birçok laboratuvarında en yaygın olarak kullanılan tribolojik testlerdir [40].

Şekil 3.9’da aşınan yüzeylerin birbiri üzerinde kayma hareketi yaptığı sırada, yüzeylerden kopan parçacıkların nasıl hareket ettikleri şematize edilmiştir. Buna göre [41]:

- Dönen (1): Sabit veya hareket edemeyen parçacığın ve ya çıkıntının önüne hapsolan parçacıktır. Diğer yüzeyin pürüzleriyle temas etmesine rağmen bulunduğu yeri değiştiremez ve sadece kendi ekseninde bulunduğu noktada dönebilir.
- Bağlı Kayan (2): Sürtünen yüzey çiftinin birisine sabitlenen ve ya bir boşluğa sıkışıp hareket edemeyen taneciğin, diğer yüzeye sabitlenmiş bir başka taneciğe göre kaymasıdır.
- Yuvarlanma (3): Hareket eden diğer yüzeye birlikte serbestçe hareket ederken kendi eksenini etrafında dönebilmesi sayesinde her hangi bir boşluğa ve ya çıkıntıya sıkışmadan hareket edebilen parçacıklardır.
- Adhezyon ve ya Sinterlenme Tesirli Yuvarlanma Mekanizması (4): Komşu parçacıkların birbiri ile adhezyonu, parçacıkların yuvarlanmalarını azaltarak serbest yuvarlanma mekanizmasına göre daha fazla sürtünmenin oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.9 : Aşınan yüzeylerin birbiri üzerinde kayma hareketi esnasında oluşan parçacıkların, olası hareket mekanizmaları. 1-) Dönen, 2-) Bağlı Kayan, 3-) Yuvarlanan ve 4-) Adhezyon veya Sinterlenme tesirli yuvarlanma mekanizması [41].



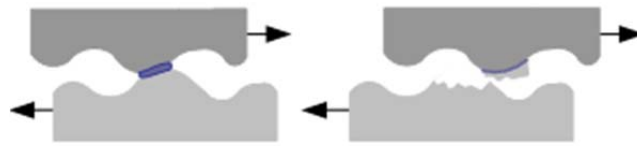
Şekil 3.10 : Farklı sıcaklıklar için aşınma süreçlerini göstren Jiang Diyagramının geliştirilmiş versiyonu [41].

Şekil 3.10'da parçalanmış oksit tabakası parçacıklarının olası hareket senaryoları şematik olarak gösterilmektedir. Orijinal diyagramda kırılan sır tabakaları ile parçacıklar için geri dönüşüm hatları bulunmamaktadır. Bir karar kutucuğu vasıtası ile Jiang'ın tanımladığı kritik sıcaklık (T_c) ile fiili sıcaklık (T) arasındaki bağlantıya göre neler olabileceğini göstermektedir [41].

Metalik yüzeylerin rölatif hareketleri ile aşınma partükülleri oluşur. Bazı parçacıklar aşınma kanalının dışına çıkarlar. Diğer parçacıklar aşınma kanalında kalırlar. Kalan bu parçacıkların tekrarlanan plastik deformasyon ve kırılma ile yeniden parçalanırlar. Bu kırılma-parçalanma sırasında taze metalik yüzeye sahip partiküller kısmen ya da tamamen oksitlenirler. Katı yüzeyler arasındaki, yüzey enerjisinden kaynaklanan yapışma kuvvetleri ile, nispeten kararlı sıkıştırılmış tabakaların oluşumuna bağlı olarak, aşınma yüzeylerindeki çeşitli alanlarda sürekli parçalanma ve topaklanma gerçekleşir [41].

3.3.1 Adhezif aşınma

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan *adhezif aşınma*, en sık rastlanılan aşınma türü olmasına rağmen, genelde gerçekleşen hasarı hızlandırıcı etkisi bulunmamaktadır. Adhezif aşınma genel olarak karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre göreceli olarak hareket eden iki yüzeyin birinden kopan parçacığın, diğer yüzeye yapışmasıdır. Buna göre adhezif aşınma, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir [38].



Şekil 3.11 : Adhezif aşınma mekanizmasının şematik gösterimi [42].

Şekil 3.11'deki gösterildiği gibi, iki ayrı metal yüzeyi basınç altında göreceli olarak farklı yönlerde hareket ettiklerinde, yüzeylerinde bulunan çıkıntılar hem sürtünme nedeniyle açığa çıkan ısınn etkisi ile, hem de soğuk kaynak neticesinde birbirleri ile bağ oluştururlar. Oluşan bu bağ, birleşen çıkıntıların diğer bölgelerindeki bağ yapısından daha kuvvetli ise, yüzeylerin birbirlerine göre yaptığı hareketin devam etmesi ile bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopacaktır. Bu kopma kaynak noktasında gerçekleşmezse, bir yüzeyden diğerine malzeme transferi meydana

gelecektir. Bu işlemin çalışma koşullarında birçok kere tekrarlanmasıyla, adhezif aşınma hissedilir boyutlara ulaşacaktır [38].

Adhezif aşınma, özellikle birbiri ile kayma sürtünmesi gerçekleştiren malzeme çiftinde oluşan *kaynama* olayının bir sonucudur. Birbiri üzerinde hareket eden yüzeylerin ancak küçük bir kısmı temas halindedir. Bu temas bölgelerindeki gerilmeler çok küçük yüklemelerde dahi akma dayanıma ulaşırlar ve geçerler. Bu nedenle moleküler yapışma kuvvetleri etkisini gösterir [38].

Genel olarak adhezif aşınma için alınabilecek önlemler şu şekilde sıralanabilir:

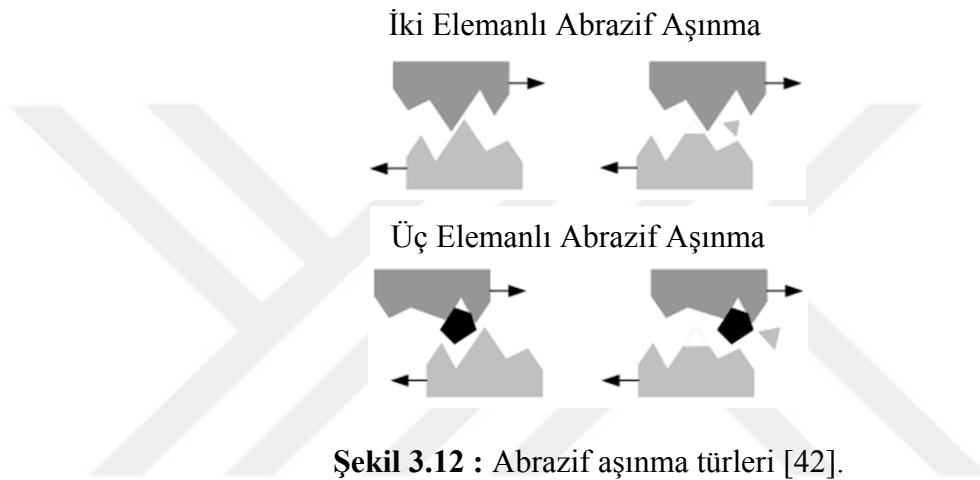
1. Yağlama: Adhezif aşınma, sıcaklığın bölgesel attığı kısımlarda meydana geldiği için, iyi bir yağlama ile hem yüzeyler arası sürtünme azaltılır, hem de yağlayıcı vasıtası ile sistemden ısı uzaklaştırılabilir. Bu şekilde mikro kaynak bölgelerinin önüne geçilebilir.
2. Birbiri içinde çözünmeyen metaller kullanmak: Bu yöntem ile adhezif aşınmayı oluşturan mikro kaynak prosesinin gerçekleşmesi engellenerek, adhezif aşınma tamamen ortadan kaldırılabilir. Ancak pratikte bu yöntemin uygulaması çok sınırlıdır.
3. Düz yüzey kullanımı: Birbiri ile etkileşim halinde olacak yüzeylerde soğuk kaynamayı oluşturacak çıkıntılar yok ise, adhezif aşınma gerçekleşmeyecektir. Bu düz yüzeyler arasına yağlayıcıların uygulanması ile yüzeyler birbirleri ile temassız olarak kayacaklardır.
4. Metal-metal temasını önlemek: Adhezif aşınmayı oluşturan metal-metal temasını engellemek amacıyla yüzeyler kimyasal filmler ile kaplanabilir. Bu kaplamalar aşınmayı engeller ancak bir süre sonra kendileri aşınarak bitebilirler. Fakat bu durumda dahi aşınma süresini uzatırlar. [38]

Adhezif aşınma yüzeye etkiyen normal yük, kayma mesafesi (yolu) ve aşınan malzemenin sertliği ile orantılıdır [38].

3.3.2 Abrazif aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması da olarak adlandırılan *abrazif aşınma*, hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrazif aşınma, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan parçacıklarla basınç altında etkileşmesiyle, sert parçacıkların malzeme yüzeyinden parçalar koparması olarak tanımlanabilir [38].

Bu tarz aşınmada sert ve keskin parçacıklar, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırır. Bu aşınma, *iki elemanlı* ve *üç elemanlı* olmak üzere iki türdür (Şekil 3.12) [38].



Şekil 3.12 : Abrazif aşınma türleri [42].

İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen malzemelerin doğrudan birbirleri ile etkileşimleri sonucu meydana gelmektedir. Üç elemanlı abrazif aşınmada ise, aşınan ve aşındıran malzeme arasında serbest ara malzeme bulunmaktadır. Bu ara malzemeler bazı durumlarda aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıklardan oluşmaktadır [38].

Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrazif veya adhezif aşınma olarak başlayıp, üç elemanlı abrazif aşınma olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaş parçacıkları ve parçalanmış oksit parçaları üçüncü malzemeyi yani ara elemanı oluştururlar. Serbest hale geçen mikro talaş parçacıkları genellikle ana malzemeden daha sert oldukları için aşınmayı hızlandırırlar [38].

Abrazif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farkı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir. Bu

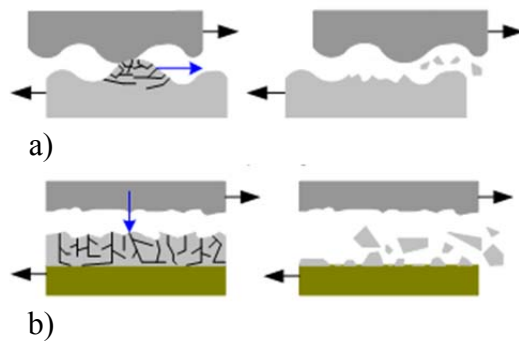
şekilde parçacıkların yüzeye daha az batması ve dolayısı ile çok daha az çapak kaldırması sağlanarak bıraktıkları izler küçültülebilir [38].

Abrazif aşınmanın engellenmesi ya da hızının en aza indirilmesi için aşağıdaki yöntemler uygulanabilir:

1. Yüzey sertliğini arttırmak: Abrazif aşınmanın engellenmesinde veya aşınma hızının azaltılmasında en etkili yoldur. Ancak bazı durumlarda bu yöntemin uygulanması daha büyük sorunlara yol açabilmektedir. Örneğin kesici takımlarda sertliğin arttırılması aşınma direncini yükselterek körlenmeyi geciktirecek, ancak gevrek kırılma riskini yükseltecektir.
2. Abrazif parçacıkları uzaklaştırmak: Abrazif aşınmaya neden olan sert parçacıkların sistemden uzaklaştırılması ile abrazif aşınma engellenebilir. Bu amaçla abrazif aşınmanın oluşabileceği ortamlarda hava, su ve yağlarda bulunan partiküller filtre edilmelidir.

3.3.3 Yorulma aşınması

Değişken ve tekrarlı yüklemeler sonucu oluşan aşınma türüdür. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde gözlemlenen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma olayında görülmektedir. Gerçekleşen zorlanmalar sonucunda yüzeyde çatlaklar oluşur. Oluşan bu çatlaklar malzeme yüzeyinden parçacıkların ayrılarak çukur ve oyukların oluşmasına neden olurlar (Şekil 3.13) [38].



Şekil 3.13 : Yorulma aşınmasının şematik gösterilişi. a) kuvvet ile hareketin aynı yönde olduğu hal, b) kuvvetin yüzeye dik olduğu hal [42].

3.3.4 Eroziyon aşınma

Eroziyon aşınma, taşıyıcı ortam (örneğin bir sıvı) içerisindeki sert parçacıkların malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda kayması ya da yuvarlanması esnasında meydana gelir. Kayma veya yuvarlanma sırasında, yüzeyle temas halinde olan her bir parçacığın uzun bir süre/döngü sonunda metal yüzeyinden çok sayıda parça koparması ile eroziyon aşınma hasarı gerçekleşir.

Eroziyon aşınmanın bu tanımına ve açıklanan oluşum şartları dikkate alındığında, bu aşınma türünün pompalarda, pervanelerde, fanlarda, nozullarda, boru ve tüplerin dirsek veya keskin geometriye sahip kısımlarında ve bu tarz koşullara sahip sistemlerde/proseslerde yaygın olarak oluştuğu gözlemlenmektedir.

Sıcaklık ve akış hızı arttıkça, aşınma hızlanmaktadır [38].

3.4 Yorulma

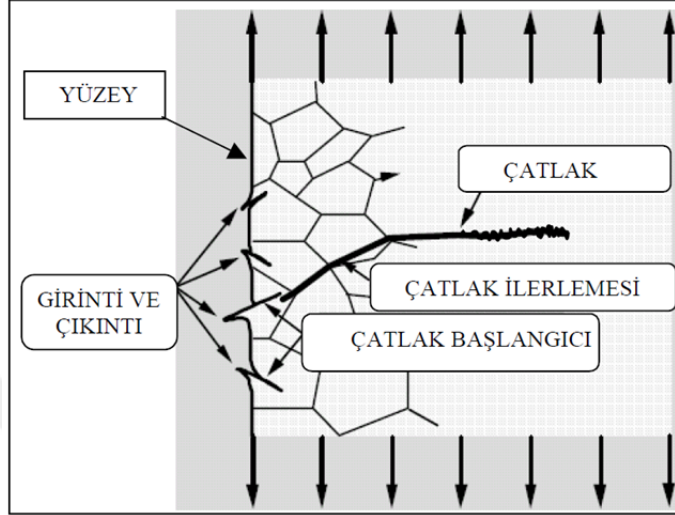
Ekstrüzyon prosesi, sabit kesitli parçaların yüksek miktarda imalatında genellikle en ekonomik yöntemdir; çünkü tasarımcı ihtiyaç duyduğu her yere metal malzemeyi konumlandırabilir. Birçok durumda ekstrüzyon imalat için kullanılacak tek yöntem halini alır. Metal şekillendirme işlemlerinde kalıp ömrü döngüsü büyük oranda aşınmadan etkilenmektedir. Aşınma şekil verilen parçaların ağırlık ve ölçü toleranslarını etkiler. Yorulma da beklenmeyen ani kırılmanın gerçekleşmesini sağlar [43].

Genellikle kalıp ömrü, kalıp malzemesinin özellikleri ve yük altında meydana gelen gerilmelerin oluşturduğu etkilerle belirlenir. Ekstrüzyon prosesinde kalıp ve takımlarının yorulma ömürlerinin tahmin edilebilmesi; kalıp takımlarının değiştirilme/yenilenme zamanlarının belirlenmesi, proses kontrolü ve takım maliyetlerinin değerlendirilebilmesi için önemlidir. Genellikle takım maliyetleri toplam parça imalat maliyetlerinin önemli kısmını oluşturmaktadır [43].

Bir ekstrüzyon kalıbı sadece biyetten gelen sıcaklıkla değil, sürtünme ve şekil değiştirme nedeniyle oluşan ısının tesiri ile yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır.

Yorulma, dinamik ve dalgalanan yüklere maruz kalan yapılarda oluşan kırılma türüdür. Tek başlarına uygulandıklarında çatlak oluşması için çok küçük olan yüklerin tekrarlı uygulanması sonucunda kalıplarda yorulma çatlakları oluşur.

Parçalarda ve makinelerde oluşan çatlaklar en tehlikeli hasar türüdür. Yorulma çatlağı sıklıkla yüzeyden başlar, çünkü yük altındaki metallerde yüzey gerilmesi her zaman iç gerilmelerden daha yüksektir. Bu durum çatlak başlangıcıdır (Şekil 3.14). Bundan sonra gerilmeye dik yönde çatlak ilerleyebilir. Bu evre çatlak ilerlemesi olarak adlandırılır. En son aşamada parça kırılır [43].



Şekil 3.14 : Yorulma çatlağının aşamaları [43].

Modern yorulma teorileri her aşama için ayrı analiz yapılabilmesini sağlamaktadır. Çatlak oluşumu teorileri, yorulma çatlaklarının parçanın yüzeyinde bölgesel gerilmeler sonucunda meydana geldiğini varsaymaktadır. Çatlak ilerlemesi teorileri de çatlağın büyümesinin, parçanın iç gerilmeleri ile ilişkili olduğunu söylemektedir. Kırılma ise kırılma mekaniği kullanılarak analiz edilebilmektedir [43].

4. EKSTRÜZYON KALIPLARINDA AŞINMA DAYANIMINI ARTTIRMA YÖNTEMLERİ

Ekstrüzyon, alüminyum profil imalatı için çok önemli endüstriyel yöntemdir. Alüminyum biyetin preslenerek herhangi bir şekildeki kesit boşluğuna (figür) sahip olan bir kalıptan geçirilmesi ile profil imalatı gerçekleştirilir [17].

Ekstrüzyon kalıplarının kullanım ömrünün uzatılması proses maliyeti açısından önemli bir stratejidir. Kullanım esnasında kalıp geçişinin yüzeyi yüksek mekanik, termal, kimyasal ve tribolojik yüklere maruz kalmaktadır. Yetersiz sertliğe bağlı hasarın ardında (kalıp malzemesinin düşük kalitesine ve/ve ya yetersiz ya da yanlış ısı/yüzey işleme bağlı olarak) aşınma kalıp ömründeki azalmanın en önemli nedeni olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıcak ekstrüzyonda; ekstrüzyon kalıplarının aşınması ekonomik ve teknolojik olarak öneme sahiptir, çünkü ürünün hem yüzey kalitesini hem de geometrik ölçülerini aynı anda etkilemektedir. Ekstrüzyon ürününün yüzey kalitesini ve ölçülerinin hassasiyetini sağlamayı hedefleyen gelişmiş uygulamalarla kalıpların servis ömrünün artması sağlanırken, hurda, set-up zamanı maliyeti gibi giderlerin azaltılması hedeflenmektedir [17,21,30,36].

4.1 Ekstrüzyon Kalıplarında Isıl İşlemler ve Yüzey Sertleştirme Teknikleri

Son yirmi yıllık süreç içinde gaz ve plazma nitrasyon, PVD sert seramik kaplamalar ve çift katmanlı işlemler diğer yüzey işlemlerine göre çok daha popüler metotlar olarak literatüre girmişlerdir [28].

4.1.1 Nitrasyon

Ağır yük şartlarında kullanılmakta olan mühendislik ürünlerinin performanslarının ve ömürlerinin arttırılması için modifiye edilmiş yüzeylerin faydaları geçmiş yıllarda fark edilmiş ve kanıtlanmıştır. Uzunca bir süre nitrürleme düşük işlem sıcaklığı nedeniyle takım çelikleri için özellikle yüzey sertleştirme açısından en uygun termo-kimyasal tekniği olarak ön plana çıkmıştır [44].

AISI H13 çeliklerine yüksek sıcaklıklarda uygulanan ısıt işlemler sonucunda elde edilen iyi tokluk ve makul sertlik değerlerine (genellikle 48 ± 2 HRC) rağmen bu malzemeler mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesiyle beraber termal çatlak oluşumu direncinin artırılması için yüzey işlemlerinin yapılması gerekmektedir [28].

Nitrasyonda genellikle yüzey sıcaklığı 450-580 °C aralığında olan çelik malzemeye sıvı, gaz veya vakum ortamında azotun difüzyonu gerçekleşmektedir. Gaz nitrasyon, alüminyum ekstrüzyon kalıplarında genel olarak uygulama alanı bulmuştur. Termal ayrışma reaksiyonu ile amonyum gazından azot açığa çıkar ve azotun çeliğe difüzyonuyla, malzemenin iç kısmından yüzeye doğru artan sertlikle karakterize edilen difüzyon bölgesini oluşturur. 50-300 µm kalınlığında azotla zenginleşmiş difüzyon bölgesi ve yüzeyin üzerinde ϵ -Fe₂₋₃N ve γ' -Fe₄N, ve ya her ikisinin karışımından oluşan demir nitrür içerikli ince bir tabaka oluşur. Genellikle, Bu tabaka “Beyaz Tabaka” olarak adlandırılır ve yaklaşık 1-20 µm kalınlığındadır. Ulaşılan sertlik aralığı 1000-1200 HV civarındadır. Beyaz tabaka bağıl olarak gevrek yapıdadır. Beyaz tabakanın aşınma direncini azalttığı ya da faydasının olmadığı yönünde fikir ayrılığı mevcuttur [18,21,28].

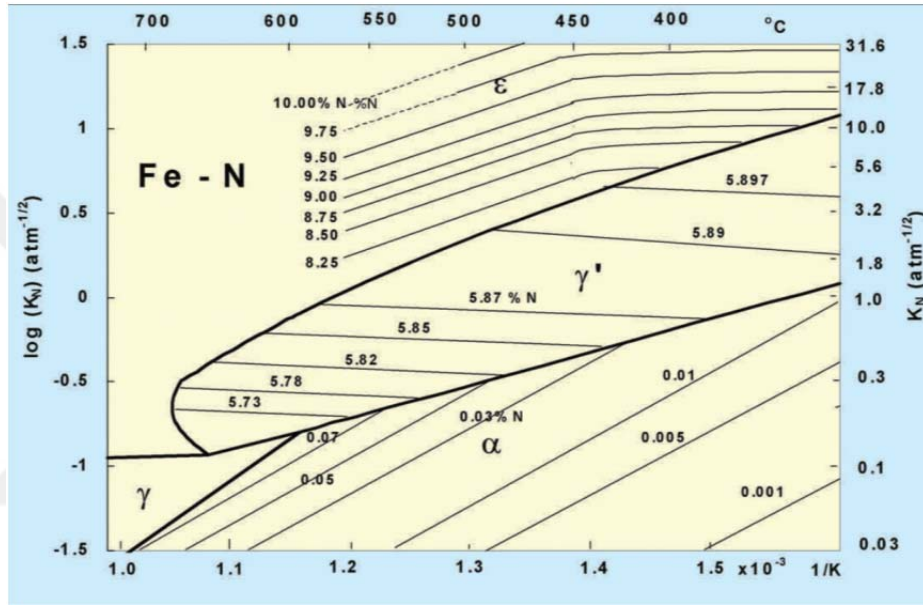
Sıcak iş çeliklerinin yüksek yüzey gerilmeleri nedeniyle gaz ve plazma nitrasyon yöntemlerine nazaran daha yumuşak nitrasyon yapılabilen tuz banyosu yöntemleri olan Tenifer ve Tufftride tercih edilmektedir. Düşük maliyet, yüksek meneviş direnci ve sıcak mukavemet, ekstrüzyon kalıbının aşınma direncinde önemli artış sağlayan bu yöntemin önemli avantajlarındandır. Genellikle, bu proses sonucu oluşan gevrek demir nitrat tabakası (beyaz tabaka) mekanik yöntemlerle kaldırılır. Ancak endüstriyel uygulamalarda bu işlem her zaman kabul görmemektedir [36].

Sanayi endüstrisinde uygulanan nitrürleme işlemlerinin çoğunda kullanılmakta olan gaz nitrasyon fırınları içerisindeki atmosferin nitrürleme kabiliyeti yeterince kontrol edilemez. Bu nedenle nitrasyon işlemi uygulanan parçaların arttırılan yüzey sertliğine bağlı iyileştirilen mekanik özelliklerinin, parçanın çalışacağı ortama ne oranda uygun olacağı ve ne tip sonuçlar doğuracağı belirsizdir [45].

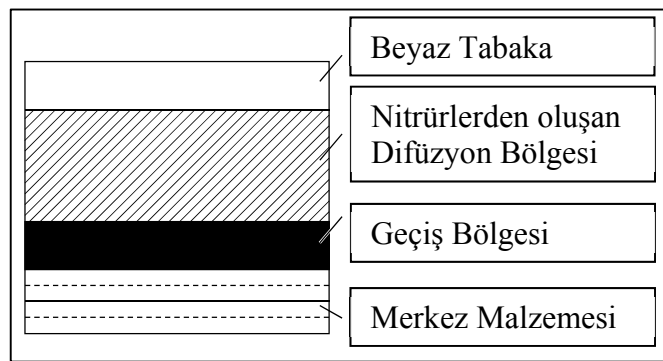
Nitrürleme işleminde geçerli olan en temel termodinamik ilke, metal yüzeyinde yeni oluşan azot konsantrasyonunun korunması ilkesidir. Teorik olarak bilinen ancak

nitrürleme proseslerinde hemen hemen hiç uygulanamamış bir kavram olan KN, nitrürleme potansiyelini simgeler (Şekil 4.1) [45].

KN, çeliğin yüzeyinden çekirdeğe doğru oluşan difüzyon bölgesinin (Şekil 4.2) sağlanması için gereken azot miktarını ve yüzey dokusunun doğrudan doğruya ϵ -Fe₂₋₃N ve γ' -Fe₄N fazlarındaki azot konsantrasyonuyla ilişkilendirilmiş yeni oluşan azot seviyesini belirten matematiksel bir ifadedir. Nitrasyon proseslerinde bu zamana kadar uygun sensörler geliştirilemediğinden dolayı, KN formülünün pratik olarak uygulanması zor olmuştur [45].

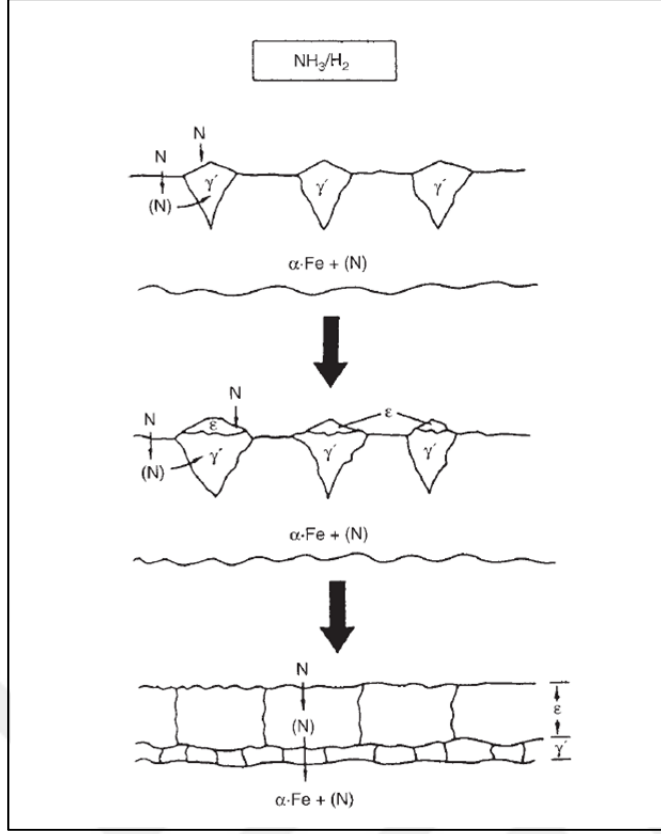


Şekil 4.1 : Nitrasyon potansiyel diyagramı [46].



Şekil 4.2 : Nitrasyon tabakasının genel yapısı [45].

Şekil 4.3'te ϵ -Fe₂₋₃N ve γ' -Fe₄N nitrür fazlarının çekirdeklenme evreleri gösterilmektedir. Nitrürlerin oluşumu, çelik yüzeyi ile nitrürleyici ortam arasındaki ara yüzeyde önce γ' -Fe₄N fazının oluşumu ile başlar. Bu süreç beyaz tabakayı oluşturan diğer faz olan ϵ -Fe₂₋₃N çekirdekleninceye dek sürer [45].



Şekil 4.3 : ϵ ve γ' nitürlerin oluşumunun şematik gösterimi [45].

Nitrasyonda yüzeylerin çekici özellikleri, demir nitürden (Fe_4N ve/veya Fe_3N) meydana gelen beyaz tabakanın altında oluşan azot difüzyon bölgesiyle ortaya çıkar. Beyaz tabakanın sertliğinin genel olarak çeliğin tipine ve işlem parametrelerine bağlı olarak 900 ile 1100 HV arasında değiştiği Pye tarafından bildirilmiştir. Nitürleme birçok mühendislik uygulaması için gerekli olan yüksek aşınma direnci ve iyi sürtünme özelliklerini sağlamasına rağmen, Pogornik ve diğerleri tribolojik temaslarda ve/veya 500 °C'ın üzerindeki çalışma sıcaklıklarında bağıl olarak yumuşak $\alpha-Fe$ 'in beyaz tabakadan ayrışmasıyla, tabakanın ufalanması sonucu olumsuz etkilerin oluştuğunu göstermiştir [44].

4.1.2 Sert ince film kaplama teknikleri

Son yıllarda sıcak iş çelikleri ve bu çeliklerden imal edilen donanım ve takımların yüzey özelliklerini geliştirmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Kokil kalıba döküm, sıcak ekstrüzyon ve sıcak dövme gibi sıcak şekil verme proseslerinde kullanılan araç-gereçlerin geliştirilmesi metal imalat sektörünün büyük ilgisini çekmektedir. 600 °C ve daha yüksek sıcaklıklar, çok büyük şekillendirme kuvvetleri ve özel tribolojik sistemler bu iş sahasının genel karakteristik özellikleridir [47].

Plastik şekil verme operasyonlarında kalıp ve makine yüzeyleri yüksek sıcaklıkla birlikte korozyon maddelerinin saldırılarına ve abrazyon etkisi olan zerreçiklerden oluşan zorlu çalışma ortamlarına maruz kalmaktadırlar. Bu ortam şartları, makine parçalarının servis ömürlerini kısaltmakta ve imalat kalitesi ile verimliliği düşürmektedir. Bu nedenlerden dolayı teknolojik ve ekonomik bakış açılarından, parçaların aşınma ve korozyon dirençlerinin artırılması çok önemlidir [40,48].

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile elde edilen kaplamalar eşsiz fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ürün yüzeyinin korunması ve geliştirilmesi için çok ilgi çekici teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir. PVD kaplamalar için artan sayıda yeni uygulama alanı bulunmaktadır. Sert ince kaplamalar günümüzde mekanik parçaların ve aletlerin sürtünmelerini ve aşınmalarını azaltıcı birçok uygulamada kullanım alanı bulmuşlardır. Kaplama malzemelerinin yüzeyde biriktirilmesi için çok yönlü uygulamaları olan fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD) gibi teknikler uygulanmaktadır. PVD'nin avantajı, bağıl olarak düşük biriktirme sıcaklık (200-500 °C) ile birçok endüstriyel öneme sahip malzemenin kaplanmasına olanak tanımasıdır [20,40].

PVD kaplama tekniği ile uygulanan ince seramik kaplamaların, mukavemet ve aşınma direncinin artırılması ve uygun yüzey filmi malzemesi seçimi ile korozyon direncinin artırılabilmesi alanlarındaki yararları çok iyi bilinmektedir. Öte yandan gelişmiş aşınma direnci özelliği sağlayan kaplama malzemesi yüzeyinden altlığın içine doğru çatlakların ilerlemesine bağlı olarak yorulma ömrünün azalmasına neden olacaktır. Yorulmanın, parçanın yüzeyindeki kalıntı gerilmelerle yakından ilişkili olduğu bilinmekte ve buna bağlı olarak basma yönünde kalıntı gerilme oluşturacak kaplama tekniklerinin yorulma davranışını çekme yönünde kalıntı gerilme oluşturan yüzey işlemlerine göre çok daha iyi duruma getirecektir [40,49].

Son yıllarda ince sert kaplamalar ekstrüzyon kalıplarında yavaş yavaş uygulama alanı bulmaya başlamıştır. Geleneksel nitrasyonla kıyaslandığında kalıp ömrünü uzattıkları için ekonomik olarak uygulanabilir durumdadırlar. Ekstrüzyon kalıpları gibi ağır şartlarda şekillendirme işi yapılan takımlarda aşınmaya dayanıklı kaplamaların uygulanmasında büyük ekonomik yararlar bulunmaktadır. Alüminyum ekstrüzyonunda kullanılan sıcak iş çeliğinin 400-500 HV sertlik aralığına menevişlenmesinden sonra nitrasyon işlemi yapılmaktadır. Kalıp geçişinin aşırı aşınmasına bağlı olarak, 20-50x103 m imalattan sonra ekstrüzyon kalıpları hurdaya

ayrılmaktadır. Daha fazla imalat talebini karşılayacak şekilde aşınma direncinin artırılmasını nitrasyon işlemi sağlayamamaktadır. Kalıp aşınmasını azaltmak için çift katmanlı kaplamalar düşünülmektedir. Çift katmanlı kaplamalarda altlık malzemesi plazma nitrasyon işleminden sonra PVD yöntemi kullanılarak kaplanmaktadır. PVD kaplamanın amacı abrazif ve korozyon aşınmayı azaltmaktır. Nitrasyon tabakası bu sırada kaplama ya destek olarak, kaplamanın taşıyabileceği yük miktarını arttırmaktadır [20,21,40].

PVD kaplamaların 200-500 °C aralığındaki bağıl olarak düşük sıcaklıklarda uygulanabilir oluşu endüstriyel öneme sahip birçok malzemenin (sıcak iş çelikleri dâhil) kaplanabilmesini sağlamaktadır. PVD prosesindeki tek kısıtlayıcı şart, prosesin sadece görüş alanı içindeki bölgeleri kaplayabilmesidir. Örneğin yarık ve oyuklara sahip karmaşık geometriye sahip yüzeylerin kaplanması zordur. Genel olarak genişliğinden daha derin olan boşlukların kaplanamayacağı belirtilmektedir. Bu sınırlama, birçok ekstrüzyon kalıbında karmaşık dillerin, oyukların ve derin deliklerin olması dolayısıyla PVD'nin uygulama alanını daraltmaktadır [20,21].

Ekstrüzyon esnasında nitrasyonlu kalıplarda kalıp geçişinin giriş kısmı bağıl olarak sabit duran alüminyum film ile kaplıdır. Filmin ön ucu kayma hızına, sıcaklığa, kalıp geçişi geometrisine, başlama-durma periyotları gibi olaylara bağıl olarak pozisyonunu değiştirmektedir. Alüminyum filmin bu çok ağır hareketi nedeniyle kalıp malzemesi ile arasında reaksiyon oluşmasına imkân tanıyacak kadar uzun süreli temas oluşmaktadır [18,21].

Kuvvetli çekme ve kayma gerilmeleri ile birlikte kimyasal etkileşim sonucu kalıp geçişinden küçük malzeme parçacıklarının kopmasına neden olur ve bu parçacıklar ekstrüzyon ürünü profille birlikte kalıp dışına taşınır. Nitrasyonlu kalıplarda kalıp geçişlerinde derin çizikler ve 20-100 µm derinliğinde aşınma kraterlerinin oluştuğu şiddetli aşınma gözlemlenir [21].

Kalıp geçişinin aşınması teknolojik ve ekonomik öneme sahiptir çünkü profilin yüzey kalitesini, boyutlarını ve şeklini bozmaktadır. Aşınmayı azaltmak ve kalıp ömrünü uzatmak için kalıplar genellikle nitrürlenmiş sıcak iş çeliğinden yapılmaktadır. Aşınma direncini daha da arttırabilmek için PVD kaplamalar uygun geometriye ve uzun servis süresi beklentisi olan kalıplara başarı ile uygulanmaktadır.

Geçiş metallerinin nitrülerinin kimyasal olarak agresif ortamlara ve aşınmaya karşı dirençlerinin çok iyi olduğu bilinmektedir [17,48].

PVD kaplamalar birçok endüstriyel uygulama için çok önemli malzemeler haline gelmiştir. Bu tip kaplamalar yüksek sıcaklıklarda başarılı sonuçlar vermektedir. Sert PVD kaplamalar düşük sürtünme katsayısına ve yüksek aşınma direncine sahip gelişmiş tribolojik özelliklerde yüzeyler oluşturmasıyla bilinmektedir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle uygulanan kaplamalar ile ekstrüzyon kalıplarının özellikleri ve kullanım ömürlerinin uzatılması amaçlanmaktadır. Seramik kaplamaların kullanımı ile servis ömrünün geleneksel nitrasyonlu kalıplara göre belirgin bir şekilde uzadığı, ancak yüzey işlem maliyetlerinin de arttığı görülmektedir [21,40,47].

Modern yüzey modifikasyonu işlemlerinde, fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği ile biriktirilen TiN ve CrN kaplamalar yüksek aşınma dayanımı gerektiren birçok teknik uygulamada başarıyla kullanım alanı bulmuşlardır [44].

TiN birçok endüstriyel uygulama için bilinen en iyi ve popüler kaplama olmasına rağmen, Batista ve diğerlerinin kapsamlı bir çalışması, CrN'nin daha yüksek aşınma direncine, düşük sürtünme katsayısına ve yüksek oksidasyon direncine sahip olması nedeniyle TiN kaplamalara alternatif olacağını göstermiştir. Lee'ye göre, döküm, işleme ve metal şekillendirme gibi uygulamalar için CrN kaplama oldukça ilgi çekici bir kaplamadır [44].

CrN, halojenlerin kimyasal saldırılarına karşı koruma ile aşınma direnci yüksek sert kaplama özelliklerinin birlikte olduğu malzemedir. En çok kullanılan kaplama türü CrN'dür. Yakın zamanlarda plazma nitrasyondan sonra çok katmanlı titanyum alüminyum nitrür ((TiAl)N) kaplamalar da kullanılmaya başlanmıştır [17,48,50].

Cr-N kaplama düşük gerilmeli ve ince taneli yapısı sayesinde kalınlığı birkaç μm 'yi aşmayan diğer geleneksel PVD kaplama türlerine göre çok daha az kalınlığa sahip olacak şekilde kaplanabilmektedir. Çelik altığa tutunma; korozyon ve oksidasyon direncinde olduğu gibi; 0,1-0,5 μm kalınlığında Cr ara tabakasının oluşturulmasıyla sağlanır [50].

TiN'e göre daha yumuşak, kalın ve daha az gevrek olan CrN; göreceli olarak yumuşak olan paslanmaz çelik, bakır-alüminyum ve alaşımları, sertleştirilmemiş çelikler gibi malzemelerin korunması için çok avantajlı görülmektedir. Basınçlı döküm gibi yüksek sıcaklık uygulamaları ile titanyum ve bakırın soğuk şekil verme

işlemleri ve işlenmesinde TiN kaplamalara CrN oldukça başarılı alternatif kaplama malzemesi haline gelmiştir [50].

PVD sert seramik kaplamalar ile düşük sürtünme katsayısına ve yüksek aşınma direncine sahip yüzeyler elde edilir. Ancak ekstrüzyon uygulamalarında bu tekniğin bazı dezavantajları vardır. En önemli nokta altlık ile kaplama arasındaki büyük sertlik farkı nedeniyle oluşan kaplamada oluşan hasarlardır. Kaplama öncesi uygulanan nitrasyon işlemi ile elde edilen çift katmanlı yapı ile (Dubleks işlem); altlık ve kaplama arasındaki sertlik farkını azaltarak hem kaplamanın daha iyi tutunmasını hem de kalıbın dayanımını arttırmaktadır [20,28].

PVD yöntemiyle yapılan sert seramik kaplamaların zayıf noktası kaplama-altlık ara yüzeyinde sertliğin ani değişimi nedeniyle, yoğun tribolojik temaslar sonucunda altlık malzemesinin rölatif yumuşaklığı nedeniyle deformasyonu sonucunda kaplamanın hasara uğramasıdır. Seramik kaplama ile altlık arasındaki bu büyük sertlik farkını ortadan kaldırmak için, termo-kimyasal teknikler (karbürizasyon, nitrasyon ve borlama) ile kaplama yöntemleri (fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme, termal püskürtme ve elektrokimyasal/kimyasal biriktirme vb.) bir araya getirilmiştir [44].

Çelik ve demirdışı metaller için çeşitli işlem süreçlerinin bir arada kullanılmasını inceleyen Kessler ve diğerleri, nitrasyon ve PVD süreçlerinin birlikte kullanılmasıyla yüksek sertlikteki kaplamalara nitrasyon tabakasının büyük yüklere karşı destek olduğunu göstermişlerdir [44].

Ekstrüzyon prosesindeki sayısız parametrenin (alüminyum alaşımı ve sıcaklığı, kalıp figürünün geometrisi, ekstrüzyon hızı, kalıpların fiziksel bakımları vs.) takip edilmesindeki güçlükler PVD kaplanmış kalıpların servis ömrünün uzatılması konusunda çok net değerlendirmelerin yapılabilmesini güçleştirmektedir. Uygulanan bir imalat testinde, CrN ile kaplanmış kalıpların geleneksel ekstrüzyon kalıplarına göre imalat giderlerinin fark edilir düzeyde azaldığı tespit edilmiştir [17,20].

PVD ve CVD prosesleri ile elde edilen sert kaplamalar, kaplanan malzemenin abrazyif aşınma direncini belirgin bir şekilde artırmaktadır. Koruyucu kaplama ile kaplanmış takım kullanımında, kaplamaların düşük sürtünme katsayılarından dolayı sürtünmenin azalması tek başına gittikçe büyüyen ekonomik kazanımların artmasında etkili bir neden oluşturmaktadır. Ürünlerin imalat sırasındaki aşınmaya

bağlı olarak ağırlık artışlarının azalması, kalıplara uygulanan bakım ve temizlik işlemlerinin azalması ve bu işlemler nedeniyle oluşan ilave aşınmaların da en aza indirilmesi ya da yok olması işletme giderlerinin azalmasına neden olmuştur. Tezgâh çalışma zamanlarındaki kazanç ve ürünlerdeki hataların da azalması ile de yeni kazanımların elde edilebilmesi mümkün olacaktır [17,20,40].

4.1.3 Kriyojenik ısıt işlem

Soğuk ısıt işlem, yüksek hassasiyetteki parça ve bileşenlerde östenitin martenzite dönüşümünü arttırdığı için geniş kullanım alanı bulmaktadır. Malzeme özelliklerine ve su verme parametrelerine bağlı olarak pratikte -60 ile -80 °C aralığı optimum işlem sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır. Birçok işletmede yüzey sertliğini arttırmak ve ısıt kararlılığı sağlamak için bu tür ısıt işlemler uygulanmaktadır [51].

Kriyojenik ısıt işlem (Sıfır altı işlem) yüksek aşınmaya maruz kalan takımlarda aşınma direncini artırma amaçlı uygulanan modifiye edilmiş bir soğutma işlemidir. Takım çeliklerine uygulanan geleneksel sertleştirme yöntemlerinde çelik östenitleme işleminin ardından çelik cinsine bağlı olarak çeşitli soğutma ortamlarında minimum mümkün sıcaklık olan oda sıcaklığına kadar soğutulur ve martenzitik yapı elde edilir. Yüksek alaşımlı çeliklerde ise sertleşmeyi sağlayan martenzitik dönüşüm belirli bir sıcaklıkta (150-300 °C) başlar ve oda sıcaklığında sona ermez [5,6].

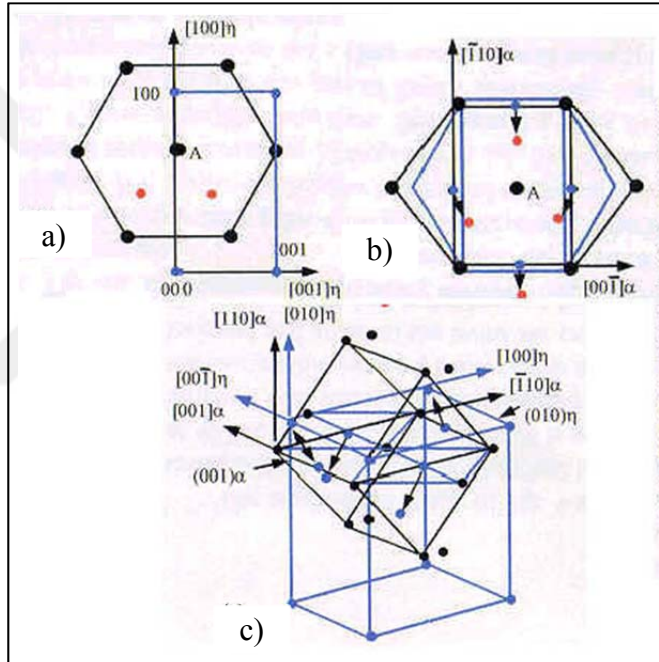
Oda sıcaklığına kadar yapılan konvansiyonel soğutmayla bu tür çeliklerin bünyesinde yüksek oranda kalıntı östenit olarak adlandırılan kararsız faz bulunur (DIN 1.2379 çeliğinde sertleştirme sıcaklığına bağlı olarak kalıntı östenit miktarı %12-20 arasında değişim gösterir). Takımın aşınma direncini kötü etkileyen kalıntı östenit fazını gidermenin en etkili yolu konvansiyonel soğutmadan sonra kriyojenik ısıt işlemin uygulanmasıdır. Kriyojenik ısıt işlemde parçalar sıvı azotun buharlaştırılmasıyla -185 °C'a kadar soğutulurak maksimum oranda aşırı doymuş martenzitik yapı elde edilir [5,6,52,53].

Derin kriyojenik ısıt işlem -125 ile -196 °C aralığında belirli özellikler açısından normal soğuk işlemin sağladığı gelişmelerin ötesinde iyileşmeler sağlayabilmektedir. Bunun ana nedeni, östenitin tamamen martenzite dönüşmesine ilave olarak menevişlenmiş martenzit yapısının içine dağılan çok küçük karbürlerin oluşmasıdır. Özelliklerdeki en büyük iyileşmeler su verme ile menevişleme arasında yapılan derin kriyojenik ısıt işlemle elde edilmektedir. Geleneksel ısıt işlem sürecinden sonra

işlemleri bitmiş takımlara uygulanan kriyojenik işlemle dahi kayda değer önemli mekanik özellik geliştirmeleri yapılabilmektedir. Bu son çözüm değerine göre çok daha fazla esneklik sağlamaktadır ve kriyojenik işlemin daha birçok uygulama ile daha yaygın olarak kullanılmasına imkân sağlayacaktır [51].

Kriyojenik ısıt işlemleri takiben uygulanan menevişleme işleminde ise konvansiyonel sertleştirme işleminde gözlenmeyen η -karbürler çelik matrisinde çöker, hem kalıntı östenitin giderilmesi hem de η -karbür çökmesine bağlı olarak yüksek alaşımlı çeliklerde maksimum aşınma direnci kazanımı sağlanır [5,6,52,53].

Şekil 4.4'te HMK-ortorombik sistem dönüşümü gösterilmektedir. Kriyojenik işlem ile martenzit latis deformasyonuna neden olduğu bilinmektedir [52].



Şekil 4.4 : ● Demir ve ya yer alan atomlar, ● karbon atomu. a) Martenzit düzlemi.

b) Latisin distorsiyonu ve karbon atomunun yer değiştirmesi ile HMK latisten ortorombik latis dönüşümü. c) HMK-ortorombik dönüşümün şematik gösterimi[52].

Şekil 4.4 a) ve Şekil 4.4 b) (111) martenzit düzlemi ile (010) η -karbür düzlemi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu iki faz arasında kafes yapısının uyumu sonucunda (010) η -karbür düzlemi (110) martenzit düzleminden tüerken; $[100]$, $[010]$ ve $[001]$ η -karbür yönleri de $[\bar{1}10]$, $[110]$ ve $[00\bar{1}]$ martenzit yönlerinden türeyecektir. η -karbür kafes yapısında, karbon atomları oktahedral boşluklarda ve demir ya da yer alan atomlar da HMK konumlarında bulunmaktadır [52].

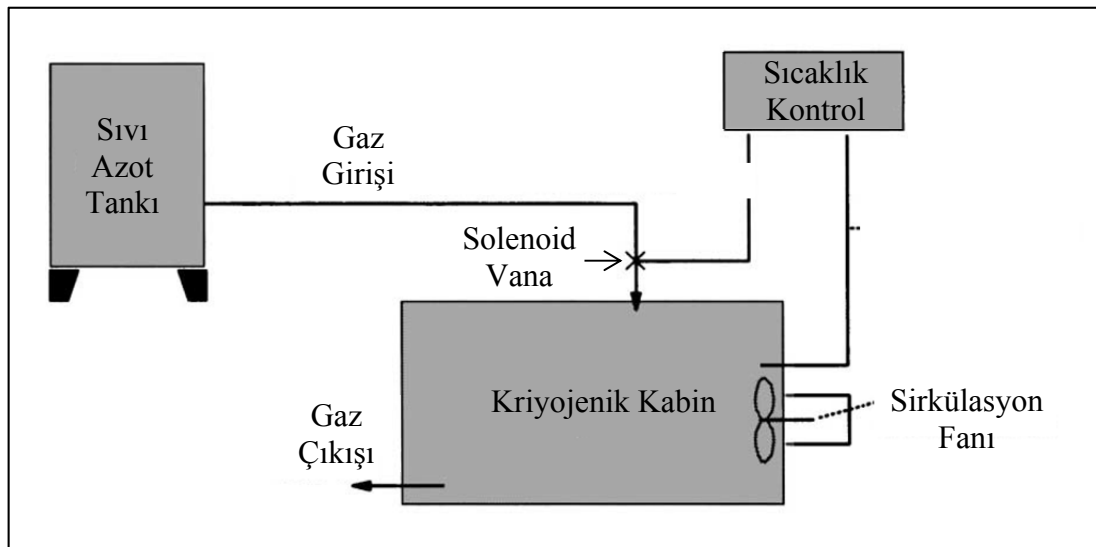
Ana HMK kafesinin $[\bar{1}10]$ ve $[110]$ martenzit doğrultularında büzülmesi ve $[00\bar{1}]$ martenzit doğrultusunda genişlemesinden dolayı demir veya yeralan atomların yeniden düzenlenmesi yoluyla kafes deformasyonu gerçekleşerek bir ortorombik η -karbür kafesi haline dönüştürmesi beklenmektedir. Buna göre η -karbür yapısının oluşması için karbon atomlarının (110) martenzit düzleminde hafifçe kayması gerekmektedir [52].

η -karbür M_2C formundadır (Fe_2C).

Bu dönüşümler geçirimli elektron mikroskobu analizi ve kristalografi analizleri ile karbürlerin oluşumunun ve martenzitin içinden çözünmesinin gözlemlenmesi ile ortaya konmuş verilerdir [52].

Kriyojenik ısıtım işlem paslanmaz çeliklerin korozyon direncini bozmadan dayanımının artırılmasında ve yüksek boyutsal kararlılık istenen ölçü aletlerine yaygın olarak uygulanır. Endüstriyel uygulamaların dışında trompet, trombon gibi müzik enstrümanlarına elektro ve akustik gitar tellerine kriyojenik ısıtım işlem uygulanarak metalin rezonans frekansı artırılarak daha canlı tınılar elde edilir [5,6].

