

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

**31CRMO12 ÖN ALAŞIMLI T/M ÇELİKLERDE BORO-
SİNERLEME İŞLEM PARAMETRELERİNİN
BELİRLENEREK TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HASAN DURAN

DENİZLİ, AĞUSTOS- 2024

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**31CRMO12 ÖN ALAŞIMLI T/M ÇELİKLERDE BORO-
SİNERLEME İŞLEM PARAMETRELERİNİN
BELİRLENEREK TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HASAN DURAN

DENİZLİ, AĞUSTOS- 2024

**Bu tez çalışması PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL
ARAŞTIRMA PROJELERİ tarafından 2022FEBE052 nolu proje ile
desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Hasan DURAN

ÖZET

31CRMO12 ÖN ALAŞIMLI T/M ÇELİKLERDE BORO-SİNERLEME İŞLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENEREK TRIBOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HASAN DURAN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ.DR. SİNAN AKSÖZ)
(EŞ DANIŞMAN:DR.ÖĞR.ÜYESİ. ÖZER PAMUK)
DENİZLİ, AĞUSTOS- 2024

Bu çalışmada, ön alaşımlı 31CrMo12 çelik tozları kullanılarak toz metalurjisi (T/M) üretim yöntemi ile numune üretilmiştir. Numune üretim aşamasında, tozların preslenme sıcaklık değerleri ve basınç değerleri belirlenmiştir. Sinterleme aşamasında, preslenmiş tozlar, sinterleme ve borlama işlemlerinin eş zamanlı gerçekleştirildiği ve Boro-Sinterleme olarak adlandırılan yöntem kullanılarak hem borlama hem de sinterleme işlemleri tek seferde gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, katı borlama kutusunda Ekabor2, Al₂O₃ ve SiC tozları ortamında uygulanmıştır. Boro-Sinterleme işlemi ile elde edilen numunelerin tribolojik davranışları incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan 31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozları, atomizasyon yöntemiyle elde edilmiş olup, ortalama 20-30 µm boyut aralığında tozlardan oluşmaktadır. Tozlar, 200 MPa'da soğuk ve 600°C sıcaklıkta 300 MPa'da ılık olmak üzere iki aşamada preslenerek Boro-Sinterleme aşamasına geçilmiştir. Boro-Sinterleme işlemi, 950°C ve 1050°C'de 2, 4 ve 6 saat süresince gerçekleştirilmiştir. Boro-Sinterleme sonrasında üretilen numunelerin, Boro-Sinterleme sürecinin etkilerinin incelenebilmesi için yoğunlukları hesaplanmış, aşınma verileri oluşturulmuş ve mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde numuneler arasındaki farklar ve değerler yorumlanmıştır. Boro-Sinterleme sonrasında numunelerin karakterizasyonu FESEM, EDS, OM ve XRD analizleriyle gerçekleştirilmiştir.

Boro-Sinterleme sonucunda yüzeyde homojen yapılı borür tabakasının oluşumu sağlanmıştır. Boro-Sinterleme sonrasında numune sertliklerinde artış gözlemlenmiştir. Boro-Sinterleme sıcaklığı ve süresindeki optimizasyon ile numunelerin tribolojik davranışlarının iyileştiği gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Boro-Sinterleme, Toz Metalurjisi, 31CrMo12, Triboloji

ABSTRACT

Determination of Boro-Sintering Process Parameters and Investigation of Tribological Behaviors in 31CrMo12 Pre-Alloyed T/M Steels

MSC THESIS

HASAN DURAN

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR:ASSOC.PROF. DR SİNAN AKSÖZ)
(CO-SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. ÖZER PAMUK)
DENİZLİ, AUGUST 2024**

In this study, samples were produced using pre-alloyed 31CrMo12 steel powders and the powder metallurgy (P/M) production method. During the sample production phase, the pressing temperature and pressure values of the powders were determined. In the sintering phase, the pressed powders were subjected to a simultaneous sintering and boronizing process, known as Boro-Sintering, where both processes were carried out in a single step. This process was performed in a solid boronizing box with Ekabor2, Al₂O₃, and SiC powders. The tribological behaviors of the samples obtained via the Boro-Sintering process were examined.

The pre-alloyed 31CrMo12 steel powders used in the study were produced by the atomization method, with an average particle size range of 20-30 µm. The powders were pressed in two stages: cold pressing at 200 MPa and warm pressing at 300 MPa at 600°C, before moving on to the Boro-Sintering phase. The Boro-Sintering process was carried out at 950°C and 1050°C for durations of 2, 4, and 6 hours. After the Boro-Sintering process, the densities of the samples were calculated, wear data were compiled, and microhardness measurements were conducted to examine the effects of the Boro-Sintering process. Based on the obtained data, the differences and values between the samples were interpreted. The characterization of the samples after Boro-Sintering was conducted through FESEM, EDS, OM, and XRD analyses.

As a result of the Boro-Sintering process, the formation of a homogeneous boride layer on the surface was achieved. An increase in the hardness of the samples was observed following the Boro-Sintering process. Optimization of the Boro-Sintering temperature and duration resulted in improvements in the tribological behaviors of the samples.