Şekil 4.5'te kriyojenik ısıtım işlem düzeneği şematik olarak gösterilmektedir. Sistem esas olarak ısı yalıtımlı bir kabin, kabine bağlı sirkülasyon fanı, sıvı azot tankı, selenoid vana, termokupl ve sıcaklık kontrol-programlama ünitesinden oluşmaktadır. Termokupl bu örnekte 30 kg ağırlığında çelik bir bloğun içine yerleştirilmiştir. Kriyojenik kabin konulan malzemelerin sıcaklık ölçümleri bu düzeneğin vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir [51].



Şekil 4.5 : Kriyojenik ısıtım işlem düzeneğinin şematik gösterimi [51].



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada derin kriyojenik ısıtım işlem görmüş ve nitrasyon sonrasında ince sert film (PVD) kaplama yapılmış sıcak iş kalıp çelikleri ile geleneksel yöntemle hazırlanmış sıcak iş kalıp çeliklerinin hem laboratuvar hem de imalat şartlarında başta aşınma dirençleri olmak üzere mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

5.1 Deneysel Malzemeler

Bu çalışmada bileşimleri Çizelge 5.1’de verilen 2 farklı alaşımda sıcak iş çeliği kullanılmıştır. AISI normlarına göre AISI H13 ve AISI H10 olarak adlandırılan 2 farklı alaşımdaki sıcak iş çeliği, 3 farklı ısıtım işlem sürecine tabi tutulduktan sonra kaplamasız, nitrasyonlu ve çift katmanlı kaplamalı (nitrasyonlu ve PVD kaplamalı) varyasyonları hazırlanmıştır.

Çizelge 5.1 : Çalışmada kullanılan malzemelerin alaşım standartları ve analiz sonuçları.

Malzeme	Element (% ağı.)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Cu	Ni
AISI H13	0,32- 0,45	0,80- 1,20	0,20- 0,50	0,03 maks.	0,03 maks.	4,75- 5,50	1,10- 1,75	0,80- 1,20	-	-
Analiz	0,42	0,95	0,38	0,01	-	4,93	1,37	0,88	0,07	0,13
AISI H10	0,35- 0,45	0,80- 1,20	0,25- 0,75	0,03 maks.	0,03 maks.	3,00- 3,75	2,00- 3,00	0,25- 0,75	0,25 maks.	0,3 maks.
Analiz	0,40	0,31	0,74	0,002	-	3,00	2,44	0,78	0,08	0,07

Geleneksel ısıtım işlem adı verilen ve hali hazırda imalat süreçlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan ısıtım işlem yöntemi ile hazırlanan malzemeler referans malzeme olarak kullanılmıştır. Kriyojenik yöntemle hazırlanan ve kaplanan malzemelerin mekanik özellikleri ve kullanım ömürleri bu malzeme grubu ile karşılaştırılacaktır.

AISI H13 numuneler Ø180 ve AISI H10 numuneler de Ø190 Orvar 2M Microdized sıcak iş çeliği kütüklerden 100 mm kalınlığında kesilerek hazırlanmıştır. Kesilen kütük dilimlerinin ısıt işlemleri belirlenen 3 ısıt işlem grubunun reçetelerine göre uygulanmıştır. AISI H13 kütükten bir miktar Vacuum Heat Treatment Technologies (Milano-İtalya) firmasına gönderilerek gönderilerek aynı şartlarda ısıt işlem reçeteleri uygulanarak numuneler ayrıca hazırlanmıştır. Numune miktarının az olması nedeniyle kısıtlı miktarda aşınma ve ısıt döngü numuneleri bulunmamaktadır.

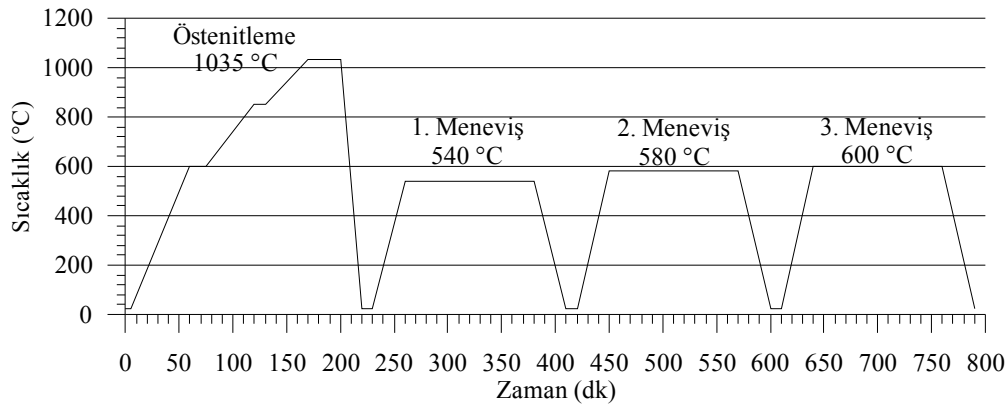
5.2 Uygulanan ısıt İşlem Reçeteleri

AISI H13 ve AISI H10 çelik parçalara belirlenen üç farklı ısıt işlem reçetesine göre ısıt işlem yapılmıştır.

Yapılan çalışmada yaygın ve alışlagelmiş olarak kullanılmakta olan ısıt işlem yöntemi *Geleneksel* olarak adlandırılmış ve bu malzemelerden elde edilen sonuçlar referans olarak kullanılmıştır. Kriyojenik ısıt işlem içeren yöntemlerle hazırlanan numuneler ise sırasıyla *Kriyojenik* ve *Kriyojenik + 1 Meneviş* olarak adlandırılmıştır. ısıt işlem reçeteleri sırasıyla G, K ve KM ile sembolize edilmiştir.

5.2.1 Geleneksel ısıt işlem

Geleneksel ısıt işlem reçetesi östenitleme ve 3 adet menevişleme kademesinden oluşmaktadır. Östenitleme ısıt işlem kademesi 1035 °C'ta 30 dakika bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Sonrasında 3 adet meneviş işlemi sırasıyla 540 °C, 580 °C ve 600 °C'ta gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1'de Geleneksel ısıt işlem reçetesinin aşamalarının gösterildiği sıcaklık-zaman grafiği görülmektedir.

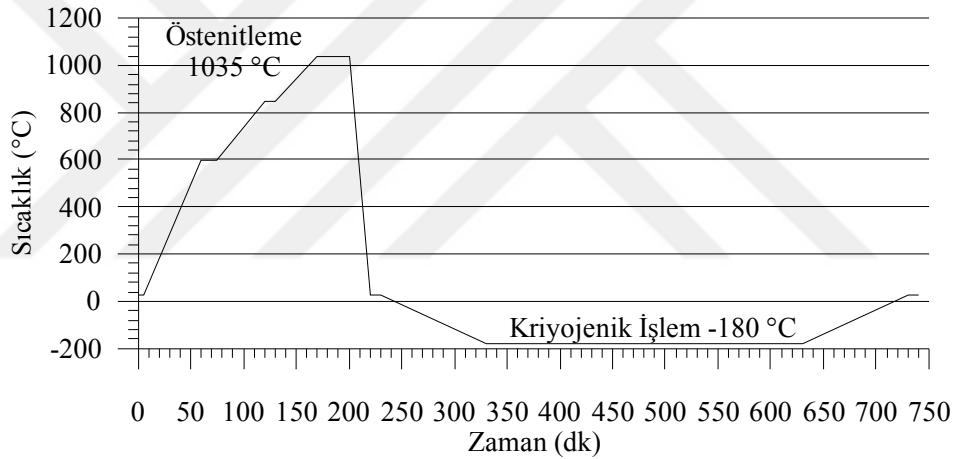


Şekil 5.1 : Geleneksel ısıt işlem reçetesinin aşamaları.

AISI H13 ve AISI H10 çelik kütüklerden kesilmiş Ø 180 ve Ø 190 çapında 100 mm kalınlığındaki numuneler ısıtıl işlem öncesinde üç parçaya ayrılarak ısıtıl işlem reçetesine göre kodlanarak işaretlenmişlerdir. Numunelerin tamamı Geleneksel ısıtıl işlem reçetesindeki Östenitleme işlemine girmiş, işlem sonunda Kriyojenik tabanlı ısıtıl işleme girecek numuneler Geleneksel grubundan ayrılmışlardır.

5.2.2 Kriyojenik ısıtıl işlem

Kriyojenik ısıtıl işlem reçetesi östenitleme ve derin kriyojenik ısıtıl işlem kademesinden oluşmaktadır. Östenitleme ısıtıl işlemi 1035 °C'ta 30 dakika bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Östenitleme ısıtıl işleminin ardından AISI H13 ve AISI H10 sıcak iş çeliği numuneler -180 °C'ta 5 saat süre derin kriyojenik ısıtıl işleme tabi tutulmuşlardır. Şekil 5.2'de Kriyojenik ısıtıl işlem reçetesinin aşamalarının gösterildiği sıcaklık-zaman grafiği görülmektedir.



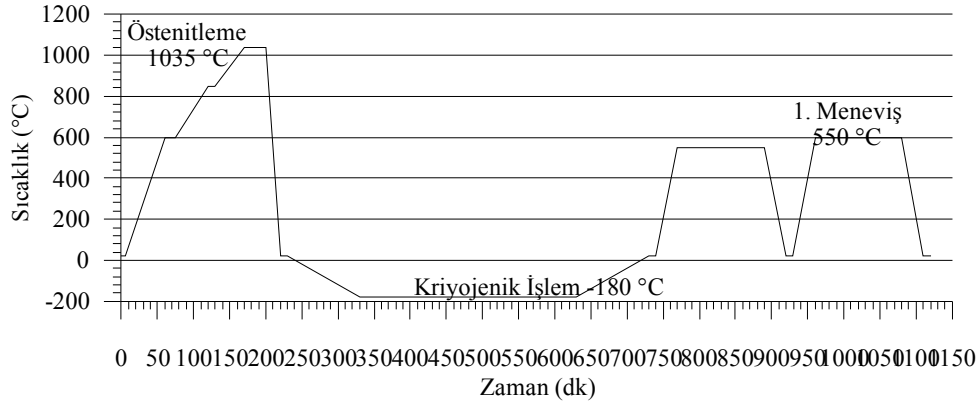
Şekil 5.2 : Kriyojenik ısıtıl işlem reçetesinin aşamaları.

Kriyojenik tabanlı ısıtıl işleme tabi tutulacak bütün numuneler aynı anda kriyojenik ısıtıl işleme girmişlerdir. Kriyojenik ısıtıl işlem sonunda meneviş yapılacak numune grubu ayrılmıştır.

5.2.3 Kriyojenik ısıtıl işlem + 1 meneviş

Kriyojenik meneviş (KM) ısıtıl işlem reçetesi östenitleme, derin kriyojenik ısıtıl işlem ve bir adet meneviş kademesinden oluşmaktadır. Östenitleme ısıtıl işlemi 1035 °C'ta 30 dakika bekletilerek yapılmıştır. Östenitleme ısıtıl işleminin ardından sıcak iş çeliği numuneler -180 °C'ta 5 saat süre ile derin kriyojenik ısıtıl işlem görmüşlerdir. Bu işlemden sonra numuneler 550 °C'ta bir tane menevişleme ısıtıl işlemine tabi

tutulmuşlardır. Şekil 5.3'te Kriyojenik meneviş (KM) ısıtım işlem reçetesinin aşamalarının gösterilmekte olduğu sıcaklık-zaman grafiği görülmektedir.



Şekil 5.3 : KM ısıtım işlem reçetesinin aşamaları.

5.3 Gaz Nitrasyon

Numunelerin ve imalat kalıbının nitrasyon işlemleri Tamçelik A.Ş.'de kontrollü gaz nitrasyon yöntemi (NITREG®) kullanılarak yapılmıştır.

Nitreg teknolojisi, gaz nitrüleme işlemine kontrol amaçlı bir yaklaşıma dayalı bir teknolojidir. Bu teknoloji ile gaz nitrüleme proseslerinin kontrol edilebilmesi ve nitrürlü tabakaların istenilen özelliklerde oluşturulabilmesi sağlanmıştır.

5.4 “Sert İnce Film Kaplama

Hazırlanan numunelerin ve imalat kalıbının ince sert film kaplamaları Tinkap Yüzey İşlemleri A.Ş.'de yapılmıştır. Numuneler kaplama yapılmadan önce yüzeyleri zımparalanarak beyaz tabaka kaldırılmıştır. Uygulanan kaplamaların proses parametreleri aşağıdaki gibidir.

5.4.1 Krom nitrür (CrN) kaplama

Beyaz tabakaları mekanik olarak kaldırılan numuneler parlatıldıktan sonra aşağıda verilen parametrelerde CrN ince sert film kaplama uygulanmıştır.

Kaplama sistemi: Novatech NVT-11 katodik ark buharlaştırma PVD

Katot sayısı: 3 adet krom (%99,8 saflıkta) katot

Başlangıç vakum değeri: 5×10^{-5} torr

Katot akımı: 60 amper

Bias voltajı: 110 volt

Azot kısmi basıncı: 6,5 mtorr

Kaplama süresi: 80 dakika

Kaplama kalınlığı: yaklaşık 4 mikron

Kaplama sertliği: 2500 HV

Sürtünme katsayısı: 0,40 (alüminaya karşı)

5.4.2 CrN üzeri alüminyum titanyum nitrür (AlTiN) kaplama:

Beyaz tabakaları mekanik olarak kaldırılan numuneler parlatıldıktan iki aşamadan oluşan ince film sert kaplama uygulaması yapılmıştır. Aşağıda verilen parametrelerde önce CrN ince sert film kaplama, daha sonra ikinci periyotta da Al(TiN) kaplama uygulaması yapılmıştır.

- CrN periyodu:

Kaplama sistemi: Sinoarc SA-14 katodik ark buharlaştırma PVD

Katot sayısı: 6 adet krom (%99,8 saflıkta) katot

Başlangıç vakum değeri: 5×10^{-5} torr

Katot akımı: 80 amper

Bias voltajı: 120 volt

Azot kısmi basıncı: 6,5 mtorr

Kaplama süresi: 20 dakika

Kaplama kalınlığı: yaklaşık 1,5 mikron

Kaplama sertliği: 2500 HV

Sürtünme katsayısı: 0,40 (alüminaya karşı)

- AlTiN periyodu:

Kaplama sistemi: Sinoarc SA-14 katodik ark buharlaştırma PVD

Katot sayısı: 6 adet AlTi alaşım (%70 Alüminyum at., %30 titanyum at.) katot

Başlangıç vakum değeri: 4×10^{-5} torr

Katot akımı: 60 amper

Bias voltajı: 100 volt

Azot kısmi basıncı: 7 mtorr

Kaplama süresi: 50 dakika

Kaplama kalınlığı: yaklaşık 1,3 mikron

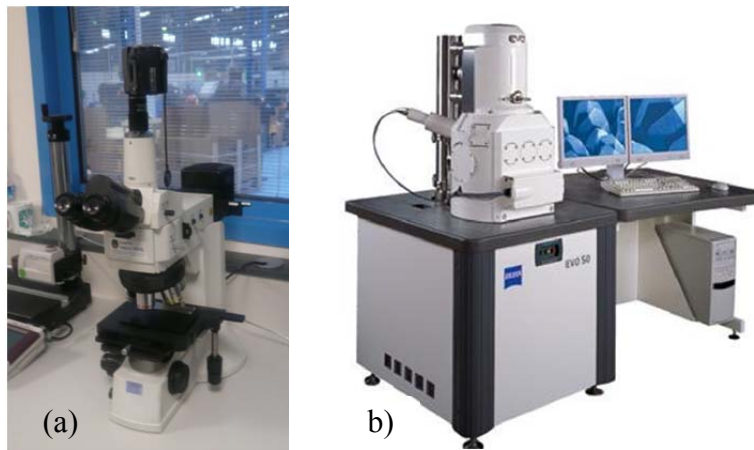
Kaplama sertliği: 3700 HV

Sürtünme katsayısı: 0,55 (alüminaya karşı)

5.5 Malzemelerin Karakterizasyonu

Farklı ısıtım işlem reçetelerine girmiş ve nitrasyon işlemi görmüş malzemelerin karakterizasyonu mikroyapı incelemeleri, sertlik deneyleri ve X-ışınları difraksiyonu kullanılarak yapılmıştır.

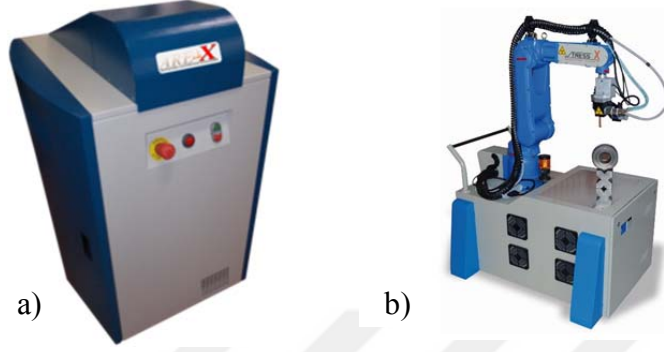
Mikroyapısal inceleme için numunelerden kesitler alınmıştır, bakalite alınarak 120, 240, 400, 600, 800, 1200 mesh SiC zımpara seri ile zımparalandıktan sonra 6 μ , 3 μ ve 1 μ 'luk DIAPAT-P polikristal elmas süspansiyon kullanılarak Metkon FEDO serisi çuhalarda parlatılmışlardır. Numunelerin parlatıldıktan sonra Nital (%95 CH₃OH+ %5 HNO₃) çözeltisi ile 20 saniye dağlanarak Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskop ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Fotoğraflar ve ölçülendirmeler için Clemex Captiva 6.0 programı ve Clemex dijital kamera kullanılmıştır (Şekil 5.5a).



Şekil 5.4 : a)Nikon Eclipse L150 Optik mikroskop, b) Zeiss Evo 50 / Bruker EDS ataçmanlı SEM (Borçelik Ar-Ge Lab).

SEM ve EDS çalışmaları Sakarya Üniversitesi Merkez Laboratuvarı ve Borçelik Ar-Ge laboratuvarında yapılmıştır. (Şekil 5.4b).

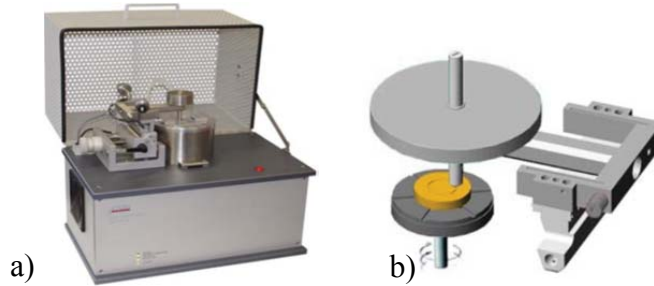
Sıcak iş çeliği parçalarda ısıtma işlem öncesi ve sonrası kalıntı östenit tayini için XRD tekniği kullanılmıştır. Bu amaçla numuneler yurtdışında G.N.R. s.r.l. - Analytical Instruments Group firmasına gönderilmiştir. AreX L cihazı kullanılarak kalıntı östenit tayini gerçekleştirilmiştir. Aynı firmada StressX robotik kalıntı gerilme ölçüm cihazı ile de ölçümler yapılmıştır.



Şekil 5.5 : a) AreX L Kalıntı östenit tayin cihazı, b) StressX robotik kalıntı gerilme ölçüm cihazı.

5.6 Aşınma Deneyleri

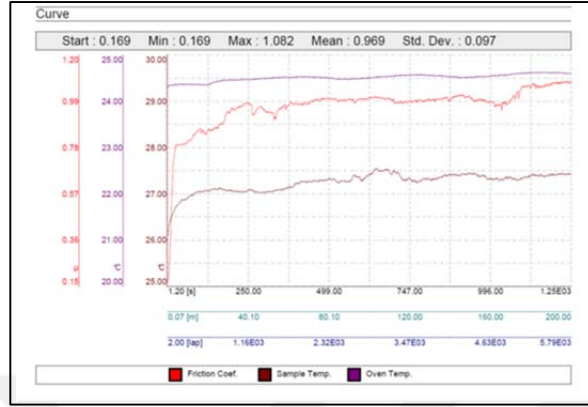
Farklı alaşımdaki sıcak iş çeliği malzemelere uygulanan ısıtma işlem ve yüzey kaplama tekniklerinin hem oda, hem de çalışma sıcaklığındaki sürtünme ve aşınma davranışlarına olan etkilerini incelemek için disk üzerinde bilye esasına göre çalışan CSM marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 5.6a).



Şekil 5.6 : CSM disk üzerinde bilye deney cihazı. a) Genel görünümü, b) Çalışma prensibi

Aşınma deneyleri normal atmosferik şartlarda (24 °C, %30 bağıl nem) ve ekstrüzyon ortalama kalıp çalışma sıcaklığında (480 °C, %30 bağıl nem) 0.16 m/s kayma hızında ve 200 m toplam kayma mesafesinde, 6 mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılarak 3 N yük altında numune yüzeyinde 10 mm çaplı dairesel bir aşınma izi oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Deneyden önce sıcak iş çeliği numunelerin yüzeyleri ve Al_2O_3

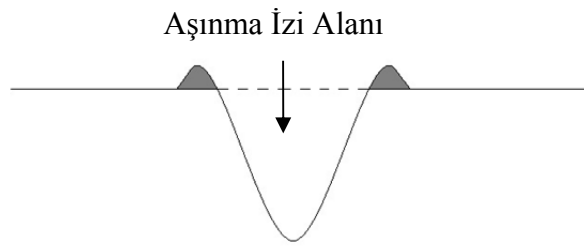
bilye aseton ile silinerek yüzeyler kir ve lekelerden arındırılmıştır. Aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısı, ortam sıcaklığı ve kayma mesafesi arasındaki değişim bir bilgisayar yardımı ile sürekli olarak kaydedilmiştir. Şekil 5.7’de bir kayıt örneği gösterilmektedir.



Şekil 5.7 : CSM Disk üzerinde bilye cihazının deney ekranı.

Aşınma deneylerinden sonra farklı alaşım, ısıtım işlem şartları ve yüzey kaplama şartlarındaki numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin alanları hesaplanmıştır. Aşınma izleri, Veeco Dektak 6M marka yüzey profilometresi kullanılarak belirlenmiştir.

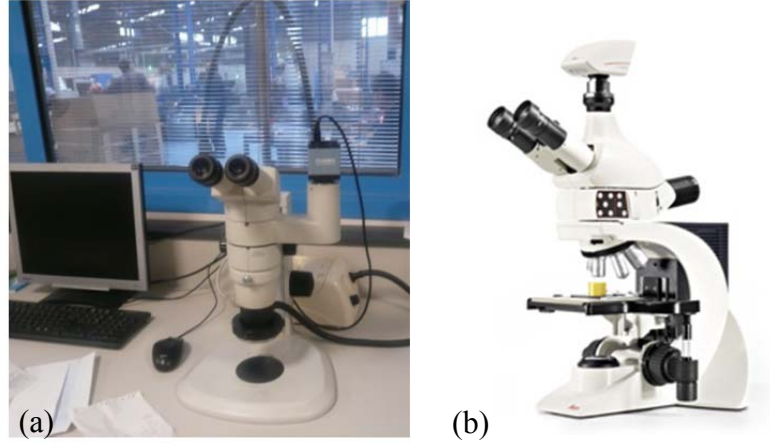
Şekil 5.8’de şematik olarak gösterilmekte olan aşınma izi alanları, farklı alaşım, ısıtım işlem ve yüzey özelliklerine sahip numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izi profilleri oluşturulduktan sonra iz derinliği ve genişliği ölçülerek hesaplanmıştır.



Şekil 5.8 : Aşınma izinin kesitten şematik görünümü.

Disk üzerinde bilye yöntemi ile ortam sıcaklığında ve çalışma sıcaklığında (480 °C) gerçekleştirilen aşınma deneyinden elde edilen aşınma izlerinin görüntüleri Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskopta ve Nikon SMZ 800 marka stereo mikroskopta incelenmiş ve Clemex Captiva 6.0 programı kullanılarak fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 5.9a). Her aşınma deneyi sonunda alümina bilye yüzeyinde oluşan izin

görüntüleri Leica DM6000 M marka mikroskopta incelenmiş ve Clemex Captiva XX programı yardımıyla fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 5.9b).

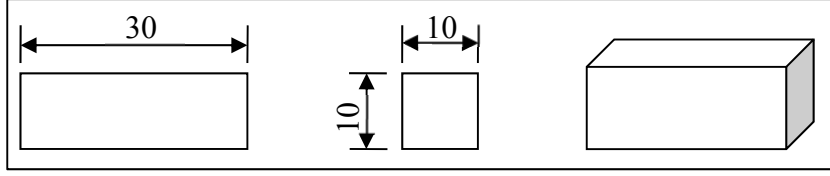


Şekil 5.9 : (a) Nikon SMZ 800 stereo mikroskop ve Leica DM 6000 M optik mikroskop.

5.7 Isıl Döngü ve Sertlik Deneyleri

Ekstrüzyon kalıpları imalat süreçlerinde kalıp ön ısıtma fırınlarında minimum ekstrüzyon sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra prese bağlanarak imalata başlandığında sürtünme ve basınç etkisi ile doğal çalışma sıcaklıklarına çıkılmaktadır. Bu döngü kalıp imalat yapamaz hale gelene dek sürmektedir. Bir kalıp ortalama 8-12 defa prese bağlanarak imalat yapabilmekte, dolayısı ile bu döngüye 8-12 defa maruz kalmaktadır. Isıl döngü deneylerinde mekanik zorlamalar ihmal edilerek sadece sıcaklığın yapıya ve nitrasyon tabakasına olan etkilerinin gözlemlenmesi hedeflenmektedir.

10x10x30 mm ölçülerinde hazırlanan kare prizma şeklindeki numuneler kullanılarak servis şartlarının ve döngülerinin malzemeye etkilerinin gözlemlenmesi için uygulanmıştır. Şekil 5.10’da numunelerin ölçüleri ve şekilleri gösterilmektedir. Yapılan işlem basınç, aşınma ve alüminyumla etkileşim hariç ekstrüzyon sürecinin zamana bağlı sıcaklık etkisi ile sıcak iş çeliği malzeme ve yüzeyindeki nitrasyon tabakasına tesirini gözlemlemektir. İmalat döngüsünde, kalıpların ön ısıtma (4-6 saat) ve profil imalatı süresince (2-4 saat) sıcaklığa maruz kalma sürelerinin toplamı ortalama olarak 8 saat kabul edilmiştir. Kalıp ön ısıtma sıcaklığı 460 °C, ortalama imalat sıcaklığı da yaklaşık olarak 480-500 °C civarındadır. Bu nedenle deney sıcaklığı olarak 480 °C olarak belirlenmiştir.

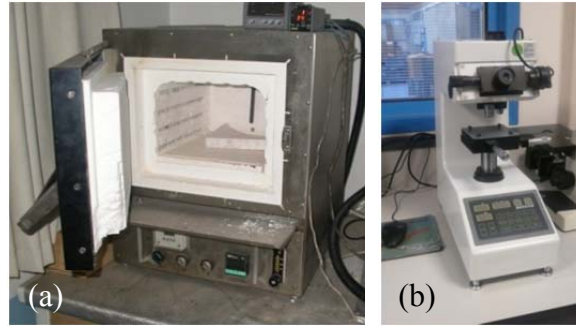


Şekil 5.10 : Isıl döngü deneylerinde kullanılan AISI H10 ve AISI H13 nitrasyonlu sıcak iş çeliği numuneler.

Deneyde kullanılan numuneler ısıtım işlem programlarına göre ısıtım işlemleri yapıldıktan sonra nitrasyon işlemine girmişlerdir. Numuneler ısıtım döngü işlemine tabi tutulmadan önce kesitlerinden yüzeyden başlayarak iç kısımlara doğru ~450 µm kadar derinliğe kadar mikro sertlikleri ölçülmüştür.

Başlangıç verileri alındıktan sonra hem yurtdışında hem de yurtiçinde hazırlanan numunelerin 480 °C'ta 8 saat süre ile numuneler Linn High Term VMK-135 laboratuvar tipi fırında (Şekil 5.11a) ısıtım döngü deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Her döngü sonrasında numunelerden ısıtım döngüyü temsil eden 2 mm kalınlığında dilimler alınarak saklanmıştır. Bu parçalardan metalografi çalışmalarında ve döngüye bağlı olarak sertlik profilindeki değişimlerin gözlemlenmesi konularında faydalanılmıştır.



Şekil 5.11 : (a) Isıl döngü deneyleri için kullanılan fırın ve (b) Metkon MH-6 Mikro Vickers sertlik cihazı.

Her döngü sonrasında yurtdışında hazırlanmış AISI H13 numunelerde, ısıtım döngünün etkilerini görmek için kesitten ve yüzeyden Metkon MH-6 Mikro Vickers cihazında 40x büyütmede sertlik değerleri ölçülmüştür (Şekil 5.11b). Ayrıca numunelerin sertlik profilleri bu cihazda ölçülmüştür. Ölçüm noktalarının mümkün mertebe yüzeyden itibaren birbirlerine olan mesafelerinin yakın olmaması amaçlandığı için ölçümler düz bir hat yerine zikzak oluşturacak şekilde yapılmıştır.

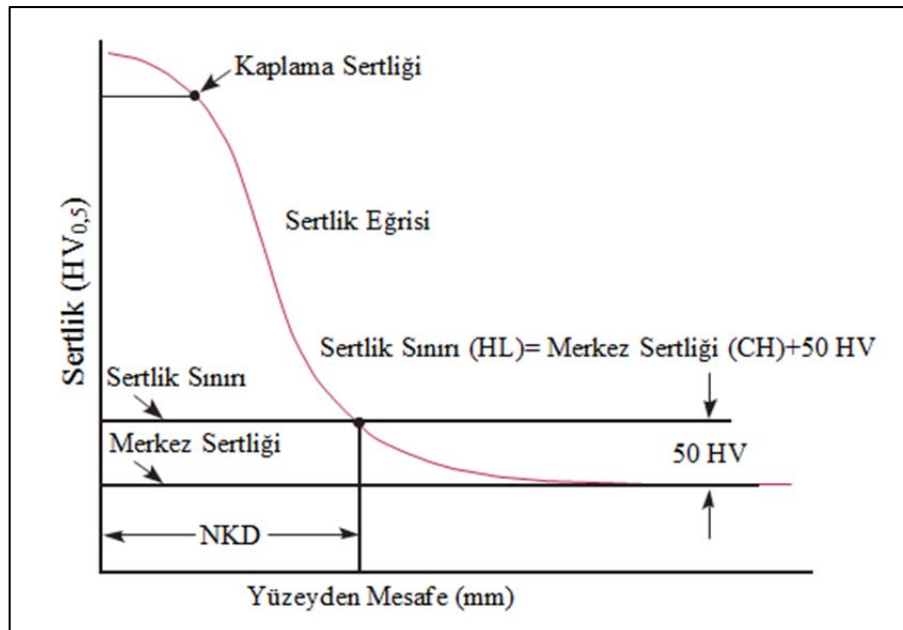
Kesitten yapılan sertlik ölçümleri olabildiğince yüzeye yakın noktalardan başlayarak, nitrasyon tabakasını kat edip sıcak iş çeliği malzemenin yüzeyden yaklaşık 400-450 µm derinliğine kadar yapılmıştır.

Yurtiçinde hazırlanmış AISI H13 ve AISI H11 sıcak iş çeliği numunelerin sertlik profilleri Borusan Ar-Ge laboratuvarında bulunan DuroScan 50 G5 sertlik cihazında ölçülmüştür (Şekil 5.12). Cihazın sertlik profili oluşturmak için özel programı kullanılarak ısıtılmış döngü numunelerinin sertlik profilleri oluşturulmuştur.



Şekil 5.12 : DuroScan 50 G5 Micro Vickers sertlik ölçüm cihazı.

Nitrasyon tabakasının kalınlığının tayini için, DIN 50190-3 Isıl işlem görmüş parçaların sertlik derinliği; nitrasyon sonrası etkili sertleştirme derinliğinin belirlenmesi (Hardness depth of heat-treated parts; determination of the effective depth of hardening after nitriding) standardına göre merkez sertliğinin 50 Vickers artış gösterdiği sınır temel alınmıştır (Şekil 5.13).



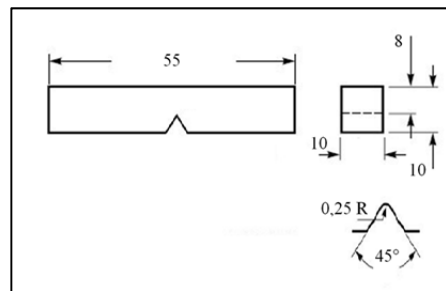
Şekil 5.13 : DIN 50190-3'e göre nitrasyon tabakasının derinliğinin tespiti.

5.8 Çekme Deneyleri

Ekstrüzyon kalıp malzemelerinin akma ve çekme dayanımlarının, yapılan ısıtıl işlem ve nitrasyon işlemlerinden nasıl etkilendiğini gözlemlemek amacıyla çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri oda ve çalışma sıcaklığına yakın sıcaklıklarda yapılmaya çalışılmıştır. Mekanik özelliklere nitrasyonun etkilerini görmek için nitrasyona gönderilen numunelerin çekme deneylerinde düşük yüklerde parçalanma görüldüğü için, daha sonraki aşamada darbe deneyi numunelerine de uygulanacak *nitrasyon eş değeri* olarak kabul edebileceğimiz bir ısıtıl işlem yapılmıştır. Nitrasyon işlemi sıcaklık ve sürelele bağılı kalacak şekilde, nitrürleme ortamı olmadan uygulanmıştır.

5.9 Darbe Deneyleri

3 farklı ısıtıl işlem reçetesine göre ısıtıl işlem yapılmış AISI H10 ve AISI H13 sıcak iş çeliği malzemelerden ASTM E23 Metalik Malzemelerin Çentikli Darbe Testi için Standart Test Yöntemleri (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials) standardına göre Charpy Çentikli Darbe Deneyi numuneleri tel erozyonda kesilerek hazırlanmıştır. Şekil 5.14'te numunelerin standarda göre ölçüleri gösterilmektedir. Çentikli darbe deneyi her iki farklı alaşımdaki sıcak iş çelikleriyle ortam sıcaklığında nitrasyonsuz ve nitrasyonlu, çalışma sıcaklığında (480°C) nitrasyonsuz ve nitrasyonlu olmak üzere dört farklı şartta yapılmıştır. Yapılan ön çalışmalarda nitrasyon tabakasının kırılmayı kolaylaştırdığı gözlemlendiği için nitrasyonlu numunelere fiili olarak nitrasyon yapılmamış, ancak nitrasyon işlemi şartlarında (sıcaklık ve süre göz önüne alınarak) tutulmuşlardır. Bu işlemdeki amaç nitrasyon sıcaklığının ve bu sıcaklıkta kalınan sürenin malzemeye etkisinin olup olmadığını gözlemlemektir.



Şekil 5.14 : Çentikli darbe deneyi numunesinin ASTM E23 standartına göre şekli ve boyutları.

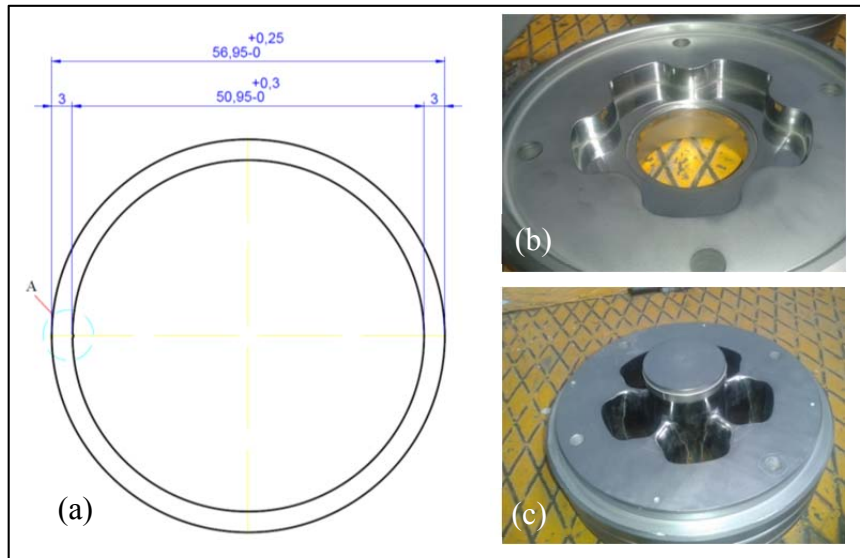
Darbe deneyleri yapılan ısıt ışılem koşullarına göre malzemenin özellikle sıcak şartlarda mekanik davranışındaki değişiklikler izlenmeye çalışılmıştır.

5.10 İmalat Kalıbı Uygulaması

İmalat kalıbı uygulaması için olabildiğince sık ve yüksek miktarda siparişi gelen, basit fiğrrl ve ortalama geçiş yüzey alanına sahip, zıvanalı (porthole) kalıp seçimi yapılmıştır. Bunun için otomotiv sektöründe titreşim takozu imalatında kullanılmakta olan boru kalıplarından biri uygulama kalıbı olarak seçilmiştir.

Ø57 boru profili olan 3095 numaralı profilin 9 numaralı kalıbının uygulama kalıbı olarak imalinin yapılmasına karar verilmiştir. şekil 5.15’de profilin teknik resmi ve CrN PVD kaplama yapılmış kalıp görülmektedir.

Onat Profil’in Extrusionic MATERA ESM-1851 uluslararası proje ortaklığı kapsamında yapılmış olan çalışmalardaki sıcak aşınma deneylerinin verilerine göre uygulama kalıbının Kriyojenik meneviş (KM) ısıt ışılem reçetesine göre yapılmasına karar verilmiştir. Ancak benzer şartlarda yurt dışında imal edilen iki kalıpta köprülerin atlması ile zıvananın ileri çıkması nedeni ile (deformasyon + kırılma hasarı) uygulama kalıbında KM şartının risk oluşturacağı öngörüldüğünden K2M (iki menevişli) şartının uygulanması kararlaştırılmıştır.

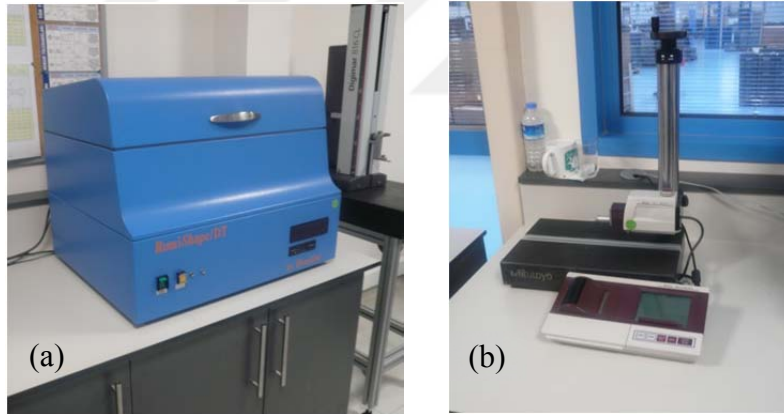


şekil 5.15 : 3095 numaralı boru profilinin (a) teknik resmi, (b) kalıp kapağı ve (c) kalıp zıvanası.

Kalıp imalinde AISI H13 sıcak iş çeliği malzeme kullanılmıştır. 1. Meneviş sonunda kalıbın sertliği 52-54 HR_C aralığında ölçülmüştür. 2. Meneviş sonunda sertlik 48-49 HR_C seviyesine düşürülmüştür.

Deneme kalıbı ile imal edilen 6082 alüminyum profillerden, biri imalatın başlangıcındaki sağlam ilk profilden, diğeri de imalatın sonundaki profilden olmak üzere her imalat periyodundan ikişer adet numune alınmıştır. Elde edilen ürün numuneleri Romidot SM420 hassas kesim numune testeresi ile kesildikten sonra ultrasonik temizleme cihazında ortam sıcaklığında aseton ile 5 dakika süre ile temizlenmişlerdir. Kesim yüzeylerindeki ince çapaklar dikkatlice temizlendikten sonra Romidot Romishape/DT cihazında taranarak geometrik kontrolleri yapılmıştır (Şekil 5.16a). Ölçüleri kontrol edilen profiller hassas terazi ile tartılarak birim ağırlıkları hesaplanmıştır.

Profillerin ekstrüzyon yönünde iç ve dış yüzeylerinin, ekstrüzyon yönüne dik olarak da dış yüzeylerinin pürüzlülükleri Mitutoyo SJ-400 yüzey pürüzlülüğü cihazında ölçülmüştür (Şekil 5.16b).

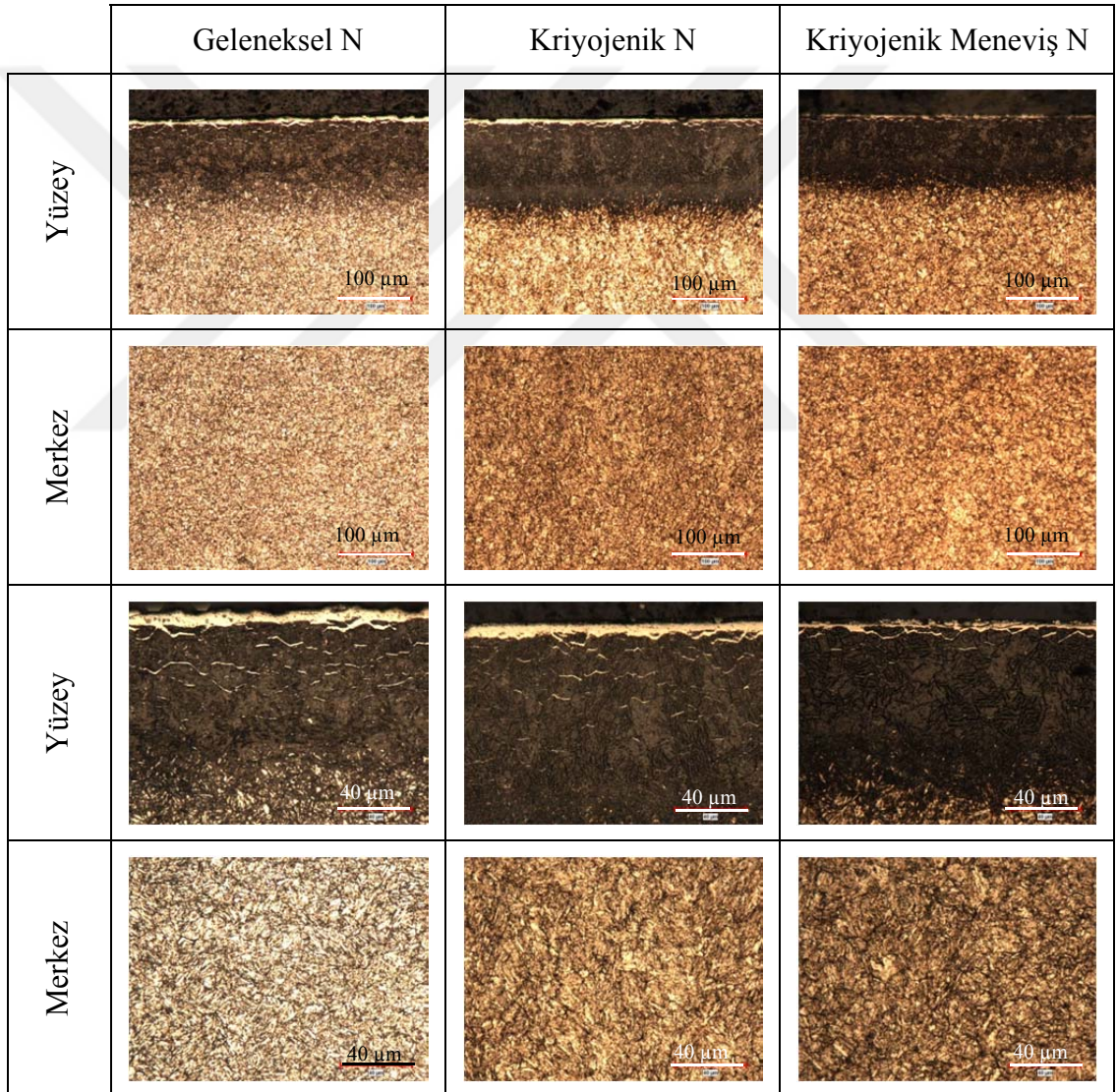


Şekil 5.16 : (a) Romidot Romishape/DT profil ölçüm cihazı ve (b) Mitutoyo SJ-400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1 Mikroyapısal Karakterizasyon

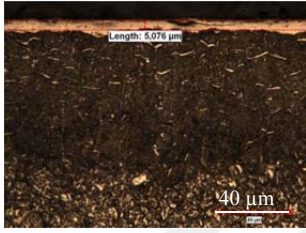
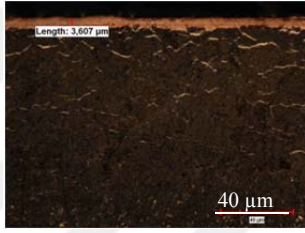
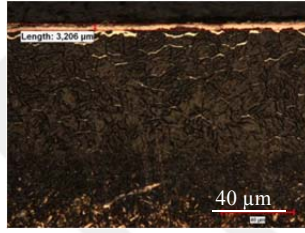
Üç farklı ısıtıl işlem reçetesiye göre hazırlanan, ısıtıl işlemleri yurtdışında yapılan AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin nitrasyon işlemi sonrası mikroyapıları Şekil 6.1’de karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir (N: Nitrasyonlu).



Şekil 6.1 : Üç farklı ısıtıl işlem reçetesiye göre hazırlanan AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin nitrasyon tabakalarının ve merkez yapılarının karşılaştırılması.

Kriyojenik işlem sonucunda ve sonrasında uygulanan 1 Meneviş ısıtma işleminden sonra AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin mikroyapılarında, geleneksel ısıtma işlem görmüş numunelere göre, optik mikroskopla gözlemlenebilen bir değişiklik gerçekleşmemiştir.

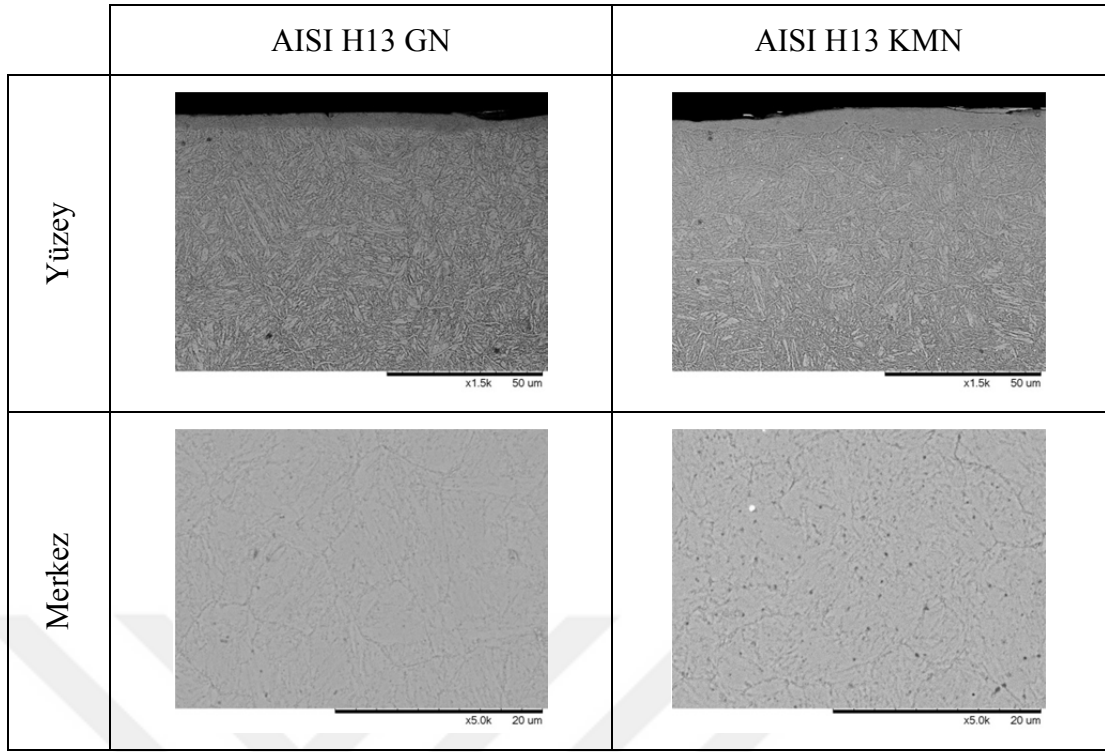
Nitrasyonlu sıcak iş çeliği numunelerin yüzey ve yüzeye yakın kısımlarına bakıldığında her üç ısıtma işlem şartındaki numunede kalınlıkları birbirine yakın beyaz tabaka varlığı gözlenmektedir. Optik mikroskopta, Clemex Captiva programı ile yapılan ölçümlerde numune yüzeylerindeki ortalama beyaz tabaka kalınlıkları Geleneksel ısıtma işlem reçetesiyle hazırlanan numunede 5,1 μm , Kriyojenik ısıtma işlem reçetesiyle hazırlanan numunede 3,2 μm ve KM ısıtma işlem reçetesiyle hazırlanan numunede de 3,6 μm olarak ölçülmüştür (Şekil 6.2).

GN	KN	KMN
		

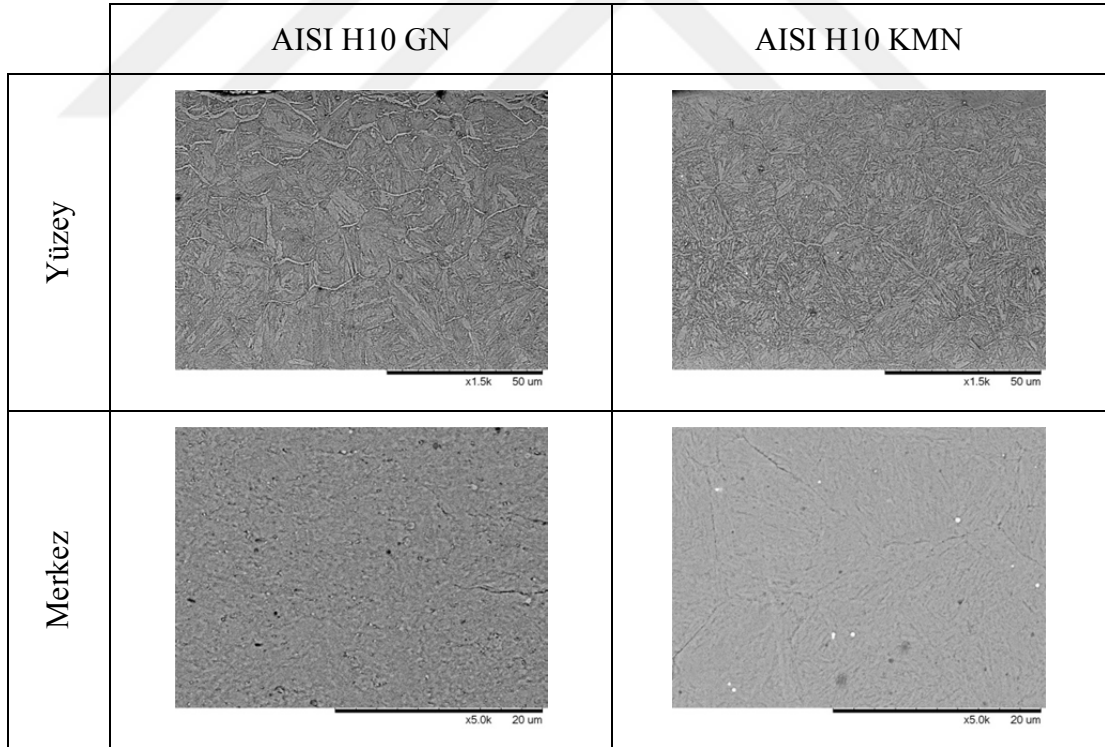
Şekil 6.2 : Üç farklı ısıtma işlem reçetesiyle hazırlanan DIN 1.2344 sıcak iş çeliği numunelerin beyaz tabaka kalınlık ölçümleri.

Isıtma işlemleri dışında yapılan 2 farklı alaşım grubundan oluşan numunelerin SEM kullanılarak çekilen yüzeye yakın ve merkez görüntüleri Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te karşılaştırılmıştır. SEM kullanılarak çekilen mikrograflarda 5000 büyütme kadar çıkmıştır. Yapılan bu çalışmada dikkati çeken unsur, kriyojenik ısıtma işlem görmüş numunede çok sayıda ve yapıya nispeten daha homojen olarak dağılmış çökeltilerin görülmesidir. Geleneksel numunelerde çökeltilerin sayısı oldukça az, daha büyük ve heterojen dağılım göstermektedirler. Şekil B.1 ve Şekil B.2'de nitrasyon-merkez geçişine yakın bölgeleri de içerecek şekilde daha detaylı karşılaştırma yapılmıştır.

Her iki alaşım grubu için yapılan ikinci bir SEM çalışmasında, daha yüksek büyütme ile çökeltilerin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Şekil B.3 ve Şekil B.4'ten görüleceği üzere, daha önce de gözlemlenen çok küçük ve homojen dağılım gösteren çökeltiler daha net görüntüler ile tespit edilmiştir. AISI H10 çeliğinin kriyojenik versiyonunda çok daha yoğun ve ince formda çökeltiler görülmektedir.



Şekil 6.3 : Isıl işlemleri yurtiçinde yapılan AISI H13 numunelerin yüzeye yakın yapılarıyla merkez yapılarının karşılaştırılması.



Şekil 6.4 : Isıl işlemleri yurtiçinde yapılan AISI H10 numunelerin yüzeye yakın yapılarıyla merkez yapılarının karşılaştırılması.

Özellikle çökeltiler hakkında daha fazla bilgi elde edebilmek amacıyla EDS analizi yapılması hedeflenmiş, ancak S.Ü. Merkez Laboratuvarındaki SEM cihazına bağlı

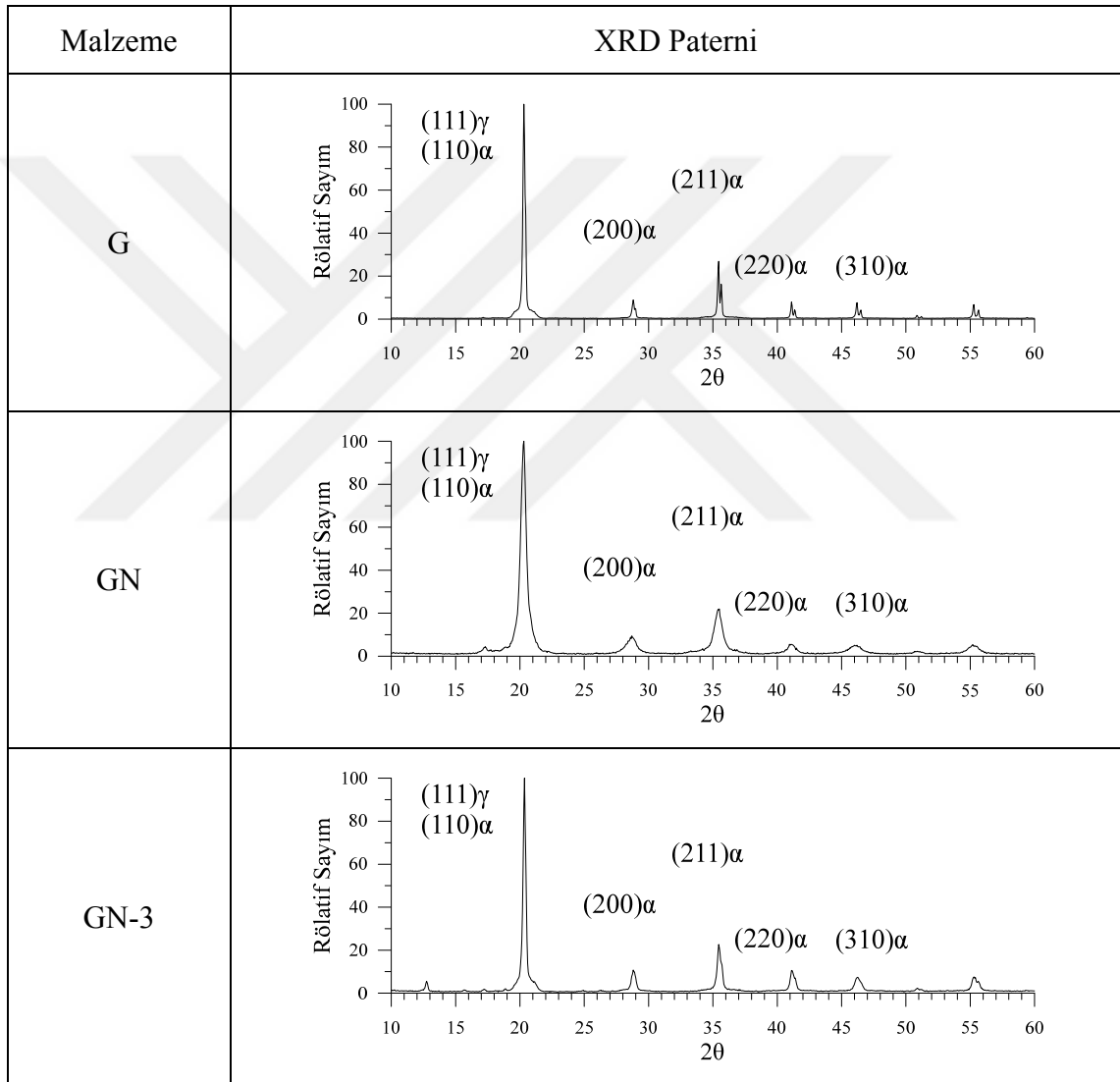
EDS ünitesinin çözünürlüğü ile görüntü sorunları nedeniyle sağlıklı analiz yapılamamıştır. Bu nedenle Borçelik Ar-Ge laboratuvarından yardım alınarak EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Borçelik'te yapılan çalışmada çekilen SEM fotoğrafları Şekil B.5 ve Şekil B.6'da görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan mikroyapı numuneleri, daha önce kullanılan numunelerden farklıdır. Sonuçlarda bir değişiklik olup olmayacağı kontrol edilmiştir. Tıpkı daha önceki numunelerde elde edilen çok küçük boyutlarda ve homojen çökelti, kriyojenik numunelerde aynı şekilde gözlemlenmiştir. Geleneksel numunelerdeki çökelti daha iri ve az sayıdadırlar. Kriyojenik numunelerde özellikle tane sınırlarında çökelti yoğunlaştığı, buna ilaveten tane içerisinde de homojen olarak dağıldıkları gözlemlenmektedir. Molinari ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada da benzer bulgular öne sürülmektedir. Ayrıca bazı kaynaklarda da çok ince karbürlerin; özellikle η -karbürlerin kriyojenik işlemi takip eden menevişleme sırasında çökmeye başladıkları bildirilmektedir. [5,6,51]

Gözlemlenen bu çökelti EDS analizlerinin yapılmasına çalışılmıştır. Kullanılan SEM EDS ataçmanlarının önemli kısmı yüksek çözünürlükte analiz yapma kabiliyetine sahip olmadığı için sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Aynı şekilde yapılan analizlerde sadece çökelti parçacığından değil, parçacığın altından da piklerin elde edildiği gözlemlenmiştir. Çökelti boyutlarında olması nedeniyle hemen altlarından da yansımalar dedektöre geldiği için, analiz sonuçları genel analiz sonuçları ile benzer değerlerde çıkmaktadır.

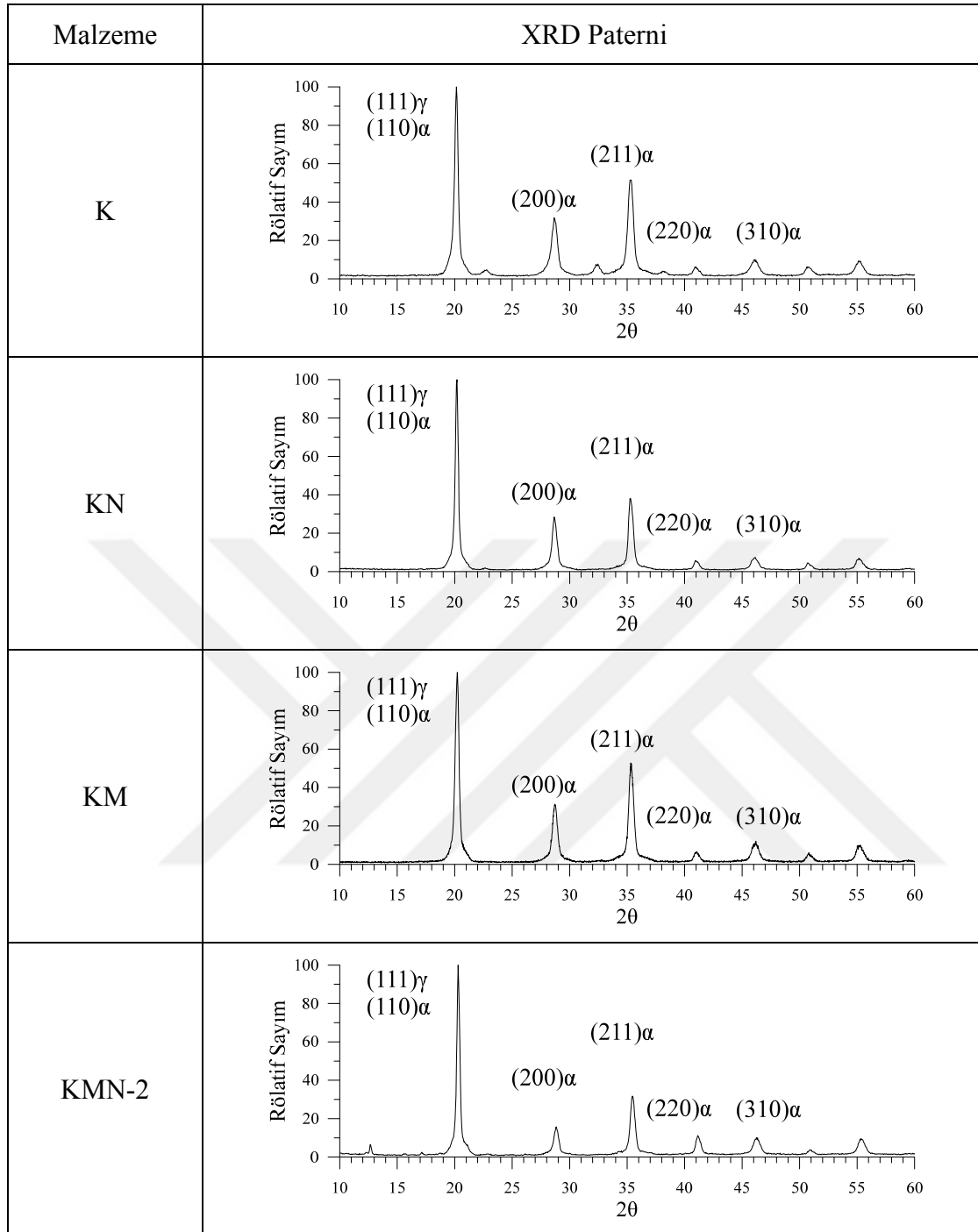
Tüm bu olumsuzluklara rağmen en tutarlı ya da sertleşme mekanizmasının açıklanabilmesi adına nispeten güvenilir veriler Borçelik Ar-Ge Laboratuvarında yapılan çalışmadan elde edilmiştir. Bu çalışmaya ait raporların bir kısmı Şekil C.1-C.4'te gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre çökelti den demir, molibden ve krom ile birlikte karbon pikleri elde edilmektedir. Bu durumda bu kısımlarda karbür varlığından söz edilebilmektedir.

Geleneksel ve kriyojenik tabanlı ısıt işlemlerine göre ısıt işlemleri yapılan AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerde bulunması olası kalıntı östenitin tayini amacıyla XRD paternlerine bakılmıştır. Bu analizlerde yurtdışında ısıt işlemleri görmüş numuneler kullanılmıştır. Şekil 6.5'te geleneksel ısıt işlemleri yapılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunenin sırasıyla ısıt işlemleri sonrasında (G), nitrasyon sonrasında (GN) ve üçüncü ısıt döngüsü sonrasında (GN-3) elde edilen XRD paternleri görülmektedir. Elde edilen paternlerin çözümlenmesi sonucunda kalıntı östenite rastlanılmamıştır.

Şekil 6.6’da kriyojenik ısıt işlem yapılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin sırasıyla kriyojenik ısıt işlem sonrasında (K), nitrasyon sonrasında (KN), kriyojenik işlem sonrasında bir meneviş yapılmış (KM) ve menevişlendikten sonra ikinci ısıt döngü sonrasında (KMN-2) elde edilen XRD paternleri görülmektedir. Elde edilen paternlerin çözülmesi sonucunda sadece K ısıt işlem görmüş numunede kalıntı östenit olduğu görülmüştür. G ve KM ısıt işlem görmüş, nitrülenmiş numunelerde kalıntı östenit bulgusuna rastlanılmamıştır. İlerleyen ısıt döngüler sonucunda, yapıda kalıntı östenit açısından bir değişikliğin oluşmadığı gözlemlenmiştir.



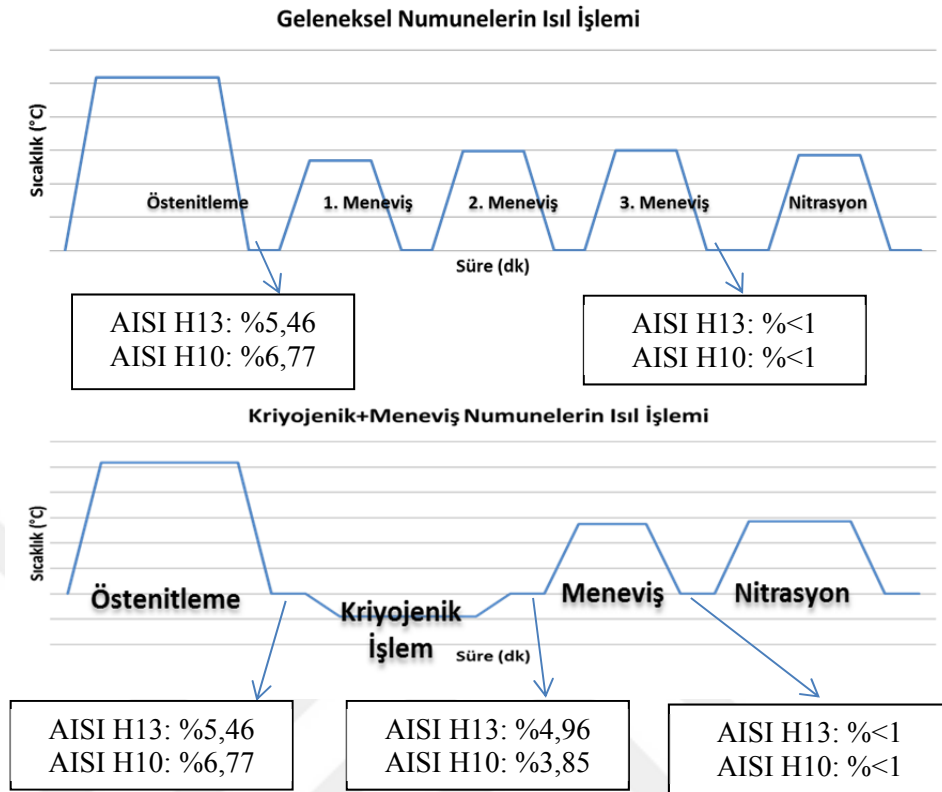
Şekil 6.5 : Geleneksel ısıt işlem reçetesine göre hazırlanmış Geleneksel (G), sonrasında nitrasyon yapılmış (GN) ve üç defa ısıt döngüye girmiş (GN-3) AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin XRD paternleri.



Şekil 6.6 : Kriyojenik ısıt işleme reçetesine göre hazırlanmış Kriyojenik (K), sonrasında nitrasyon yapılmış (KN), Kriyojenik işleminden sonra menevişlenmiş (KM) ve nitrasyon yapıp iki defa ısıt döngüye girmiş (KMN-2) AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin XRD paternleri.

Kriyojenik işlem sonrasında kalıntı östenit bulunması nedeniyle aralarında sadece su verilmiş numunelerin de bulunduğu yeni numune grubu hazırlanarak analiz tekrarlanmıştır. Bu seri ısıt işlemleri yurtiçi ısıt işlem firmasında yapılan gruptan alınarak AISI 13 numunelerle birlikte AISI H 10 numunelerin de analizleri

gerçekleştirmiştir. Şekil 6.7’de numunelerin alındığı ısıtıl işlem kademeleri ve kalıntı östenit analiz sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.7 : Kalıntı östenit tayini için numune planı ve analiz sonuçları.

Burada dikkati çeken durum östenitleme sonrasında var olan kalıntı östenit miktarının, meneviş işlemi ile birlikte ölçülebilir değerin altına düşmesi ya da tamamen martenzite dönüşmesidir.

Numune serisine su verilmiş numuneler de eklenerek yüksek hassasiyette ölçüm yapabilen ve özellikle kalıntı östenit tayini için geliştirilmiş bir cihazla analiz yapılması için yurtdışı analiz cihazları imalatçısı bir firmadan destek alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin raporları Şekil D.1-8’de verilmiştir. AreX kalıntı östenit analizi cihazının %0,5 hassasiyetle kalıntı östenit oranına kadar ölçüm yapabildiği bilgisi alınmıştır.

Çizelge 6.1’de analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği üzere, östenitlenmiş ve su verilmiş durumda her iki alaşımda da %5’in üzerinde olan kalıntı östenit oranı, G ısıtıl işlem sonunda AISI H13 numunede ölçülebilir sınırın altına düşmekte (%0,5), AISI H10 numunede ise %1,9 seviyesine gerilemektedir. Kriyojenik işlem sonunda her iki alaşımda da kalıntı östenit

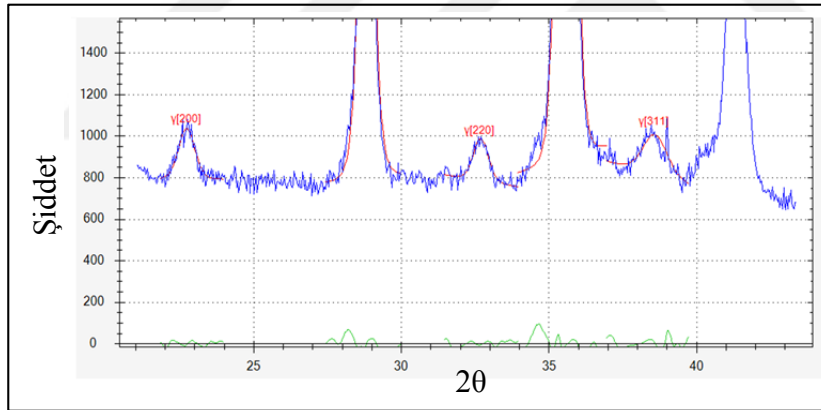
bulunmaktadır. Yapılan meneviş ısıt işleminde ölçülebilir seviyenin altına düşmektedir.

Çizelge 6.1 : Kalıntı östenit analizi sonuçları.

	Su Verme (%)	G (%)	K (%)	KM (%)
AISI H13	5,46	<1	4,96	<1
AISI H10	6,77	1,9	3,85	<1

Kriyojenik ısıt işleminin AISI H10 sıcak iş çeliği numunede kalıntı östenit açısından önemli bir fark yaratmış olduğu görülmektedir. Uygulanan geleneksel yöntemde %2,0 seviyelerinde kalıntı östenit bulunduğunu varsaydığımızda, kriyojenik işlem ile bu oranın %0,5'in altına düştüğü gözlemlenmiştir.

Şkil 6.8'de kriyojenik ısıt işlem yapılmış AISI H13 numunede yapılan kalıntı östenit ölçümü sonunda elde edilen XRD paterni görülmektedir. Kalıntı östenitin varlığına işaret eden pikler işaretlenmiştir. Analiz raporu Şkil D.3'te verilmiştir.



Şkil 6.8 : AISI H13 kriyojenik numunenin AreX kalıntı östenit cihazı ile kalıntı östenit analizi sonucunda elde edilen XRD paterni.

Destek alınan firmanın StressX adlı cihazı ile yüzeyde kalıntı gerilme ölçümü yapabildiği bilgisi üzerine, numunelerin sertliklerindeki değişimin ilişkilendirilebileceği düşüncesi ile yüzeylerde kalıntı gerilme analizleri yaptırılmıştır. Bu analizlerin raporları Şkil E.1-8'de verilmiştir. Çizelge 6.2'de analiz sonuçları toplu olarak verilmektedir.

Malzeme üzerindeki gerilmeler dış kuvvetler uygulandığında artış gösterecektir. Uygulanan kuvvetler ve kalıntı gerilim miktarı, malzemenin veya parçanın nihai

performansını belirlemek için birlikte değerlendirilmektedir. Kalıntı gerilmeler büyükse parça yüksek gerilmelere karşı dayanıklı olmayacaktır.

Çizelge 6.2 : Kalıntı gerilme analiz sonuçları.

	Su Verme (MPa)	G (MPa)	K (MPa)	KM (MPa)
AISI H13	645	-116	406	679
AISI H10	599	669	413	650

Bu bilgiler ışığında bakıldığında yapılan analizlere göre sadece AISI H13 çeliğinin G versiyonunda kalıntı gerilmeler açısından avantaj bulunmaktadır. Diğer numunelerde uygulanan ısıtıl işlemlerle de bağlantılı olarak kalıntı gerilme değerlerinde artış gözlemlenmektedir.

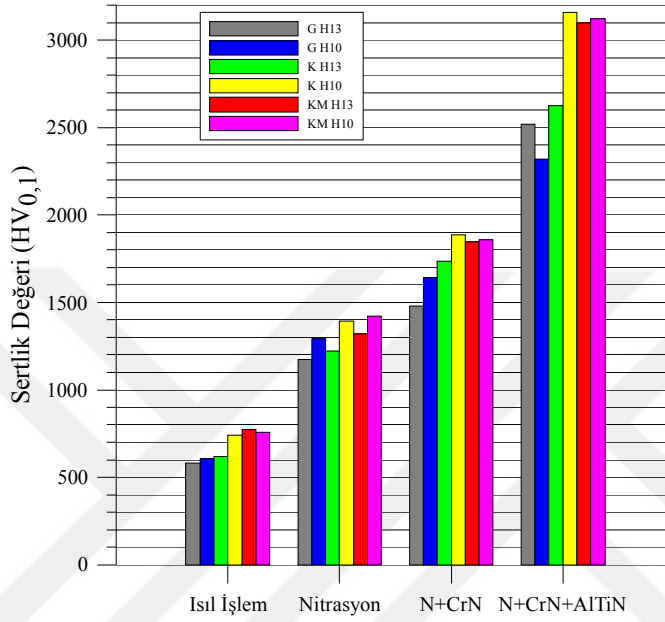
6.2 Isıl İşlem-Mekanik Özellikler İlişkisi

Isıl işlem reçetelerine göre hazırlanan ve sonrasında nitrasyon, PVD ince film sert kaplama yapılan numunelerin karşılaştırmalı sertlik ölçümleri Çizelge 6.3'te gösterilmektedir. Tablodan görüleceği üzere uygulanan ısıtıl işlemler ile birlikte çeliklerin sertlikleri artış göstererek, nitrasyon tabakasıyla elde edilen sertlik değerine yaklaşmaktadır. Kriyojenik işlem, katmanlar arası sertlik farkını azaltarak kalıbın yüzey dayanımını arttırmaktadır. Aynı şekilde uygulanan ince sert film kaplamaların da yüzeye uyumu ve tutunması daha da iyileşmektedir. Rodríguez-Baracaldo ve diğerleri ile Björk ve diğerleri, yaptıkları çalışmalarda benzer sonuçları bildirmişlerdir [20,28].

Çizelge 6.3 : AISI H13 ve AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerin uygulanan ısıtıl işlemler ve kaplamalar sonucunda ulaştıkları sertlik değerleri.

	G (HV _{0.1})		K (HV _{0.1})		KM (HV _{0.1})	
	AISI H13	AISI H10	AISI H13	AISI H10	AISI H13	AISI H10
Isıl İşlem	583	606	620	741	774	755
Nitrasyon	1.173	1.293	1.224	1.394	1.319	1.422
N+CrN	1.479	1.643	1.735	1.888	1.847	1.858
N+CrN+AlTiN	2.519	2.319	2.626	3.160	3.098	3.122

Şekil 6.9’da daha rahat karşılaştırma yapılabilmesi için sertlik verileri grafik şeklinde sunulmaktadır. Örnek olarak AlTiN kaplamanın doğrudan nitrasyon tabakasının üzerine uygulanacağı halde yaklaşık iki kat sertlik farkı oluşacaktır. Bu durumda AlTiN kaplamanın yüzeyden ayrılma ihtimali çok yüksek olacaktır. Ara katman olarak uygulanan CrN, sertlik farkını dengelemektedir. Benzer ilişki kriyojenik işlem-nitrasyon-CrN tabakası için de geçerlidir.



Şekil 6.9 : Sıcak iş çeliği numunelerin işlem grupları bazında sertlik değerlerinin karşılaştırılması.

6.3 Isıl Döngünün Etkileri

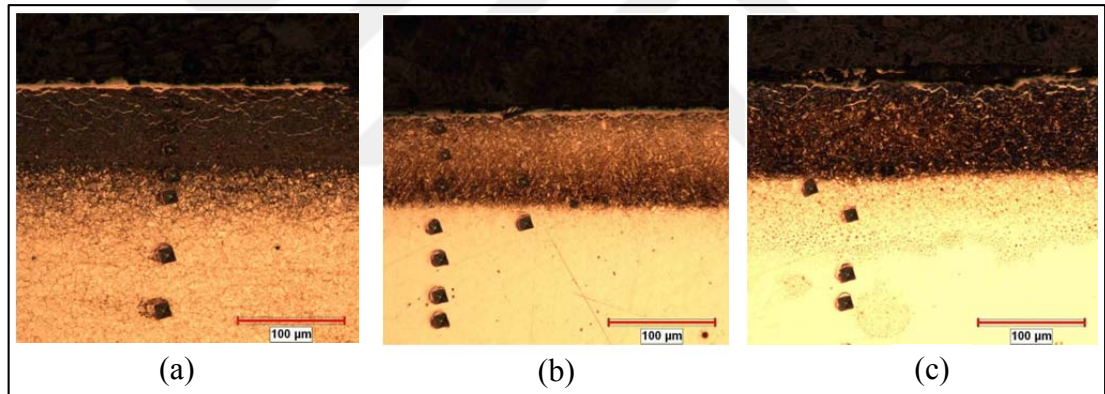
Isıl döngü deneyleri koruyucu atmosfer ortamı olmadan, laboratuvar tipi fırında gerçekleştirilmiştir. Bu ilk deneylerde ısıtma işlemi yurtdışında yapılan numuneler kullanılmıştır. Kalıp ön ısıtma ile ortalama imalat kalma sürelerinin toplamı olan 8 saat ısıtma döngüsü süresi olarak tayin edilmiştir. Deney sıcaklığı olarak imalat sırasında kalıbın sürtünmeler ile ısınabileceği ortalama değer olan 480 °C seçilmiştir. Artan prese bağlanma sayısına bağlı olarak ısıtma tesiri yapıda oluşacak değişimleri gözlemlemek için her deney sonunda numunelerden 2 mm kalınlığında dilimler tel erozyon yöntemi ile alınmıştır. Kalan numune parçası ile ısıtma döngü deneylerine devam edilmiştir.

Her ısıtma döngü adımıyla alınan numunelerde yüzeyden artan yükü 40x büyütme ve kesitten nitrasyon tabakasından içeriye doğru 0,1 kg yükü 40x büyütme Mikro Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Kesitten yapılan sertlik ölçümleri olabildiğince yüzeye yakın noktalardan başlayarak, nitrasyon tabakasını kat edip sıcak iş çeliği malzemenin yaklaşık 400 μm derinliğine kadar yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin olabildiğince nitrasyon tabakası-çelik geçişini tanımlamaya yardımcı olacak biçimde olmasına gayret edilmiştir.

Nitrasyon tabakasının kalınlığının tayini için, DIN 50190-3 standardına göre merkez sertliğinin 50 Vickers artış gösterdiği sınır baz alınmıştır. Ölçüm noktalarının mümkün mertebe yüzeyden itibaren birbirlerine olan mesafelerinin yakın olmaması amaçlandığı için ölçümler düz bir hat yerine zikzak oluşturacak şekilde yapılmıştır (Şekil 6.10, Şekil 6.12 ve Şekil 6.14).

Elde edilen sertlik verileri ile Şekil 6.11, Şekil 6.13 ve Şekil 6.15'teki sertlik-derinlik grafikleri oluşturulmuştur. DIN 50190-3 standardında tanımlanan yöntemle Şekil 6.11'i incelediğimizde; GN numunenin nitrasyon tabakasının $\sim 135 \mu\text{m}$, KN numunenin nitrasyon tabakasının $\sim 220 \mu\text{m}$ ve KMN numunenin de nitrasyon tabakasının da $\sim 225 \mu\text{m}$ civarında derinliğe sahip olduğu görülmektedir.

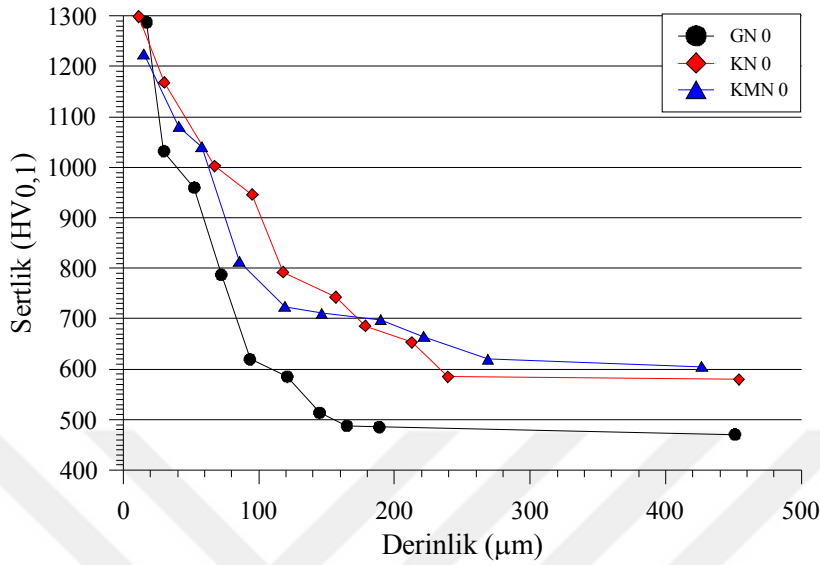


Şekil 6.10 : Isıl döngüye girmemiş numunelerin sertlik ölçümü sonrası fotoğrafları. (a) GN, (b) KN ve (c) KMN.

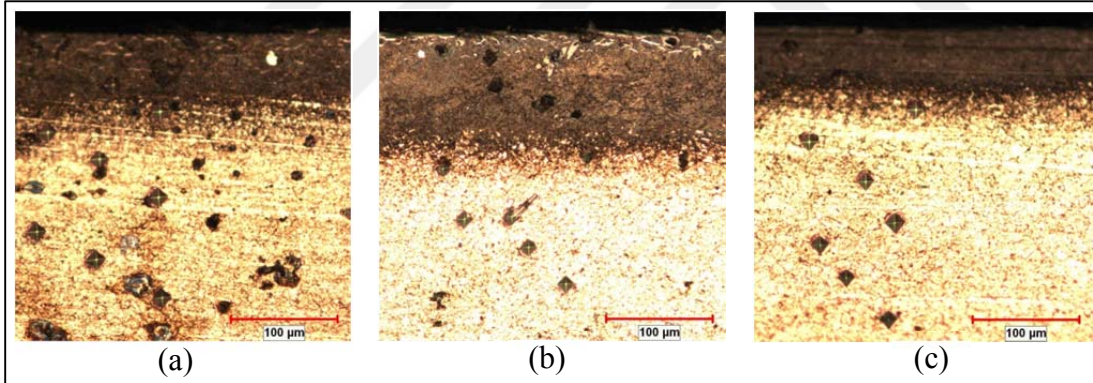
Isıl döngüye girmeden önce yapılan sertlik ölçümlerinin gösterilmekte olduğu Şekil 6.11'den de görüleceği üzere Kriyojenik ısıtma işlemi uygulanmış numunenin merkez sertliği diğerlerine göre yüksek çıkmıştır. Nitrasyon tabakasının yüzeye en yakın noktasındaki sertlik her üç ısıtma işlem şartında da bir birine yakın değerler göstermektedir.

Üçüncü ısıtma döngüsü sonunda elde edilen sertlik verileri Şekil 6.13'te gösterilmiştir. Genel olarak tüm ısıtma işlem şartlarına göre hazırlanan numunelerinde önceki ölçüme göre bir miktar düşük değerler elde edilmiştir. Bu durumun olası nedeni, bir hat boyunca ölçüm alınmaya çalışıldığı için, birkaç ölçümün ortalamasının

alınmayışıdır. Bu nedenle sapmalar normal karşılanabilir. Genel olarak K numunenin hem merkez hem de nitrasyon tabakasının yüzeye yakın kısımlarının sertliğinin diğer numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

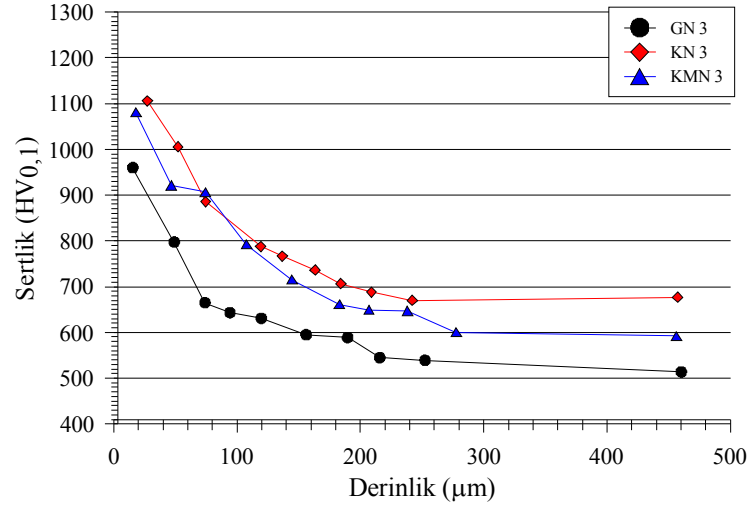


Şekil 6.11 : Isıl döngüye girmeden önce numunelerin kesitten ölçülen sertlik değerlerinin karşılaştırılması.

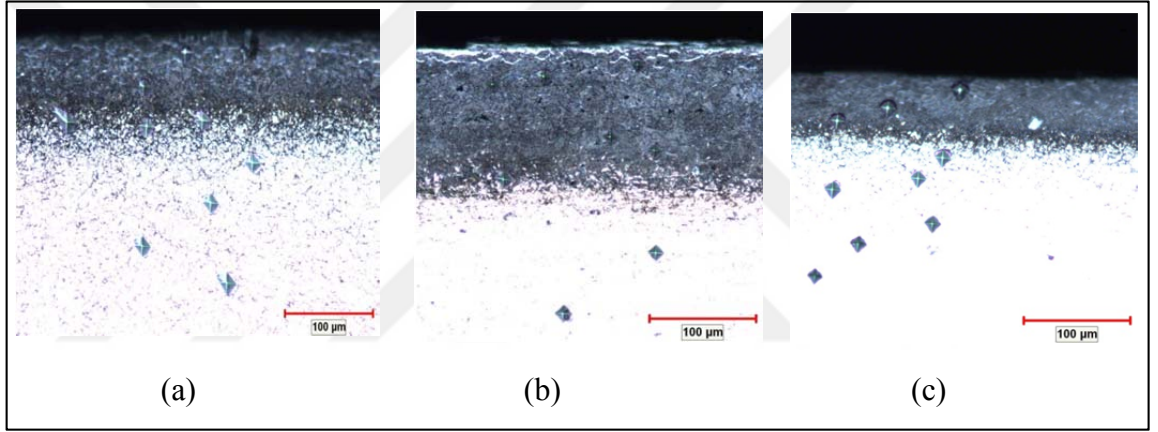


Şekil 6.12 : Üçüncü ısıl döngünün ardından yapılan sertlik ölçümü fotoğrafları. (a) GN, (b) KN ve (c) KMN.

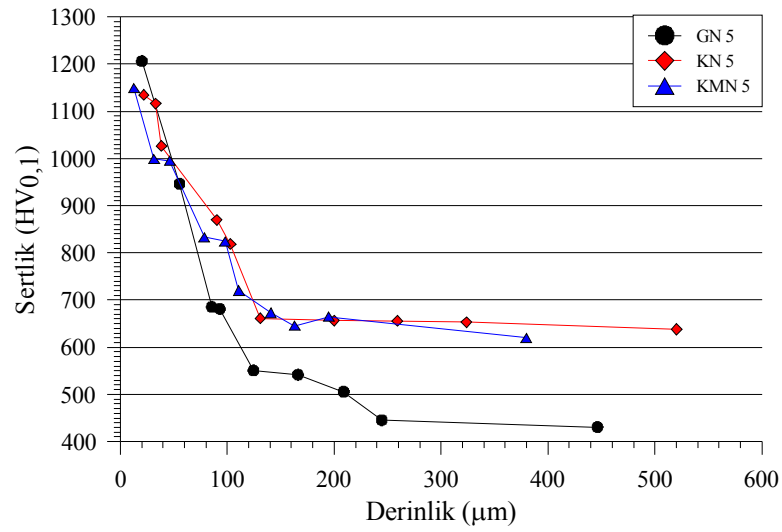
Beşinci ısıl döngü sonunda elde edilen sertlik verileri Şekil 6.15'te gösterilmektedir. K ve KM ısıl işlemlili numunelerin merkez sertliklerinin geleneksel numuneye göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. G numunedeki düşüş, daha önce açıklanan, ortalama değerlerin alınmayışı ile ilgili olabilir. Normal çalışma şartlarında ısı, basınç ve döngüsel kuvvetler nedeniyle kalıplarda uzun zamanda yumuşama gözlemlenmektedir. Özellikle ince diller bu etkinin nispeten kolay ve hızlı geliştiği kalıp bölümleridir. Aynı şekilde geçişlerde de yumuşama sonucunda deformasyon hasarları ile karşılaşmaktadır.



Şekil 6.13 : Üçüncü ısıl döngüye girmiş numunelerin kesitten ölçülen sertlik değerlerinin karşılaştırılması.



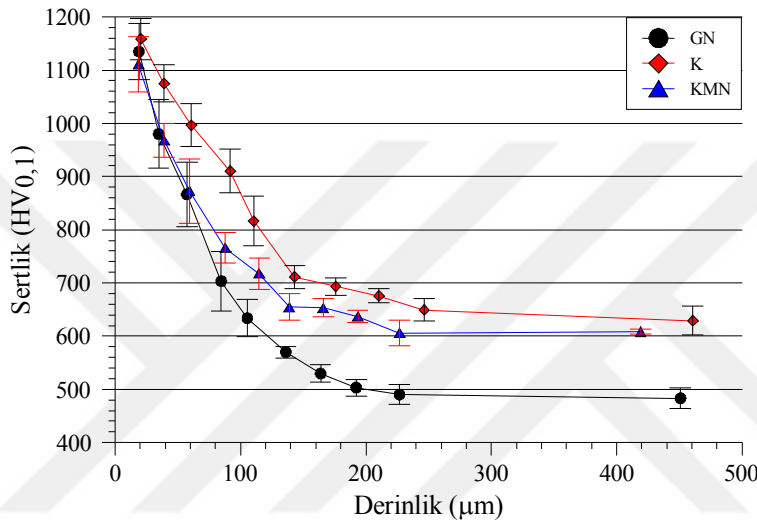
Şekil 6.14 : Beşinci ısıl döngünün ardından yapılan sertlik ölçümü fotoğrafları. (a) GN, (b) KN ve (c) KMN.



Şekil 6.15 : Beşinci ısıl döngüye girmiş numunelerin kesitten ölçülen sertlik değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 6.16’da numunelere uygulanan beş adet ısıl döngü sonrasında elde edilen sertlik verilerinin yüzeyden merkeze doğru değişiminin ortalamaları sapma değerleri ile birlikte gösterilmektedir.

Grafiği incelediğimizde nitrasyon tabakasının yüzeye yakın kısımlarında her üç ısıtma işlem reçetesinden neredeyse bağımsız olarak birbirine çok yakın sertlik değerleri elde edilmiştir. Ancak asıl fark kendini merkez sertliğinde göstermektedir. Uygulanan kriyojenik işleme merkez sertliği geleneksel numuneye göre ortalama 100 HV’den daha fazla farkla artış göstermektedir.



Şekil 6.16 : Numunelere uygulanan 5 adet ısıl döngü sonucunda elde edilen sertlik değerlerinin ortalamaları ve sapmaları.

Yurtiçinde ısıtma işlemleri yapılan numunelerle bu deney tekrarlanmıştır. Aynı fırında ve şartlarda 6 defa ısıtma döngüsü yapılmıştır. Her döngüden sonra bir seri numune alınarak deneye devam edilmiştir. 6. Döngüden çıkan numuneler toplamda 6 kere ısıtma soğuma periyoduna tabi olmuştur. Bu numuneler yüzeyleri hafifçe parlatıldıktan sonra, programlanabilir sertlik cihazı kullanılarak yüzeyden merkeze doğru ölçümler alınarak sertlik profilleri oluşturulmuştur. AISI H13 ve AISI H10 çeliklerin GN ile KMN numuneleri için oluşturulan sertlik profilleri Şekil F.1-4’te gösterilmektedir.

Toplam 6 çevrimlik ısıtma döngü serisinde numunelerde belirgin bir yumuşama gözlemlenmemiştir. Difüzyon tabakasının derinliğinin değişimi veya azotun daha derinlere yayılması hakkında yorum yapılabilecek veri/veriler bu deney serisinden elde edilememiştir. Ancak bu şartlarda basınç ve yorulma etkisi olmadan malzemelerde sadece ısıtma döngülerle 6 döngü sonucunda bariz yumuşama etkisi

olmadığı gözlemlenmiştir. Bu ısıtım döngü deneyi sırasında fırında bir hata sonucunda 24 saate yakın süre boyunca 480 °C'ta kalan numunelerin nitrasyon ve merkez sertliklerinin hiç ısıtım işlem yapılmamış malzeme sertliğine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu hata sonrasında yeniden numuneler hazırlanarak ısıtım döngü deneyine en baştan başlanmıştır.

6.4 Aşınma Deneyleri

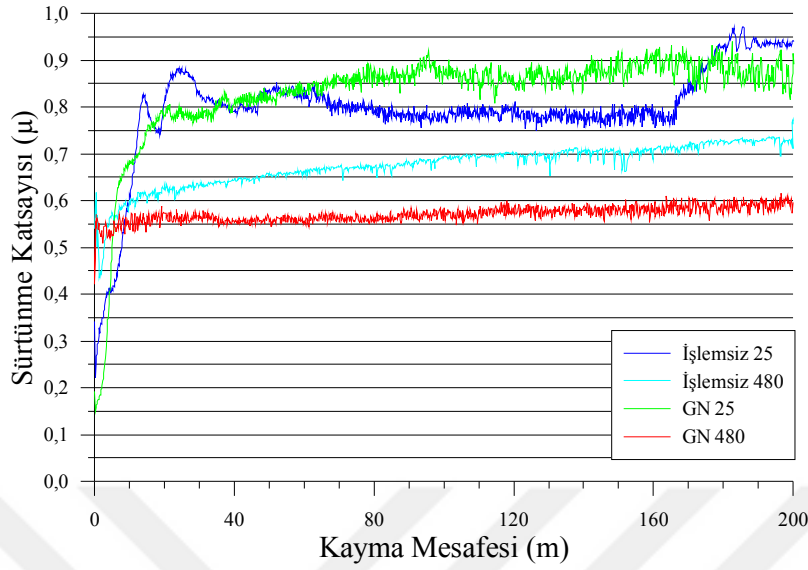
Aşınma deneyleri, normal atmosferik koşullarda (23 ± 2 °C, %32 ± 2 bağıl nem) ve ekstrüzyon şartlarına benzer şartlarda (480 ± 10 °C, Azot-Hava karışımı atmosfer ortamında) olmak üzere 2 farklı ortamda yapılmıştır. Aşındırıcı ortam, 6 mm çapında Al_2O_3 bilyenin numune üzerinde 0,16 m/s kayma hızında ve 200 m toplam kayma mesafesinde 3N yük altında sürtünmesi ile oluşturulmuştur.

Isıl işlemsiz, G, K ve KM ısıtım işlem reçetelerine göre ısıtım işlemleri yurtdışında yapılmış olan AISI H13 sıcak iş çeliği numuneleri ile ortam sıcaklığında normal atmosferik koşullarda ve argon-hava karışımı ile çalışma sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayıları Şekil 6.17-6.19'da gösterilmiştir. G nitrasyonsuz numune bulunmamaktadır. Isıtım işlem reçeteleri, ortam sıcaklığına ve nitrasyon durumuna göre karşılaştırılmıştır. Şekil 6.20'de nitrasyonsuz ve Şekil 6.21'de de nitrasyonlu ısıtım işlem reçetelerinin sürtünme katsayılarının birbiri ile karşılaştırması gösterilmektedir.

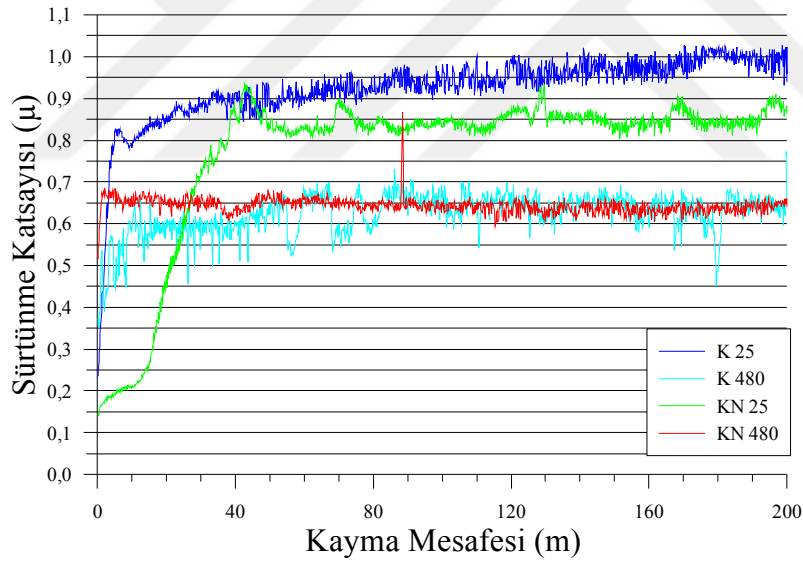
Aşınma deneyinin başlaması ile artan eğilim gösteren sürtünme katsayısı değerleri çok kısa bir süre içinde belirli alt üst değerler aralığında kararlı hale gelmiştir. Kararlı sürtünme katsayısının ortalaması ortam sıcaklığında ısıtım işlemsiz numuneler için nitrasyonsuz halde 0,77 seviyesindeyken, geleneksel nitrasyonlu numune için ise 0,87 seviyesine çıkmıştır (Şekil 6.17). Aynı numuneler için ekstrüzyon sıcaklığında gerçekleştirilen deneylere bakıldığında ise ısıtım işlemsiz numunenin sürtünme katsayısı 0,70 ve nitrasyonlu numunenin sürtünme katsayısı da 0,57 seviyelerindedir (Şekil 6.17).

Kriyojenik ısıtım işlemleri numunelerin sürtünme katsayılarına baktığımızda, ortam sıcaklığında nitrasyonsuz numune ile yapılan deneyde 0,97 seviyesinde bulunan sürtünme katsayısı nitrasyonlu numunede 0,84 seviyelerinde bulunmaktadır. Kriyojenik numunelerle çalışma sıcaklığında yapılan deneylerde ise nitrasyonsuz

numunenin sürtünme katsayısı 0,66 seviyesinde iken, nitrasyonlu numunenin sürtünme katsayısı da 0,63 seviyesindedir (Şekil 6.17).



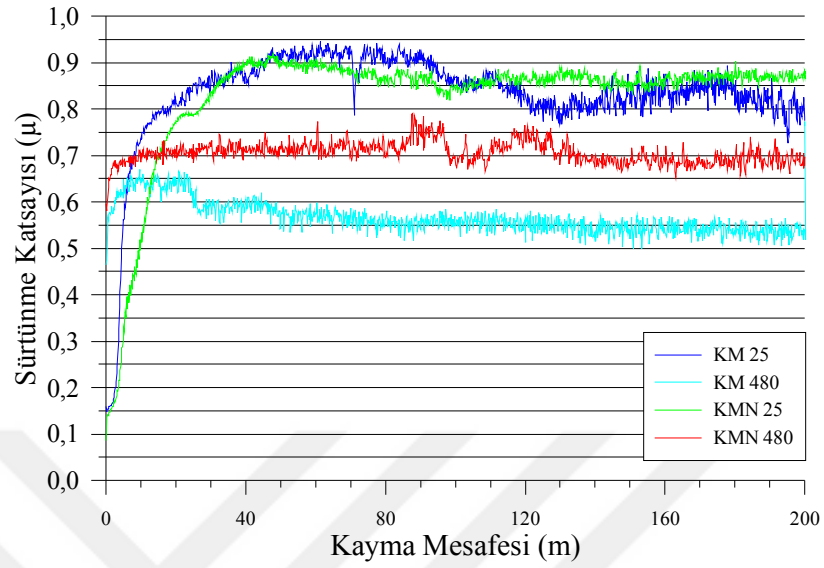
Şekil 6.17 : Isıl işlemsiz ve GN ısıl işlem reçetesi göre işlem görmüş numunelerin ortam ve ekstrüzyon sıcaklığındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.



Şekil 6.18 : K ısıl işlem reçetesi göre işlem görmüş nitrasyonsuz ve nitrasyonlu numunelerin ortam ve ekstrüzyon sıcaklığındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.