KEYWORDS: Boro-Sintering, Powder Metallurgy, 31CrMo12, Tribology

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. BORLAMA	3
2.1 Borlama Nedir	3
2.2 Bor Tabakası.....	5
2.3 Borlama Yöntemleri	7
2.3.1 Katı(kutu) Borlama	7
2.3.2 Gaz Borlama	8
2.3.3 Sıvı Borlama	9
2.3.4 Pasta(macun) Borlama	9
2.3.5 Plazma Borlama	10
3. TOZ METALURJİSİ (T/M).....	11
3.1 Toz Üretimi	12
3.1.1 Mekanik Yöntemler	13
3.1.2 Kimyasal Yöntemler	13
3.1.3 Atomizasyon Yöntemleri	14
3.2 Karıştırma	15
3.3 Sıkıştırma (presleme).....	15
3.4 Sinterleme.....	17
4. AŞINMA.....	21
4.1 Aşınma Mekanizmaları ve Türleri.....	22
5. MATERYAL METOT	26
5.1 Numune Hazırlama.....	27
5.1.1 Kalıp Montajı.....	27
5.1.2 31CrMo12 Ön Alaşımli Çelik Tozlarının Hazırlanması.....	28
5.1.3 31CrMo12 Ön Alaşımli Çelik Tozlarının Kalıplanması.....	29
5.1.4 Çelik Tozlarının 600°C’de Preslenmesi	30
5.1.5 Üretilen Numune Serileri.....	32
5.2 Ön Sinterleme.....	32
5.3 Boro-Sinterleme	34
5.3.1 950°C’de 2-4-6 Saat Boro-Sinterleme.....	38
5.3.2 1050°C’de 2-4-6 Saat Boro-Sinterleme.....	39
5.4 Numune Yoğunluklarının Hesaplanması	39
5.5 Boro-Sinterleme Sonrası Karakterizasyon İşlemleri	39
5.5.1 Numunelerin Kesim İşlemi	40
5.5.2 Zımparalama, Parlatma ve Dağlama İşlemleri	40

5.5.3	Optik Mikroskop Görüntüleri	41
5.5.4	Mikro Sertlik.....	42
5.5.5	Aşınma Deneyi	43
5.5.6	FESEM ve EDS Analizleri	45
6.	BULGULAR	46
6.1	Pres Basıncı ve Presleme Sıcaklığı.....	46
6.2	Yoğunluk Ölçümleri.....	46
6.3	Sertlik Verileri	48
6.4	XRD Analizi.....	56
6.5	Boro-Sinterleme Sonrası Optik Mikroskop Görüntüleri	59
6.6	Boro-Sinterleme Sonrası FESEM Görüntüleri ve EDS analizleri.....	64
6.7	Boro-Sinterleme Sonrası Aşınma Deney Sonuçları ve Yüzey Morfolojisinin incelenmesi.....	71
6.7.1	Boro-Sinterleme Sonrası Aşınma Deneyi Yapılan Numunelerin Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi.....	71
6.7.2	Aşınma Deney Sonuçları	78
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	86
8.	KAYNAKÇA	89

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Fe-B denge diyagramı (Massalski, 1986).	5
Şekil 2.2: Borür tabakası çeşitleri (Matuschka 1977).	6
Şekil 3.1: T/M üretim aşamaları şematik gösterimi (Tripathy ve diğ. 2018)....	12
Şekil 3. 2: Atomizasyon ile metal toz üretimi (Dawes ve diğ. 2015).	14
Şekil 3. 3: Boyun çapı X olan iki küresel parçacığın sinterleme profili (German 2010).....	18
Şekil 3. 4: iki küresel tanenin sinterleme aşamaları (German 2010).	19
Şekil 3. 5: Örnek difüzyon mekanizmalarının oluşumu (German 2010).	20
Şekil 5.1: Tez çalışmasında kullanılan materyal ve yöntemin şematik gösterimi.	26
Şekil 5.2: Montajı tamamlanan kalıp görüntüsü.	28
Şekil 5.3: (a) çinko stearat, (b) 3D karıştırma cihazı.	29
Şekil 5.4: Tozların soğuk preslenme aşaması.	30
Şekil 5.5: Ilık presleme sonrasında kalıbın oda sıcaklığında soğuması.	31
Şekil 5.6: Sinterlenme fırını.	33
Şekil 5.7: Ön sinterleme işleminin ısı işlem grafiği.	34
Şekil 5.8: Boro-Sinterleme kutusuna numunelerin dizilişi.	35
Şekil 5.9: (a) Boro-Sinterleme kutusu iç dizilimi, (b) Boro-Sinterleme öncesinde kutunun son hali.	36
Şekil 5.10: Boro-Sinterleme fırını.	37
Şekil 5.11: Boro-Sinterleme sonrası kutunun soğumaya bırakılması.	38
Şekil 5.12: Örnek bölünmüş numuneler.	40
Şekil 5.13: Zımparalama ve parlatma cihazı.	41
Şekil 5.14: Optik mikroskop cihazı.	42
Şekil 5.15: Vickers sertlik ölçüm cihazı.	43
Şekil 5.16: Pin-on disk aşınma cihazı.	44
Şekil 5.17: FESEM analiz cihazı.	45
Şekil 6.1: 950°C’de 2 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB950-2 ve BS950-2 kodlu numunelerin sertlik değerleri.	49
Şekil 6.2: 950°C’de 4 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB950-4 ve BS950-4 kodlu numunelerin sertlik değerleri.	50
Şekil 6.3: 950°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB950-6 ve BS950-6 kodlu numunelerin sertlik değerleri.	51
Şekil 6.4: 1050°C’de 2 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB1050-2 ve BS1050-2 kodlu numunelerin sertlik değerleri.	52
Şekil 6.5: 1050°C’de 4 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB1050-4 ve BS1050-4 kodlu numunelerin sertlik değerleri.	53
Şekil 6.6: 1050°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB1050-6 ve BS1050-6 kodlu numunelerin sertlik değerleri.	54
Şekil 6.7: 1250°C’de 2 saatlik sinterleme işlemi uygulanan S1250 kodlu numunenin sertlik değerleri.	54
Şekil 6.8: (a) S1250 kodlu numunenin XRD grafiği, (b) ÖSB 950-6 kodlu numunenin XRD grafiği, (c) BS950-4 kodlu numunenin XDR grafiği, (d) BS950-6 kodlu numunenin XRD grafiği.	57