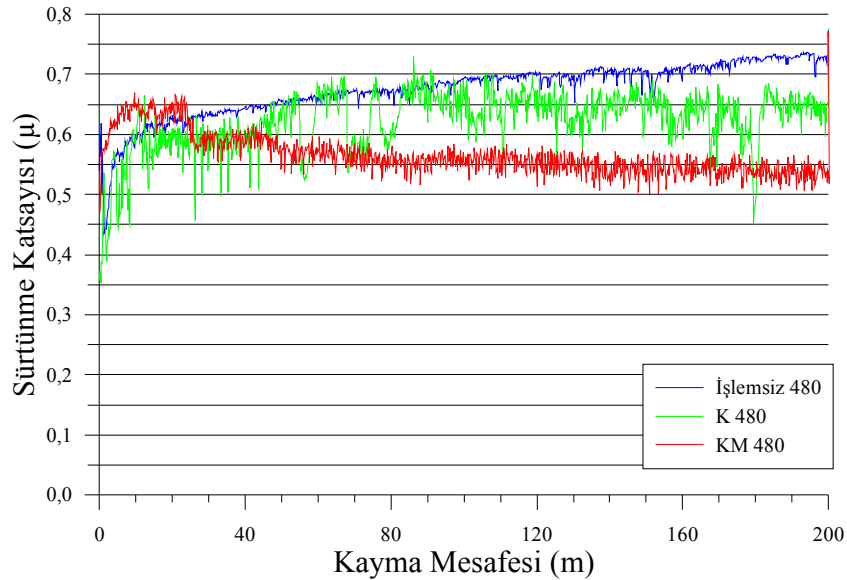
KM ısıl işlem reçetesi göre hazırlanmış numunenin ortam sıcaklığındaki sürtünme katsayısına baktığımız zaman nitrasyonsuz numunenin önce 0,91 sonra da 0,83 gibi iki farklı seviyede kararlı hale geçtiğini gözlemleyebiliriz. Nitrasyonlu numunenin de sürtünme katsayısının 0,86 seviyesinde olduğunu görmekteyiz.

Çalışma sıcaklığında yapılan deneylerde ise KM ısıtılmış numunelerin nitrasyonsuz hali için sürtünme katsayısının 0,56 ve nitrasyonlu hali için de sürtünme katsayısının 0,70 seviyesinde olduğunu grafikten görmekteyiz (Şekil 6.19).



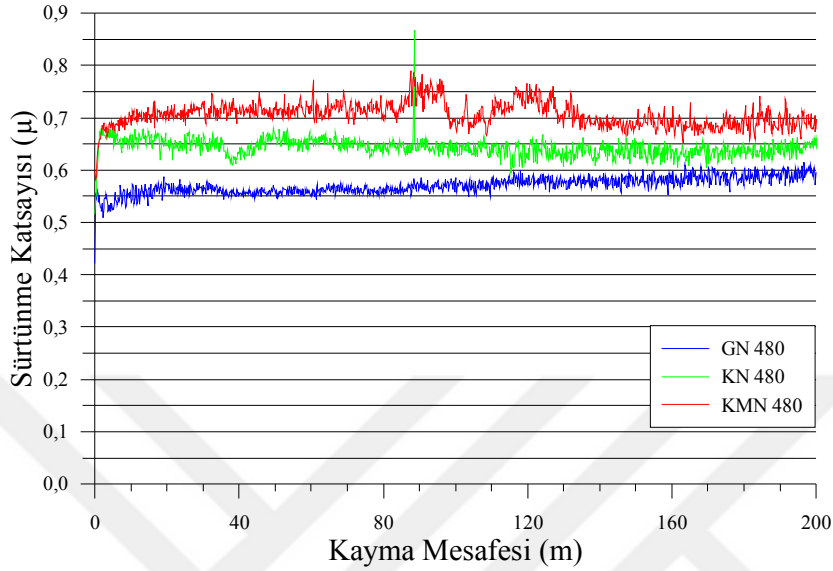
Şekil 6.19 : KM ısıtılmış numunelerin nitrasyonsuz ve nitrasyonlu hallerinin ortam ve ekstrüzyon sıcaklığındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.

Sürtünme katsayılarını ekstrüzyon sıcaklığı şartında nitrasyonsuz duruma göre karşılaştırdığımızda ısıtılmış numunenin sürtünme katsayısı 0,70 iken KM numunenin sürtünme katsayısı 0,56 seviyesindedir (Şekil 6.20).



Şekil 6.20 : Isıtılmış, K ve KM numunelerin ekstrüzyon şartlarındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.

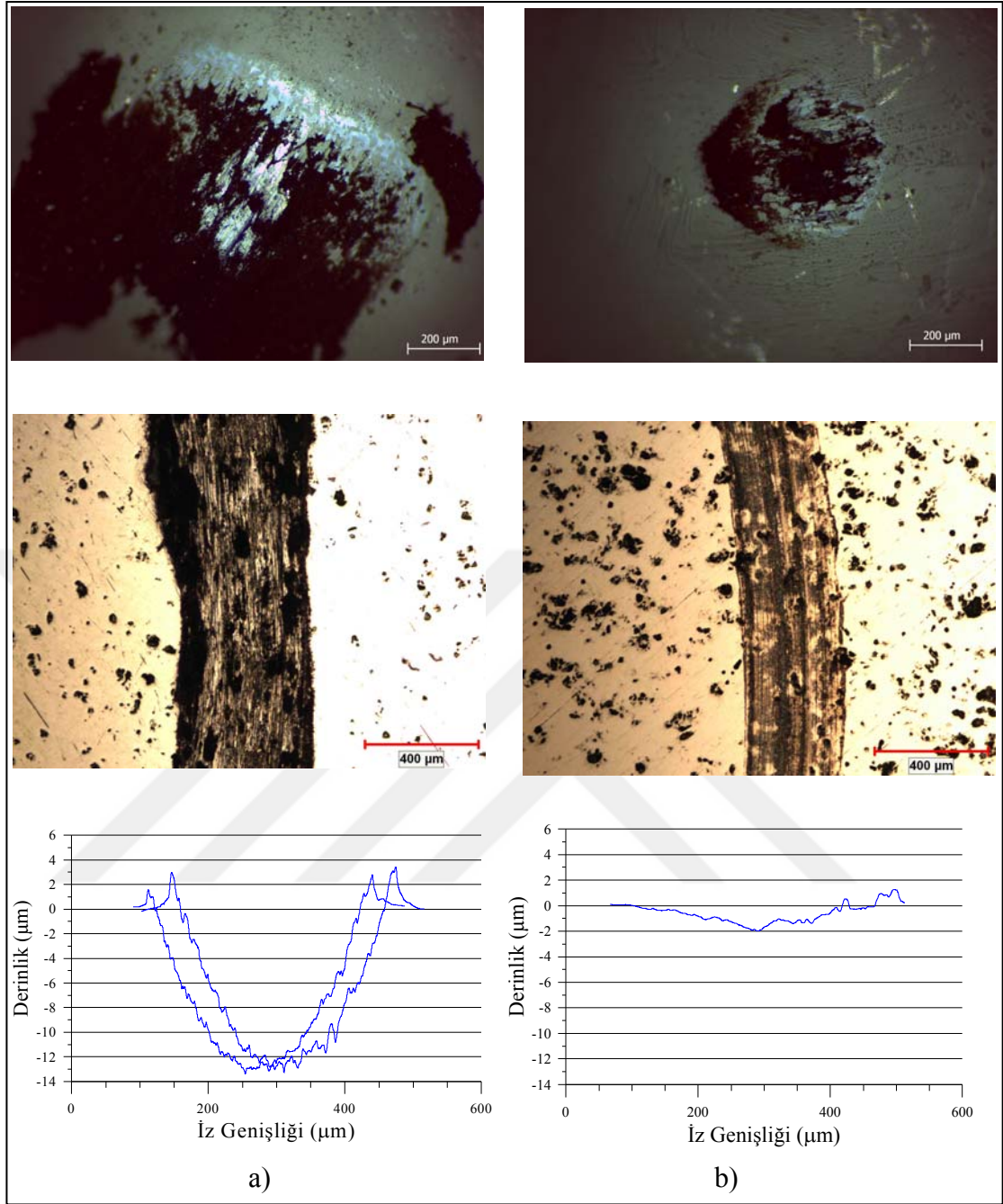
Sürtünme katsayılarını ekstrüzyon sıcaklığı şartında nitrasyonlu duruma göre karşılaştırdığımızda geleneksel yöntemle göre hazırlanmış numunenin sürtünme katsayısı 0,57 olarak karşımıza çıkarken, KM ısıtma işlem şartındaki numunenin sürtünme katsayısı 0,70 seviyesindedir (Şekil 6.21).



Şekil 6.21 : GN, KN ve KMN numunelerin ekstrüzyon sıcaklığındaki sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.

Tüm aşınma deneyleri gerçekleştirildikten sonra farklı ısıtma işlem reçetelerine göre hazırlanmış nitrasyonlu ve nitrasyonsuz numunelerin ortam ve çalışma sıcaklıklarında, yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görüntüleri yüzey profilometresi kullanılarak oluşturulmuştur. Karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi için sadece iz verilerini dikkate alarak ölçekli grafiklerle aynı orijinden başlatarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu nedenle grafiklerde x eksenini göreceli olarak iz genişliğini göstermektedir. İz genişliği birimi μm 'dir. Orijinal verilere dayanan aşınma izi profilleri Şekil G.1-5'te verilmektedir.

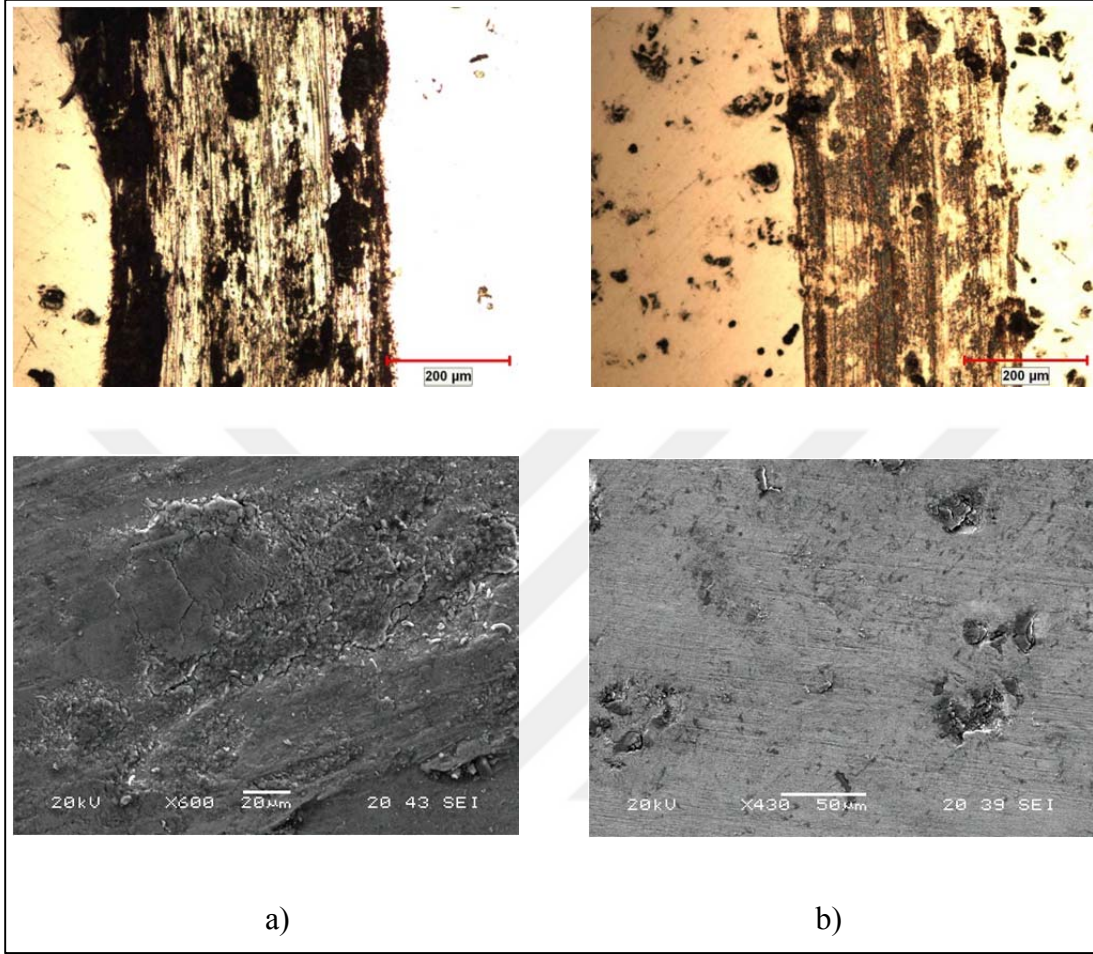
Şekil 6.22'de ısıtma işlemleri ve geleneksel ısıtma işlem reçetesine göre hazırlanmış numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinde alümina bilye ile numune yüzeyinde oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri gösterilmektedir.



Şekil 6.22 : Isıl işlemsiz ve G ısıtılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) İşlemsiz, b) GN.

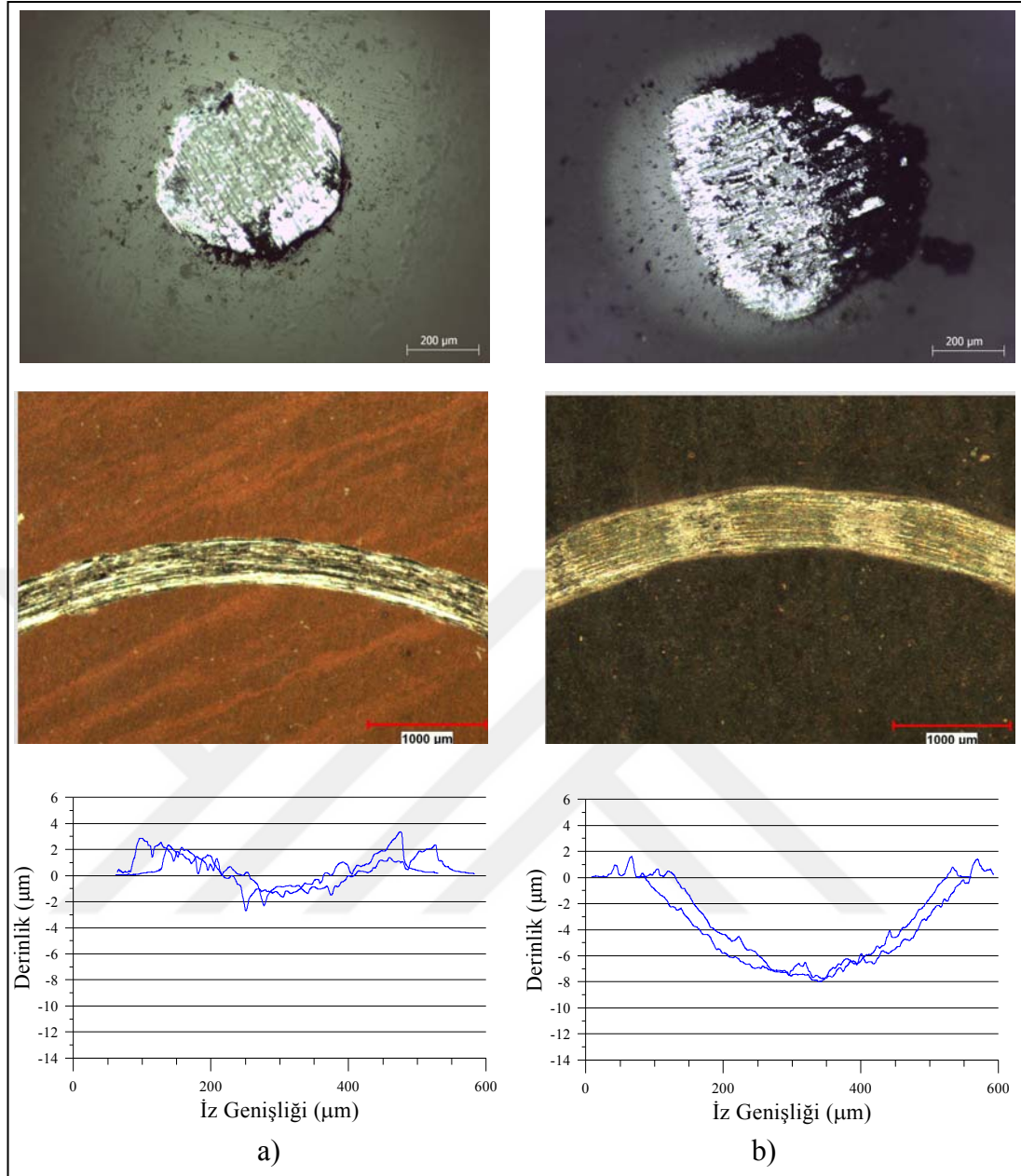
Isıl işlemsiz numunede aşınma izi derinliği 9,39 μm civarındadır. Alümina bilye yüzeyinde oldukça geniş temas alanına sahiptir ve bilyede aşınma gözlenmemiştir. Çelik yüzeyinden kopan parçaların bir miktarı alümina bilyenin yüzeyinde birikim yapmıştır.

GN numunede aşınma izi derinliği 1,97 μm civarındadır. Abrasif aşınma daha baskın gerçekleşmiştir. Alümina bilye yüzeyinde aşınma izi küçük boyuttadır ve yüzeyde çok az miktarda aşınma sonucu oluşan parçacık birikimi gözlemlenmektedir.



Şekil 6.23 : Isıl işlemsiz ve G ısıl işlemlili AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) İşlemsiz, b) GN.

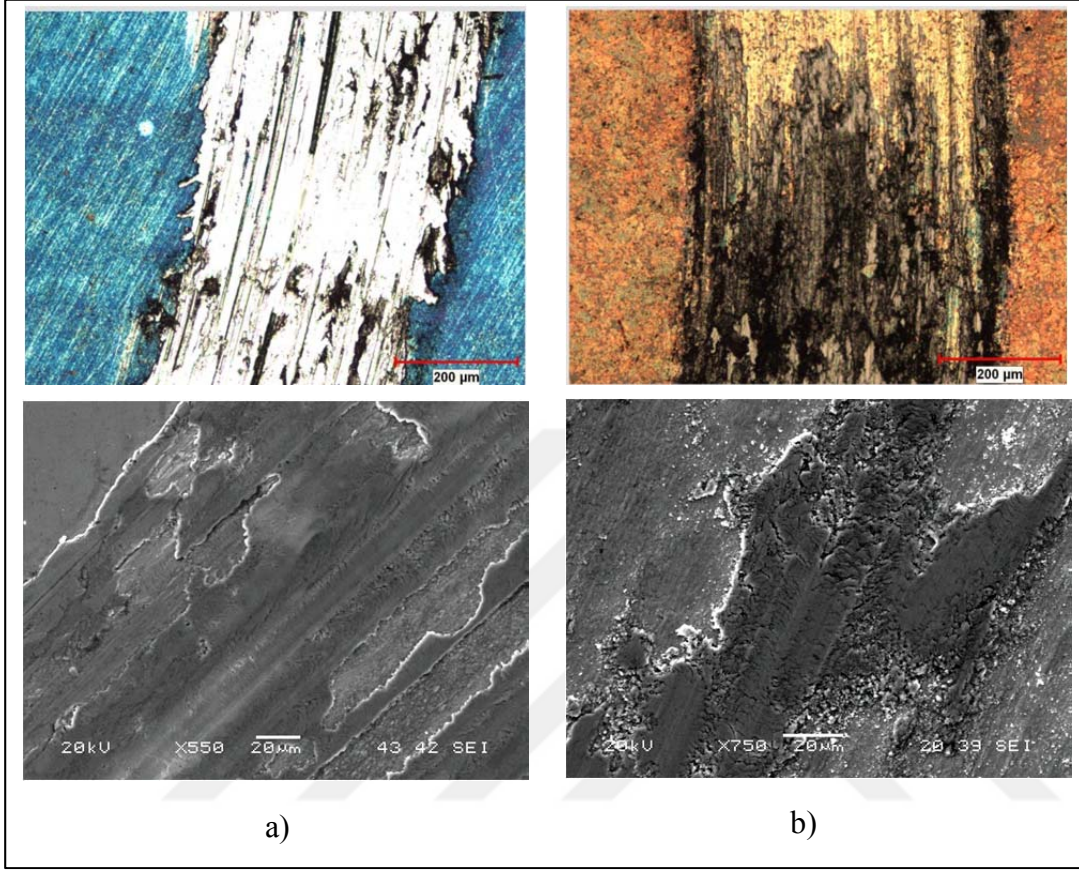
Şekil 6.24'te ısıl işlemsiz ve G ısıl işlem reçetesine göre hazırlanmış 480 °C'ta yapılan sıcak aşınma deneylerinde alümina bilye ile numune yüzeyinde oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri gösterilmektedir. İşlemsiz numunede, malzemenin yumuşak olması nedeniyle aşınma ürünlerinin sistemi terk etmemesi neticesinde adhezyon oluşmuştur. Yüzeye yapışan ve sıvanan aşınma ürünleri, aşınmanın ilerlemesini önemli ölçüde yavaşlatmıştır. Alümina bilye yüzeyinde de temas noktası oldukça küçüktür ve aşınma gözlenmemektedir. Aşınma izi derinliği 0,67 μm civarındadır.



Şekil 6.24 : Isıl işlemsiz ve G ısıtılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) İşlemsiz, b) GN.

Ekstrüzyon prosesi atmosfere kapalı şekil verme işlemi olduğu için nitrasyonsuz ve ısıtılmış kalıplar, doğrudan alüminyumun mekanik ve kimyasal aşındırıcı etkisine maruz kalacaktır. Alüminyum hammaddenin içinde döküm prosesinde ayrıştırılmayarak kalan ya da stok sırasında üzerinde biriken aşındırıcı etkiye sahip olabilecek tozların sisteme girmesiyle birlikte çok şiddetli aşınma gerçekleşecektir. Alüminyum oksit formları yapay elmadan sonra en yüksek aşındırma özelliğine sahip malzemelerden biridir. Bu sistemde kalıptan dışarıya aşınma ürünleri sürekli taşınacağı için yeniden yüzeye yapışma ve ya tutunma olasılığı oldukça düşecektir.

GN numunede aşınma izi derinliği 6,57 μm civarında ölçülmüştür. Abrazif aşınma daha baskın olarak gerçekleşmiştir. Alümina bilyede çok az miktarda aşınma sonucu oluşan parçacıkların biriktiği gözlenmiştir.



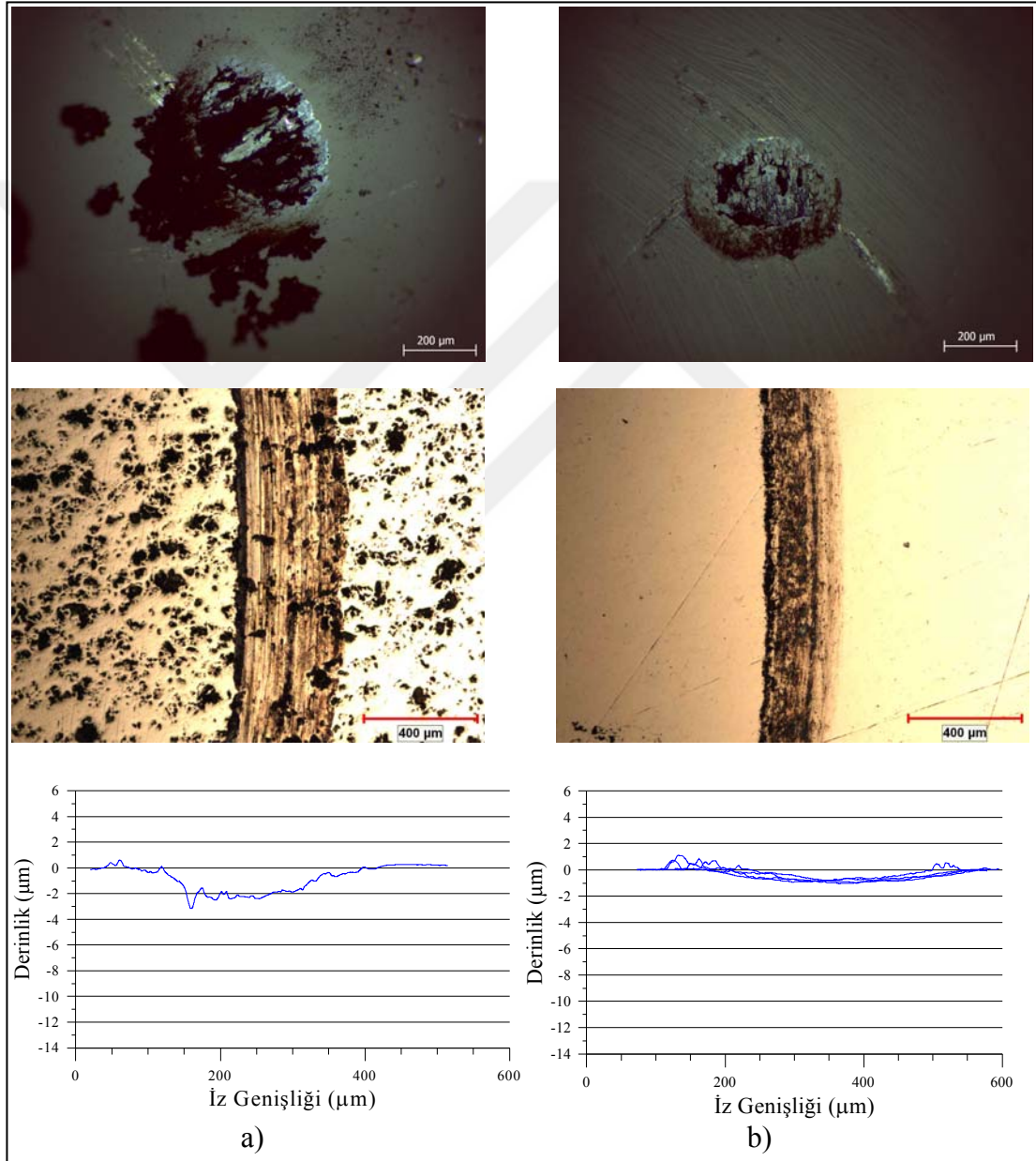
Şekil 6.25 : Isıl işlemsiz ve G ısıtılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) İşlemsiz, b) GN.

Şekil 6.25'te ısıtılmış ve geleneksel ısıtılmış işlem reçetesine göre ısıtılmış işlemleri yapılmış numunelerin aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri görülmektedir. Isıtılmış işlemsiz numunede aşınmanın başlangıcında kopan parçaların yüzeye tekrar yapışarak aşınmanın ilerlemesini durdurduğu/yavaşlattığı görülmektedir. Aşınma izi boyunca yüzeye yapışan parçacıklar gözlenmektedir. Nitratlı numunede ise ağırlıklı olarak abrazyon aşınma mekanizması ile birlikte bir miktar adhezyon da gözlenmektedir.

Normal ekstrüzyon sıcaklığında yüksek basınç, sürtünme etkisiyle çelik yüzeyinden geçecek alüminyum nedeniyle aşınma ürünleri sistemi kısa sürede terk edecekleri için bu deneyde gözlemlenen yeniden sıvanma/kaynama olayı ısıtılmış işlemsiz numunede

gerçekleşmeyecek ve şiddetli aşınma ile birlikte kalıp genelinde plastik deformasyon gözlemlenecektir.

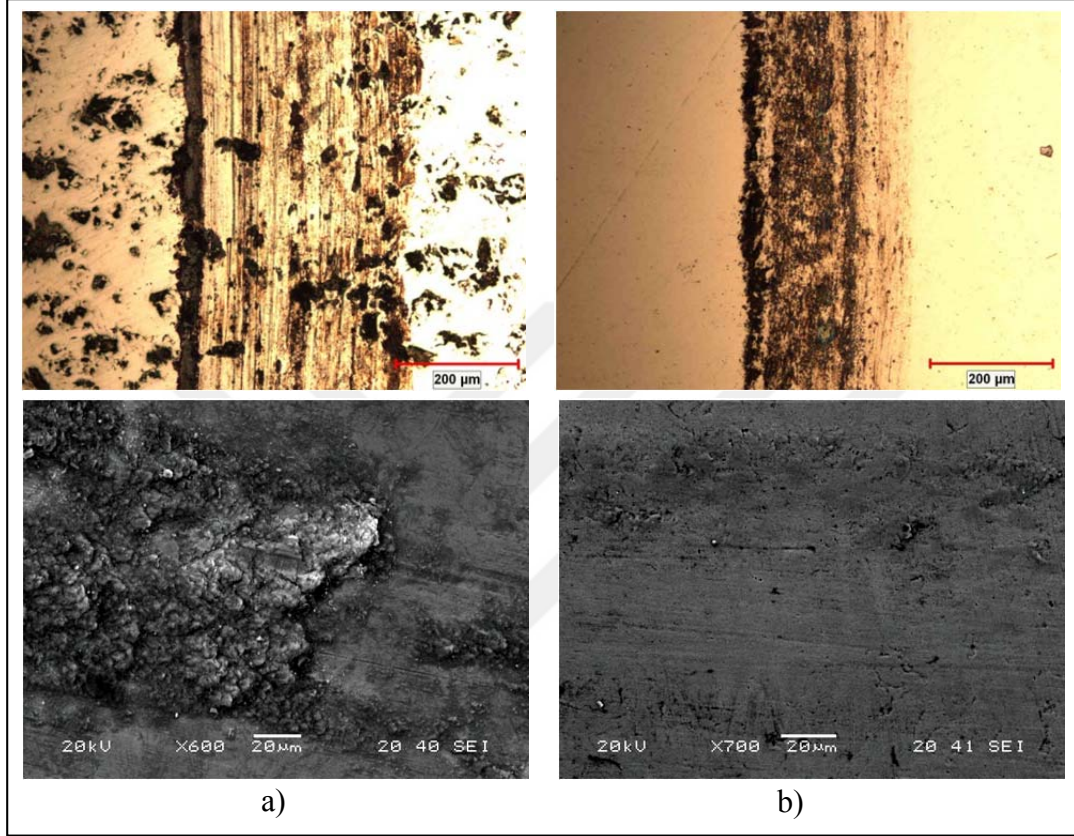
Şekil 6.26'da kriyojenik ısıtılma işlem yapılmış numunelerin ortam sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneyi sonuçları gösterilmektedir. Kriyojenik işlemle birlikte sertlik artışı sonucunda nitrasyonlu ve nitrasyonsuz numune arasında iz derinliği açısından çok küçük farklılık gözlemlenmektedir. Alümina bilye üzerinde aşınma ürünlerinin birikimi çok az olmuştur.



Şekil 6.26 : K ısıtılma işlem reçetesi göre hazırlanmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) Nitrasyonsuz, b) nitrasyonlu.

Kriyojenik nitrasyonsuz numunede iz derinliği 2,64 μm civarındadır. Nitrasyonlu numunede ise iz derinliği 0,92 μm mertebesindedir.

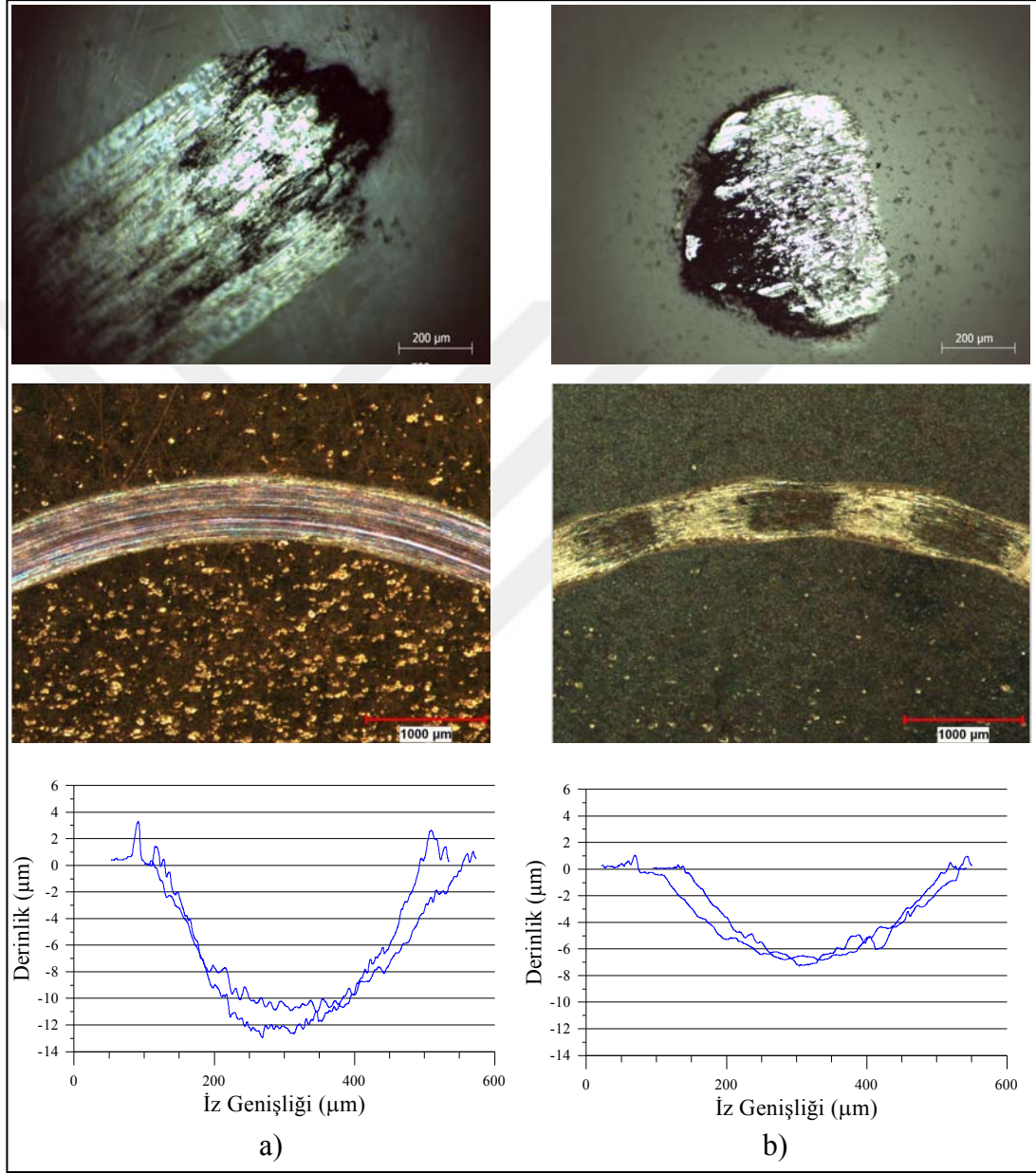
Şekil 6.27'ye bakıldığında aşınma ürünlerinin özellikle nitrasyonlu numunede büyük oranda sistemi terk ettiği, nitrasyonsuz numunede aşınma izi içinde büyük bir parçanın yapışmış olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 6.27 : K ısıt ısıtılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görünümeleri. a) Nitrasyonsuz, b) nitrasyonlu.

Şekil 6.28'de Kriyojenik ısıt işlem reçetesine göre ısıt işlemleri yapılmış nitrasyonsuz ve nitrasyonlu numunelerin 480 °C'ta yapılmış olan sıcak aşınma deneyinde alümina bilye ile numune yüzeyinde oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri gösterilmektedir. Nitrasyonsuz kriyojenik numunede abrazif aşınmanın gerçekleştiği ve oldukça düzgün bir aşınma oyuğunun oluştuğu hem optik mikroskop hem de 2 boyutlu profil ölçümlerinden alınan sonuçlarda görülebilmektedir. Alümina bilyenin yüzeyinde çelik numuneden kopan parçacıkların oluşturduğu izler ve parçacık birikimleri gözlenmiştir. Numunede oluşan aşınma izinin en derin noktası 10,00 μm civarındadır.

Nitrasyonlu kriyojenik numunede abrazif aşınma sonucu yüzeyden kopan parçacıkların tekrarlı aralıklarla yeniden yüzeye yapıştığı gözlemlenmektedir. Alümina bilyenin yüzeyinde belirgin bir aşınma olmadığı ve kopan parçacıkların nitrasyonsuz numuneye kıyasla çok daha az birikim yaptığı gözlenmiştir. Numunede oluşan aşınma izinin en derin noktası 5,92 μm mertebesindedir.

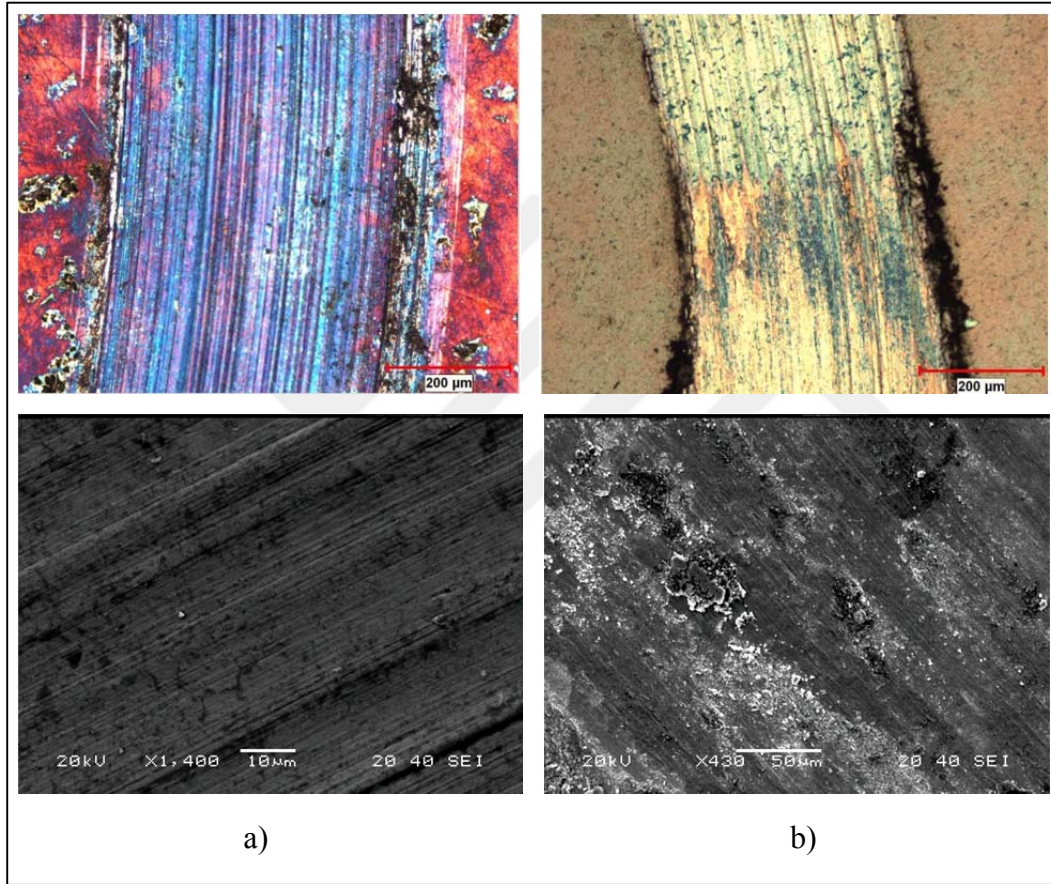


Şekil 6.28 : K ısıtıl işlem reçetesine göre hazırlanmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) Nitrasyonsuz, b) nitrasyonlu.

Şekil 6.29'da Kriyojenik ısıtıl işlem reçetesine göre ısıtıl işlemleri yapılmış numunelerin 480 °C'ta yapılan deneyde elde edilen aşınma izlerinin optik mikroskop

ve SEM görüntüleri görülmektedir. Nitrasyonsuz numunede aşınmanın son derece düzgün abrazif aşınma olarak gerçekleştiği görülmektedir. SEM fotoğraflarında da aşınma yüzeyinin parçacıklar ve diğer kalıntılar açısından temiz olduğu ve sadece aşınma izlerinin olduğu görülebilmektedir.

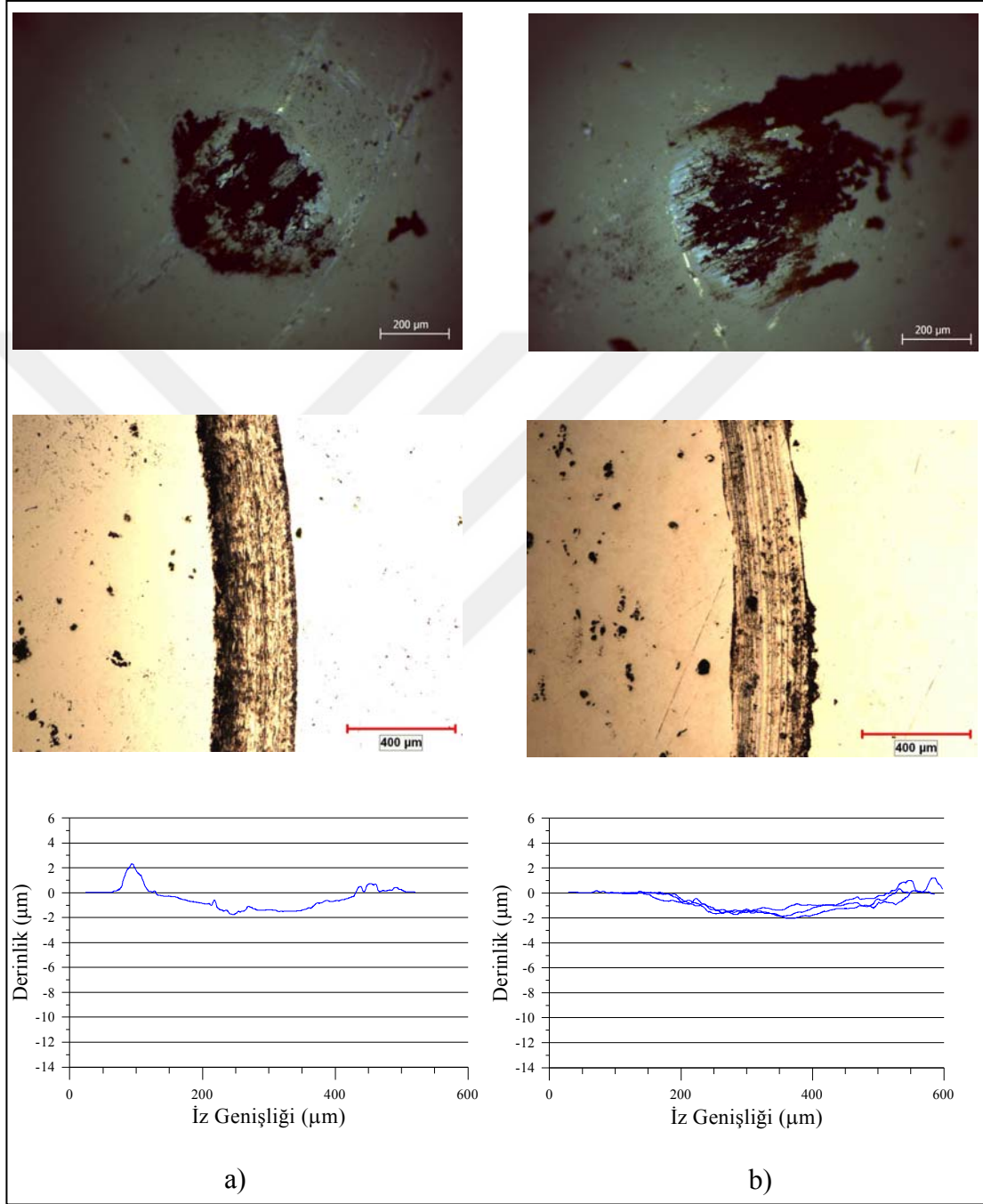
Nitrasyonlu numunede ise ağırlıklı olarak abrazif aşınma mekanizması ile birlikte bir miktar adhezyon da gözlenmektedir. Yüzeyden kopan parçacıkların yeniden yüzeye yapışmasının, aşınmanın ilerlemesini yavaşlattığı düşünülmektedir.



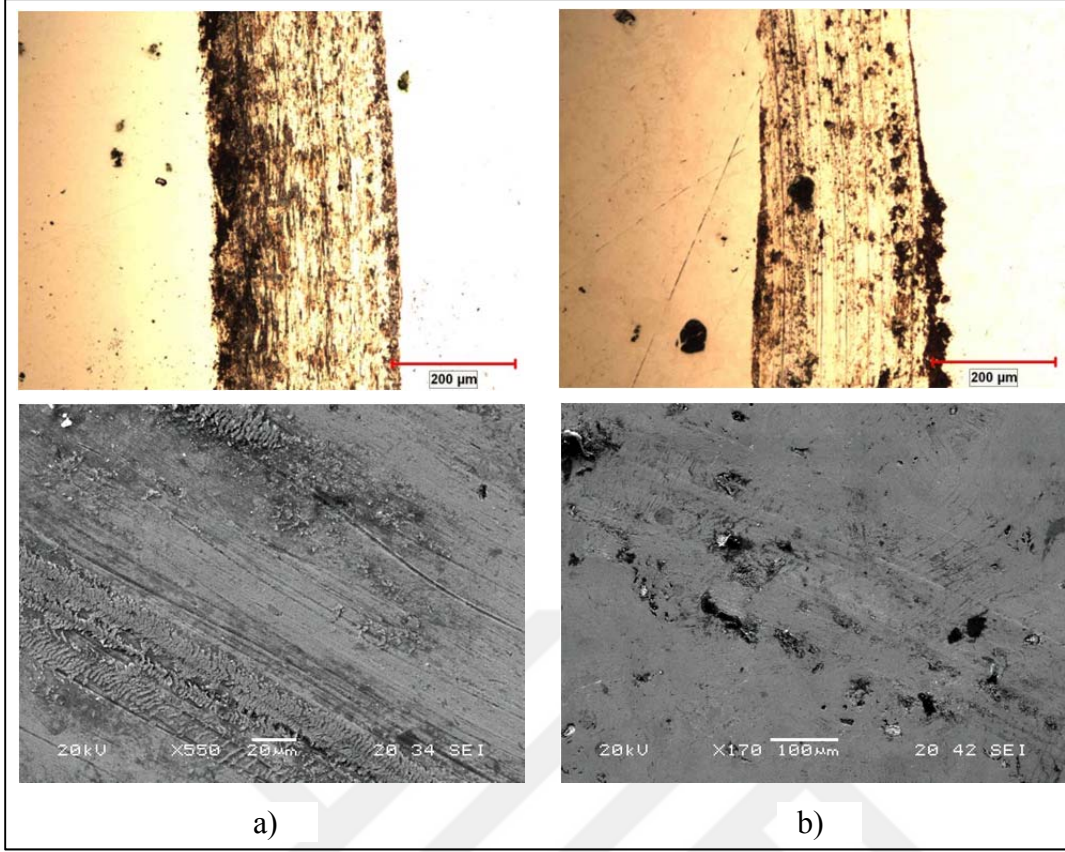
Şekil 6.29 : K ısıtılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görünüşleri.
a) Nitrasyonsuz, b) nitrasyonlu.

Şekil 6.30'da KM ısıtılmış reçetesiyle hazırlanmış nitrasyonlu ve nitrasyonsuz numunelerin ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiş aşınma deneylerinin verileri karşılaştırmalı gösterilmektedir. Her iki numunede aşınma derinliği 1,50 µm civarında ölçülmüştür. Aşınma izlerinin görüntülerinde düzgün aşınma izleri gözlemlenmektedir. Alümina bilye görüntülerinde izler küçük ve aşınma ürünlerinin çok az yapıştığı gözlemlenmektedir.

Şekil 6.31’de KM numunelerin ortam sıcaklığı deneylerinin optik mikroskop ve SEM fotoğrafları verilmiştir. Bu fotoğraflardan görüleceği üzere, izler abrasif karakterli ve aşınma ürünleri açısından kalıntıların bulunmadığı düzgün yapıda izlerdir.



Şekil 6.30 : KM ısıtıl işlem reçetesiye göre hazırlanmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) Nitrasyonsuz, b) nitrasyonlu.

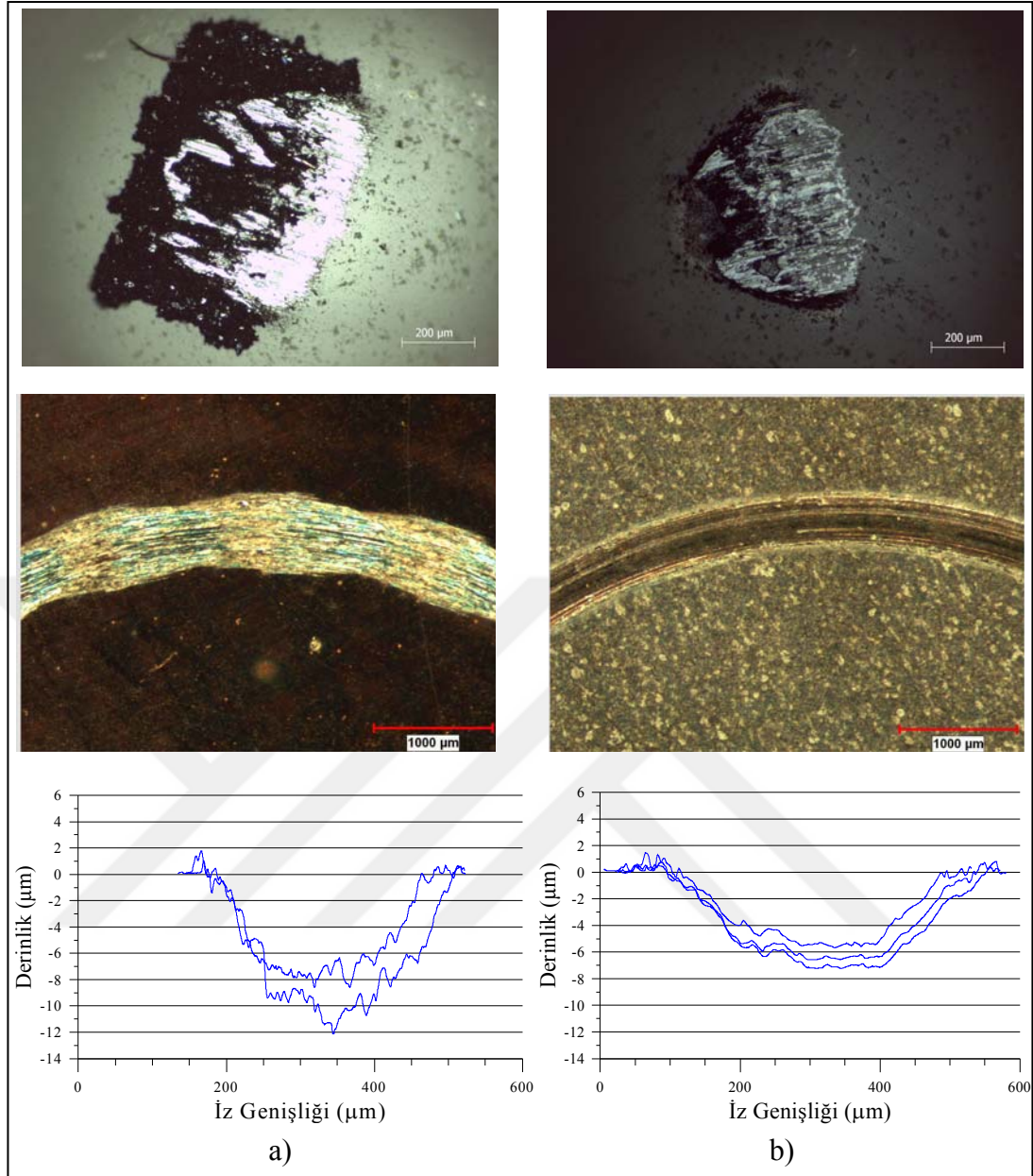


Şekil 6.31 : KM ısıtılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin ortam sıcaklığında yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri. a) Nitrasyonsuz, b) nitrasyonlu.