Şekil 6.9: (a) S1250 kodlu numunenin XRD grafiği, (b) ÖSB1050-6 kodlu numunenin XRD grafiği, (c) BS1050-4 kodlu numunenin XRD grafiği, (d) BS1050-6 kodlu numunenin XRD grafiği.	58
Şekil 6.10: 950°C’de 2 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB950-2 kodlu numune, (b) BS950-2 kodlu numune.	59
Şekil 6.11: 950°C’de 4 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB950-4 kodlu numune, (b) BS950-4 kodlu numune.	60
Şekil 6.12: 950°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB950-6 kodlu numune, (b) BS950-6 kodlu numune.	61
Şekil 6.13: 1050°C’de 2 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB1050-2 kodlu numune, (b) BS1050-2 kodlu numune.	61
Şekil 6.14: 1050°C’de 4 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB1050-4 kodlu numune, (b) BS1050-4 kodlu numune.	62
Şekil 6.15: 1050°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB1050-6 kodlu numune, (b) BS1050-6 kodlu numune.	63
Şekil 6. 16: 31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozlarının FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	64
Şekil 6. 17: ÖSB950-2 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	65
Şekil 6. 18: ÖSB950-6 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	66
Şekil 6. 19: S1250 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	66
Şekil 6. 20: ÖSB1050-2 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	67
Şekil 6. 21: ÖSB1050-6 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	67
Şekil 6. 22: BS950-6 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	68
Şekil 6. 23: BS1050-2 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	68
Şekil 6. 24: BS1050-4 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	69
Şekil 6. 25: BS1050-6 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.	69
Şekil 6. 26: 950°C’de 2 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB950-2 kodlu numune (b) BS950-2 kodlu numune.	72
Şekil 6.27: 950°C’de 4 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB950-4 kodlu numune (b) BS950-4 kodlu numune.	73
Şekil 6.28: 950°C’de 6 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB950-6 kodlu numune (b) BS950-6 kodlu numune.	74
Şekil 6.29: 1050°C’de 2 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB1050-2 kodlu numune (b) BS1050-2 kodlu numune.	75
Şekil 6.30: 1050°C’de 4 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB1050-4 kodlu numune (b) BS1050-4 kodlu numune.	76
Şekil 6.31: 1050°C’de 6 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB1050-6 kodlu numune (b) BS1050-6 kodlu numune.	77
Şekil 6.32: 1250°C’de 2 saat sinterlenen S1250 kodlu numunenin 15N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü.	77
Şekil 6. 33: 950°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme yapılmış numunelerin 15N yük altında hacim kayıp grafiği.	79
Şekil 6. 34: 1050°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme yapılmış numunelerin 15N yük altında hacim kayıp grafiği.	80

Şekil 6. 35: 950°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme yapılmış numunelerin 15N yük altında aşınma oranı grafikleri.....	81
Şekil 6. 36: 1050°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme yapılmış numunelerin 15N yük altında aşınma oran grafiği.	82
Şekil 6. 37: 950°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme işlemi sonrası numunelerin alınan yol, sürtünme katsayısı grafiği.	83
Şekil 6. 38: 1050°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme işlemi sonrası numunelerin alınan yol, sürtünme katsayısı grafiği.	84