Şekil 6.32’de KM ısıtılmış işlem reçetesi göre ısıtılmış nitrasyonsuz ve nitrasyonlu numunelerin 480 °C’da yapılmış olan sıcak aşınma deneyinde alümina bilye ile numune yüzeyinde oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri gösterilmektedir. Nitrasyonsuz kriyojenik+1 menevişli numunede abrazif aşınmanın gerçekleştiği ve yüzeyden kopan parçacıkların tekrarlı aralıklarla yeniden yüzeye yapıştığı gözlemlenmiştir.

Alümina bilyenin yüzeyinde çelik numuneden kopan parçacıkların oluşturduğu geniş bir iz ve bir miktar yapışmış kalıntı gözlenmiştir. 2 boyutlu profil ölçümlerinden alınan sonuçlara göre numunede oluşan ortalama aşınma izi derinliği 8,40 µm mertebesindedir.

KMN numunede abrazif aşınmanın baskın olduğu gözlenmektedir. Alümina bilyenin yüzeyinde belirgin aşınma olmadığı ve kopan parçacıkların nitrasyonsuz numuneyle benzer görünüm ve miktarda az birikim yaptığı gözlemlenmiştir. Numunede oluşan aşınma izinin en derin noktası 4,98 µm mertebesindedir.

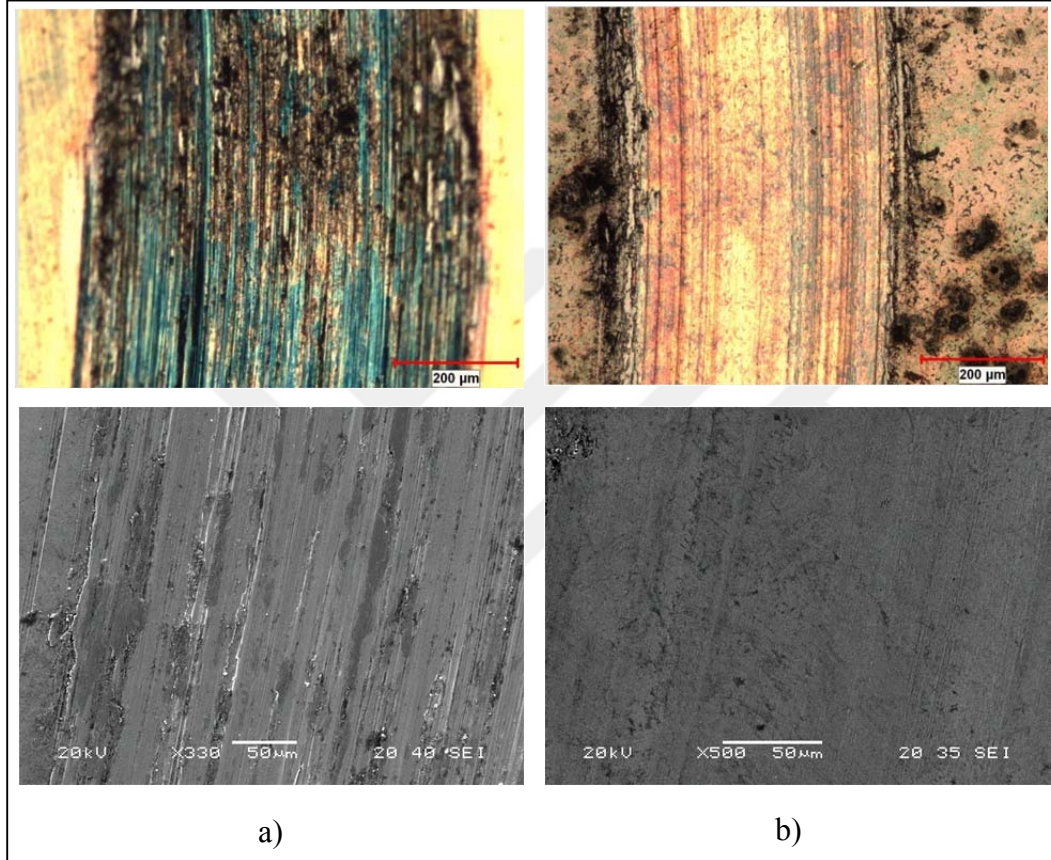


Şekil 6.32 : KM ısıt işlem reçetesine göre hazırlanmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneyi sonrası alümina bilye ile numunede oluşan aşınma izleri ve bu izlerin 2 boyutlu iz profilleri. a) Nitrasyonsuz, b) nitrasyonlu.

Şekil 6.33'te KM ısıt işlem reçetesine göre ısıt işlemleri yapılmış numunelerin aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri görülmektedir. Nitrasyonsuz numunede aşınmanın yer yer abrazif, yer yer de adhezif karakterde olduğu gözlenmektedir. Yüzeyden kopan parçacıkların bir kısmı yeniden yüzeye yapışmış/sinterlenmiş olmasına rağmen aşınma oldukça hızlı ilerlemiştir. Buna neden olarak yüzeye yapışan/sinterlenen parçacıkların yeniden koparken, kaynadıkları kısımları da yüzeyden ayırarak daha şiddetli aşınmaya yol açtıkları düşünülebilir

(adhesif aşınma). SEM fotoğrafında düzgün aşınma izlerine yapışmış ve uzamış kalıntılar gözükmemektedir.

Nitrasyonlu numunede ise abrazif aşınma mekanizmasının etkili olduğu gözlenmektedir. Yüzeyden kopan parçaların yeniden yüzeye yapışmadan sistemden uzaklaştığı ve numune ile alümina bilyenin yüzeyleriyle fazla etkileşime girmedikleri düşünülmektedir.

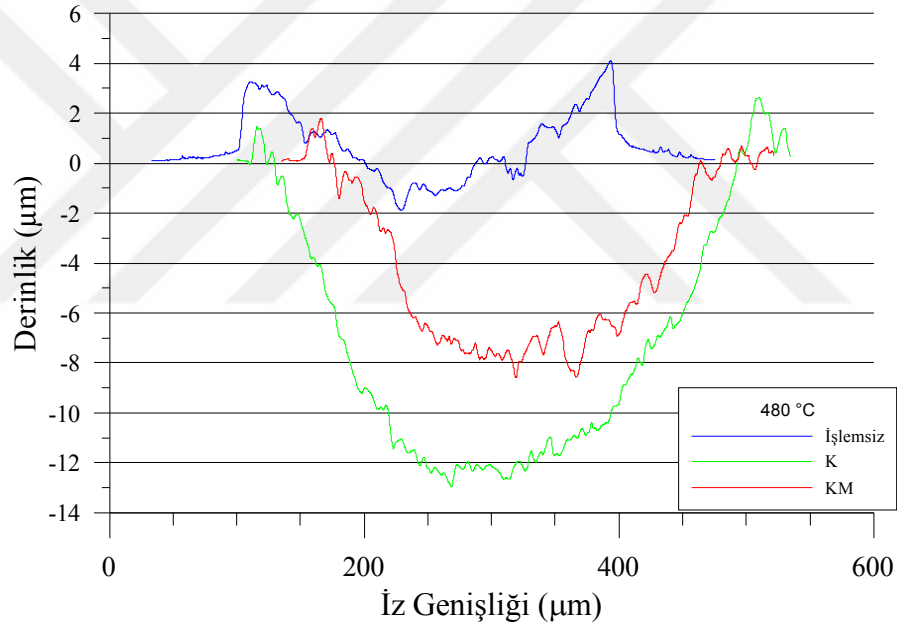


Şekil 6.33 : KM ısıtılmış AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerin 480 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden sonra aşınma izlerinin optik mikroskop ve SEM görüntüleri.
a) Nitrasyonsuz, b) nitrasyonlu.

Aşınma deneylerinden sonra her numunenin yüzeyinde oluşan dairesel aşınma izinin farklı bölgelerinden profilometre ile en az dört ölçüm yapılarak aşınma izlerinin yüzey alanları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu yüzey alanlarının ortalaması alınarak her bir numune için ortalama aşınma iz alanları belirlenmiştir.

Aşınma izlerinin profilleri Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'te ısıtılmış işlem reçetelerine göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aşınma deneylerinde elde edilen aşınma iz derinlikleri nitrasyonlu numunelerde, nitrasyon tabakasının kalınlığından çok daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Şekil 6.34'ten görüleceği üzere, ısıtıl işlem yapılmamış numunenin aşınma ile kaybettiği malzeme miktarının oldukça düşük olduğu dikkati çekmektedir. Ayrıca iz kenarlarında oluşan şişmenin diğer numunelere göre fazla olduğu görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni, malzemenin ısıtıl işlemsiz olmasıyla birlikte argon gazı ile yarı koruyucu ortam oluşturulmasına rağmen malzemenin oksitlenmesi sonucu aşınmanın azalması ve yüzeyden kopan parçaların tekrar yüzeye yapışarak bir tabaka oluşturmasıdır. Ekstrüzyon şartlarında alüminyum biyetin kovan içinde sıkıştırılması ile hava dışarı atılır ve sistem atmosfere kapalı hale gelir. Ekstrüzyon sırasında kalıp-alüminyum sürtünmesi sonucu yüzeyden kopan çelik parçacıkları, oluşan alüminyum profille birlikte kalıbın dışına taşınır. Bu nedenle pratikte aşınma sonucu yüzeyden kopan çelik parçacıklarının oksitlenmeleri ve yeniden yüzeye yapışma olasılığı yoktur ve ya çok düşük ihtimaldir.

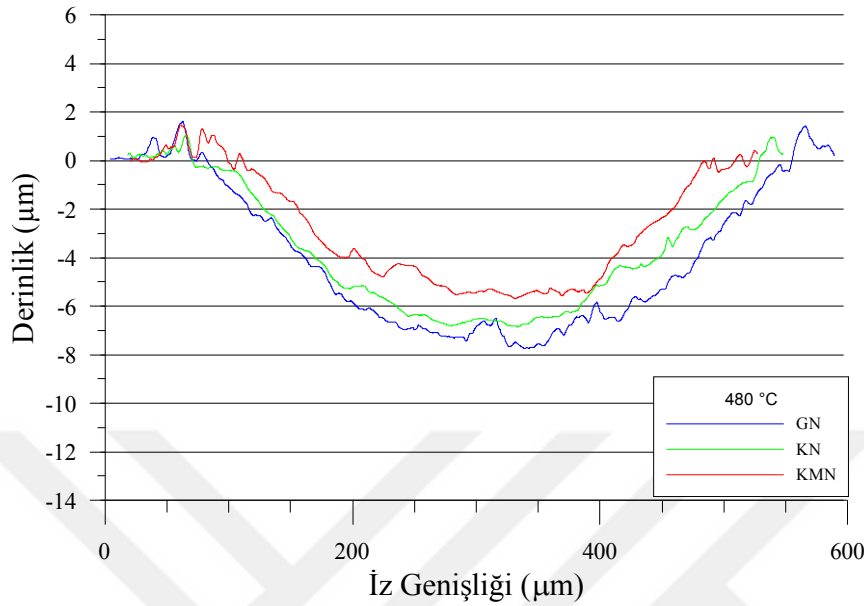


Şekil 6.34 : İşlemsiz, K ve KM ısıtıl işlem reçetelerine göre hazırlanmış nitrasyonsuz numunelerin ekstrüzyon sıcaklığındaki aşınma iz kesitlerinin karşılaştırılması.

Aşınma izlerinin karşılaştırmalarına bakıldığında en derin izin 10,00 µm seviyesinde kriyojenik işlem yapılmış numunede olduğu görülmektedir.

Şekil 6.35'te G, K ve KM ısıtıl işlem yapılmış nitrasyonlu numunelerin aşınma izi profilleri görülmektedir. En derin aşınma izi 6,57 µm derinliğinde geleneksel numunede görülmektedir. Kriyojenik+meneviş ısıtıl işlem reçetesine göre hazırlanmış nitrasyonlu numunenin aşınma iz derinliği aynı şartlarda 4,98 µm mertebesinde.

Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5'te sırasıyla ortam sıcaklığı ile 480 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden elde edilen iz derinliği, iz genişliği ve iz alanı verileri ile bu verilerden hesaplanan Rölatif Aşınma Dirençleri gösterilmektedir.

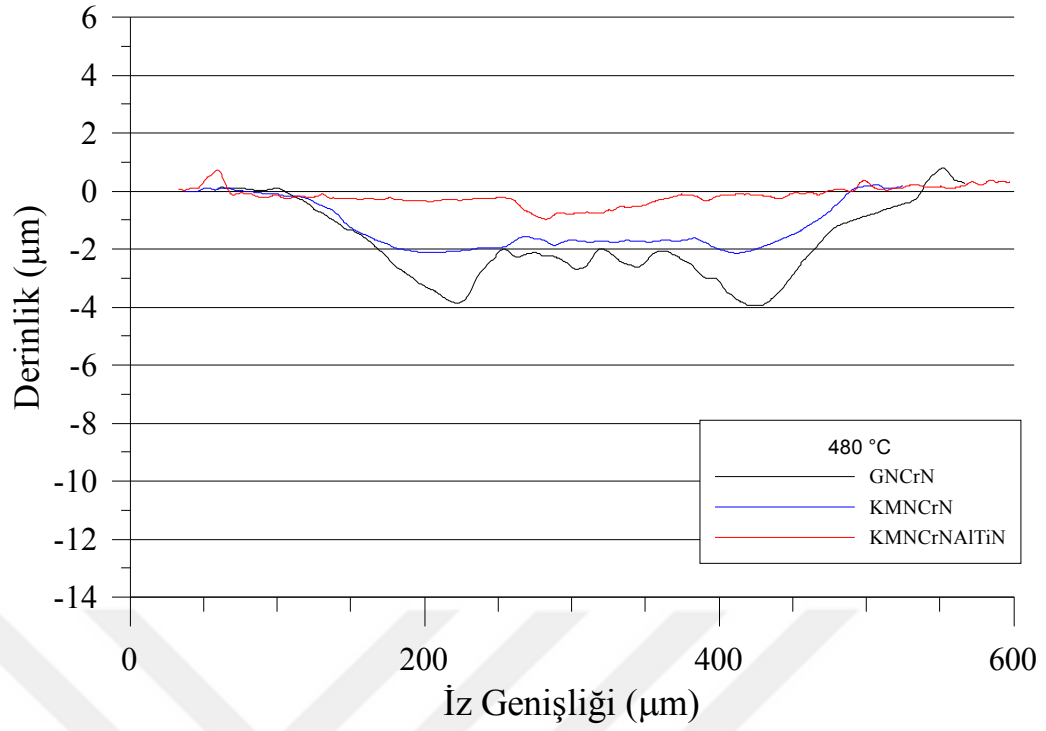


Şekil 6.35 : G, K ve KM ısıtım işlem reçetelerine göre hazırlanmış nitrasyonlu numunelerin ekstrüzyon sıcaklığındaki aşınma iz kesitlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 6.4 : 25 °C'ta yapılan aşınma deneylerinden elde edilen iz derinliği, iz genişliği ve iz alanları verileri.

	Derinlik (µm)	Genişlik (µm)	İz Alanı (µm ²)	Rölatif Aşınma Direnç
İşlemsiz	11,16	563,5	5014,81	1,00
K	2,64	328,25	694,46	7,22
KM	1,5	299,75	357,11	14,04
GN	1,68	330,75	431,81	11,61
KN	0,92	267,75	192,54	26,05
KMN	1,5	249,25	298,97	16,77

Şekil 6,36'da CrN ve CrN üzerine AlTiN kaplanmış sıcak iş çeliği numunelerin aşınma izi profilleri görülmektedir. KMN şartına göre geleneksel nitrasyonlu numunenin CrN kaplı durumu çok daha iyi performans göstermiştir. Ortalama iz derinliği 2,5 µm civarındadır. KMNCrN numune yüzeyinde oluşan aşınma izinin derinliği ise ortalama 1,74 µm olarak ölçülmüştür. Üç katmanlı KMNCrNAlTiN numunede aşınma izi derinliği aynı şartlarda 0,60 µm'dir.



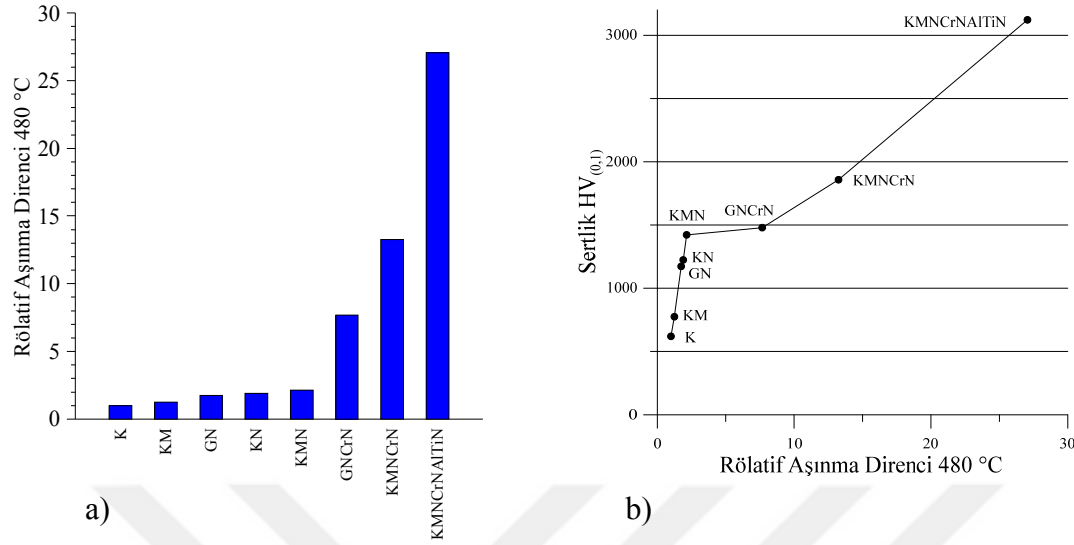
Şekil 6.36 : PVD kaplamalı numunelerin aşınma izlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 6.5 : 480 °C’ta yapılan aşınma deneylerinden elde edilen iz derinliği, iz genişliği ve iz alanları verileri.

	Derinlik (μm)	Genişlik (μm)	İz Alanı (μm^2)	Rölatif Aşınma Direnci
İşlemsiz	1,59	430	533,91	8,06
K	10,31	535	4354,09	1,00
KM	8,82	501	3476,11	1,25
GN	6,81	465	2552,98	1,74
KN	6,87	423	2304,31	1,89
KMN	6,36	405	2034,82	2,14
GNCrN	2,46	292	565,22	7,66
KMNCrN	1,75	238	327,12	13,24
KMNCrNAlTiN	0,60	341	160,14	27,05

Şekil 6.37’de numunelerin rölatif aşınma dirençleri ısıtıl işlem reçeteleri ve uygulanan kaplamalar bazında gösterilmektedir. Ayrıca sertlik-rölatif aşınma direnç ilişkisi grafik olarak sunulmuştur. Çalışma sıcaklığı şartında (480 °C) en iyi aşınma performansını KMN numunenin gösterdiği görülmektedir. Kaplamalı numunelerde

ise yine KMN numunenin çift katmanlı ve üç katmanlı kaplamalı varyasyonları oldukça iyi performans göstermişlerdir.



Şekil 6.37 : a) Numunelerin 480 °C'teki aşınma davranışlarının karşılaştırılması. b) Sertlik-rölatif aşınma direnci ilişkisi.

6.5 Çekme Deneyleri

Ekstrüzyon prosesi açısından çekme deneyi çok büyük önem arz etmemektedir. Prosesin gerçek anlamda mekanik testlerini yapmak ve kalıp malzemesinin ekstrüzyon koşullarına mekanik özellikler açısından yaklaşabilmek adına tercih edilebilecek deney Gleeble testidir. Ancak bu testi yapma/yaptırma olanağı bulunamamıştır.

Bu nedenle eldeki imkânlar ile ve malzemelerin el kitaplarından gösterilen çekme deneyi verileri baz alınarak deneyler yapılmıştır.

Yapılan deneylerde ısıtılma işlem reçetelerine göre hazırlanmış numuneler ile bu numunelerin nitrasyon işlemine tabi tutulmuş varyasyonları kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.6'da sonuçlar gösterilmektedir. Kırmızı yazı ile gösterilen deneyler nitrasyonlu ve hatalı sonuçlar elde edilen deneyleri ifade etmektedir. Nitrasyon uygulanan numuneler düşük yüklerde ve parçalı kırıklar şeklinde kopma eğilimi göstermişlerdir. Bu durumun olası nedeni özellikle köşe kısımlarında nitrasyon nedeniyle oluşan sert ve gevrek yapıdan çatlak başlaması ve hızla ilerlemesi düşünülmektedir. Bu sonuçlar nedeniyle bir sonraki başlıkta anlatılan darbe

deneylerinde nitrasyonlu varyasyon için çözüm üretilmesi gerekmiştir. Çözüm olarak *nitrasyon eşdeğeri* olarak tanımlanan, nitrasyon şartlarında yapılan bir ısıtma işlemi tasarlanıp uygulanmıştır.

Çizelge 6.6 : Çekme deneyi sonuçları (ön denemeler).

	YS (MPa)	UTS (MPa)	%Uzama
*G	1.520	1.820	9
GN	-	1.251	0,31
K	1.176	2.260	3,12
KN	112	844	0,06
KM	1.296	2.217	5,31
KMN	-	1.171	0,15

*G olarak işaretlenmiş değerler, AISI H13 çeliğinin ısıtma işlemi sonrası için ORVAR 2M sıcak iş çeliği için katalogta belirtilen referans değerleridir.

Çizelge 6.7’de, tezin *Kalıp Malzemesi Seçimi* bölümünde gösterilmekte olan mekanik özellikler tablosu, karşılaştırmayı kolaylaştırmak için bu bölümde yeniden verilmiştir. Çekme deneyi sonuçları genel olarak standardın altında (Çizelge 6.6) ve çok tatmin edici olmayan değerler vermiş olmasına rağmen, çalışmanın ve deneylerin ilerleyen aşamaları için dikkat edilmesi gereken noktaları göz önüne getirmesi açısından oldukça faydalı olmuştur.

Çizelge 6.7 : Ekstrüzyon sanayiinde kullanım alanı bulunan üç farklı sıcak iş çeliğinin mekanik özelliklerinin karşılaştırması [33-34].

	Sıcaklık (°C)	DIN 1.2344	DIN 1.2365
UTS (MPa)	20	1600	1600
	500	1100	1150
YS (MPa)	20	1460	-
	500	900	950

Hazırlanan ikinci grup çekme çubuklarına nitrasyon işlemi sıcaklığında ve süresinde ısıtma soğutma rejimi uygulanarak bir tür ısıtma işlemi yapılmıştır. Benzer ısıtma işlemi

darbe numuneleri için de öngörülmüştür. Bu yöntem ile nitrasyonun mekanik özelliklere sağladığı katkı/değişiklik modellenmiş olmaktadır. Her bir deney alt grubu için 2 adet numune deneye tabi tutulup ortalamaları alınmıştır.

Çizelge 6.8’de ve Çizelge 6.9’da sırasıyla AISI H13 ve AISI H10 numunelere oda sıcaklığı şartında yapılan çekme deneyinin sonuçları gösterilmektedir. Bu grupta akma dayanımları referans değerlerin altında kalmıştır. Kopma dayanımları kriyojenik numunelerde daha yüksektir. Nitrasyon eşdeğeri işlemle birlikte bir miktar düşüş göstermektedir. Nitrasyon eşdeğeri işlem öncesi en yüksek %uzama değeri her iki alaşımda da KM numunede gözlemlenmiştir. Nitrasyon eşdeğeri işlem sonrasında değerler aynı değer aralığına gelmiştir.

Çizelge 6.8 : AISI H13 oda sıcaklığında çekme deneyi sonuçları

	YS (MPa)	UTS (MPa)	%Uzama
G	1100	1630	7,6
K	1030	1902	6,8
KM	775	1708	10,6
GN	1183	1575	7,8
KN	1161	1787	7,4
KMN	1170	1620	7,3

Çizelge 6.9 : AISI H10 oda sıcaklığında çekme deneyi sonuçları.

	YS (MPa)	UTS (MPa)	%Uzama
G	1189	1746	8,5
K	1016	2062	9,5
KM	995	1796	10
GN	1252	1728	8,5
KN	1145	1811	8,5
KMN	1199	1730	8,1

Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11’de çalışma sıcaklığına (480 °C) kadar ısıtılıp deneye tabi tutulan numunelerin çekme deneyi sonuçları gösterilmektedir.

Bu grupta da akma dayanımları Çizelge 6.7’de verilen referans değerlerin altında kalmıştır. Kopma dayanımları kriyojenik numunelerde daha yüksektir. Nitrasyon eşdeğeri işlemle birlikte bir miktar düşüş göstermektedir. Nitrasyon eşdeğeri işlem öncesi en yüksek %uzama değeri her iki alaşımda da KM numunede gözlemlenmiştir. Nitrasyon eşdeğeri işlem sonrasında değerler aynı değer aralığına gelmiştir.

Sıcak deneylerde elde edilen sonuçlar, oda sıcaklığında yapılan deneylere göre genel olarak daha iyi sonuçlar vermiştir.

Çizelge 6.10 : AISI H13 sıcak çekme deneyi sonuçları.

	YS (MPa)	UTS (MPa)	%Uzama
G	1096	1473	6,8
K	1240	1764	7
KM	1209	1530	6,6
GN	1097	1391	6,4
KN	1238	1603	6,4
KMN	1163	1435	6,5

Çizelge 6.11 : AISI H10 sıcak çekme deneyi sonuçları.

	YS (MPa)	UTS (MPa)	%Uzama
G	1251	1585	7,1
K	1257	1808	8,9
KM	1203	1610	7,0
GN	-	-	-
KN	1231	1555	6,8
KMN	1284	1457	6,6

6.6 Darbe Deneyleri

Darbe deneyleri ısıtılma işlem reçetelerine göre hazırlanan AISI H13 ve AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerle ortam sıcaklığında ve çalışma sıcaklığı olan 480 °C’ta yapılmıştır. Nitrasyon işleminin numunelerde kırılma eğilimine yol açması nedeniyle

nitrasyonlu olması gereken numune grubuna nitrasyon şartlarını sıcaklık açısından karşılayan ısıtılma işlemi yapılmıştır. Bunun için numuneler ortam sıcaklığından 570 °C'ta 30 dakikada ısıtılıp bu sıcaklıkta 2,5 saat bekletilmiştir. Süre sonunda numuneler 570 °C'tan 130 °C'ta fırın içinde soğutulduktan sonra fırın dışına çıkartılarak ortamda soğumaya bırakılmışlardır.

Bu nedenle bu bölümde nitrasyonlu olarak adlandırılan numuneler, fiilen nitrasyon işlemine girmemiş, sadece eşdeğer ısıtılma işlemine girmiş numunelerdir.

Ön denemelerde çentiksiz numunelerle yapılan deneylerde, numunelerin kırılmadan eğildiği görüldüğü için V-çentikli numune standardına göre numuneler hazırlanmıştır.

Şekil 6.38 ve 6.39'da, üç farklı ısıtılma reçetesiyle hazırlanmış, nitrasyonsuz ve nitrasyon şartlarında ısıtılma işlemi görmüş AISI H13 ve AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerin, ortam sıcaklığında ve 480 °C yapılan V-Çentikli Charpy Darbe Deneyi sonucunda elde edilen kırılma yüzeyleri karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. Her grup ve şart için dörder adet deney gerçekleştirilmiştir.

Ortam sıcaklığında yapılan çentikli darbe deneylerinde G, K ve KM ısıtılma reçeteleri ve nitrasyonsuz-nitrasyonlu şartlar için AISI H13 ve AISI H10 numunelerin kırılma yüzeylerinin %100 kristalin görünümde olduğu gözlemlenmiştir. Kırılan tüm numunelerde deformasyon görülmemiştir.

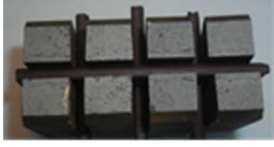
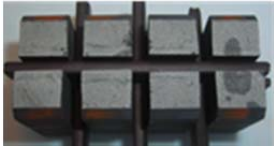
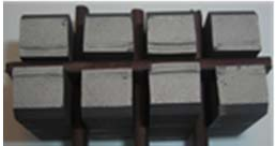
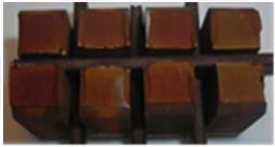
480 °C'ta yapılan çentikli darbe deneylerinde G, K ve KM ısıtılma reçeteleri ve nitrasyonsuz-nitrasyonlu şartlar için AISI H13 ve AISI H10 numunelerin kırılma yüzeylerinin %100 lifli görünümde olduğu gözlemlenmiştir. Kırılan tüm numunelerde plastik deformasyon gözlemlenmiştir.

Şekil 6.38 ve Şekil 6.39'dan görüleceği üzere 480 °C sıcaklıkta yapılan darbe deneylerinde kırılma yüzeylerinde renklenmeler oluşmuştur.

AISI H13 sıcak iş çeliği numune grubunda geleneksel numunede koyu kahverengi-mor, GN numunede koyu kahverengi-mor, kriyojenik numunede koyu saman-kahverengi, KN numunede koyu saman rengi, KM numunede koyu kahverengi ve KMN numunede koyu kahverengi-mor renklenme görülmektedir (Şekil 6.38).

AISI H 10 sıcak iş çeliği numune grubunda geleneksel numunede koyu mavi, GN numunede mavi-açık mavi, kriyojenik numunede gece mavisi-mor-kahverengi, KN

numunede mor-gece mavisi, KM numunede mor ve KMN numunede koyu mavi renklenme görülmektedir (Şekil.6.39).

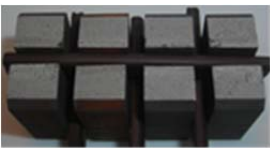
	Geleneksel	Kriyojenik	Kriyojenik Meneviş
Ortam Sıc.			
Ortam Sıc. Nitrasyonlu			
480 °C			
480 °C Nitrasyonlu			

Şekil 6.38 : Nitrasyonsuz ve nitrasyonlu AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtma işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma yüzeylerinin karşılaştırılması.

Çelik parçaların yüzeyleri zımpara, kumlama veya parlatma yöntemleri temizlendikten hemen sonra bekletilmeden ısıtılırsa, yüzeyinde bir oksit tabakası oluşmaktadır. Çeliğin sıcaklığı arttırıldıkça, demir oksidin de kalınlığı artış göstermektedir. Normalde demir oksit şeffaf bir yapıya sahip olmamasına rağmen, bu tipteki ince tabakalar ışığın geçişine izin vermekte ve tabakanın üst ve alt yüzeylerinden yansımaya neden olmaktadır. Bu durum yüzeyde renklenmenin oluşmasına neden olan İnce Film Girişimi olarak adlandırılan bir olayın gerçekleşmesine neden teşkil etmektedir. Sıcaklıkla birlikte bu tabakanın kalınlığı arttıkça tabakanın rengi soluk sarıdan kahverengine, sonra mora, daha sonra da maviye dönecektir.

Bu renklerin oluşması çok hassas sıcaklıklara bağlı olduğu için, demirciler renklere bakarak aynı hassasiyetle sıcaklık tayini yapabilirler. Renkler ve renklere karşılık

gelen sıcaklıklar ile kullanım alanlarına ilişkin örnekler şöyle sıralanabilir (Şekil 6.40).

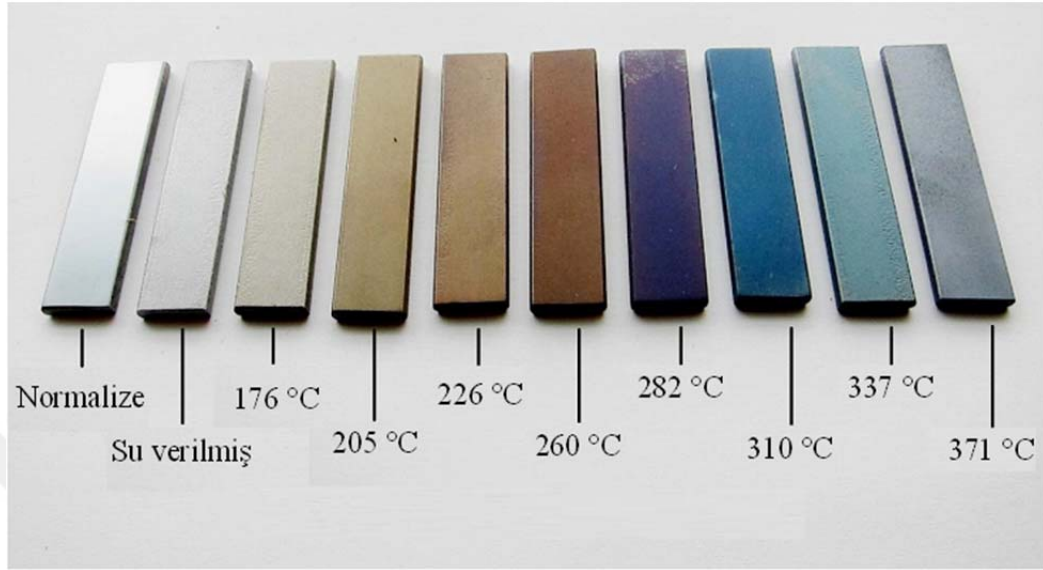
	Geleneksel	Kriyojenik	Kriyojenik Meneviş
Ortam Sıc.			
Ortam Sıc. Nitrasyonlu			
480 °C			
480 °C Nitrasyonlu			

Şekil 6.39 : Nitrasyonsuz ve nitrasyonlu AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtım reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma yüzeylerinin karşılaştırılması

- Soluk sarı – 176 °C; gravür uçları, jilet, kazıyıcılar.
- Açık saman – 205 °C; delici, rayba, metal kesme testereleri.
- Koyu saman – 226 °C; çizici, planya bıçağı.
- Kahverengi – 260 °C; musluklar, matkap uçları, çekiç, keski, kalıplar.
- Mor – 282 °C; cerrahi aletler, zımbalar, taş oyma araçları.
- Koyu mavi – 310 °C; tornavidalar, anahtarlar.
- Açık mavi – 337 °C; yaylar, ahşap kesme testereleri.
- Gri-mavi – 371 °C ve daha yüksek sıcaklıklar; yapısal çelikler.[54]

Şekil 6.40'ta tavllanmış yassı çelik çubuklar görülmektedir. Soldan birincisi normalize edilmiş çeliktir. İkincisi ise su verilmiş tavsız martenzit parçadır. Kalan parçalar ise ısıtım fırınında karşılık geldikleri sıcaklıklarda bir saat tavllanmış

elik parçalardır. Bu tarz Görsel Referans Parçaları doğru rengi elde etmek için doğru sıcaklıkta tavlama yapabilmek amacıyla demirciler tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır.



şekil 6.40 : Çeliklerin tavlama renklerinin karşılık geldiği sıcaklıklar [54].

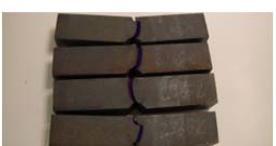
	Geleneksel	Kriyojenik	Kriyojenik Meneviş
Ortam Sıc.			
Ortam Sıc. Nitrasyonlu			
480 °C			
480 °C Nitrasyonlu			

şekil 6.41 : Nitrasyonsuz ve nitrasyonlu AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısııl işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma şekillerinin karşılaştırılması.

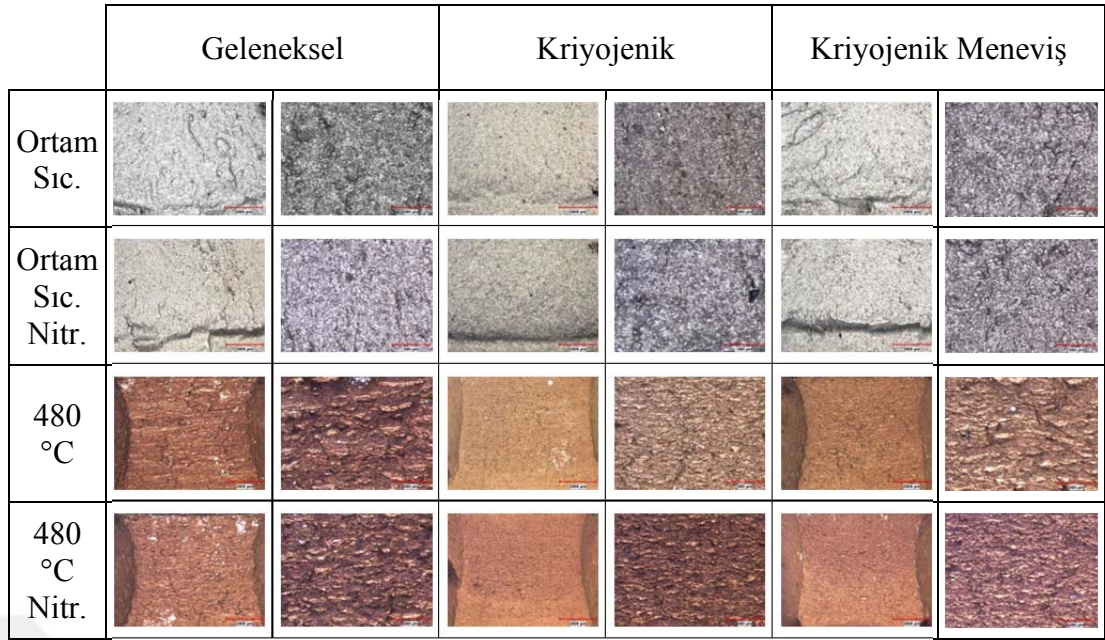
Charpy darbe deneyinde kırılan çentikli numunelere yandan kırık yüzeyleri karşılıklı gelecek şekilde birleştirilerek bakıldığında ortam sıcaklığında kırılan numunelerin deformasyona uğramadan gevrek kırıldıkları görülmektedir (Şekil 6.41 ve Şekil 6.42). Kırılma hattının büyük çoğunlukla düz bir hat şeklinde olduğu görülmektedir.

Aynı şekilde 480 °C sıcaklıkta darbe deneyinde kırılan numunelere kırık yüzeylerinden birleştirilerek yandan bakıldığında numunelerin geriye doğru eğildiği, kırılma sırasında plastik deformasyona uğradıkları görülmektedir. Kırılma hatları eğriseldir. Kırılmalar yarı-sünek karakterdedir.

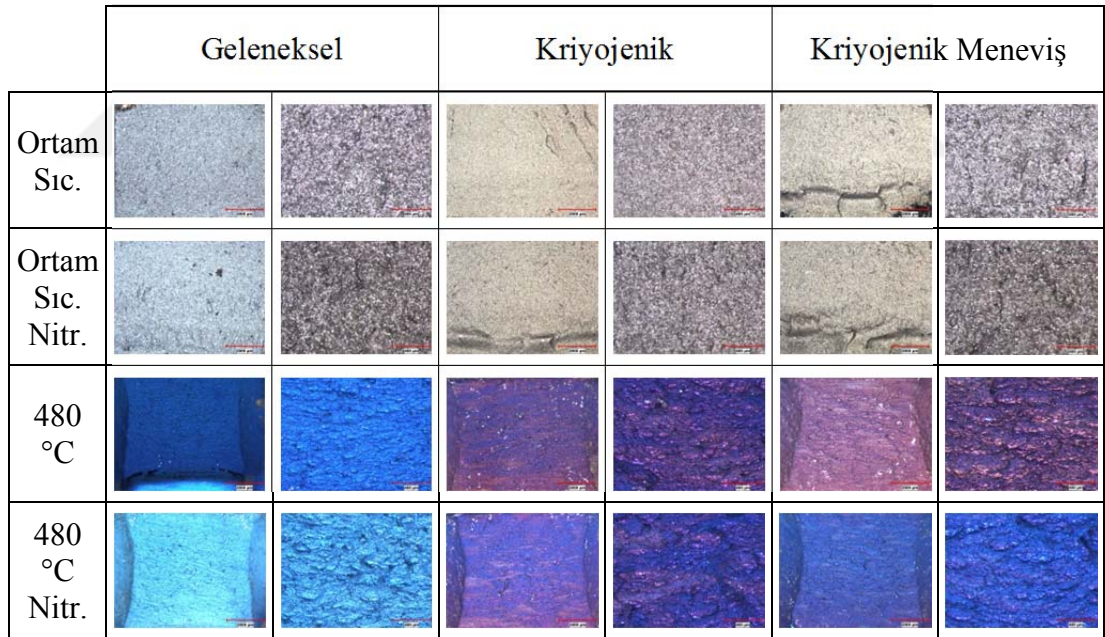
Şekil 6.43'te AISI H13 ve Şekil 6.44'te de AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerin Çentikli Charpy Darbe Deneyi sonucunda elde edilen kırık yüzeylerinin stereo mikroskopta farklı iki büyütmeye çekilmiş fotoğrafları karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

	Geleneksel	Kriyojenik	Kriyojenik Meneviş
Ortam Sıc.			
Ortam Sıc. Nitrasyonlu			
480 °C			
480 °C Nitrasyonlu			

Şekil 6.42 : Nitrasyonsuz ve nitrasyonlu AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısıtım reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma şekillerinin karşılaştırılması.

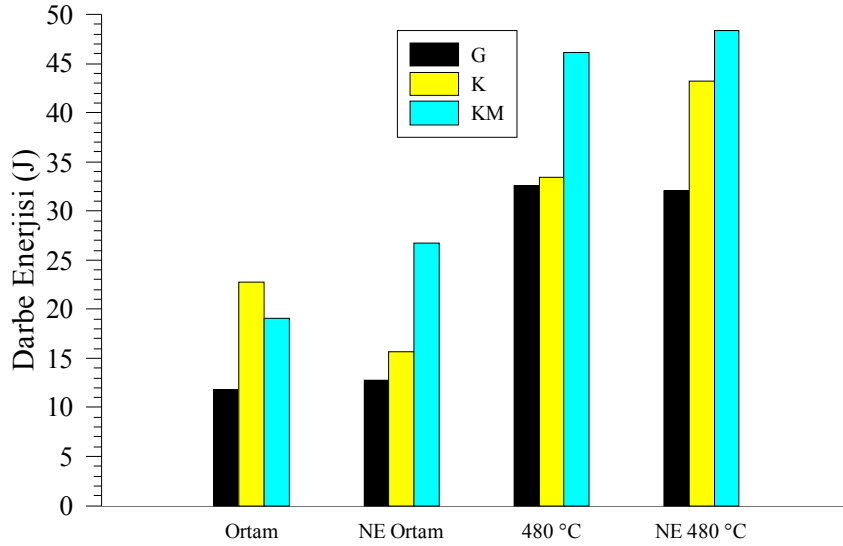


Şekil 6.43 : Nitrasionsuz ve nitrasyonlu AISI H13 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısı işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma yüzeylerinin stereo mikroskop ile çekilmiş genel ve detay görüntülerinin karşılaştırılması.



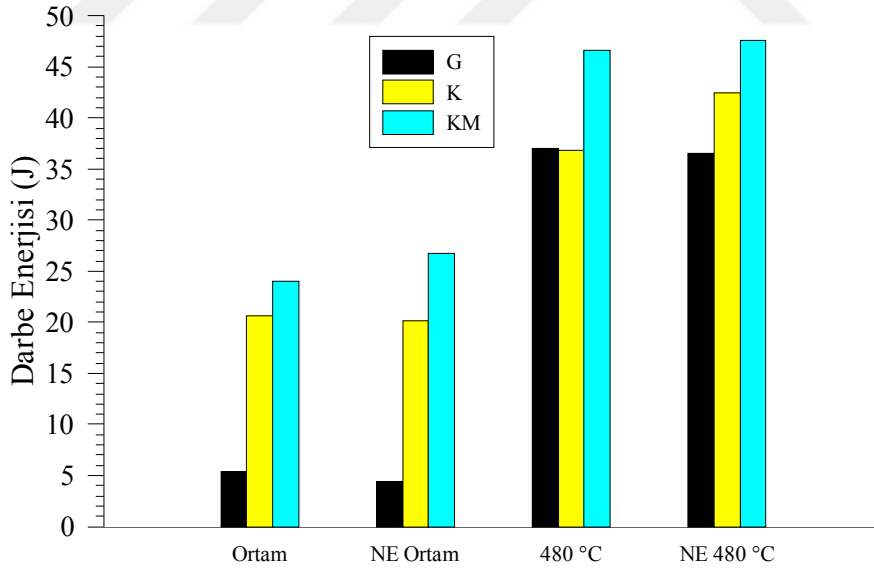
Şekil 6.44 : Nitrasionsuz ve nitrasyonlu AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerinin farklı ısı işlem reçetelerine göre hazırlanmış çentikli darbe deneyi numunelerinin ortam ve 480 °C sıcaklıklarında elde edilmiş kırılma yüzeylerinin stereo mikroskop ile çekilmiş genel ve detay görüntülerinin karşılaştırılması.

Şekil 6.45 ve Şekil 6.46’da sırasıyla AISI H13 ve AISI H10 sıcak iş çeliği numunelerden Charpy Çentikli Darbe deneyi sonucunda elde edilen sonuçların karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.45 : Ortam sıcaklığında ve çalışma sıcaklığında (480 °C) nitrasyonsuz ve nitrasyon şartlarında bekletilen AISI H13 numunelerin darbe enerjilerinin karşılaştırılması.

Bu sonuçlara göre en iyi darbe dayanımının KM ısıtım işlem reçetesinden elde edildiği görülmektedir. Yapılan nitrasyon işleminin de darbe dayanımına her iki sıcak iş çeliği alaşımında da katkı sağladığı görülmektedir. Geleneksel numunelerde nitrasyon sonrası darbe dayanımında hafif bir düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 6.46 : Ortam sıcaklığında ve çalışma sıcaklığında (480 °C) nitrasyonsuz ve nitrasyon şartlarında bekletilen AISI H10 numunelerin darbe enerjilerinin karşılaştırılması.

6.7 İmalat Kalıbı Uygulaması

Ekstrüzyon kalıpları teknik resim gramajlarına göre müsaade edilen negatif toleranslara göre imal edilmektedirler. İmalat süreçlerinde kalıp geçişlerindeki aşınma ile birlikte profil kesit alanlarında ölçü artışı gerçekleşmektedir. Bu nedenle geleneksel yöntemlerle imal edilen kalıplarda aynı profil imalat sürecinin başındaki ve sonundaki profillerde dahi gramaj farkı gözlemlenmektedir. Baskı sayısındaki artışla birlikte gramaj artışı daha da fazlalaşır. Başka bir nedenden dolayı kalıp hasar görmez ise, pozitif gramaj toleransı geçildiğinde kalıp iptal edilerek hurdaya ayrılır.

Çizelge 6.12’de 3095 numaralı profillerin imalatında kullanılmış olan bütün kalıpların verileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. “*” ile işaretli kalıpların aşınan ya da deforme olan kapaklarının ve zıvanalarının tek tek yenilenmesi ile imalata devam edildiği bilgisi bulunmaktadır. Bu nedenle işaretli kalıpların yüksek miktarlarda imalat gerçekleştirmiş olarak gözükmelerinin ya da baskı sayılarının (prese bağlanıp imalat gerçekleştirip arşive kaldırılmaları döngüsü) fazla olmasının nedeni kalıp parçalarının yenilenerek imalata devam edilmiş olmalarıdır. Hatta bu yenileme sürecinde kapak ve zıvananın arka arkaya yenilenmesi sonucu yepyeni bir kalıpla imalata devam edilmesi dahi söz konusudur.

Çizelge 6.12 : 3095 numaralı boru profilinin imalatında kullanılan kalıpların toplam imalat verileri. K2M ısıtma işlem reçetesiyle hazırlanan ve CrN kaplama yapılan kalıp tire 9’dur.

Kalıp Tiresi	Brüt İmalat (kg)	Baskı Sayısı	Brüt Boy (m)
*0	25.718	15	18.663
*1	15.268	8	11.080
2	13.100	7	9.507
*3	22.930	16	16.647
4	8.724	5	6.331
5	11.774	6	8.544
*6	16.796	13	12.189
7	4.470	5	3.244
9	20.986	8	15.229
10	15.528	6	11.091

3095-9 (3095 Tire 9) kalıbı ile yapılan imalatın verilerine bakıldığında, daha önceki kalıplara göre toplam imalat miktarının yaklaşık iki katına çıktığını söyleyebiliriz.

Geleneksel yöntemlerle imal edilen kalıplarda aynı imalat sürecinin başındaki ve sonundaki profillerde gramaj artışı gerçekleşmektedir. Baskı sayısındaki (prese bağlanıp imalat yapma sayısı, kalıp döngüsü) artışla birlikte gramaj artışı daha da fazlalaşır. Gramaj artışına, kalıbın geçiş kısımlarının aşınması sonucu profil kesitlerinin kalınlaşması neden olmaktadır.

Çizelge 6.13'te K2M (Kriyojenik-2 Meneviş) ısıtım işlem reçetesine göre hazırlanmış CrN PVD kaplamalı 3095-9 numaralı kalıbın imalat detay verileri gösterilmektedir. Kalıp iptal olana kadar, imalat sürecinin tamamında resim gramajının altında ürünler imal edilmiştir. Son imalat, köprülerdeki çatlaklar nedeniyle kalıp zıvanası olması gereken konumdan öne çıkarak profil dış ölçüsünün büyümesine ve imalat toleranslarının dışına çıkmaya başlamasına neden olmuştur. Bu olay aynı zamanda ürün birim gramajının bir miktar artmasına da neden olmuştur. Kalıp sekizinci baskı sonunda köprülerde oluşan çatlaklar nedeniyle iptal edilmiştir.

Çizelge 6.13 : K2M ısıtım işlem reçetesine göre hazırlanıp PVD yöntemi ile CrN kaplanan 3095-9 kalıbının imalat verileri. Profilin resim gramajı 1,378 kg/m'dir.

İmal No.	Fiili Gramaj (kg/m)	Brüt İmalat (kg)	Brüt Boy (m)
050913.1	1,352	-	-
231013.1	1,371	1.395	1.012
231013.2	1,371	2.240	1.626
211113.1	1,370	2.536	1.840
181213.1	-	1.395	1.012
181213.2	-	1.268	920
100114.1	1,371	1.479	1.073
100114.2	1,371	2.240	1.626
130214.1	1,370	338	245
130214.2	1,370	2.283	1.657
060314.1	1,370	2.219	1.610
260314.1	1,378	1.057	767
270314.1	1,378	2.536	1.840
Toplam		20.986	15.228

Çizelge 6.14'te geleneksel ısıt işlemlerine göre hazırlanmış 3095-10 numaralı kalıbın imalat detay verileri gösterilmektedir. Kalıp kısa sürede resim gramajına erişmiş ve iptal olmadan önce de üzerine çıkmıştır. Brüt imalatın 4.525 m civarına eriştiği 090514.2 numaralı imalat sürecinde resim gramajı geçilmiştir ki bu imalat rakamı kalıbın net imalat toplamının kabaca %40'ını oluşturmaktadır. Kalıbın ilk nitrasyon işleminden sonra brüt 4525 m profil, ikinci nitrasyon işleminden sonra brüt 2669 m profil ve üçüncü nitrasyon sonrasında da brüt 4043 m profil imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu durumda imalat sürecinde kalıbın nitrasyon tabakasının iki defa yenilenmesi gerekmiştir.

Şekil 6.47'de 3095-9 numaralı K2MN ısıt işlemlerine göre hazırlanmış CrN kaplamalı imalat kalıbının ilk hali ve iptal edildikten sonraki durumunu gösteren fotoğraflar gösterilmektedir. Şekil 6.47 c'de kalıbın zıvanasındaki köprülerde oluşan çatlaklar görülmektedir. Bu çatlaklar nedeniyle kalıp zıvanası ileriye doğru çıkarak geçiş bölgelerinin birbirine göre konumlarının bozulmasına ve profilin geometrisinin bozulmasına neden olmuşlardır.

Çizelge 6.14 : Geleneksel ısıt işlemlerine göre hazırlanan 3095-10 kalıbının imalat verileri. Profilin resim gramajı 1,378 kg/m'dir. Altı çizili imalat numaraları yenilenmiş nitrasyon tabakası ile imalat başlangıcını göstermektedir.

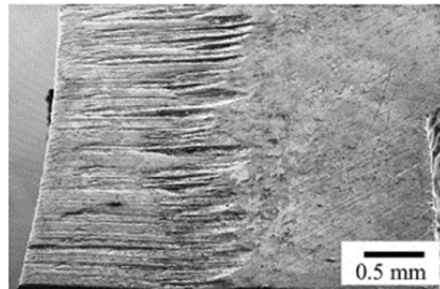
İmal No.	Fiili Gramaj (kg/m)	Brüt İmalat (kg)	Brüt Boy (m)
230414.1	1,375	42	30
250414.1	-	3.107	2.255
090514.1	1,377	1.543	1.120
090514.2	1,379	1.585	1.150
020614.1	-	2.959	2.147
020614.2	-	719	522
200614.1	-	2.113	1.533
040714.1	1,400	1.730	1.255
040714.2	1,405	1.730	1.155
Toplam		15.528	11.091



Şekil 6.47 : 3095-9 numaralı kalıbın hiç imalat yapmamış ve son baskıdan hemen önceki durumunun karşılaştırması; a) Zıvananın ilk durumu, b) kapağın ilk durumu, c) zıvananın son durumu, d) kapağın son durumu.

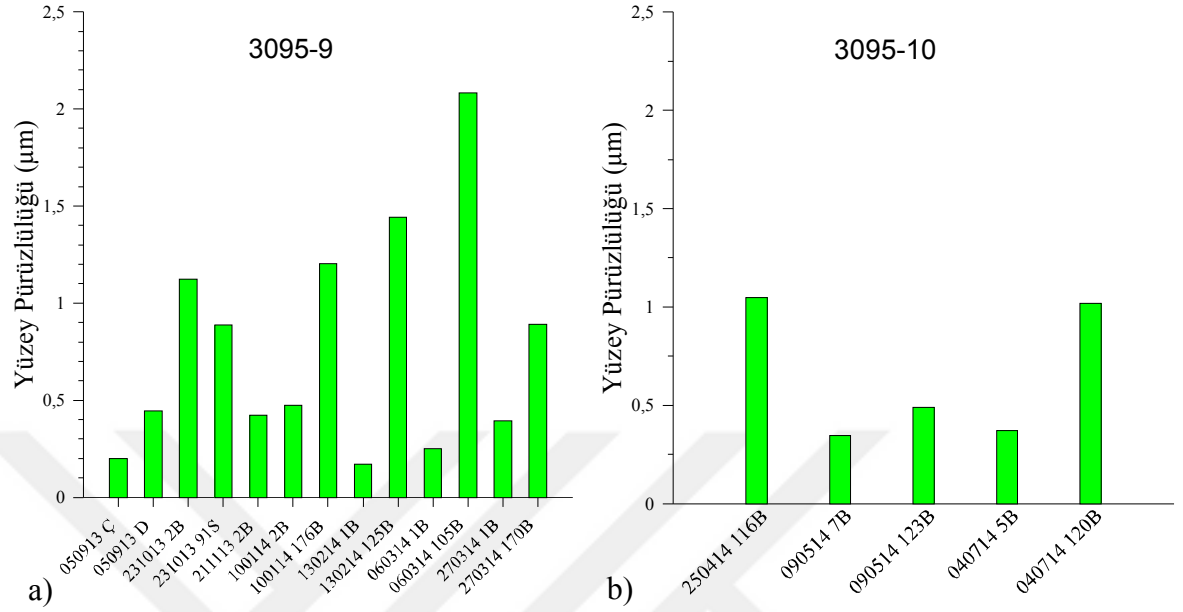
Şekil 6.47 c ve d'ye baktığımızda kalıbın geçişlerinde aşınmanın neredeyse hiç olmadığını, ilk resimlerdekine yakın parlaklıkta olduğunu görebilmekteyiz. Aşınma miktarı çok az olduğu için kalıp gramajı son baskılara dek aynı seviyede ve resim gramajının altında kalmıştır.

Şekil 6.48'de bu tarz bir imalat sonucunda oluşma ihtimali yüksek, geçiş bölgesinin yarısına kadar aşındığı örnek gösterilmektedir. Böyle bir durumda profil yüzeyinde ve geometrisinde problemler oluşması ve gramajının artması beklenmelidir.



Şekil 6.48 : Geçiş boyunun yarısına kadar aşınma [21].

Şekil 6.49’da 3095-9 K2MCrN ve 3095-10 G kalıplar ile yapılan imalatlardan alınan numunelerin dış yüzeylerinden ekstrüzyon yönüne dik olarak yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 6.49 : (a) 3095-9 ve (b) 3095-10 kalıpları ile imal edilen profillerin ekstrüzyon yönüne dik dış yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.

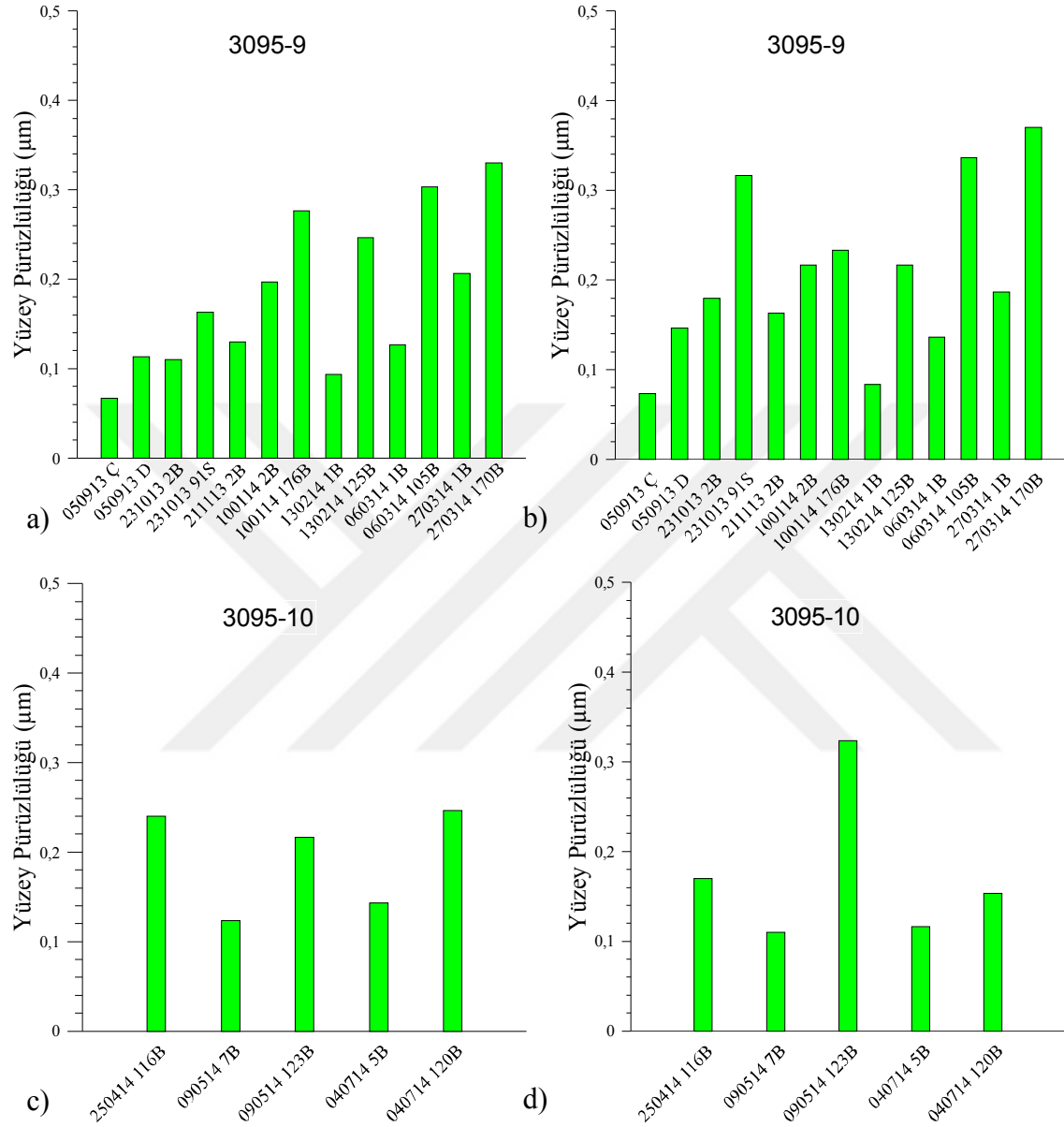
Bu grafiklerde Ç çıkış, D deneme, B biyet, S son biyeti ifade etmektedir. B ve S’nin yanındaki rakamlar ilgili biyetin o imalat kaçınıcı olduğunu ifade etmektedir.

Çıkış parçası kalıptan yapılan denemede elde edilen ilk profil parçasıdır. Deneme, kalıp nitrasyon işlemi yapılmadan gerçekleştirilir. En fazla 10 biyet kullanılarak deneme yapılır. Eğer kalıpta düzeltmeler yapılacaksa nitrasyon öncesi yapılmalıdır.

Bu bilgiler ışığında kalıp verilerini incelediğimizde imalat başlangıçlarında yüzey pürüzlülüğünün düşük, imalatın ilerleyen safhalarında artış gösterdiğini görmekteyiz. İmalat sonunda kalıp temizliği yapıldıktan sonra yüzey pürüzlülüğünün ilk hale veya az üzerindeki bir değere düştüğünü gözlemleyebiliriz. Artan imalat miktarları ile birlikte ve muhtemel empürite miktarı yüksek olan biyetlerle imalat gerçekleştirilmesine de bağlı olarak profil yüzey pürüzlülüğünde artış olmaktadır.

Ayrıca ekstrüzyon yönüne dik profil yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkileyen bir diğer faktör de kalıbın işlenme hassasiyetidir. 3095-9 kalıbı torna ile imal edilirken, 3095-10 kalıbı da CNC işleme merkezi ile imal edilmiştir. Dolayısı ile bu işleme yöntemleri arasındaki hassasiyet farkı ekstrüzyona dik yöndeki yüzey pürüzlülüğü farkına doğrudan etki edecektir.

Şekil 6.50’de 3095-9 K2MN CrN ve 3095-10 G kalıpları ile imal edilen profillerin iç ve dış yüzeylerinin ekstrüzyon yönünde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmektedir.



Şekil 6.50 : 3095-9 ve 3095-10 kalıpları ile imal edilen profillerin ekstrüzyon yönünde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri. 3095-9 (a) Profilin dış yüzeyi ve (b) profilin iç yüzeyi; 3095-10 (c) Profilin dış yüzeyi ve (d) profilin iç yüzeyi.

Benzer şekilde her iki kalıpta da imalat başlangıcında yüzey pürüzlülüğü değerleri düşükken, ilerleyen imalat aşamalarında pürüzlülük artış göstermektedir. Kalıbın yeniden imalata hazırlanması için yapılan temizlik ve bakım periyotlarında gösterilen hassasiyetle de ilişkili olarak başlangıç pürüzlülükleri aşınma etkisinden bağımsız olarak çok daha düşük seviyelerden başlayabilmektedir. Örneğin 130214 numaralı

imalat sürecinin sonuçları bunun en iyi örneğidir. Kendinden önceki imalatlarda yükselen yüzey pürüzlülüğü değerleri bu imalatta aniden düşüş göstererek tekrar yükseliş eğilimine geçmiştir.





7. SONUÇLAR

Yapılan çalışma üç ana konunun birleşim noktasında yer almaktadır. Aşınma, kriyojenik ısıtma işlem ve PVD ince film sert kaplamalar bu üç ana başlığı oluşturmaktadır. Çalışmanın ön hazırlık aşamasında başta bu anahtar kelimeleri kullanarak yapılan literatür taramasında, bu konuların ya tek başlarına ya da ikili kombinasyonlar şeklinde çalışılmış olduğu görülmüştür. Bu bağlamda yapılan çalışma olabildiğince bu üç konuyu bir araya getirecek şekilde ele alınmaya çalışılmıştır. Kriyojenik işlem ile sert ince film kaplamalar konusunun aşınma üzerindeki etkilerinin incelenebileceği en verimli ortamın alüminyum ekstrüzyon sanayii olabileceği tespit edilmiştir. Bu fikirlerden hareketle sıcak aşınmanın yoğun olarak yaşandığı bir imalat alanı ile aşınma direncini artırma yöntemi olarak karşımıza çıkan olguları buluşturarak çalışma planlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Çalışmayı özgün kılan bu kesişim noktasıdır.

Bu çalışma kapsamında yapılan laboratuvar ve saha çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki başlıklarda özetlenmiştir.

7.1 Laboratuvar Çalışmalarının Sonuçları

Geleneksel ısıtma işlem reçetesine alternatif olarak uygulanan Kriyojenik tabanlı ısıtma işlem reçeteleri ile elde edilen yapının servis sürecinde mikroyapısal ve mekanik özellikler açısından belirgin bir şekilde bozulmadığı, uzun süreli imalat süreçlerine dayanım gösterdiği görülmektedir. Kriyojenik alt yapı, malzemenin merkez sertliğindeki artışla birlikte çok tabakalı yüzey yapıları arasındaki sertlik dağılımı farkını dengeleyerek hem nitrasyon tabakasına hem de ince sert film (PVD) yöntemi ile oluşturulan CrN tabakasına gerekli mekanik desteği sağlamaktadır.

Yapılan XRD çalışmalarında, geleneksel yöntemde östenitleme ve su verme işlemlerinin sonunda yapıda bulunan kalıntı östenitin uygulanan meneviş işlemleri sonucunda martenzite dönüştüğü görülmüştür. Aynı şekilde kriyojenik numunelerde de östenitleme ve su verme sonrasında yapıda gözlemlenen kalıntı östenitin

kriyojenik işlem sonrasında yapıda bulunduğu, uygulanan menevişleme ile dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre sıcak iş takım çeliklerinin yapılarında bulunan kalıntı östenitin meneviş işlemi sonunda martenzite dönüşecek şekilde alaşım tasarımının öngörüldüğü gözlemlenmiştir. Dolayısı ile uygulanacak kriyojenik ısıtıl işlemin asıl hedefinin kalıntı östenitin martenzite dönüşümünü sağlamaktan ziyade, ikincil çökeltilerin, özellikle geleneksel ısıtıl işlem yöntemlerinde gözlemlenmeyen η -karbürün yapıda homojen olarak çökmesinin sağlanması olduğunu vurgulamak gerekmektedir.

Bu bağlamda kriyojenik işlemin kalıntı östenit açısından kritik olmadığı düşünülebilir. Ancak yapılan darbe ve aşınma deneyleri, sertlik ölçümleri sonuçlarına bakıldığında, kriyojenik işlem sırasında gerçekleşen difüzyonsuz faz dönüşümü ile oluşan ve meneviş işlemi sırasında çökelen η -karbürlerin mekanik özelliklere katkısının çok önemli olduğu görülmektedir. SEM çalışmalarında yapıya homojen ve çok küçük boyutlarda dağılmış olan çökeltilerin η -karbür yapısı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Kriyojenik ısıtıl işleminden sonra uygulanan tek meneviş işlemi ile sıcak iş çeliğinin sertliği bir miktar düşürmekle birlikte bu işlem sayesinde kırılma direncinde artış elde edilmektedir (tokluk artışı). Çentikli darbe deneylerinden elde edilen sonuçlar bu görüşü desteklemektedir.

Aynı şekilde sertlikteki bu düşüş ile birlikte çalışma şartlarında gerçekleştirilen disk üzerinde bilye deneylerinden elde edilen sonuçlardan açıkça görülmektedir ki KM ısıtıl işlemine göre hazırlanan parçanın aşınma direnci ve buna bağlı olarak yüzeyden malzeme kaybı diğer reçetelere göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Elde edilen bu sonuçlar değerlendirilerek saha çalışmasında kullanılacak imalat kalıbı için ısıtıl işlem reçetesi olarak KM reçetesinin bir meneviş ilavesi ile uygulanması kararlaştırılmıştır.

7.2 İmalat (Saha) Çalışmalarının Sonuçları

Laboratuvar sonuçlarına göre seçilen ısıtıl işlem reçetesine göre K2M (Kriyojenik + 2 Meneviş) ilk etapta basit şekilli (boru kalıbı) zıvanalı (porthole) bir kalıp hazırlanmıştır. Kalıp imalat süreçlerinde kabul gören prosedürlere göre ömrünü

tamamlayana dek kullanılarak performansı gözlenmiştir. Daha önce imalat yapılan geleneksel ısıt ışılemlili özdeş kalıplar ile istatistiksel olarak mukayese edilmiştir.

Yapılan saha çalışmalarında K2MN ısıt ışılemlili reçetesiyle birlikte uygulanan PVD kaplama ile kalıp ömürlerinin arttığı, ürün gramajlarının tüm imalat sürecinde sabit kaldığı görülmüştür. Takip edilen geleneksel yöntemlerle imal edilmiş kalıba göre imalatlar hesaplandığında 460 kg civarında daha az alüminyum kullanılarak imalatın gerçekleştirildiği görülmektedir. Özellikle kg fiyatı ile satılmayan, adet bazında satılan alüminyum ürünler için çok önemli tasarruf imkânı sağlanabilmektedir. Aynı şekilde homojen imalat fırsatı da yarı-mamullerin daha sonra kullanıldıkları/işlendikleri prosesler açısından kararlı imalat şartlarının da oluşmasını sağlayacaktır. Örneğin ekstrüzyon prosesinden sonra bükme ile şekil verilen bir profil, kalıbın aşınması neticesinde değişken kesite sahip olacağı için, bükme prosesinde hep farklı kuvvetlerin uygulanması gerekecektir. Sabit kesit ile imalat ölçüsel kararlılık da getireceği için, özellikle montaj sırasında oluşabilecek güçlükleri ve problemleri azaltacaktır.

Kalıp kaynaklı yüzeysel ve ölçüsel problemlerde düşüş gözlenmiştir. Görsel olarak daha parlak profil imalatına olanak sağlanmıştır.

Elde edilen deney verilerine göre kalıbın genel dayanımının geleneksel kalıba göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Geleneksel kalıplarda aşınmanın yanı sıra deformasyon (kalıbın plastik şekil değiştirmesi veya kalıp ayaklarının çatlaması sonucu zıvananın kapak kısmına göre yer değiştirmesi) en önemli hasar nedenidir. Deney kalıbının devre dışı kalma nedeni, kalıp ayaklarındaki çatlama sonucu kalıbın deforme olmasıdır. Ancak bu deformasyon imalat rutinlerine göre epey gecikmeli gerçekleşmiştir. Bu gecikmenin muhtemel nedeni uygulanan kriyojenik işlem nedeniyle malzemenin dayanımının gelişmesidir.

Geleneksel kalıp, aşınma sonucu profil birim ağırlığının toleransların dışına çıkması nedeni ile iptal edilerek hurdaya ayrılmıştır.

K2MN reçetesine göre hazırlanan kalıp yaklaşık iki kat daha fazla imalat gerçekleştirdiği için, benzer imalat için gerekli ikinci kalıba ihtiyaç duyulmamıştır. Dolayısı ile tüm işlemleri ile birlikte bir adet kalıp maliyeti kadar kâr sağlanmıştır. Ayrıca bu imalat sürecinde 3095-10 G kalıbının iki defa nitrasyon tabakasının yenilenmesi gerekmiştir. 3095-9 deneme kalıbına iptal olana dek ilave herhangi bir

işlem yapılmamıştır. Bu durumda deneme kalıbı için yapılan kriyojenik işlem ve PVD kaplama masrafına karşılık 5 nitrasyon işlemi, bir adet kalıp, 460 kg alüminyum tutarı kazanç sağlanmıştır.

7.3 Çalışmanın Uygulama Alanı

Alüminyum sıcak şekil verme yöntemlerinden biri olan ekstrüzyon prosesinde kullanılmakta olan sıcak iş çeliğinden imal edilen kalıpların servis ömürlerinin arttırılması konusunda önemli katkılar sağlayacak bir uygulama olacağı öngörülmektedir.

Sıcak ekstrüzyon ile alüminyum profil imalatında kalıp, kalıp bakımı ve kullanımı ile ilgili giderler, profil gramaj artışları ve buna bağlı problemlilik-ıskarta parça imalatı sonucu oluşan maliyetler, prestij kaybı, terminin gecikme maliyetleri, geri dönüşüm kayıpları gibi giderleri göz önüne aldığımızda oldukça ciddi bir yekûn ile karşı karşıya kalınmaktadır. Toplam kalıp verimindeki ve servis ömründeki artış, bu alanlardaki giderlerin azalmasını veya yok denilecek seviyelere düşmesini sağlayacak potansiyele sahiptir.

Sanayide edinilmiş ve kemikleşmiş alışkanlıkların aşılması ile çok daha iyi ve verimli sonuçlara ulaşılabilecektir. Örneğin kalıpların imalat sonrasında temizlenerek arşive kaldırılması işinde daha özenli ve dikkatli olunması kalıp yüzey ömrü ve buna bağlı olarak profil yüzey özelliklerinin daha iyi olmasına, hassasiyet beklenen üretimlerin kolayca ve nispeten çok daha sorunsuz olarak gerçekleştirilebilmesine imkan verecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<http://www.aluminyumsanayi.com/aluminyumprofilgenel>>, alındığı tarih 26.03.2012.
- [2] **Aluminum Extrusion Technology**, (2000). (Ed) Saha, P. K., ASM International, Ohio.
- [3] **Url-2** <<http://www.en.wikipedia.org/wiki/Nitriding>>, alındığı tarih 25.06.2012.
- [4] **Url-3** <http://www.tr.wikipedia.org/wiki/ince_film_kaplama_teknikleri>, alındığı tarih 25.06.2012
- [5] **Url-4** <http://www.tr.wikipedia.org/wiki/Sifir_alti_islem>, alındığı tarih 25.06.2012.
- [6] **Url-5** <http://www.en.wikipedia.org/wiki/Cryogenic_hardening>, alındığı tarih 25.06.2012.
- [7] **Url-6** <http://www.realoakfloors.co.uk/flooring_profiles_aluminium.php>, alındığı tarih 25.06.2012.
- [8] **Url-7** <http://jshaida.en.ecplaza.net/sitebuilder/images/heat_sink_aluminum_profile.jpg>, alındığı tarih 25.06.2012.
- [9] **Url-8** <<http://cfnewsads.thomasnet.com/images/large/030/30586.jpg>>, alındığı tarih 25.06.2012.
- [10] **Url-9** <<http://www.asia.ru/en/ProductInfo/442465.html>>, alındığı tarih 26.06.2012.
- [11] **Url-10** <<http://helen-luo.en.made-in-china.com/product/LeUQTCWMbHcq/China-Aluminium-Heat-Sink.html>>, alındığı tarih 26.06.2012.
- [12] **Extrusion of Aluminium Alloys**, (1999). (Ed) Sheppard, T., Kluwer Academic Publications, London.
- [13] **Url-11** <http://img.diytrade.com/cdimg/686218/5352160/0/1205119007/Aluminum_A356_2_Billet.jpg>, alındığı tarih 24.06.2012.
- [14] **Url-12** <<http://www.noktametal.com/extrusionpress.htm>>, alındığı tarih 24.06.2012.
- [15] **Url-13** <<http://www.made-in-china.com/showroom/fsyqal/product-detailrbqxRCdJguVU/China-Aluminun-Extrusion-Dies.html>>, alındığı tarih 24.06.2012.

- [16] **Url-14** <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=aluminum_extrusion>, alındığı tarih 26.06.2012.
- [17] **Björk, T., Berger, M., Westergård, R., Hogmark, S., Bergström, J.,** (2001), New physical vapour deposition coatings applied to extrusion dies, *Surface and Coatings Technology*, 146-147, 33-41.
- [18] **Panjan, P., Cvahte, P., Čekada, M., Navinšek, B., Urankar, I.,** (2001), PVD CrN coating for protection of extrusion dies, *Vacuum*, 61, 241-244.
- [19] **Björk, T., Bergström, J., Hogmark, S.,** (1999), Tribological simulation of aluminium hot extrusion, *Wear*, 224, 216-225.
- [20] **Björk, T., Westergård, R., Hogmark, S., Bergström, J., Hedenqvist, P.,** (1999), Physical vapour deposition duplex coatings for aluminium extrusion dies, *Wear*, 225-229, 1123-1130.
- [21] **Björk, T., Westergård, R., Hogmark, S.,** (2001), Wear of surface treated dies for aluminium extrusion – a case study, *Wear*, 249, 316-323.
- [22] **Saha, P. K.,** (1998), Thermodynamics and tribology in aluminum extrusion, *Wear*, 218, 179-190.
- [23] **Url-15** <<http://www.wefagroup.com/fkw.0.html?&L=1>>, alındığı tarih 26.06.2012.
- [24] **Url-16** <<http://www.aluminiumdesign.net/design-support/die-design/>>, alındığı tarih 26.06.2012.
- [25] **Extrusion Second Edition,** (2006). (Eds) Bauser, M., Sauer, G., Siegert, K., ASM International, Materials Park, Ohio.
- [26] **Url-17** <http://wildeanalysis.co.uk/system/photos/342/original/DEFORM_3D_Extrusion.jpg?1271239406>, alındığı tarih 26.06.2012.
- [27] **Url-18** <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607008059>>, alındığı tarih 24.06.2012.
- [28] **Rodríguez-Baracaldo, R., Benito, J. A., Puchi-Cabrera, E. S., Staia, M. H.,** (2007), High temperature wear resistance of (TiAl)N PVD coating on untreated and gas nitrided AISI H13 steel with different heat treatments, *Wear*, 262, 380-389.
- [29] **Birol, Y.,** (2013), Sliding wear of CrN, AlCrN and AlTiN coated AISI H13 hot work tool steel in aluminum extrusion, *Tribology International*, 57, 101-106.
- [30] **Cooke, K. E., Yang, S., Selcuk, C., Kennedy, A., Teer, D. G., Beale, D.,** (2004), Development of duplex nitrided and closed field unbalanced magnetron sputter ion plated CrTiAlN-based coatings for H13 aluminium extrusion dies, *Surface & Coatings Technology*, 188-189, 697-702.
- [31] **Takım Çelikleri El Kitabı,** (2006), (Ed) Koçak, H., Yonca Ajans – Ofset Matbaacılık Ltd. Şti., İstanbul.

- [32] Url-19 <http://metallurgicaveneta.it/pdf_eng/acciai-da-utensili-per-lavorazioni-a-caldo/1.2714.pdf>, alındığı tarih 04.09.2012.
- [33] Url-20 <http://metallurgicaveneta.it/pdf_eng/acciai-da-utensili-per-lavorazioni-a-caldo/1.2344.pdf>, alındığı tarih 05.09.2012.
- [34] Url-21 <http://metallurgicaveneta.it/pdf_eng/acciai-da-utensili-per-lavorazioni-a-caldo/1.2365.pdf>, alındığı tarih 05.09.2012.
- [35] Url-22 <https://www.uddeholm.com/files/PB_orvar_supreme_english.pdf>, alındığı tarih 03.09.2012.
- [36] Pellizzari, M., (2011), High temperature wear and friction behaviour of nitrided, PVD-duplex and CVD coated tool steel against 6082 Al alloy, *Wear*, 271, 2089-2099.
- [37] Arif, A.F.M., Sheikh, A.K., Qamar, S.Z., (2003), A study of die failure mechanisms in aluminum extrusion, (2003), 134, 318-328.
- [38] Hasar Analizi Seminer Notları, (1997), (Eds) Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y., Çimenoglu, H., Metalurji Mühendisleri Odası, İstanbul.
- [39] Yıldız, T., Gür, A.K., (2006), Aşınma Sistemleri, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, Cilt 4 Sayı 2*, 86-91.
- [40] Lukaszewicz, K., Dobrzanski, L. A., Kokot, G., Ostachowski, P., (2012), Characterization and properties of PVD coatings applied to extrusion dies, *Vacuum*, 86, 2082-2088.
- [41] High Temperature Corrosion – Shrier’s Corrosion Vol 1: Types of High Temperature Corrosion: High Temperature Tribocorrosion, (2010), (Eds) Inman, I.A., Datta, P.S., Du, H.L., Kübel, C., Wood, P.D., Elsevier.
- [42] Url-23 <https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear>, alındığı tarih 23.05.2019.
- [43] Lapadatu, D., Kobi, A., Hambli, R., Barreau, A., (2005), Lifetime multiple response optimization of metal extrusion die, (Ed), *Annual Reliability and Maintainability Symposium 2005, Proceedings*, (pp 37-42), Alexandria, VA, USA, USA, 24-27 January 24-27.
- [44] Atar, E., Alpaslan, Ö., Çelik, Ö., Çimenoglu, H., (2014), Tribological properties of CrN coated H13 grade tool steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 21, 240-245.
- [45] Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, (2003), (Ed) Pye, D., ASM International, Ohio.
- [46] Url-24 <http://www.nitrexheattreat.com/wp-content/uploads/2018/06/Broc034b_rev1.pdf>, alındığı tarih 23.05.2019.
- [47] Dobrzanski, L.A., Polok, M., Panjan, P., Bugliosi, S., Adamiak, M., (2004), Improvement of wear resistance of hot work steels by PVD coatings deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 1995-2001.

- [48] Cunha, L., Andritschky, M., Pischow, K., Wang, Z., (1999), Microstructure of CrN coatings produced by PVD techniques, *Thin Solid Films*, 355-356, 465-471.
- [49] Baragetti, S., La Vecchia, G.M., Terranova, A., (2005), Variables affecting the fatigue resistance of PVD-coated components, *International Journal of Fatigue*, 27, 1541-1550.
- [50] Navinšek, B., Panjan, P., Milošev, I., (1997), Industrial applications of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures, *Surface and Coatings Technology*, 97, 182-191.
- [51] Molinari, A., Pellizzari, M., Gialanella, S., Straffelini, G., Stiasny, K.H., (2001), Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 350-355.
- [52] Meng, F., Tagashira, K., Azuma, R., Sohma, H., (1994), Role of Eta-carbide precipitations in the wear resistance improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C tool steel by cryogenic treatment, *ISIJ International*, 34, 205-210.
- [53] **Phase Transformations in Steels Volume 2: Diffusionless transformations, high strength steels, modelling and advanced analytical techniques**, (2012), (Eds) Pereloma, E., Edmonds, D. V., Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi.
- [54] **Url 25** <https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_interference>, alındığı tarih 20.08.2014.

EKLER

EK A: Sıcak İş çelikleri Teknik Veriler

EK B: AISI H13 ve AISI H10 Numunelerin SEM Görüntüleri

EK C: EDS Analiz Raporları

EK D: Kalıntı Östenit Analiz Raporları

EK E: Kalıntı Gerilme Analizi Raporları

EK F: Isıl Döngü Sertlik Profilleri

EK G: Aşınma Deneyi Verileri





EK A: Sıcak İş Çelikleri Teknik Veriler



1.2714



Quality	55NiCrMoV7	Supply conditions:
According to standards	UNI EN ISO 4957: 2002	Annealed / Normalized
Number	1.2714	or Quenched and Tempered

Chemical composition								
C%	Si%	Mn%	P% max	S% max	Cr%	Mo%	Ni%	V%
0,50-0,60	0,10-0,40	0,60-0,90	0,030	0,020	0,80-1,20	0,35-0,55	1,50-1,80	0,05-0,15
± 0.02	± 0.03	± 0.04	+ 0.005	+ 0.005	± 0.05	± 0.04	± 0.07	± 0.02
Product deviations are allowed								

Temperature °C						
Hot-forming	Quenching	Tempering	Stress-relieving		Stress-relieving must be done after machining and before quenching	
1050-850	heating up to 700, pause, then 870 oil 40 °C, polymer or forced air	see table immediately after quenching minimum 2 cycles	650 furnace cooling to 350, then air			
Soft annealing	Isothermal annealing		Pre-heating welding	Stress-relieving after welding		
680-700 furn. cooling to 150, then air (HB max 248)	800 furnace cooling to 660, pause, then furnace cooling to 620, then air		350	650 furnace cooling		
			Ac1	Ac3	Ms	Mf
			710	770	250	10

Mechanical properties																	
Tempering table																	
HB	634	615	595	577	243	512	482	468	442	409	390	quenching at 860 °C in oil					
HRC	59	58	57	56	54	52	50	49	47	44	42	"					
N/mm²	2420	2330	2240	2160	2010	1880	1760	1700	1580	1430	1340	"					
HB	560		512		482		442	421	400	371	336	301					
HRC	55		52		50		47	45	43	40	36	32					
N/mm²	2070		1880		1760		1580	1480	1390	1250	1110	1010					
Tempering to °C	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650					
Depending on the depth of machining, the following hardness values are recommended					depth mm		20		50		100						
					HRC		40-43		38-41		34-38						
Thermal expansion	10 ⁻⁶ • K ⁻¹							12.5	13.1	13.4	13.9	14.0	14.3	14.5			
Modulus of elasticity	long.	GPa						215						198	176	165	
Modulus of elasticity	tang.	GPa						82						76	68	63	
R hardened and tempered for	N/mm²							1600						1350	1200	1000	600
Rp 0.2	N/mm²							1450						1150	1000	750	350
R hardened and tempered for	N/mm²							1200						1100	950	700	300
Rp 0.2	N/mm²							1040						820	700	500	200
Testing at	°C							20	100	200	300	400	500	600	700		
Testing at °C	Specific heat capacity J/(Kg•K)		Density Kg/dm³		Thermal conductivity W/(m•K)			Specific electric resist. Ohm•mm²/m			Electrical conductivity Siemens•m/mm²						
20	460		7.80		25.5			0.30			3.33						
500	550		7.64		25.0			0.71			1.41						
600	590		7.60		24.6			0.84			1.19						

Şekil A.1 : DIN 1.2714 sıcak iş çeliği teknik veriler [32].

Quality	X40CrMoV5-1							Supply conditions:						
According to standards	UNI EN ISO 4957: 2002							Annealed						
Number	1.2344													
Chemical composition														
C%	Si%	Mn%	P% max		S% max		Cr%	Mo%	V%					
0,35-0,42	0,80-1,20	0,25-0,50	0,030		0,020		4,80-5,50	1,20-1,50	0,85-1,15					
± 0.02	± 0.05	± 0.04	+ 0.005		+ 0.005		± 0.10	± 0.05	± 0.05					
Product deviations are allowed														
Temperature °C														
Hot-forming	Quenching				Tempering see table				Stress-relieving				Stress-relieving must be done after machining and before quenching	
1050-900	heating up to 800, pause, then 1020-1080 oil, polymer, s.b.				immediately after quenching minimum 2 cycles				600-650 furnace cooling to 350, then air					
Soft annealing	Isothermal annealing								Pre-heating welding				Stress-relieving after welding	
820 furnace cooling (HB max 229)	880 furnace cooling to 780, pause, then furnace cooling to 750, then air								350				650 furnace cooling	
								Ac1	Ac3	Ms		Mf		
								830	915	300		80		
s.b. = salt bath (450-500 °C)														
Mechanical properties														
Tempering table after quenching at 1040 °C in oil. Values on Ø 20 mm														
HB	560	543	525	512	504	512	525	543	577	577	512	455	390	301
HRC	55	54	53	52	51.5	52	53	54	56	56	52	48	42	32
N/mm²	2070	2010	1950	1880	1850	1880	1950	2010	2160	2160	1880	1640	1340	1010
Tempering at °C	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Thermal expansion	10 ⁻⁶ . K ⁻¹			10.0	10.7	10.8	11.3	11.8	12.3	12.7	13.0	13.2		
Modulus of elasticity	long. GPa						210	205	198	191	182	173		
Specific heat capacity	J/(Kg.K)						461	479	499	517	536	558	587	
Thermal conductivity	W/(m.K)						19.2	20.1	22.4	24.0	25.1	25.8	26.1	
Density	Kg/dm³						7.74							
Specific electric resist.	Ohm.mm²/m						0.543	0.638	0.705	0.782	0.868	0.96	1.06	
R hard. and tempered for	N/mm²						1600				1400	1300	1100	800
Rp 0.2	N/mm²						1460				1200	1100	900	600
R hard. and tempered for	N/mm²						1200				1120	1000	850	580
Rp 0.2	N/mm²						1060				900	800	650	420
Testing at	°C			-100	0	20	100	200	300	400	500	600		
Nitriding in gaseous ammonia. The material should be hardened and tempered at min. 580 °C before nitriding														
Temperature °C	Time h				Depth of hardening mm				Surface hardness HV					
525	10				0,125				1000 - 1250					
525	20				0,180				1000 - 1250					
525	40				0,250				1000 - 1250					
525	60				0,300				1000 - 1250					

Şekil A.2 : DIN 1.2344 sıcak iş çeliği teknik veriler [33].

Quality	32CrMoV12-28	Supply conditions:
According to standards	UNI EN ISO 4957: 2002	Annealed
Number	1.2365	

Chemical composition

C%	Si%	Mn%	P% max	S% max	Cr%	Mo%	V%
0,28-0,35	0,10-0,40	0,15-0,45	0,030	0,020	2,70-3,20	2,50-3,00	0,40-0,70
± 0.02	± 0.03	± 0.04	+ 0.005	+ 0.005	± 0.10	± 0.10	± 0.04

Product deviations are allowed

Temperature °C

Hot-forming	Quenching	Tempering see table	Stress-relieving	Stress-relieving must be done after machining and before quenching			
1050-900	I° heating up to 400, pause, then II° heating up to 800, pause, then 1030-1050 oil, polymer	immediately after quenching minimum 2 cycles	600-650 furnace cooling to 350, then air				
Soft annealing	Stress relieving ¹⁾		Pre-heating welding	Stress-relieving after welding ¹⁾			
780-800 furnace cooling max 25 °C/h to 600, then air (HB max 229)	50° under the temperature of tempering		350-380	Ac1	Ac3	Ms	Mf
				800	900	320	100

Mechanical and physical properties

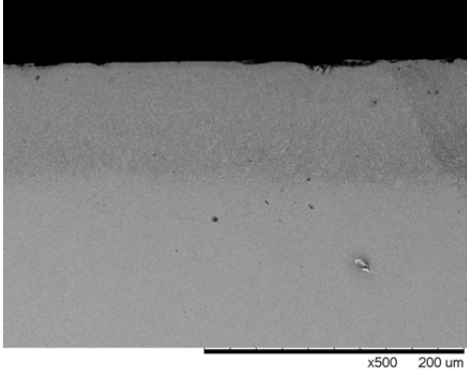
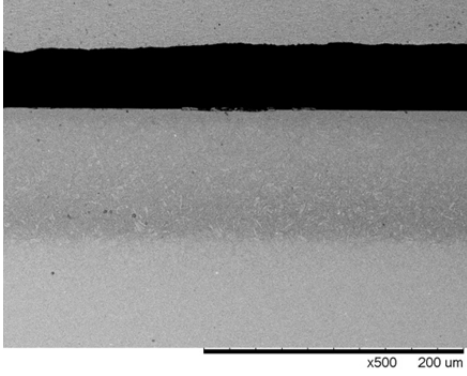
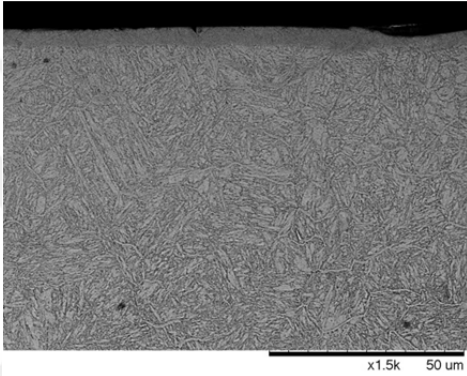
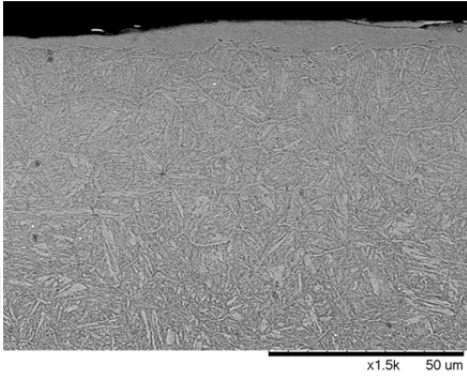
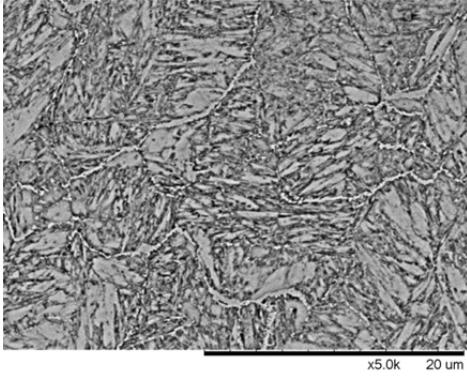
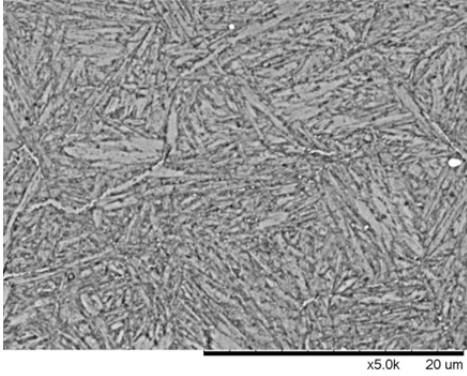
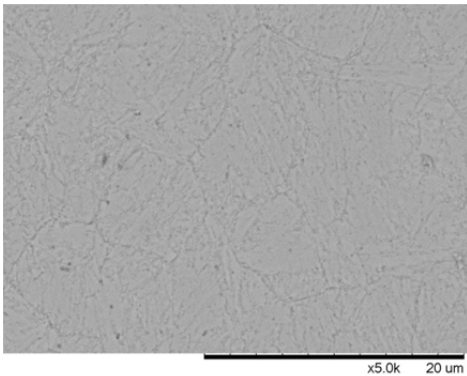
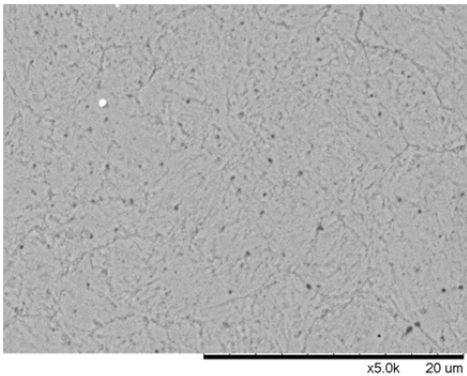
Tempering table after quenching at 1040 °C in oil.

HB	518	525	496	489	489	496	504	504	496	482	432	432	371
HRC	52.5	52	51	50.5	50.5	51	51.5	51.5	51	50	49	46	40
R	N/mm²	1880	1820	1790	1790	1820	1850	1850	1820	1760	1700	1520	1250
Tempering at °C	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
Modulus of elasticity	long.	GPa	215							176	165		
Modulus of elasticity	tang.	GPa	82							68	63		
Thermal expansion	10 ⁻⁶ • K ⁻¹				12.0	12.5	12.7	13.0	13.2	13.4	13.7		
Thermal conductivity	W/(m•K)	30.0							30.1	29.7			
Specific heat capacity	J/(Kg•K)	460							550	590			
Specific electric resist.	Ohm•mm²/m	0.37							0.78	0.89			
Electrical conductivity	Siemens•m/mm²	2.70							1.28	1.12			
Density	Kg/dm³	7.88							7.69	7.65			
R hardened and tempered for	N/mm²	1600							1350	1150	900	700	
Rp 0.2	N/mm²								1100	950	700	580	
R hardened and tempered for	N/mm²	1200							1050	900	650	520	
Rp 0.2	N/mm²								850	730	480	360	
R hardened and tempered for	N/mm²	900			830	790	720	700	600	420	300		
Rp 0.2	N/mm²				630	630	610	580	550	400	280		
Testing at	°C	20			100	200	300	400	500	600	650	700	

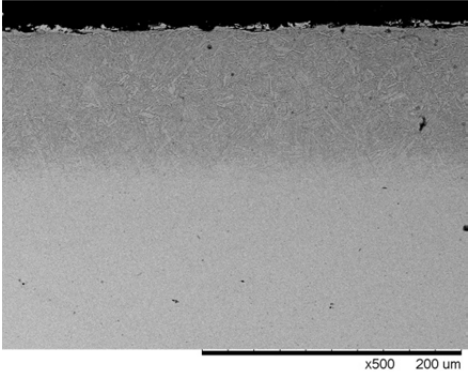
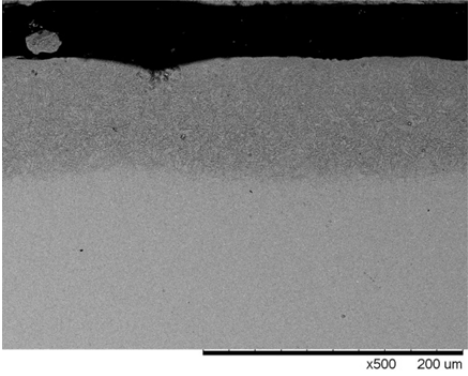
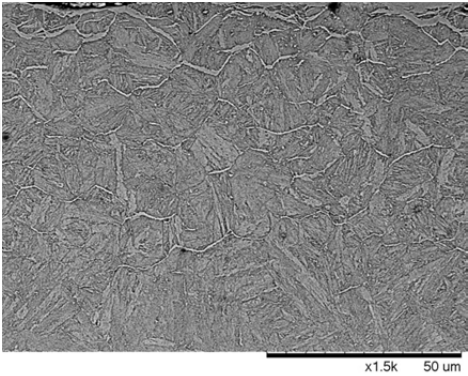
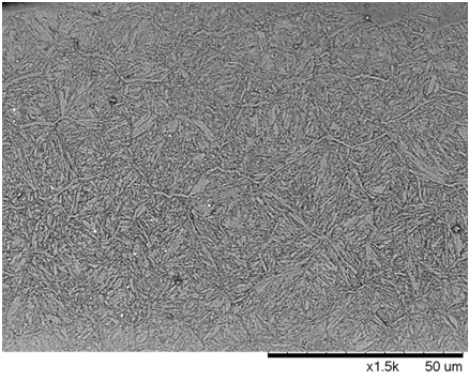
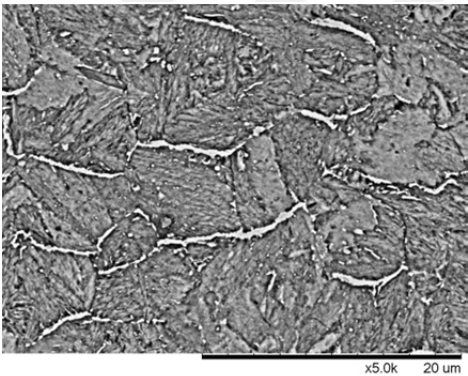
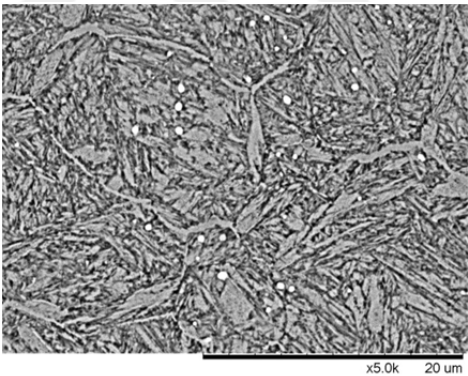
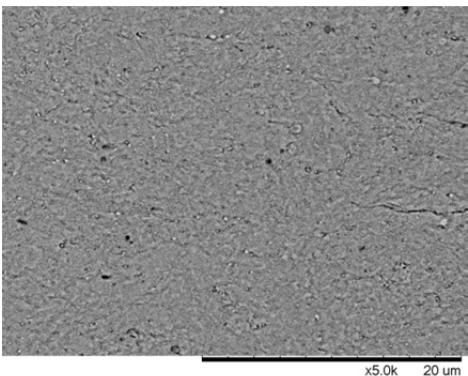
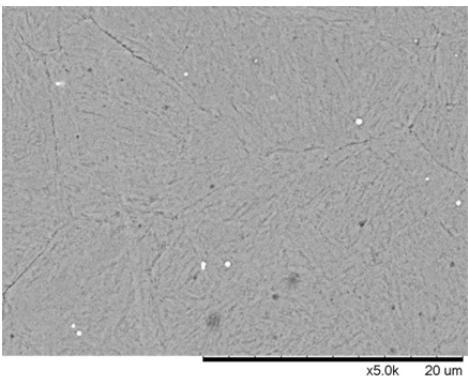
Şekil A.3 : DIN 1.2365 sıcak iş çeliği teknik veriler [34].