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Fe ₂ B ve FeB fazlarına ait özellikler (Matuschka 1977).....	4
Tablo 2.2: Gaz borlamada kaynak olarak kullanılan gazlar (Sinha 1991).....	8
Tablo 2.3: Sıvı borlamada kullanılan bileşikler (Uluköy ve Can 2006).....	9
Tablo 5.1: Üretilen numune serileri ve üretim koşulları.	32
Tablo 6.1: Ilık pres sonrası numunelerin ham yoğunlukları.	47
Tablo 6.2: 1250°C’de ön sinterleme sonrası numune yoğunlukları.....	47
Tablo 6.3: Boro-Sinterleme sonrası numunelerin yoğunlukları.....	48

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

T/M	:	Toz Metalurjisi
Fe	:	Demir
B	:	Bor
Fe₂B	:	Demir Diborür
FeB	:	Demir Borür
Si	:	Silisyum
C	:	Karbon
SiC	:	Silisyum Karbür
Al₂O₃	:	Alüminyum Oksit
B₄C	:	Borkarbür
Pa	:	Pascal
MPa	:	Megapascal
N	:	Newton
HV	:	Vickers Sertlik Değeri
FESEM	:	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	:	Enerji Dağılım Spektroskopisi
OM	:	Optik Mikroskop
XRD	:	X- Isını Difraktometresi

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımda kullanılan malzeme ve ekipman alımı için destek veren Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeler Koordinatörlüğü birimine teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimin her aşamasında bana yol gösteren, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren saygıdeğer danışmanlarım Doç. Dr. Sinan AKSÖZ ve Dr. Öğretim Üyesi Özer PAMUK hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Tez çalışmam süresince beni motive eden, fikir alışverişinde bulunmamı sağlayan ve bana arkadaşlıklarıyla güç veren sevgili arkadaşlarım Rıdvan ARSLAN, Ahmet Semih KIŞLA, Nurcihan DURU ve Ceylan KARABUDAK'a teşekkür ederim. Bu süreçte tüm şirket imkânlarından yararlanma fırsatı bulduğum AKSÖZ ARGE MÜHENDİSLİK SANAYİ ve TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ'ne de teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ve sanayi uygulamaları ile metal, seramik ve polimer gibi geleneksel malzemelerden farklı dayanım özellikleri istenmektedir. Teknoloji ve sanayi alanında geçmişten günümüze kullanılan malzemelerin üretim yöntemi, maliyet ve dayanım özelliklerinin kullanım alanlarında oluşturduğu dezavantajların giderilmesi üzerine geliştirilme çalışmaları yapılmaktadır. Malzeme alanında yapılan geliştirmeler yeni malzeme arayışı veya var olan geleneksel malzemelerin farklı üretim yöntemi, alaşımlama gibi teknikler malzeme bilimcileri ve mühendisleri bu şartları sağlamak için farklı uygulamalar geliştirmeye devam etmektedir (Huda ve diğ. 2009). Çelikler geleneksel malzemelerin başında gelmekte olup günümüzde en yaygın kullanılan malzeme konumundadır. Çeliğin çeşitli uygulamalar ve alaşımlarla çok geniş bir yelpazede farklı özellikler sergileyebilmesi çeliğin bu denli yaygın kullanılmasını sağlamaktadır (Sun ve diğ. 2020).

Yüksek aşınma direnci ve tokluk özelliklerine bir arada ihtiyaç duyulan ortamlarda çalışacak olan, kam mili, krank mili, takım tezgâh iletim milleri, dişli çarklar gibi yüksek performans isteyen makine parçalarıdır. Bu gibi parçaların üretiminde Toz Metalurjisi (T/M) yöntemi tercih edilerek daha üstün mekanik özellikler sağlanabilmektedir. Bu parçalar genellikle üretim sonrasında Borlama, Nitrüleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri uygulanan parçalardır (Danninger ve diğ. 2013). T/M üretim yönteminin avantajlarından yararlanarak yüksek performans istenen malzemelerin üretim maliyeti, üretim kalitesi ve üretim süresinin kısaltılması gibi önemli malzeme ve üretim geliştirmelerinin sağlanması açısından önemlidir (Kianian 2019).

Boro-Sinterleme işlemi sinterleme ve borlama işleminin aynı anda yapıldığı işleme verilen isimdir. Boro-Sinterleme süreci son zamanlarda daha çok T/M yöntemiyle üretilen parçalarda kullanımı giderek artmaktadır (Aksöz ve diğ. 2019). Borlama işlemi genel itibari ile demir esaslı metallere, demir dışı metallere ve sermetlere uygulanabilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir (Bayça ve

diğ. 2004). Bu sayede malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Nitrasyon çeliği olarak bilinen 31CrMo12 gibi çeliklerde, azot çelik yüzeyine farklı yöntemlerle difüze edilir ve malzemenin yüzeyinde sert bir nitrür tabakası oluşturulmaktadır (Tong ve diğ. 2003). Borlama işlemi sonrasında malzemelerde, nitrürleme ve nitrokarbürleme gibi yüzey sertleştirme işlemlerine kıyasla daha yüksek sertlik ve yüksek korozyon dayanımı sağlanabilmektedir (German 2005). Bu çalışmada Boro-Sinterleme işlemine uygun olarak 31CrMo12 T/M ön alaşımlı çelik tozları tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, 31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozlarının, toz metalürjisinin aşamalarından olan sinterleme ve sonrasında uygulanan borlama işleminin tek seferde gerçekleştirildiği, Boro-Sinterleme adı verilen yöntem için optimum sıcaklık ve Boro-Sinterleme süresinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca Boro-Sinterleme sayesinde T/M yöntemi ile üretilen malzemelerin geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmiş malzemelere kıyasla Bor'un yapı içerisindeki nüfuziyetinin daha derine ulaşılması hedeflenmiştir. Farklı Boro-Sinterleme sıcaklık ve süreleri uygulanarak farklı borlama derinliği ile yüzeyde oluşan borür bileşiklerinin varlığı belirlenerek yüzeydeki oluşumların malzemenin tribolojik davranışını nasıl etkilediği analiz edilmiştir.

2. BORLAMA

2.1 Borlama Nedir

Günümüzde geleneksel üretim yöntemleri ile üretilen çelik malzemeleri birçok alanda yaygın kullanım alanına sahiptir. Mevcut kullanım alanlarında yüksek dayanım özellikleri sergilemesine rağmen metal işleme, maden çıkartma ekipmanları gibi spesifik kullanım alanlarında ekstra dayanım özellikleri istenmektedir. Çeliklerin bu gibi alanlarda ihtiyaç duyulan yüksek dayanım özelliklerinin karşılanabilmesi amacı ile alaşımla ve ısıl işlem gibi farklı farklı yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerinden biri olan malzemenin yüzey sertliğinin yükseltilmesi amacı ile yapılan termokimyasal bir işlem olan borlama yöntemidir.

Borlama işlemi çeliklerde 900°C-1100°C sıcaklık aralığında 2-10 saat aralığında gerçekleşmektedir (Keddarn ve diğ. 2021; Yu ve diğ. 2005). Borlama uygulanan çeliklerde, yüzey sertliği 1500-2300 HV sertlik değerlerine kadar çıkabilmektedir (Goeuriot ve diğ. 1982). Sertlik artışının yanında malzemenin korozyon dayanımını ve yüksek sıcaklık dayanımını artırmakta, düşük sürtünme katsayısı sayesinde malzemelerin daha az aşınmasını sağlamaktadır.

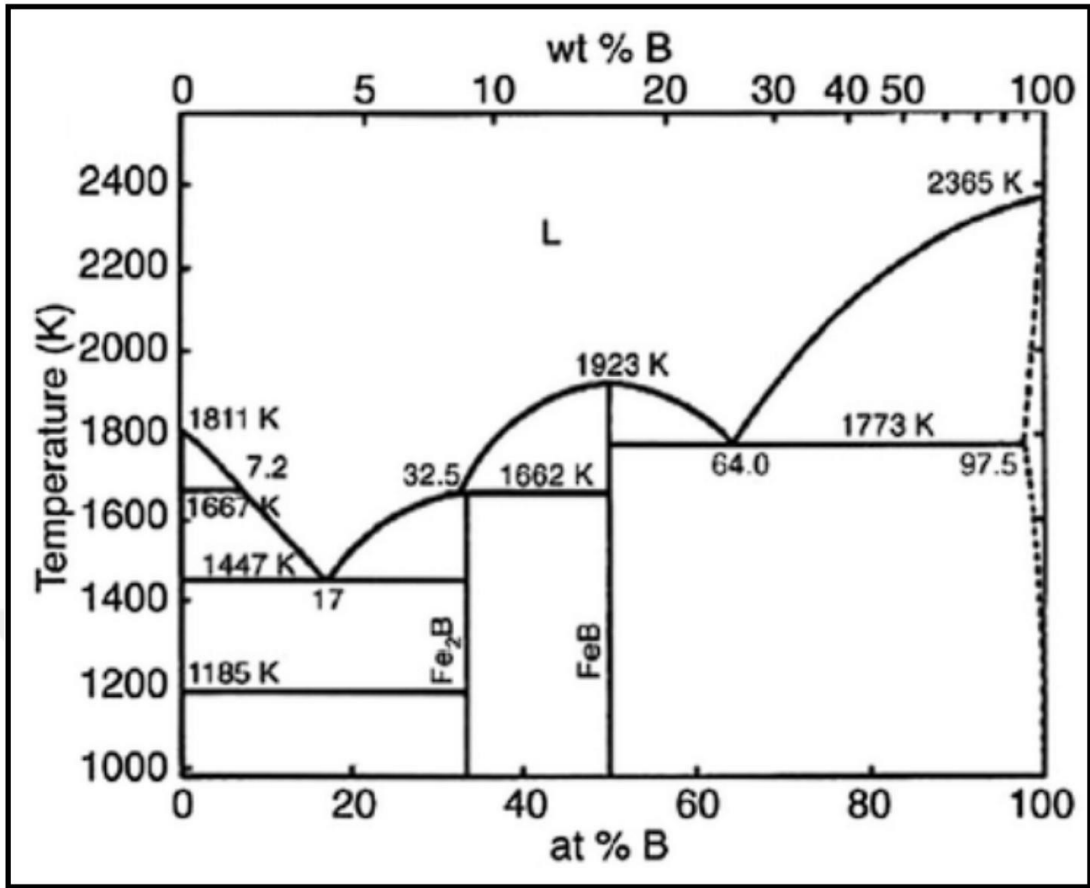
Borlama termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olup malzeme yüzeyine bor atomlarının yüksek sıcaklık altında difüzyonu ile gerçekleşir. Difüze olan bor atomları zamana ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme ile bileşik oluşturarak yüzeyde bir borür tabakası oluşturmaktadır. Bu borür tabakalarının başlangıç noktaları yüzeyin daha reaktif olduğu noktalardır (Bayça ve diğ. 2004). Çeliklerde bu bileşikler Fe₂B ve FeB fazlarıdır (Yu ve diğ. 2005). Oluşan bu fazların bazı özellikleri Tablo 2.1’de görülmektedir (Selçuk 1994).