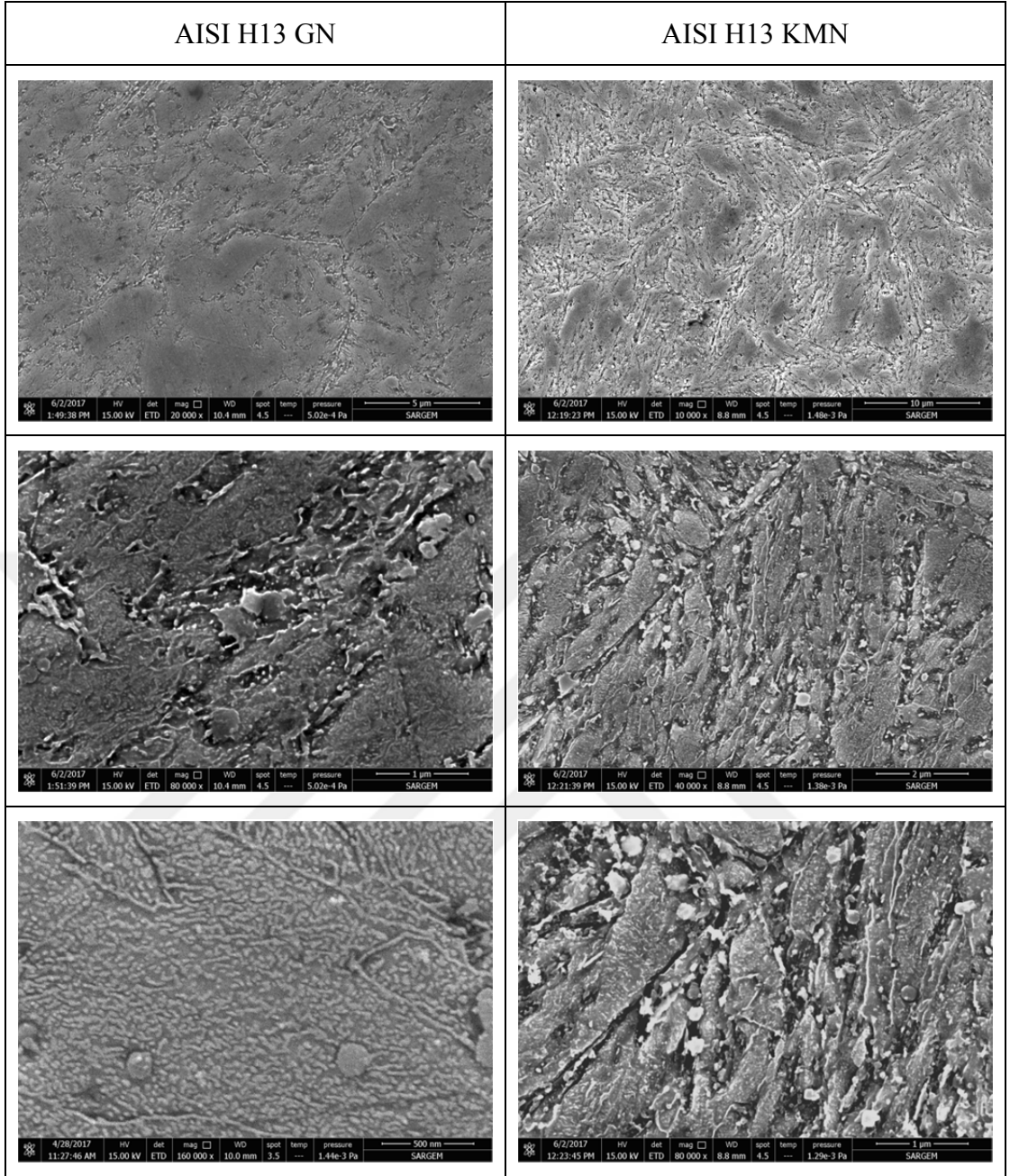
EK B: AISI H13 ve AISI H10 Numunelerin SEM Görüntüleri

	AISI H13 GN	AISI H13 KMN
Yüzey		
Yüzey		
Nitrasyon Tabakası		
Merkez		

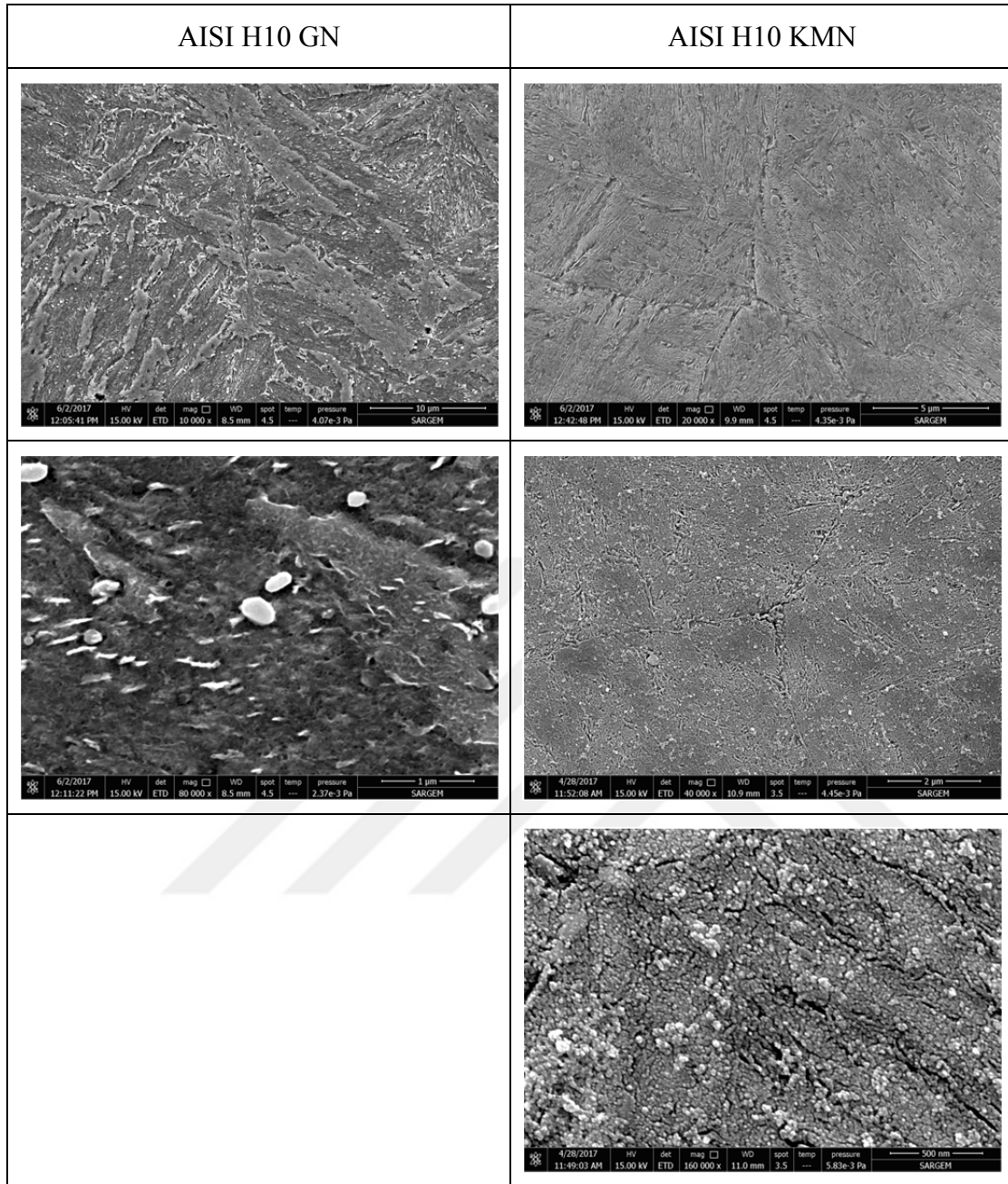
Şekil B.1 : AISI H13 numunelerin ısıtım şartlarına bağılı olarak mikroyapılarının karşılaştırılması.

	AISI H10 GN	AISI H10 KMN
Yüzey		
Yüzey		
Nitrasyon Tabakası		
Merkez		

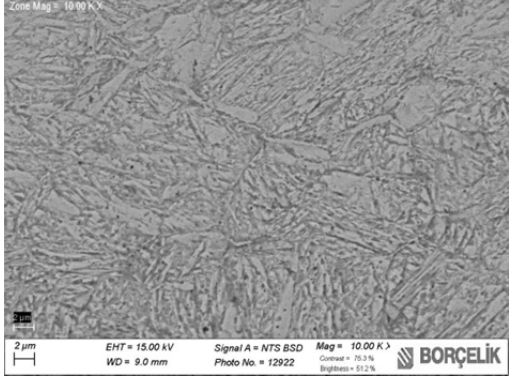
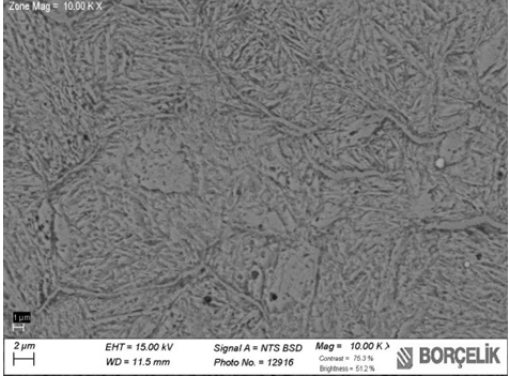
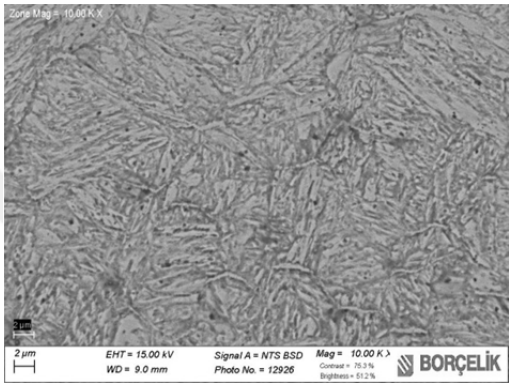
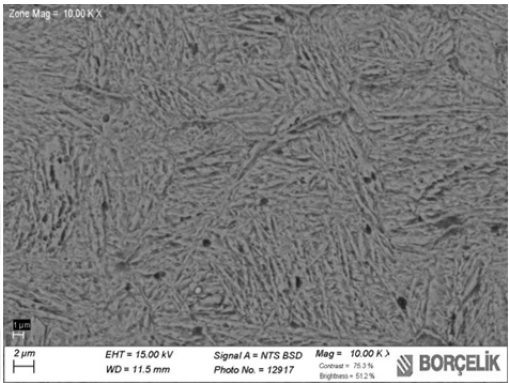
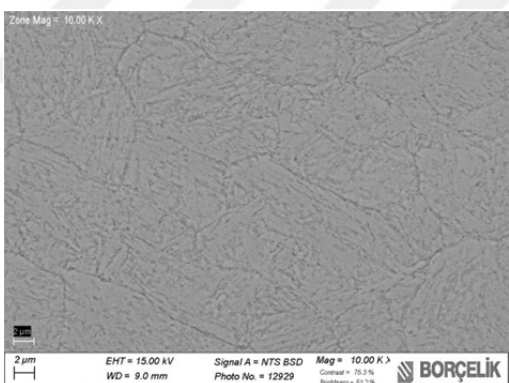
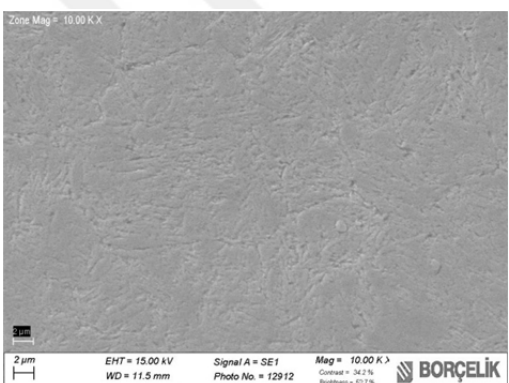
Şekil B.2 : AISI H10 numunelerin ısıt işlemlerine bağlı olarak mikroyapılarının karşılaştırılması.



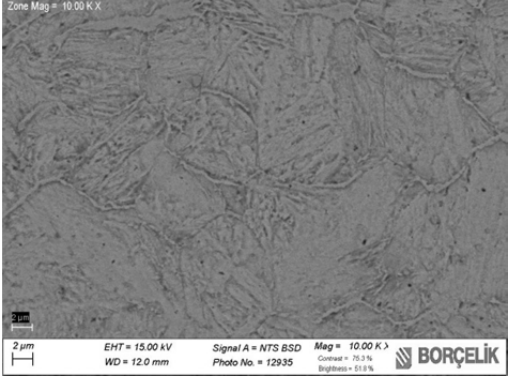
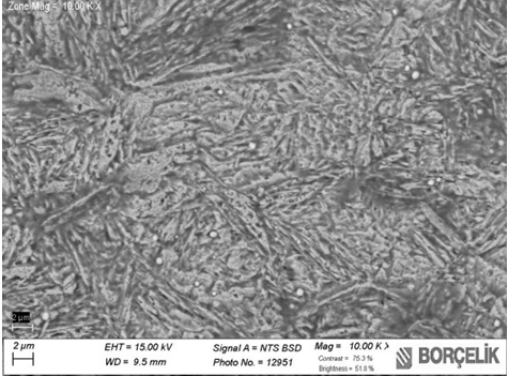
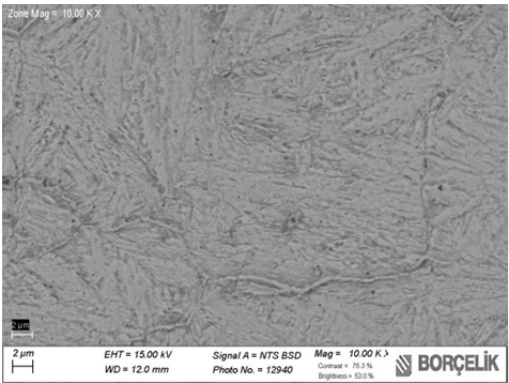
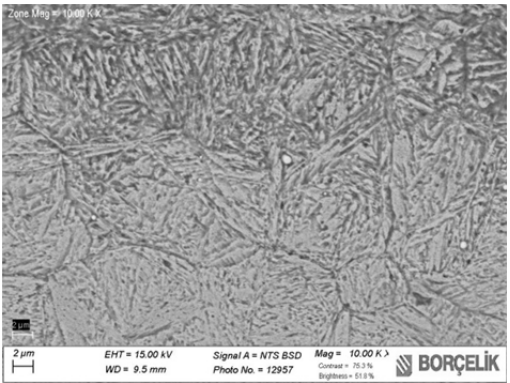
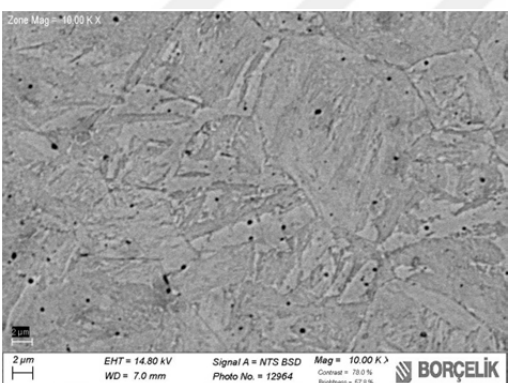
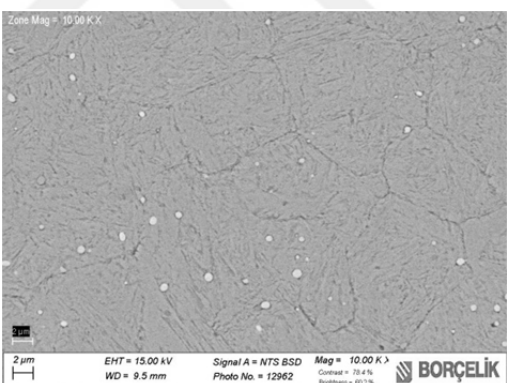
Şekil B.3 : AISI H13 numunelerin SEM fotoğrafları (Sakarya Üni. Merkez Lab.).



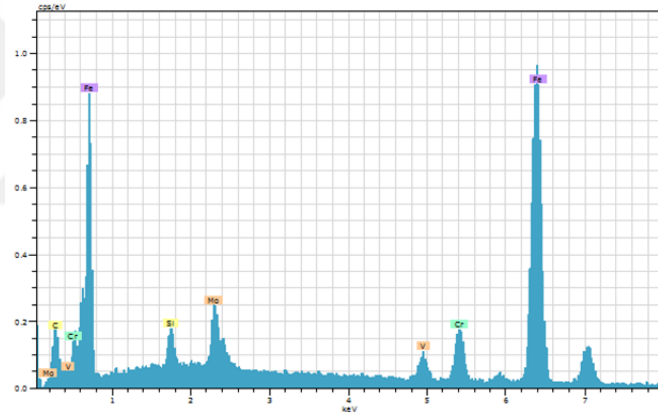
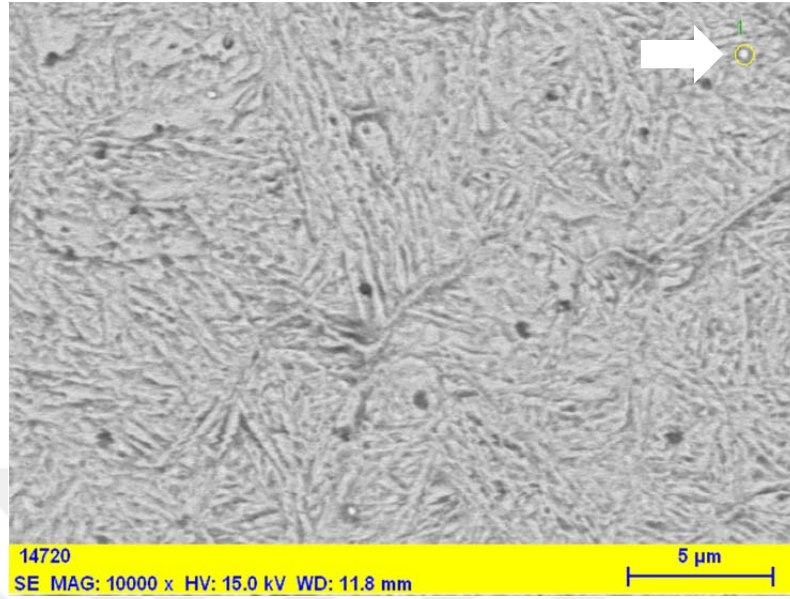
Şekil B.4 : AISI H13 numunelerin SEM fotoğrafları (Sakarya Üni. Merkez Lab.).

	AISI H13 GN	AISI H13 KMN
Yüzey		
Nitrasyon-Merkez Geçiş		
Merkez		

Şekil B.5 : AISI H13 numunelerin SEM fotoğrafları

	AISI H10 GN	AISI H10 KMN
Yüzey		
Nitrasyon-Merkez Geçiş		
Merkez		

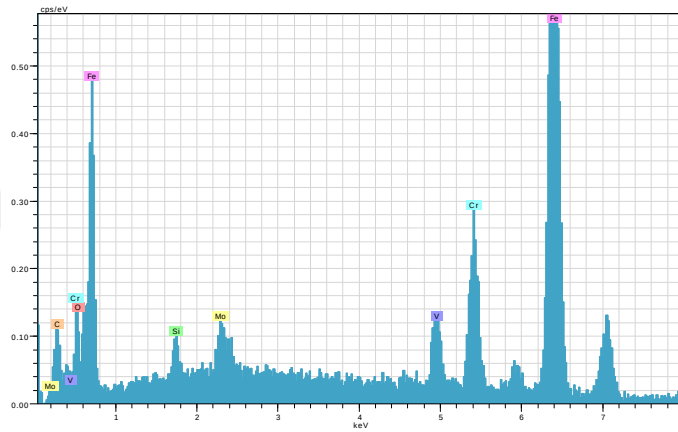
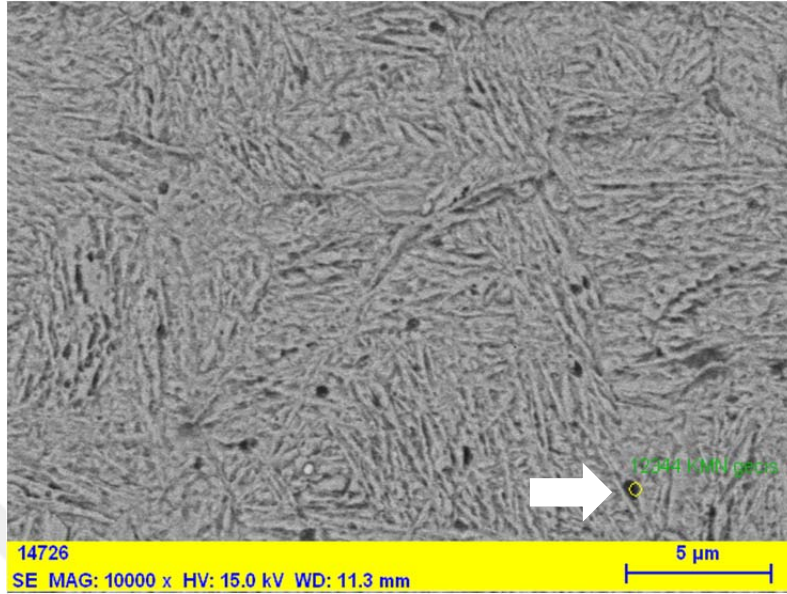
Şekil B.6 : AISI H10 numunelerin SEM fotoğrafları.



Spectrum: AISI H13 GN

Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
		[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[%]
Chromium	K-series	6.03	6.33	6.06	2.3
Iron	K-series	75.99	79.78	71.12	2.3
Silicon	K-series	1.40	1.47	2.60	0.1
Vanadium	K-series	2.58	2.71	2.65	0.3
Carbon	K-series	3.29	3.46	14.33	0.7
Molybdenum	L-series	5.96	6.26	3.25	0.3
Total:		95.25	100.00	100.00	

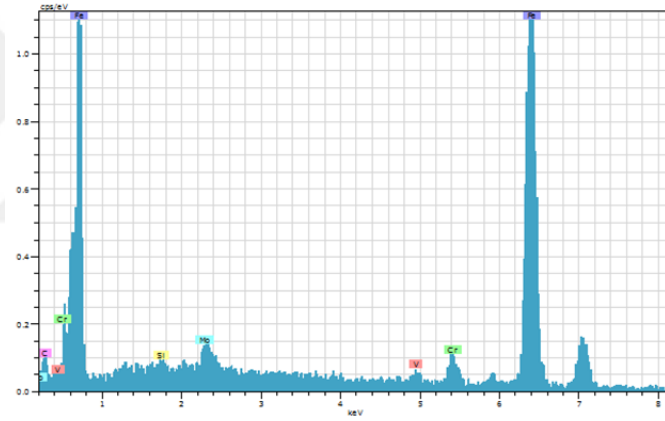
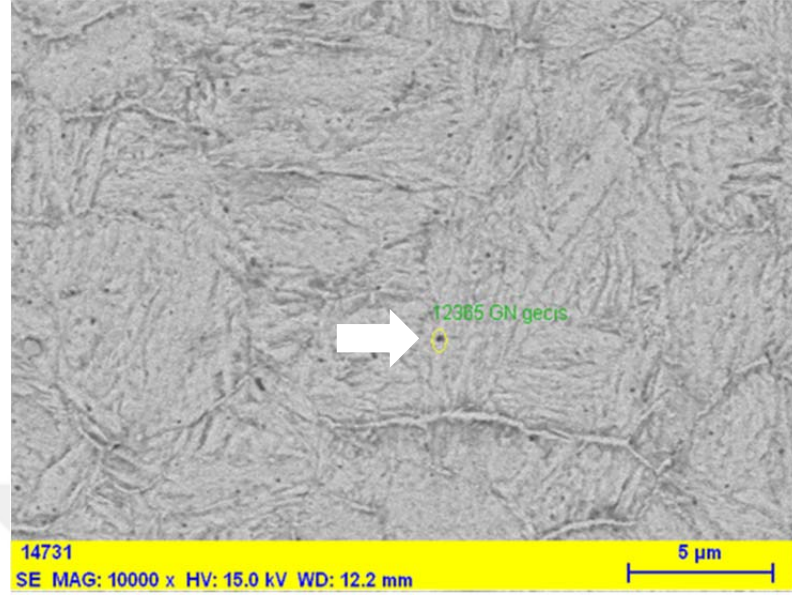
Şekil C.1 : AISI H13 GN numunenin EDS Analiz raporu



Spectrum: AISI H13 KMN

Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
		[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[%]
Silicon	K-series	0.33	0.34	0.62	0.1
Vanadium	K-series	4.33	4.40	4.41	0.5
Chromium	K-series	10.86	11.03	10.83	5.1
Iron	K-series	78.54	79.70	72.90	2.6
Molybdenum	L-series	1.89	1.92	1.02	0.2
Carbon	K-series	1.74	1.77	7.51	0.6
Oxygen	K-series	0.84	0.85	2.72	1.5

Şekil C.2 : AISI H13 KMN numunenin EDS analiz raporu.

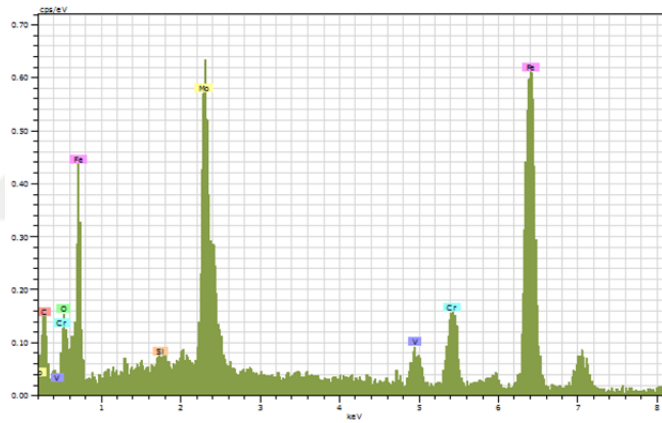
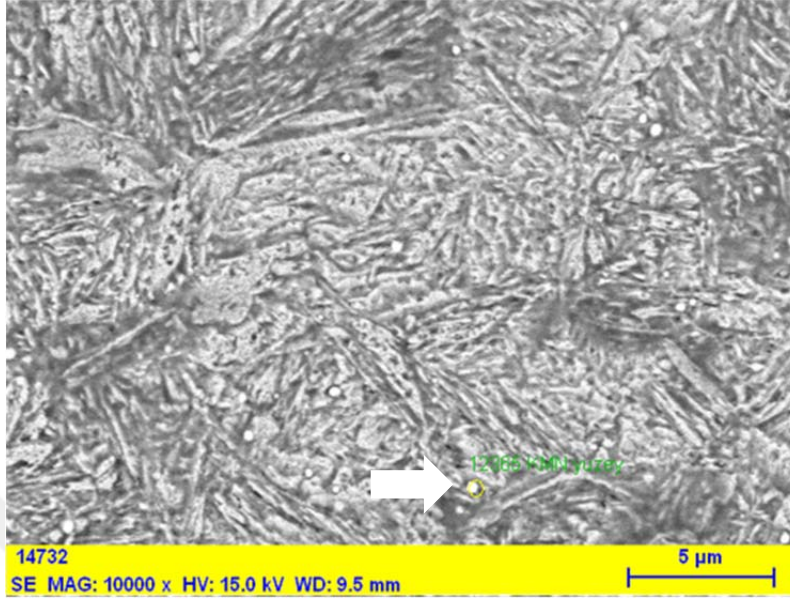


Spectrum: AISI H10 GN

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Vanadium	K-series	1.02	1.03	1.08	0.2
Chromium	K-series	3.46	3.52	3.59	2.2
Iron	K-series	88.56	90.12	85.65	2.9
Molybdenum	L-series	3.21	3.26	1.81	0.2
Carbon	K-series	1.54	1.57	6.93	0.5
Silicon	K-series	0.49	0.50	0.94	0.1

Total:		98.27	100.00	100.00	

Şekil C.3 : AISI H10 KMN numunenin EDS analiz raporu.



Spectrum: AISI H10 KMN

Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
		[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[%]
Vanadium	K-series	3.27	3.39	3.27	0.4
Chromium	K-series	7.70	7.97	7.54	4.7
Iron	K-series	60.57	62.72	55.23	2.1
Molybdenum	L-series	18.52	19.18	9.83	0.8
Silicon	K-series	0.31	0.33	0.57	0.1
Carbon	K-series	3.63	3.76	15.39	1.0
Oxygen	K-series	2.57	2.66	8.17	4.4

Şekil C.4 : AISI H10 KMN numunenin EDS analiz raporu.

EK D:

	RETAINED AUSTENITE DETERMINATION	Report n.
	% Volume X-ray Diffraction ASTM E 975 Practice	

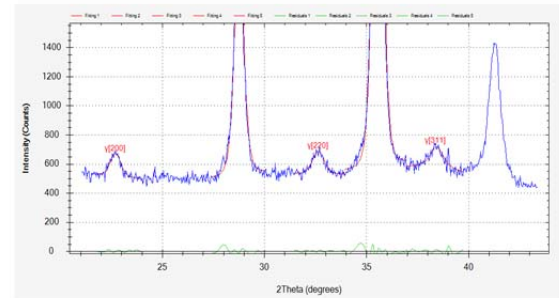
SUPPLY DATA			
Sample code	1.2344 0	Description	Drawing code
Customer name		Delivery note n.	Delivery note date 20/04/2017
Order n.		Order date 20/04/2017	Quantity 0
Job n.		Material	Heat n.
Treatment		Cycle	

INSTRUMENT DATA			
Manufacturer	GNR S.r.l. Via Torino 7 -Agrate Conturbia (NO) -Italia www.gnr.it		
Model	AreX	Radiation Type	Mo
Serial Number	00000AUS00	Collimator	1 mm

SPECIMEN DESCRIPTION			
Specimen used	No	Measure depth	0 mm
Check position			

ANALYSIS RESULTS			
------------------	--	--	--

Austenite Peaks $\gamma_{311}/\gamma_{220}$
 Austenite Peaks Ratio 1.42 {0.80 - 1.30}
 Ferrite Peaks $\alpha_{211}/\alpha_{200}$
 Ferrite Peaks Ratio 1.92 {1.50 - 2.20}
 Carbide Correction (Yes/No) No
 Carbide (%V) -
 ASTM Compliance (Yes/No) No
 Required retained austenite 0
 Retained Austenite (Result) 5.46 ± 0.02



Analysis date 09/04/2018 Technician/Operator name

NOTES

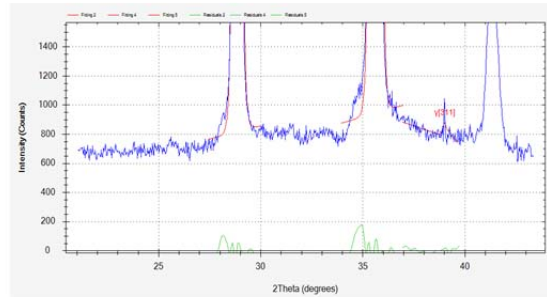
GNR srl	Via Torino 7 Agrate Conturbia (NO) ITALY	www.gnr.it
---------	--	--

Şekil D.1 : AISI H13 (DIN 1.2344) numunenin östenitleme sonrası kalıntı östenit miktarı.

	RETAINED AUSTENITE DETERMINATION % Volume X-ray Diffraction ASTM E 975 Practice	Report n.
---	--	------------------

SUPPLY DATA			
Sample code	1.2344 G	Description	Drawing code
Customer name		Delivery note n.	Delivery note date 20/04/2017
Order n.		Order date 20/04/2017	Quantity 0
Job n.		Material	Heat n.
Treatment		Cycle	
INSTRUMENT DATA			
Manufacturer	GNR S.r.l. Via Torino 7 - Agrate Conturbia (NO) - Italia www.gnr.it		
Model	AreX	Radiation Type	Mo
Serial Number	00000AUS00	Collimator	1 mm
SPECIMEN DESCRIPTION			
Specimen used	No	Measure depth	0 mm
Check position			
ANALYSIS RESULTS			

Austenite Peaks	$\gamma_{311}/\gamma_{220}$
Austenite Peaks Ratio	∞ {0.80 - 1.30}
Ferrite Peaks	$\alpha_{211}/\alpha_{200}$
Ferrite Peaks Ratio	1.7 {1.50 - 2.20}
Carbide Correction (Yes/No)	No
Carbide (%V)	-
ASTM Compliance (Yes/No)	No
Required retained austenite	0
Retained Austenite (Result)	< 1



Analysis date 09/04/2018 Technician/Operator name

NOTES

GNR srl	Via Torino 7 Agrate Conturbia (NO) ITALY	www.gnr.it
---------	--	--

Şekil D.2 : AISI H13 numunenin G ısıt işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.

SUPPLY DATA

Sample code	1.2344 K	Description	Drawing code		
Customer name		Delivery note n.	Delivery note date	20/04/2017	
Order n.		Order date	20/04/2017	Quantity	0
Job n.		Material	Heat n.		
Treatment		Cycle			

INSTRUMENT DATA

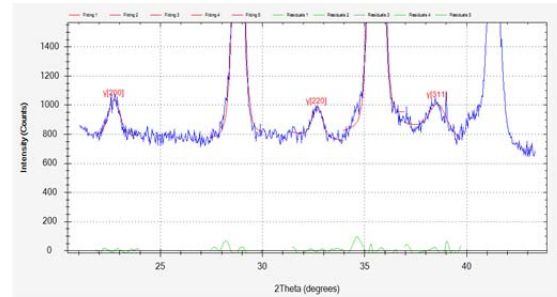
Manufacturer	GNR S.r.l. Via Torino 7 -Agrate Conturbia (NO) -Italia	www.gnr.it
Model	AreX	Radiation Type Mo
Serial Number	00000AUS00	Collimator 1 mm

SPECIMEN DESCRIPTION

Specimen used	No	Measure depth	0 mm
Check position			

ANALYSIS RESULTS

Austenite Peaks	$\gamma_{311}/\gamma_{220}$
Austenite Peaks Ratio	1.38 {0.80 - 1.30}
Ferrite Peaks	$\alpha_{211}/\alpha_{200}$
Ferrite Peaks Ratio	1.96 {1.50 - 2.20}
Carbide Correction {Yes/No}	No
Carbide {%V}	-
ASTM Compliance {Yes/No}	No
Required retained austenite	0
Retained Austenite (Result)	4.96 ± 0.03



Analysis date	09/04/2018	Technician/Operator name
----------------------	-------------------	---------------------------------

NOTES

GNR srl

Via Torino 7 Agrate Conturbia (NO) ITALY

www.gnr.it

Şekil D.3 : AISI H13 numunenin K işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.

	RETAINED AUSTENITE DETERMINATION % Volume X-ray Diffraction ASTM E 975 Practice	Report n.
---	--	------------------

SUPPLY DATA

Sample code	1.2344 KM	Description	Drawing code
Customer name		Delivery note n.	Delivery note date 20/04/2017
Order n.		Order date 20/04/2017	Quantity 0
Job n.		Material	Heat n.
Treatment		Cycle	

INSTRUMENT DATA

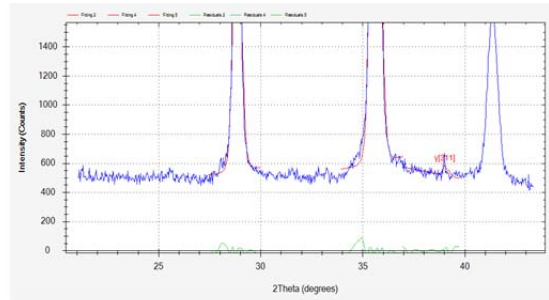
Manufacturer	GNR S.r.l. Via Torino 7 -Agrate Conturbia (NO) -Italia	www.gnr.it	
Model	AreX	Radiation Type	Mo
Serial Number	00000AUS00	Collimator	1 mm

SPECIMEN DESCRIPTION

Specimen used	No	Measure depth	0 mm
Check position			

ANALYSIS RESULTS

Austenite Peaks	$\gamma_{311}/\gamma_{220}$
Austenite Peaks Ratio	∞ (0.80 - 1.30)
Ferrite Peaks	$\alpha_{211}/\alpha_{200}$
Ferrite Peaks Ratio	1.98 (1.50 - 2.20)
Carbide Correction (Yes/No)	No
Carbide (%V)	-
ASTM Compliance (Yes/No)	No
Required retained austenite	0
Retained Austenite (Result)	< 1



Analysis date 09/04/2018 **Technician/Operator name**

NOTES

GNR srl	Via Torino 7 Agrate Conturbia (NO) ITALY	www.gnr.it
---------	--	--

Şekil D.4 : AISI H13 numunenin KM işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.

	RETAINED AUSTENITE DETERMINATION		Report n.
	% Volume X-ray Diffraction ASTM E 975 Practice		

SUPPLY DATA

Sample code	1.2365 0	Description	Drawing code
Customer name		Delivery note n.	Delivery note date
Order n.		Order date	20/04/2017
Job n.		Material	Quantity
Treatment		Cycle	Heat n.

INSTRUMENT DATA

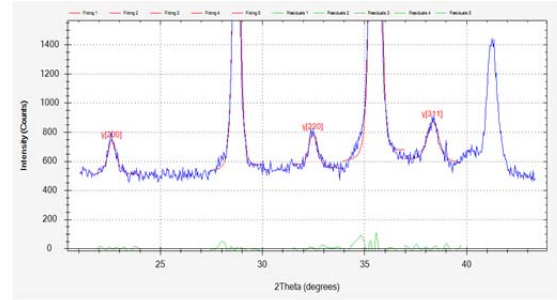
Manufacturer	GNR S.r.l. Via Torino 7 -Agrate Conturbia (NO) -Italia	www.gnr.it
Model	AreX	Radiation Type
Serial Number	00000AUS00	Collimator
		1 mm

SPECIMEN DESCRIPTION

Specimen used	No	Measure depth	0 mm
Check position			

ANALYSIS RESULTS

Austenite Peaks	$\gamma_{311}/\gamma_{220}$
Austenite Peaks Ratio	1.63 {0.80 - 1.30}
Ferrite Peaks	$\alpha_{211}/\alpha_{200}$
Ferrite Peaks Ratio	1.98 {1.50 - 2.20}
Carbide Correction (Yes/No)	No
Carbide (%V)	-
ASTM Compliance (Yes/No)	No
Required retained austenite	0
Retained Austenite (Result)	6.77 $\pm$ 0.03



Analysis date 09/04/2018 Technician/Operator name

NOTES

GNR srl	Via Torino 7 Agrate Conturbia (NO) ITALY	www.gnr.it
---------	--	--

Şekil D.5 : AISI H10 (DIN 1.2365) numunenin östenitleme sonrası kalıntı östenit miktarı.

	RETAINED AUSTENITE DETERMINATION		Report n.
	% Volume X-ray Diffraction ASTM E 975 Practice		

SUPPLY DATA

Sample code	1.2365 G	Description	Drawing code
Customer name		Delivery note n.	Delivery note date 20/04/2017
Order n.		Order date 20/04/2017	Quantity 0
Job n.		Material	Heat n.
Treatment		Cycle	

INSTRUMENT DATA

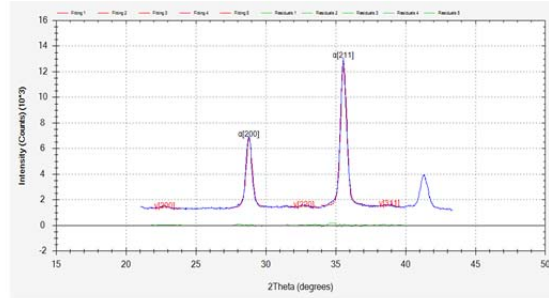
Manufacturer	GNR S.r.l. Via Torino 7 -Agrate Conturbia (NO) -Italia	www.gnr.it
Model	AreX	Radiation Type Mo
Serial Number	00000AUS00	Collimator 1 mm

SPECIMEN DESCRIPTION

Specimen used	No	Measure depth	0 mm
Check position			

ANALYSIS RESULTS

Austenite Peaks	$\gamma_{311}/\gamma_{220}$
Austenite Peaks Ratio	1.77 (0.80 - 1.30)
Ferrite Peaks	$\alpha_{211}/\alpha_{200}$
Ferrite Peaks Ratio	1.68 (1.50 - 2.20)
Carbide Correction (Yes/No)	No
Carbide (%V)	-
ASTM Compliance (Yes/No)	No
Required retained austenite	0
Retained Austenite (Result)	1.9 ± 0.03



Analysis date 09/04/2018 **Technician/Operator name**

NOTES

GNR srl	Via Torino 7 Agrate Conturbia (NO) ITALY	www.gnr.it
---------	--	--

Şekil D.6 : AISI H10 numunenin G ısıt işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.

 ANALYTICAL INSTRUMENTS GROUP	RETAINED AUSTENITE DETERMINATION		Report n.
	% Volume X-ray Diffraction ASTM E 975 Practice		

SUPPLY DATA

Sample code	1.2365 K	Description	Drawing code
Customer name		Delivery note n.	Delivery note date 20/04/2017
Order n.		Order date 20/04/2017	Quantity 0
Job n.		Material	Heat n.
Treatment		Cycle	

INSTRUMENT DATA

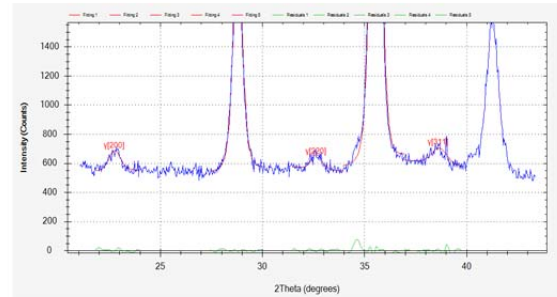
Manufacturer	GNR S.r.l. Via Torino 7 - Agrate Conturbia (NO) - Italia	www.gnr.it
Model	AreX	Radiation Type Mo
Serial Number	00000AUS00	Collimator 1 mm

SPECIMEN DESCRIPTION

Specimen used	No	Measure depth	0 mm
Check position			

ANALYSIS RESULTS

Austenite Peaks	$\gamma_{311}/\gamma_{220}$
Austenite Peaks Ratio	1.44 {0.80 - 1.30}
Ferrite Peaks	$\alpha_{211}/\alpha_{200}$
Ferrite Peaks Ratio	2.01 {1.50 - 2.20}
Carbide Correction (Yes/No)	No
Carbide (%V)	-
ASTM Compliance (Yes/No)	No
Required retained austenite	0
Retained Austenite (Result)	3.85 ± 0.03



Analysis date	09/04/2018	Technician/Operator name
----------------------	------------	---------------------------------

NOTES

GNR srl	Via Torino 7 Agrate Conturbia (NO) ITALY	www.gnr.it
---------	--	--

Şekil D.7 : AISI H10 numunenin K işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.

	RETAINED AUSTENITE DETERMINATION		Report n.
	% Volume X-ray Diffraction ASTM E 975 Practice		

SUPPLY DATA

Sample code	1.2365 KM	Description	Drawing code
Customer name		Delivery note n.	Delivery note date 20/04/2017
Order n.		Order date 20/04/2017	Quantity 0
Job n.		Material	Heat n.
Treatment		Cycle	

INSTRUMENT DATA

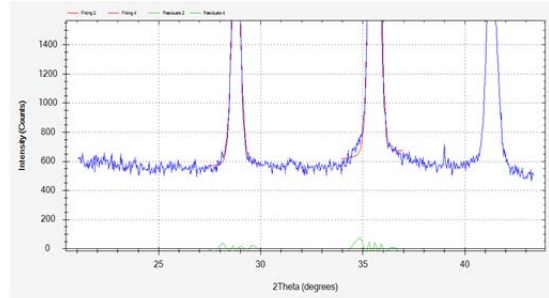
Manufacturer	GNR S.r.l. Via Torino 7 -Agrate Conturbia (NO) -Italia	www.gnr.it
Model	AreX	Radiation Type Mo
Serial Number	00000AUS00	Collimator 1 mm

SPECIMEN DESCRIPTION

Specimen used	No	Measure depth	0 mm
Check position			

ANALYSIS RESULTS

Austenite Peaks	$\gamma_{311}/\gamma_{220}$
Austenite Peaks Ratio	- {0.80 - 1.30}
Ferrite Peaks	$\alpha_{211}/\alpha_{200}$
Ferrite Peaks Ratio	2.01 {1.50 - 2.20}
Carbide Correction (Yes/No)	No
Carbide (%V)	-
ASTM Compliance (Yes/No)	No
Required retained austenite	0
Retained Austenite (Result)	< 1



Analysis date 09/04/2018 **Technician/Operator name**

NOTES

GNR srl	Via Torino 7 Agrate Conturbia (NO) ITALY	www.gnr.it
---------	--	--

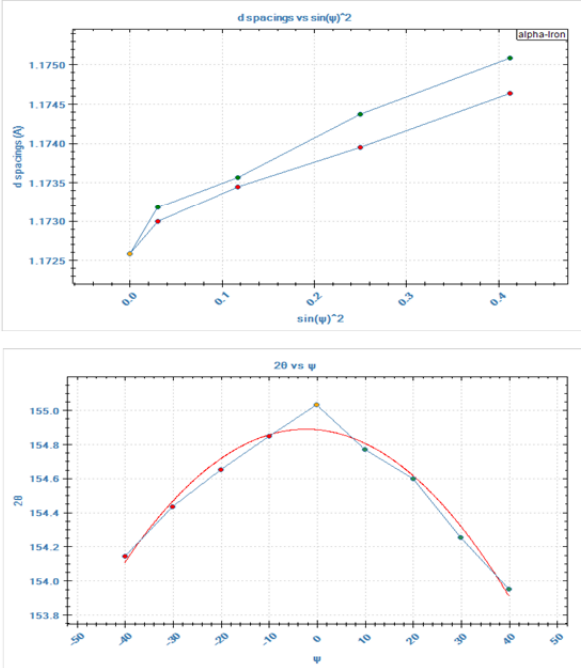
Şekil D.8 : AISI H10 numunenin KM işlem sonrası kalıntı östenit miktarı.

EK E: Kalıntı Gerilme Analizi Raporları

	REPORT DIFFRATTOMETRO (DIFFRACTOMETER REPORT)	
---	--	--

Date::	11:50 AM:5/9/2018	Report n.		Customer:	
Purchase order:		Supplier:		Measurement position:	1.23440

Residual Stress [Mpa]:	645 ± 12	-	-	-
Shear [Mpa]:	28 ± 2	-	-	-

Instrumental Set up			
Instrument S/N kV mA Anode/Filter Collimator (Ø mm) Detector Reflection hkl PSI Scan Psi n. Max Psi Range (°) Step time (s)	StressX 000AAA 25 4 Cr/V 2 mm LPSD 211 Principal - Symmetric 9 -40.00 to 40.00 30		

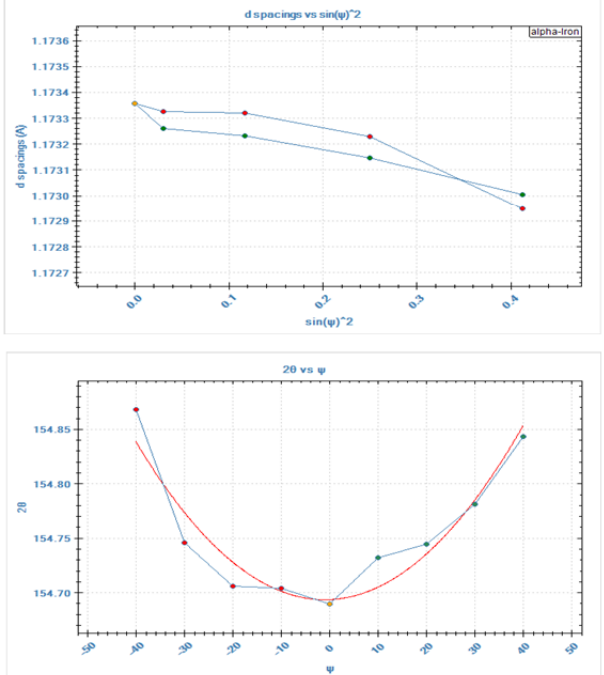
Standard Practice:	
Notes:	
 	Operator
	Operator signature

Şekil E.1 : AISI H13 (DIN 1.2244) numunenin östenitleme sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.

 ANALYTICAL INSTRUMENTS GROUP	REPORT DIFFRATTOMETRO (DIFFRACTOMETER REPORT)	

Date:	12:40 PM:5/9/2018	Report n.		Customer:	
Purchase order:			Supplier:		
Mesurement position:	1.2344G			Compliance:	

Residual Stress [Mpa]:	-116 ± 4	-	-	-
Shear [Mpa]:	-3 ± 1	-	-	-

Instrumental Set up		
Instrument	StressX	
S/N	000AAA	
kV	Not available	
mA	Not available	
Anode/Filter	Cr/V	
Collimator (Ø mm)	0.5 mm	
Detector	LPSD	
Reflection hkl	211	
PSI Scan	Principal - Symmetric	
Psi n.	9	
Max Psi Range (°)	-40.00 to 40.00	
Step time (s)	30	

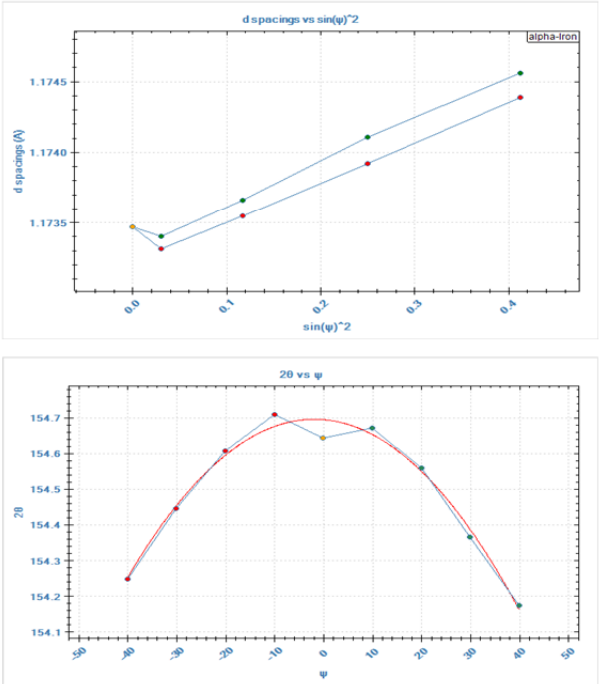
Standard Practice:			
Notes:	 	Operator	
		Operator signature	

Şekil E.2 : AISI H13 numunenin G ısıt işlemler sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.

	REPORT DIFFRATTOMETRO (DIFFRACTOMETER REPORT)	

Date:	3:08 PM:5/4/2018	Report n.		Customer:	
Purchase order:	1.2344K		Supplier:		
Measurement position:				Compliance:	

Residual Stress [Mpa]:	406 ± 10	-	-	-
		-	-	-
Shear [Mpa]:	13 ± 2	-	-	-

Instrumental Set up		
Instrument	StressX	
S/N	000AAA	
kV	24	
mA	4	
Anode/Filter	Cr/V	
Collimator (Ø mm)	2 mm	
Detector	LPSD	
Reflection hkl	211	
PSI Scan	Principal - Symmetric	
Psi n.	9	
Max Psi Range (°)	-40.00 to 40.00	
Step time (s)	30	

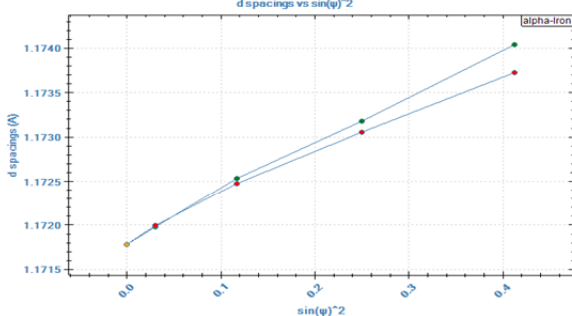
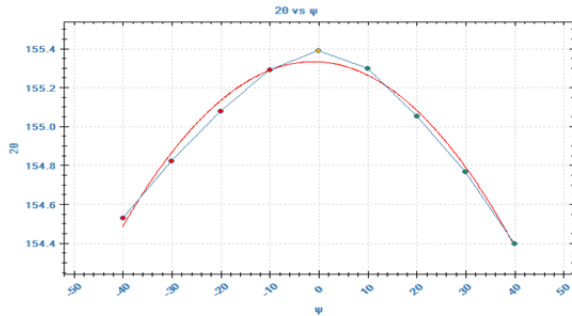
Standard Practice:	UNI EN15305, ASTM E916	
Notes:		Operator
		Operator signature

Şekil E.3 : AISI H13 numunenin kriyojenik işlem sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.

 ANALYTICAL INSTRUMENTS GROUP	REPORT DIFFRATTOMETRO (DIFFRACTOMETER REPORT)	

Date:	12:24 PM:5/9/2018	Report n.		Customer:	
Purchase order:	1.2344KM		Supplier:		
Mesurement position:				Compliance:	

Residual Stress [Mpa]:	679 ± 7	-	-	-
		-	-	-
Shear [Mpa]:	13 ± 1	-	-	-

Instrumental Set up		 	
Instrument	StressX		
S/N	000AAA		
kV	25		
mA	4		
Anode/Filter	Cr/V		
Collimator (Ø mm)	2 mm		
Detector	LPSD		
Reflection hkl	211		
PSI Scan	Principal - Symmetric		
Psi n.	9		
Max Psi Range (°)	-40.00 to 40.00		
Step time (s)	30		

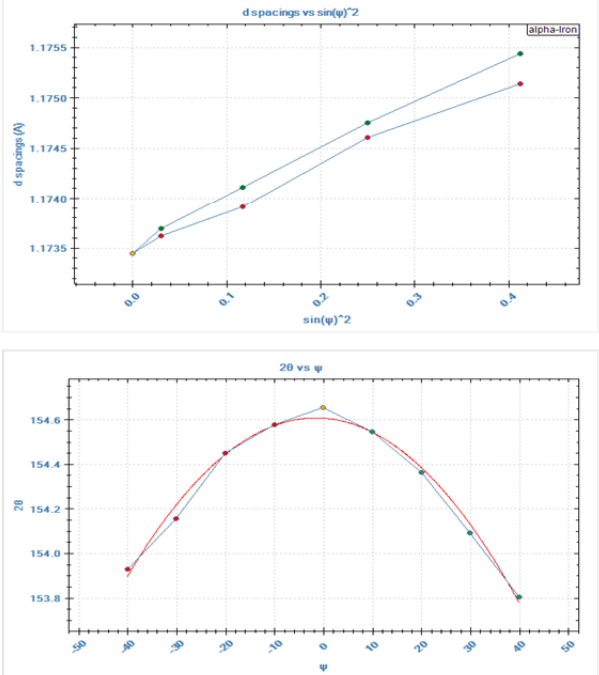
Standard Practice:			
Notes:	 	Operator	
		Operator signature	

Şekil E.4 : AISI H13 numunenin KM işlem sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.

	REPORT DIFFRATTOMETRO (DIFFRACTOMETER REPORT)	

Date:	2:07 PM:5/9/2018	Report n.		Customer:	
Purchase order:	1.2365 0		Supplier:		
Measurement position:				Compliance:	

Residual Stress [Mpa]:	599 ± 8	-	-	-
		-	-	-
Shear [Mpa]:	18 ± 2	-	-	-

Instrumental Set up		
Instrument	StressX	
S/N	000AAA	
kV	25	
mA	4	
Anode/Filter	Cr/V	
Collimator (Ø mm)	2 mm	
Detector	LPSD	
Reflection hkl	211	
PSI Scan	Principal - Symmetric	
Psi n.	9	
Max Psi Range (°)	-40.00 to 40.00	
Step time (s)	30	

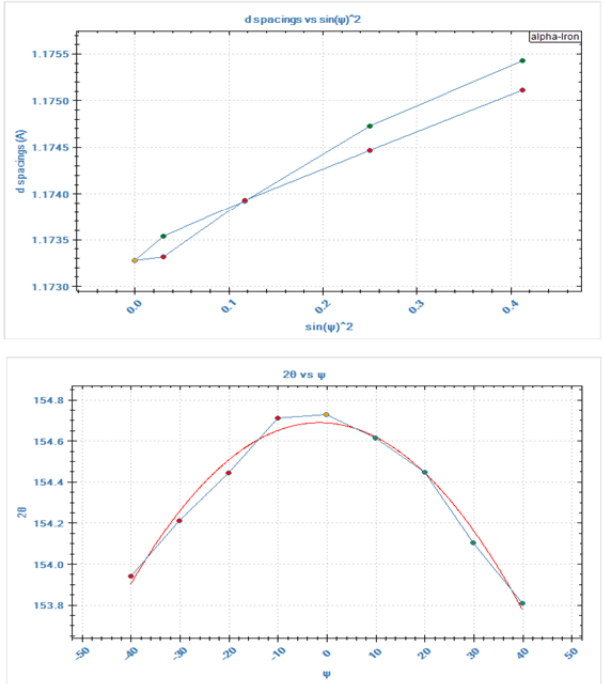
Standard Practice:		
Notes:		Operator
		Operator signature

Şekil E.5 : AISI H10 numunenin östenitleme sonrası kalıntı gerilme raporu.

 ANALYTICAL INSTRUMENTS GROUP	REPORT DIFFRATTOMETRO (DIFFRACTOMETER REPORT)	

Date:	2:15 PM:5/9/2018	Report n.		Customer:	
Purchase order:			Supplier:		
Mesurement position:	1.2365G			Compliance:	

Residual Stress [Mpa]:	669 ± 11	-	-	-
		-	-	-
Shear [Mpa]:	18 ± 2	-	-	-

Instrumental Set up		
Instrument	StressX	
S/N	000AAA	
kV	25	
mA	4	
Anode/Filter	Cr/V	
Collimator (Ø mm)	2 mm	
Detector	LPSD	
Reflection hkl	211	
PSI Scan	Principal - Symmetric	
Psi n.	9	
Max Psi Range (°)	-40.00 to 40.00	
Step time (s)	30	

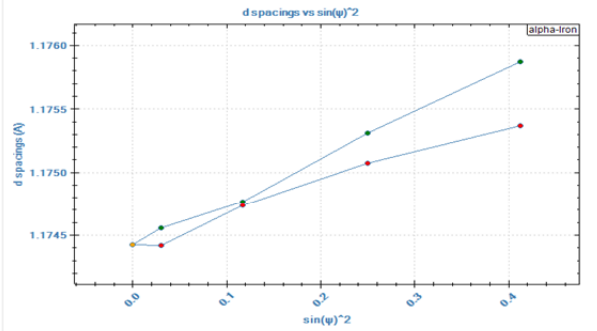
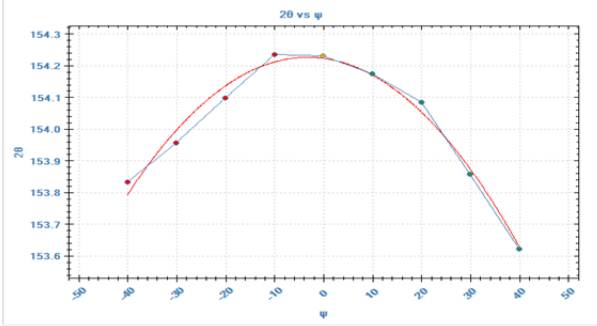
Standard Practice:			
Notes:		Operator	
		Operator signature	

Şekil E.6 : AISI H10 numunenin G ısıt işlemler sonrası kalıntı gerilme analiz raporu.

	REPORT DIFFRATTOMETRO (DIFFRACTOMETER REPORT)	

Date:	2:31 PM:5/9/2018	Report n.		Customer:	
Purchase order:	1.2365 K		Supplier:		
Measurement position:				Compliance:	1.2365K

Residual Stress [Mpa]:	413 ± 10	-	-	-
		-	-	-
Shear [Mpa]:	23 ± 2	-	-	-

Instrumental Set up		
Instrument	StressX	
S/N	000AAA	
kV	25	
mA	4	
Anode/Filter	Cr/V	
Collimator (Ø mm)	2 mm	
Detector	LPSD	
Reflection hkl	211	
PSI Scan	Principal - Symmetric	
Psi n.	9	
Max Psi Range (°)	-40.00 to 40.00	
Step time (s)	30	

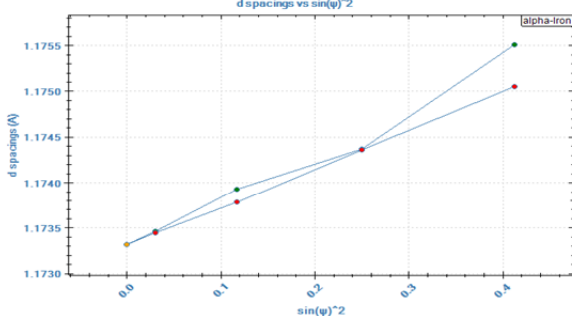
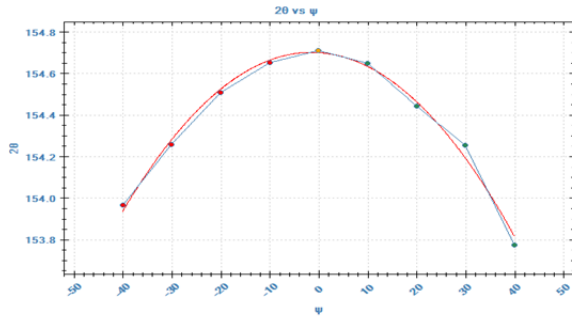
Standard Practice:		
Notes:	 	Operator
		Operator signature

Şekil E.7 : AISI H10 numunenin kriyojenik işlem sonrası kalıntı gerilme analizi raporu.

 ANALYTICAL INSTRUMENTS GROUP	REPORT DIFFRATTOMETRO (DIFFRACTOMETER REPORT)	

Date:	2:43 PM:5/9/2018	Report n.		Customer:	
Purchase order:			Supplier:		
Mesurement position:	1.2365KM			Compliance:	

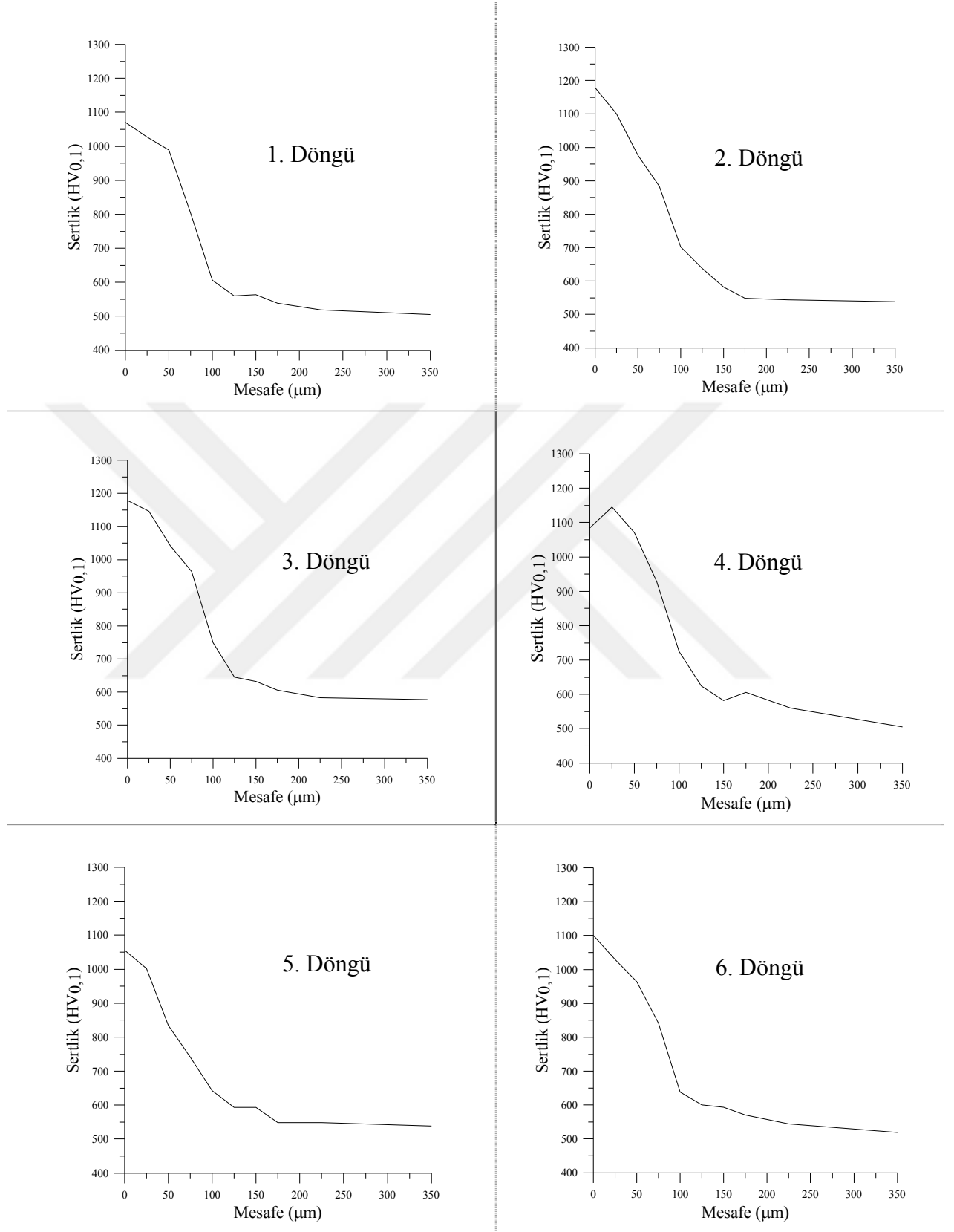
Residual Stress [Mpa]:	650 ± 8	-	-	-
		-	-	-
Shear [Mpa]:	16 ± 2	-	-	-

Instrumental Set up		 
Instrument	StressX	
S/N	000AAA	
kV	25	
mA	4	
Anode/Filter	Cr/V	
Collimator (Ø mm)	2 mm	
Detector	LPSD	
Reflection hkl	211	
PSI Scan	Principal - Symmetric	
Psi n.	9	
Max Psi Range (°)	-40.00 to 40.00	
Step time (s)	30	

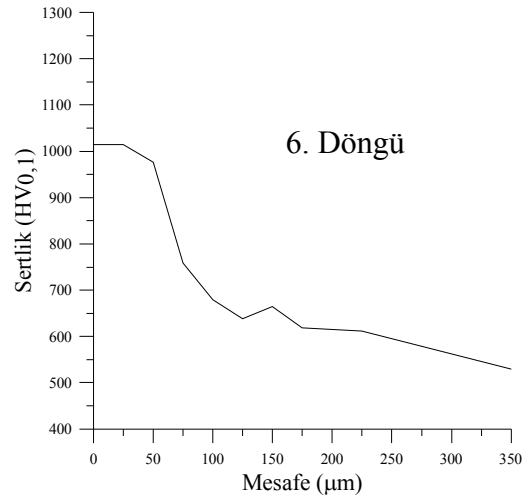
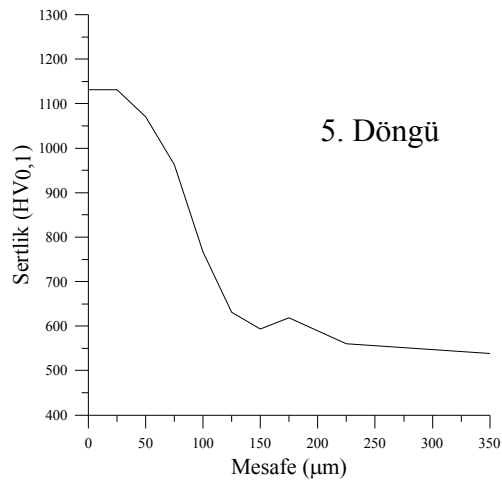
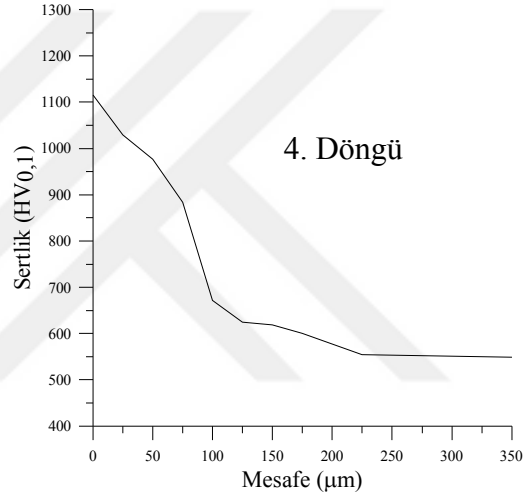
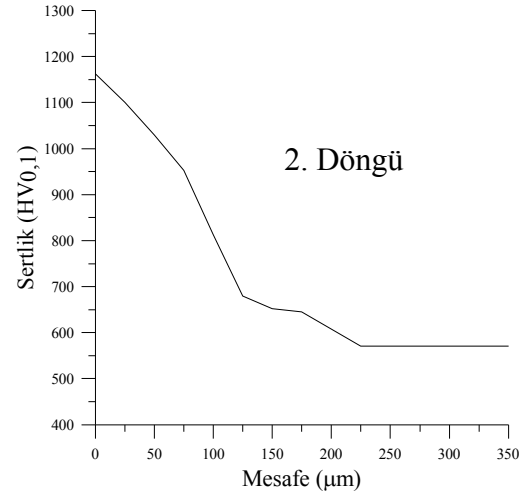
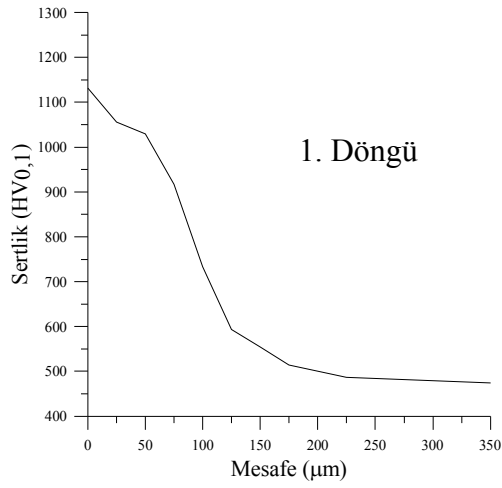
Standard Practice:		
Notes:		Operator
		Operator signature

Şekil E.8 : AISI H10 numunenin KM işlem sonrası gerilme analizi raporu.

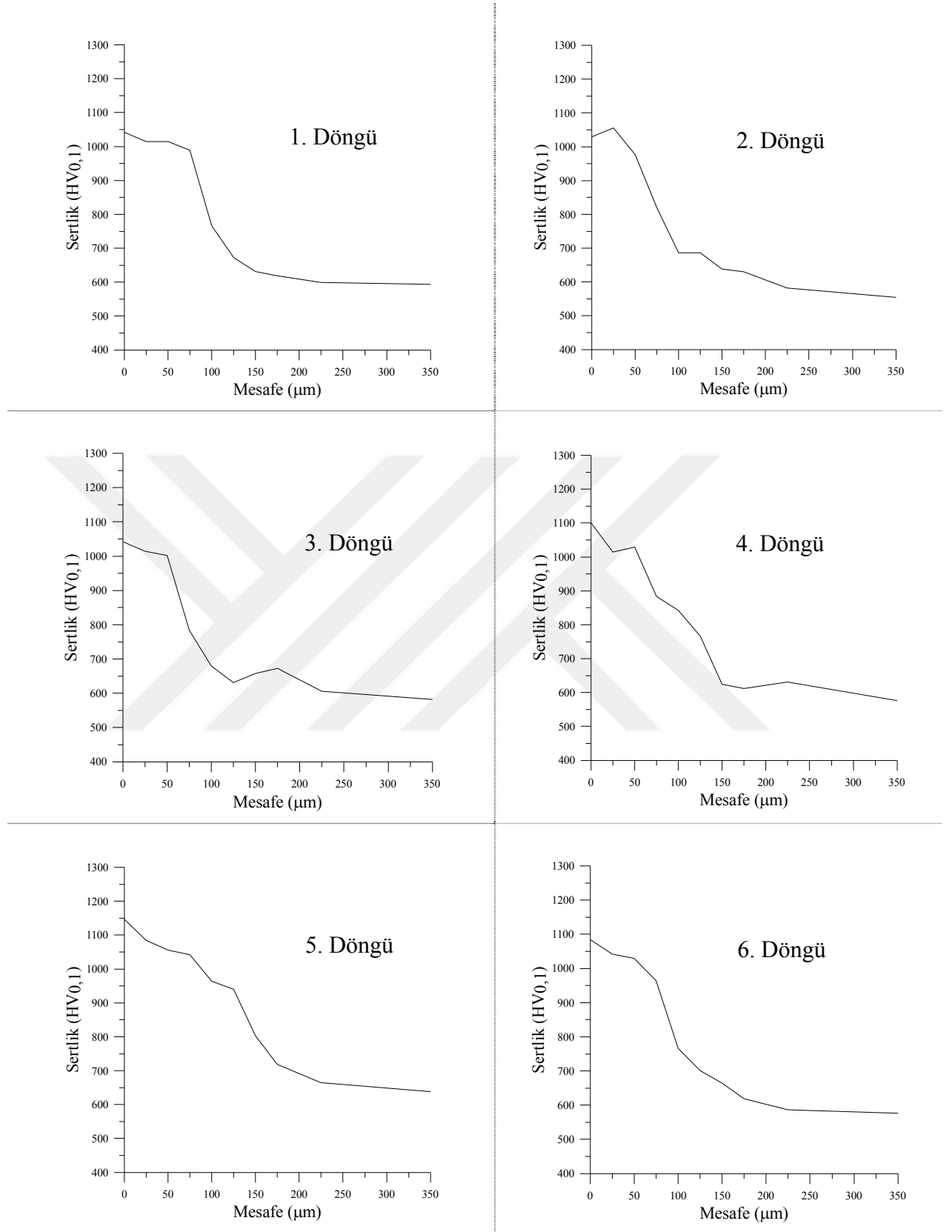
EK F: Isıl Döngü Sertlik Profilleri



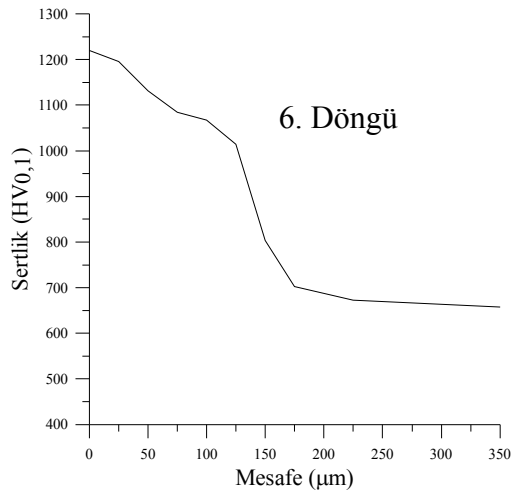
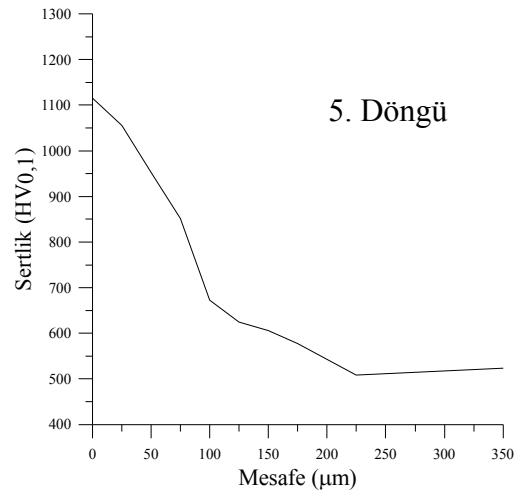
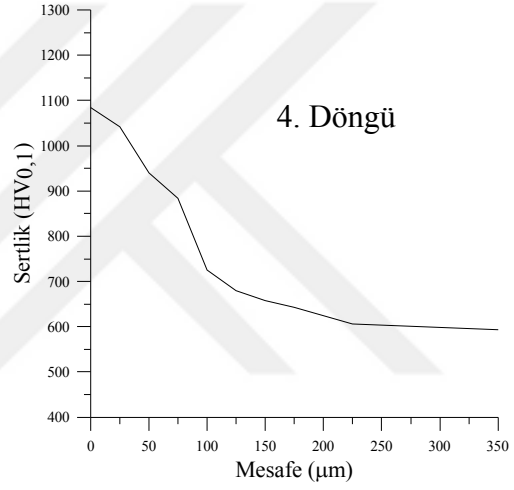
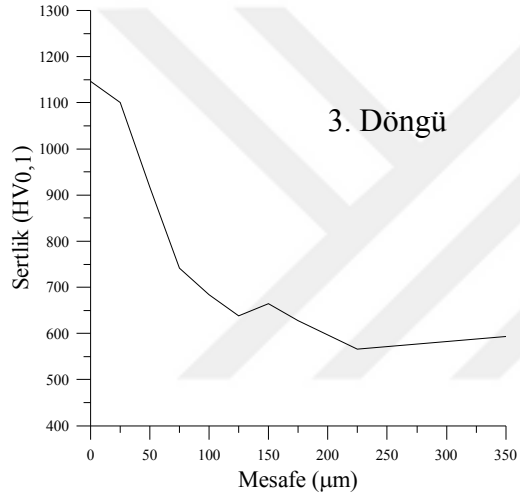
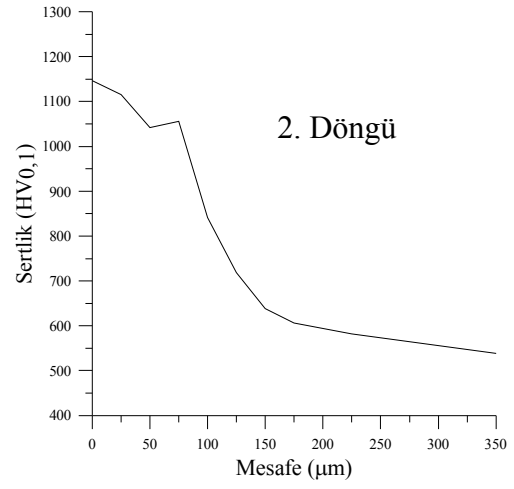
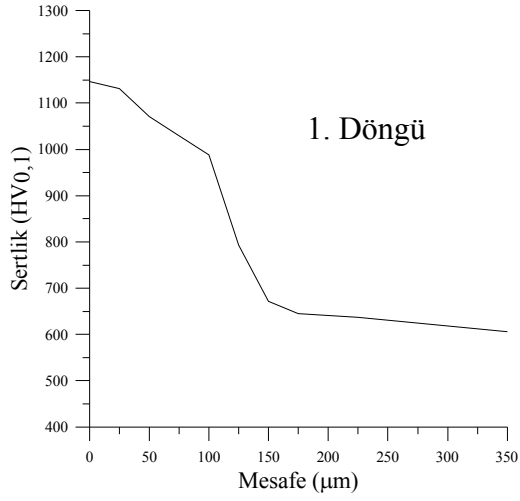
Şekil F.1 : AISI H13 GN numunelerin ısııl döngüler sonunda elde edilen sertlik profilleri.



Şekil F.2 : AISI H13 KMN numunelerin ısı döngüler sonunda elde edilen sertlik profilleri.

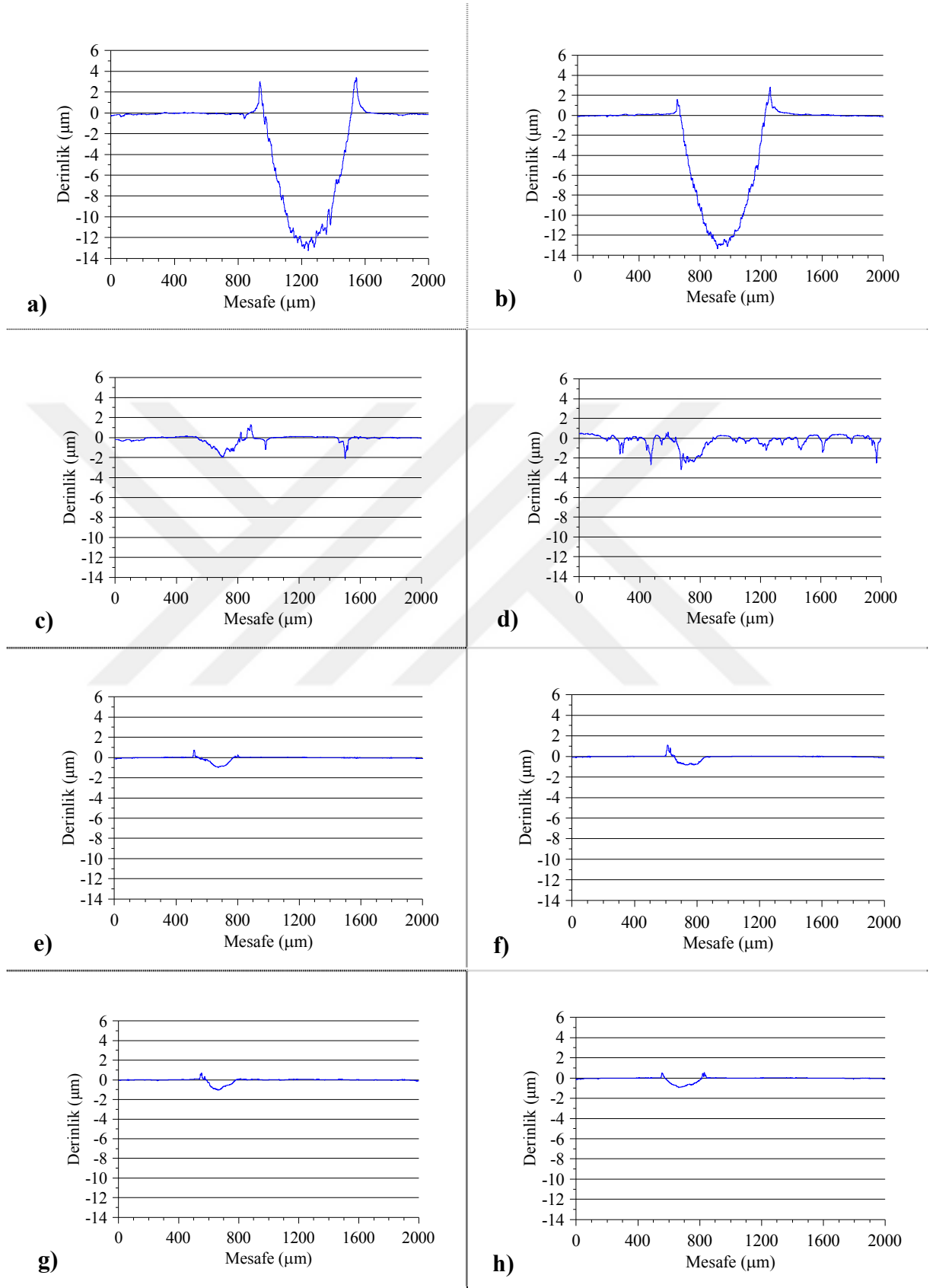


Şekil F.3 : AISI H10 GN numunelerin ısııl döngüler sonunda elde edilen sertlik profilleri.

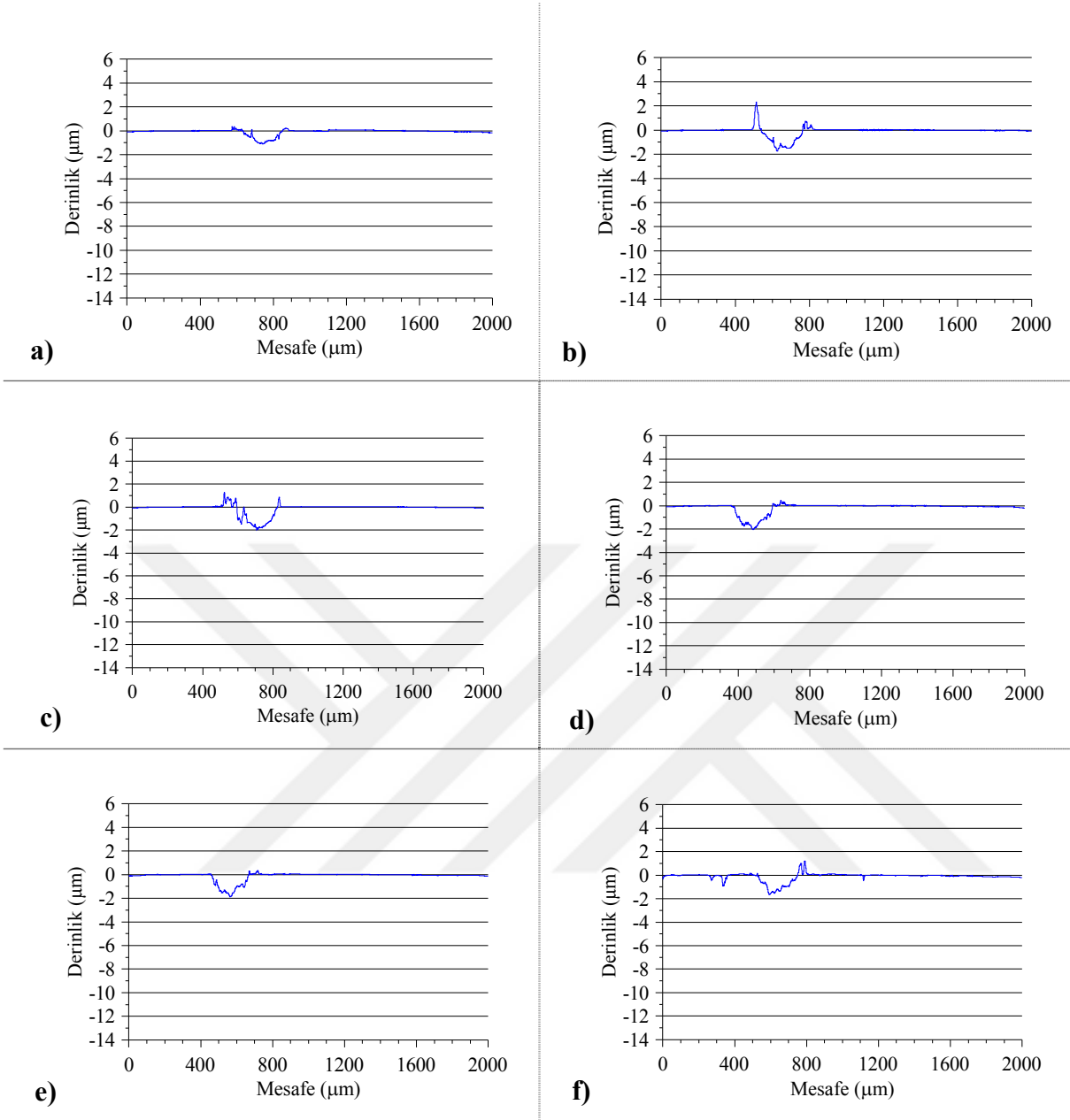


Şekil F.4 : AISI H10 KMN numunelerin ısıt döngüler sonunda elde edilen sertlik profilleri

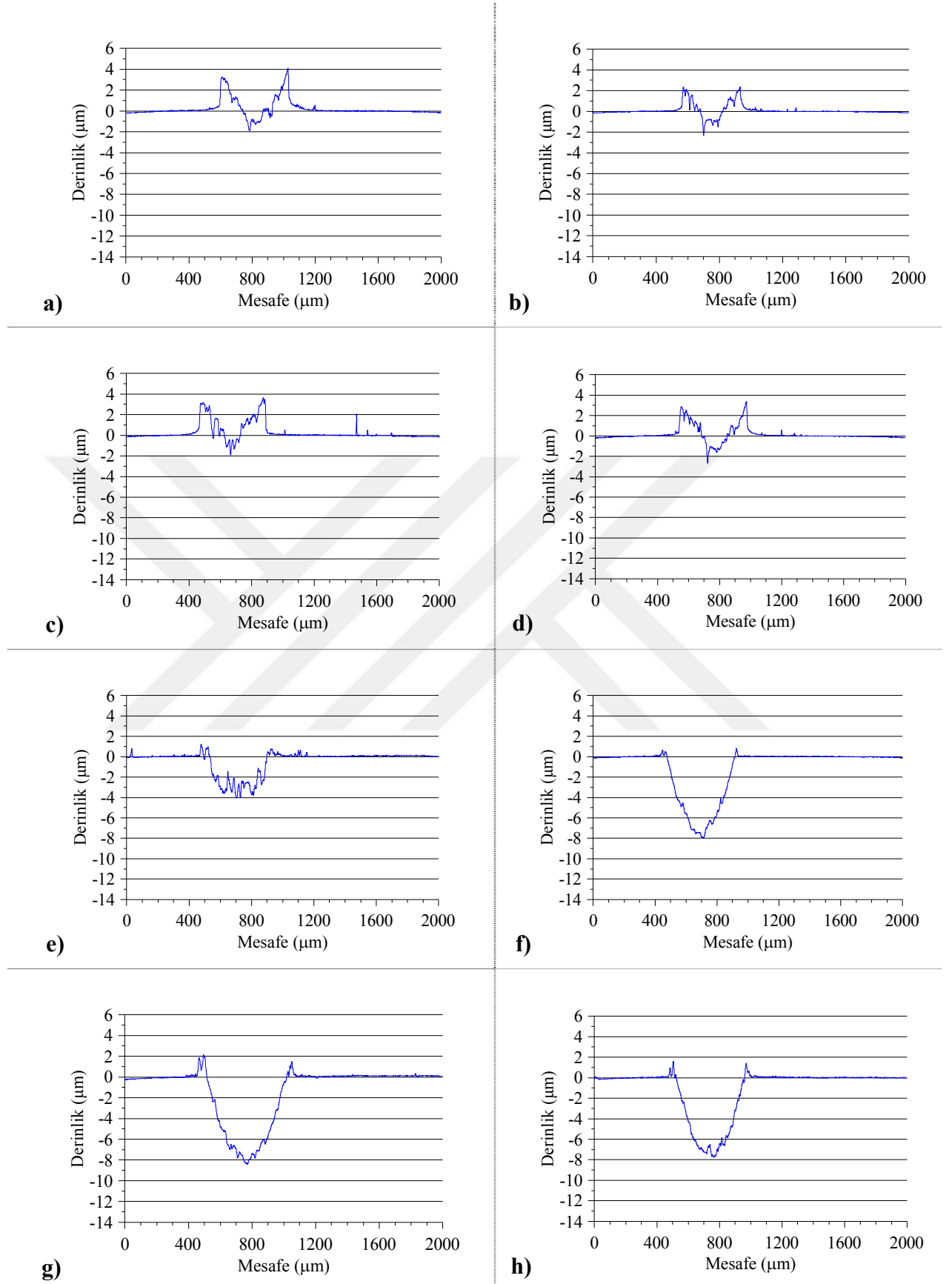
EK G: Aşınma Deneyi Verileri



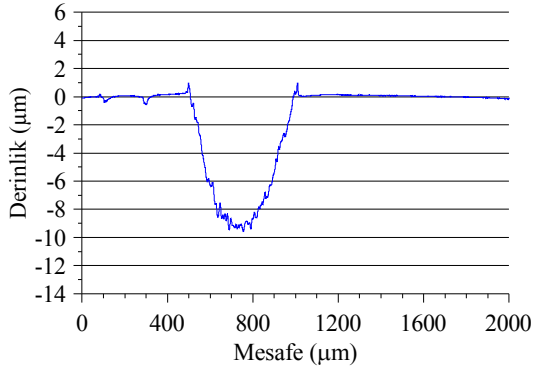
Şekil G.1 : Aşınma izi profilleri 25 °C. a) İşlemsiz-1, b) İşlemsiz-2, GN-1, d) K-1, e) KN-1, f) KN-2, g) KN-3, h) KN4.



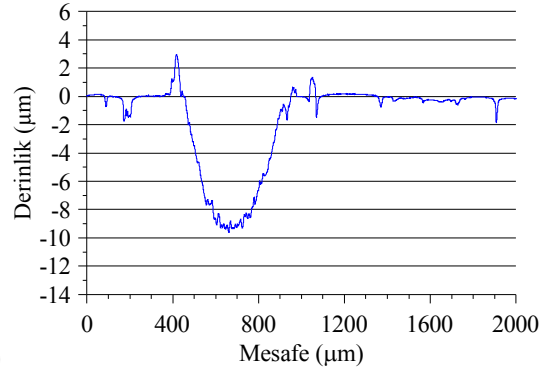
Şekil G.2 : Aşınma izi profilleri 25°C. a) KM-1, b) KM-2, c) KM-3, d) KMN-1, e) KMN-2, f) KMN-3.



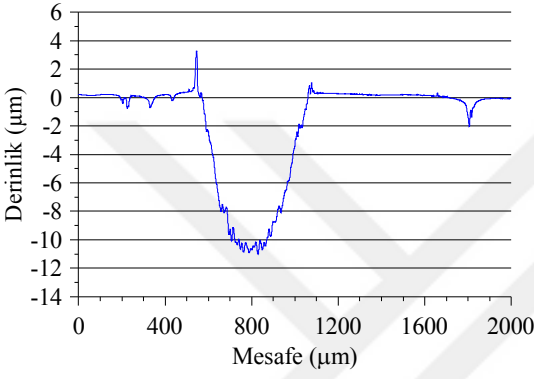
Şekil G.3 : Aşınma izi profilleri 480 °C. a) İşlemsiz -1, b) işlemsiz-2, c)İşlemsiz 3, d) İşlemsiz 4, e) GN-1, f) GN-2, g) GN-3, h) GN-4.



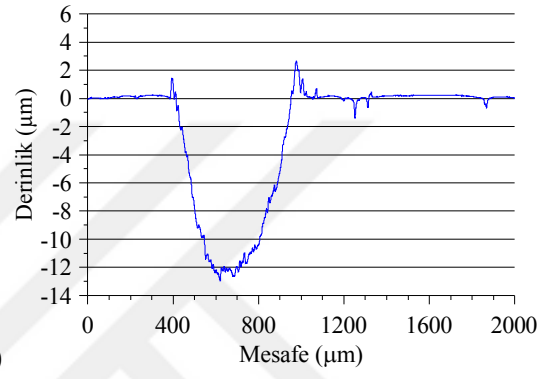
a)



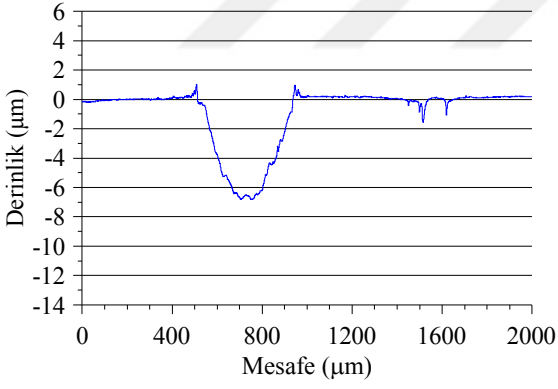
b)



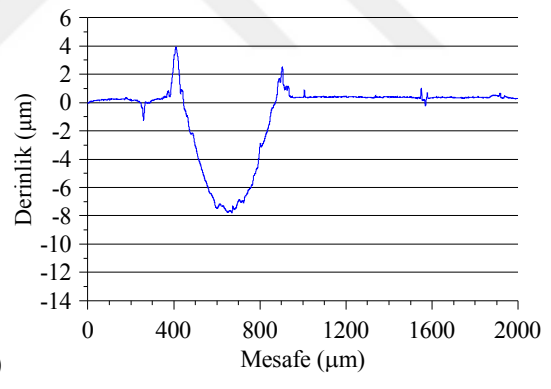
c)



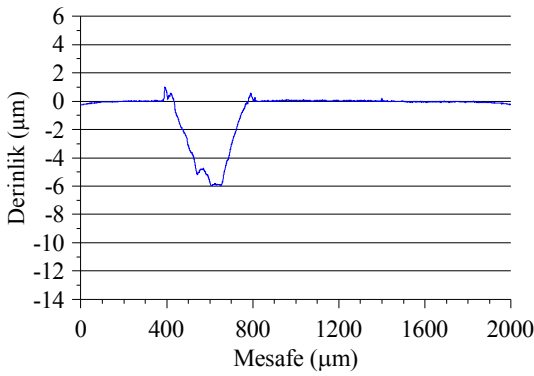
d)



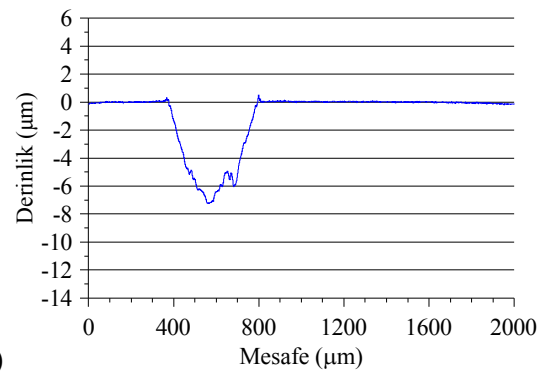
e)



f)

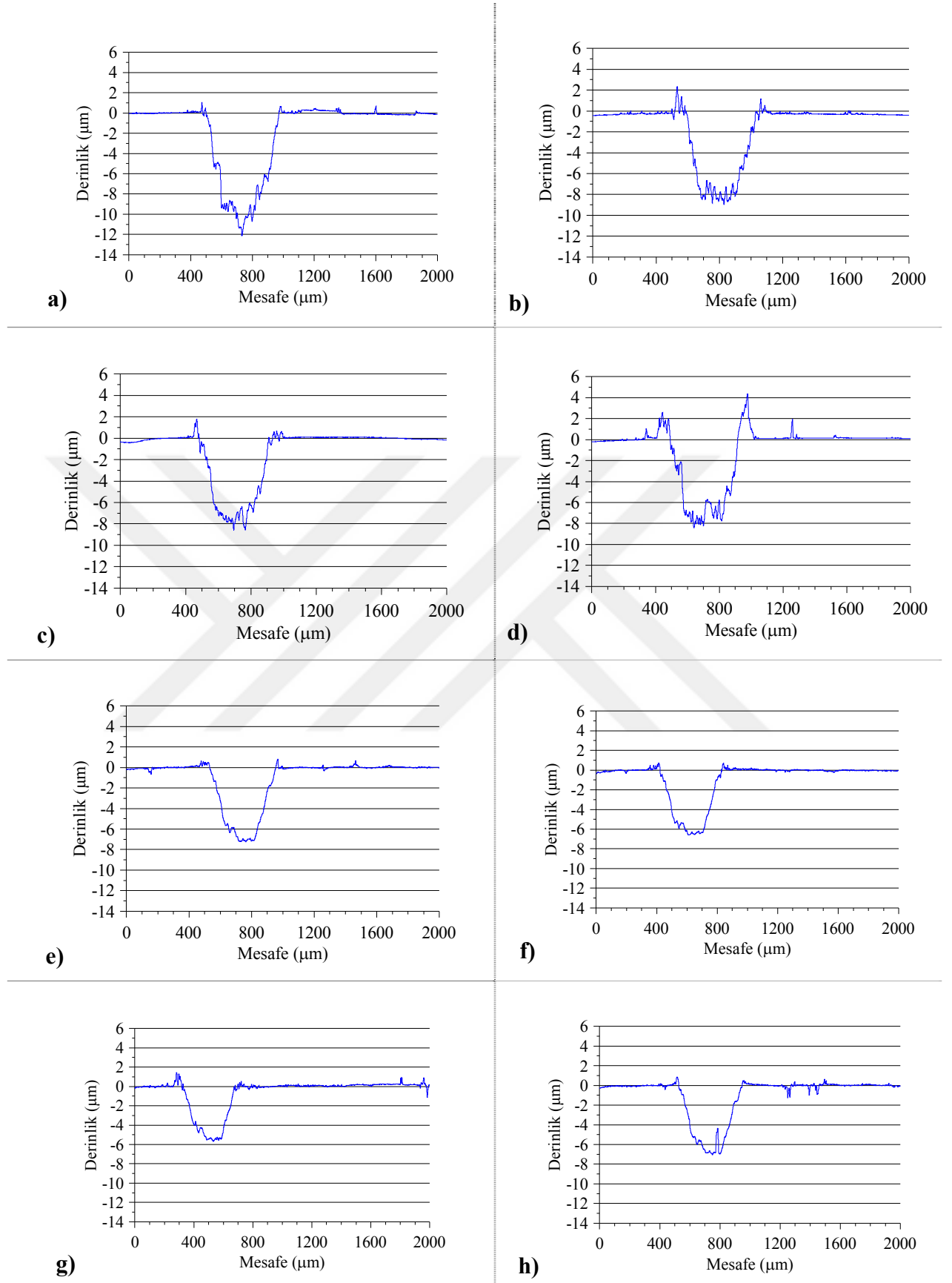


g)



h)

Şekil G.4 : Aşınma izi profilleri 480 °C. a) K-1, b) K-2, c) K-3, d) K-4, e) KN-1, f) KN-2, g) KN-3, h) KN-4.



Şekil G.5 : Aşınma izi profilleri 480 °C. a) KM-1, b) KM-2, c) KM-3, d) KM-4, e) KMN-1, f) KMN-2, g) KMN-3, h) KMN-4.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Mazhar Ümit BÜYÜKFIRAT
Doğum Tarihi ve Yeri : 14.02.1971-İSTANBUL
E-posta : umitbuyukfirat@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 1997, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2000, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği, Üretim Metalurjisi

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 1999-2003 Ertaş Isı ve Makine San. A.Ş.'inde Ar-Ge ve Dökümhane Sorumlusu olarak çalıştı.
- 2003-2009 Feniş Alüminyum San. ve Tic. A.Ş.'inde Ar-Ge, Dökümhane ve Pres İmalat Şefliği görevlerini yürüttü.
- 2011-2012 Tiryakioğlu Metal San. A.Ş.'inde Kalite Sistemi Sorumlusu olarak çalıştı.
- 2012-2016 Onat Profil Alaşım Ltd. Şti'inde Ar-Ge Şefi olarak görev aldı.
- 2017 Yılında Sistem Teknik Endüstriyel Fırınlar Ltd. Şti'inde Ar-Ge Danışmanlığı yaptı.
- 2019- Gürçelik Makine A.Ş.'de Proje Yöneticiliği görevini yürütmektedir.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Büyükfırat, M.Ü., Arslan, C.** 2019. Ekstrüzyon Kalıplarının Aşınma Dirençlerinin Isıl İşlem ve PVD Kaplama Metoduyla Arttırılması, *Metal Dünyası*, 308, 61-65.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Büyükfırat, M.Ü.**, Ergin, S. 2002. Endüstriyel Alüminyum Isıl İşlem Fırınlarında Kayıt ve Kontrol Kriterleri. 2. *Isıl İşlem Sempozyumu* , 07-08 Şubat 2002, İstanbul Türkiye.
- **Büyükfırat, M.Ü.**, Ergin, S, Eruslu,N. 2002. A356 Alaşımının Mekanik Özelliklerinin Dövme Döküm ve Isıl İşlem Teknikleri Kullanılarak Geliştirilmesi. 2. *Isıl İşlem Sempozyumu*, 07-08 Şubat 2007, İstanbul, Türkiye.