Tablo 2.1: Fe₂B ve FeB fazlarına ait özellikler (Matuschka 1977).

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime noktası (°C)	1390	1550
Mikro Sertlik (HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı (1000°C)	8.10 ⁻⁶ 1/°K	10-16.10 ⁻⁶ 1/°K
Termal İletkenlik (1000°C)	0.2-0.3 W/ (cm °C)	0.1-0.2 W/ (cm °C)
Küri Noktası(°C)	742	325
Yoğunluk (g/cm ³)	7.00	6.3
Kristal Sistem	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri(A ⁰)	a:5.078, b:4.249	a:4.053, b:5.495, c:2.496

Çeliklerin borlanması öncelikli olarak düşük aktivasyon enerjisine sahip olan Fe₂B fazı yüzeyde kalın bir tabaka şeklinde oluşmaktadır (Campos ve diğ. 2007). Bor miktarı %9'un altında ise Fe₂B oluşumu devam eder, bor miktarı %16'ya gelmişse oluşan borür tabakasının yüzeyinde ince ve kırılgan yapılu FeB fazı oluşmaya başlar (Campos ve diğ. 2015). Tablo 2.1'de fazların dönüşüm sıcaklıkları verilmektedir. Oluşan bu borür yapılarında, FeB fazında çekme gerilmesi meydana gelirken Fe₂B fazında basma gerilmesi meydana gelmektedir. Bu durum borür tabakasında bir mekanik gerilmeye neden olmaktadır. Tabakadaki gerilmeden kaynaklı olarak malzeme gevrek ve darbeler karşısında çatlama eğilimi göstermektedir (Keddani ve diğ. 2005).

Şekil 2.1'de görülen Fe-B ikili denge diyagramı incelendiğinde 1174°C'ye karşılık gelen 1447 K'de ötektik dönüşüm noktası olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak borlama işlemi için gerekli olan sıcaklık değeri ötektik dönüşüm noktasına karşılık gelen sıcaklık değerinden daha düşük bir sıcaklıkta olmalıdır. Aksi halde numunenin yüzeyinde ergime gerçekleşebilir ve borlama işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilemez (Goeuriot ve diğ. 1982).



Şekil 2.1: Fe-B denge diyagramı (Massalski, 1986).

2.2 Bor Tabakası

Yüzeyde oluşan borür tabakası kullanılan malzemeye, borlama yöntemine, borlama sıcaklığına ve borlama süresine bağlı olarak değişmektedir. Borlama işlemi difüzyon ile gerçekleşen yüzey sertleştirme işlemi olduğu için borür tabakasının kalınlığı difüzyon hızı ile alakalıdır ve denklem 2.1 ile hesaplanır (Kayalı ve diğ. 2012; Keddām ve diğ. 2005).

$$x^2 = D \cdot t \quad (2.1)$$

x; borür kalınlığı (mm), D; Yayınım katsayısı, t; zaman (s).

Difüzyon katsayısını bulmak için denklem 2.2’de verilen arhenius denklemi kullanılır;

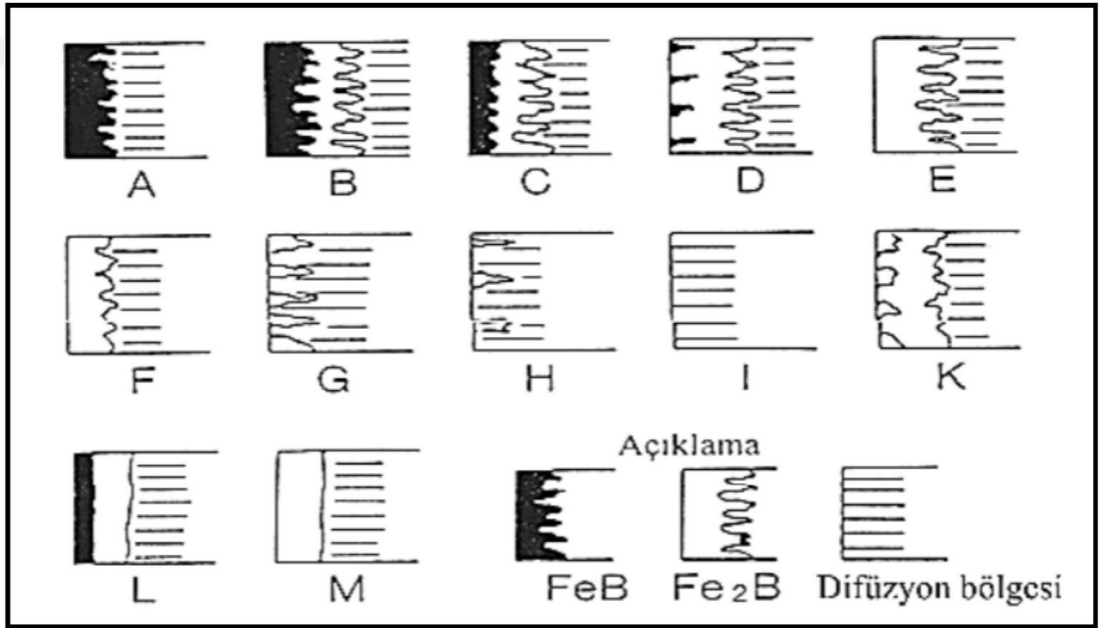
$$D=D_0.\exp(-Q/RT) \quad (2.2)$$

D_0 ; yayınan atomların yayınma sabiti (cm^2/sn), R ; gaz sabiti (J/molK), T ; sıcaklık (K),

Q ; aktivasyon enerjisi

Formüllerden anlaşılacağı üzere sıcaklık ve zamana bağlı olarak bor tabakasının kalınlığı değişmektedir (Efe ve diğ. 2008).

Çeliklerde oluşan borür tabakasının yapısı Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2: Borür tabakası çeşitleri (Matuschka 1977).

Çelik malzemelerde yüzeyde oluşan borür tabakalarında genelde çift fazlı yapı şeklinde görülmektedir. Bu fazlar Şekil 2.1’de Fe-B ikili alaşım diyagramında görüldüğü gibi FeB ve Fe_2B fazlarıdır. Borlama sırasında ilk olarak Fe_2B fazı yüzeyin daha reaktif noktalarında çekirdeklenerek genişlemeye başlamaktadır. Bor miktarı %16 oranındaysa borür tabakasının yüzeyinde FeB fazı oluşmaya başlar fakat Fe_2B fazı kadar genişlemez (Keddin ve diğ. 2005). Oluşan bu fazlar malzemeye ve borlama koşullarına bağlı olarak Şekil 2.2’de görüldüğü gibi testere dişi formunda veya düz formda olabilmektedir. Testere dişi formu Fe_2B fazının hacim merkezli tetragonal yapıya sahip olması sayesinde bor atomları $[001]$ yönünde difüze olarak kolonsal bir

yapıda gelişmesinden kaynaklandığı ileri sürülmektedir (Bayça ve diğ. 2004; Martini ve diğ. 2004).

Fe_2B ve FeB fazlarının Si ve C atomlarını içeriye doğru iterek metal matris ile borür tabakası arasında bir geçiş bölgesi oluşturduğu bilinmektedir. Bu tabaka matris metalden farklı görünmekte ve borür tabakasından daha kalın yapıda olmaktadır (Carrera ve diğ. 2016).

Adhezif aşınmayı engellemek için 5 μm kalınlığında borür tabakası yeterli olmaktadır. Fakat bu ölçülerde bir tabakanın oluşturulması mümkün değildir. Bunun nedeni ise testere dişli formunun bunu olanaksız kılmasıdır. Oluşan borür tabakanın kalınlığı 150 μm kalınlığı geçmesi durumunda tabaka gevrekleşir ve kolayca kırılabilir (Carbucchio ve diğ. 1983).

2.3 Borlama Yöntemleri

Termokimyasal bir difüzyon işlemi olan borlama, farklı ortamlarda ve farklı bor kaynaklarıyla malzeme yüzeyine bor atomlarının difüze edilmesini yöntemidir. Borlama işlemi için kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler katı borlama, sıvı borlama, gaz borlama, pasta(macun) ve elektrolitik borlama yöntemi olarak sayılabilir. İçinden en yaygın olanı ise kolay ve ucuz bir yöntem olan katı (kutu) borlama yöntemidir (Uluköy ve diğ. 2006).

2.3.1 Katı(kutu) Borlama

Katı borlama işleminde, borlama ortamında katı ve toz hâlindeki maddeler kullanılır. Borlama işlemini gerçekleştirmek için 3 bileşenden faydalanılmaktadır. Bu bileşenlerden ilki bor kaynağı olarak kullanılan bor ajanlarıdır. Çeşitli bor ajanları kullanılmaktadır. Bunlar bor karbür (B_4C), amorf bor ve ferrobordur. Bor karbür (B_4C), ucuz ve kolay bulunurluğu açısından bor kaynağı olarak daha çok tercih edilmektedir (Ortiz 2019). Oksijen afinitesi yüksek olan bor ajanlarının oksitlenmesinin önüne geçmek için ikinci bileşen olarak deoksidant tozu kullanılmaktadır. Katı borlamada deoksidant görevi görecek olan tozlar SiC ve Al_2O_3

tozlarıdır. Bu tozlar, hem katı borlama ortamına karışık hâlde hem de hazırlanan kutunun giriş kısmına yerleştirilerek oksijen girişini minimize etmeye çalışılır. Son bileşen ise yüzeyde oluşacak olan borürlerin çekirdeklenmesini sağlayacak olan aktivatör tozlarıdır (Bayça ve diğ. 2004).

Katı borlama haznesi hazırlandıktan sonra, 900-1100°C sıcaklıkta 1-10 saat aralığında borlama işlemi gerçekleştirilir. Süre sonunda kutu fırından alınarak soğumaya bırakılır. İşlem sonucunda homojen yapı oluşumu gözlenmemektedir (Casteletti ve diğ. 2013; Cimenoglu ve diğ. 2014).

2.3.2 Gaz Borlama

Az borlama yöntemi, yöntem olarak basit olmasına rağmen kullanılan gazların tehlikeli olmaları sebebiyle karmaşık ve pahalı bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Gaz borlamada parça, bor kaynağı olarak kullanılacak gazın seyreltilerek veya ayrıştırılarak 700-950°C arasında ve 67 kPa basınç altında borlama işlemi yapılabilmektedir (Sinha 1991).

Tablo 2.2’de (Arslan ve diğ. 2021) bor kaynağı olarak kullanılan gazlar ve bu gazlara ait bilgiler verilmektedir. Gaz borlama yönteminde tabloda görülen Diboran gazı çok iyi sonuçlar verse de patlayıcı ve zehirli bir gaz olması sebebiyle karışık ve pahalı bir sisteme ihtiyaç duymaktadır (Küper ve diğ. 2000).

Gaz borlamada sistemin ayarlanabilmesi, yüzeyde oluşan borür tabakasının tek fazlı halde ve homojen bir yapı elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Gaz ortamında gerçekleştiği için karmaşık şekilli parçaların borlanması tercih edilmektedir.

Tablo 2.2: Gaz borlama işleminde kaynak olarak kullanılan gazlar (Sinha 1991).

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Teorik Bor Miktarı (%)	Donma Noktası (°C)
Bor Triflorid	BF ₃	67.82	15.95	-128.8
Bor Triklorid	BCl ₃	117.19	9.23	-107.3
Bor Tribromid	BBr ₃	250.57	4.32	-46
Di-Boran	B ₂ H ₆	27.69	39.08	-165.5
Bor Trimetil	(CH ₃) ₃ B	55.92	19.35	-161.5
Bor Trietil	(C ₂ H ₅) ₃ B	98.01	11.04	-95

2.3.3 Sıvı Borlama

Sıvı borlama işleminde borlanacak parça, bor kaynağının sıvı olduğu bir banyoya alınmaktadır. Borlama işlemi 700-1000°C aralığında 2-6 saat aralığında boraks ortamında ve aktivatör olarak BC, SiC, Zr ve B kullanılarak gerçekleştirilir (Sinha 1991). Sıvı ortam ve bor kaynağı olarak kullanılan bazı bileşikler Tablo 2.3'te verilmektedir.

Tablo 2.3: Sıvı borlama işleminde kullanılan bileşikler (Uluköy ve Can 2006).

%Ağırlık Olarak Banyo İçeriği						
Na ₂ B ₄ O ₇	B ₄ C	KBF ₄	B ₂ O ₃	SiC	Ferro-Si	Al
66	-	-	14	-	20	-
65	-	-	15	-	20	-
70	-	-	-	30	-	-
70	-	-	10	20	-	-
60	40	-	-	-	-	-
-	2.5	10	-	87.5	-	-

2 farklı sıvı borlama çeşidi vardır bunlar elektrolit olan ve olmayan sıvı borlama yöntemleridir. Elektrolit sıvı borlama yönteminde borlanacak parça katot, anot olarak grafit ve elektrolit olarak boraks kullanılmaktadır. Sıvı borlama işlemi 900-950°C aralığında 0.15-0.20A/cm² akım altında ve 4-6 saat aralığında gerçekleştirilmektedir. Borür tabakasının homojen bir yapıda olması için borlama esnasında parça döndürülmelidir (Sinha 1991).

2.3.4 Pasta(macun) Borlama

Pasta borlama yönteminde numunede istenilen yer borlanabilmektedir. Numune yüzeyinde borlanması istenilen yüzeye bor karbür ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆) karışımı olan bir macun sürülerek kurutulur macun kuruduktan sonra fırına alınarak borlama işlemi gerçekleştirilir. Pasta borlama işlemi inert gaz atmosferinde gerçekleşmelidir aksi halde sağlıklı bir borlama işlemi gerçekleşmemektedir (Sinha 1991).

2.3.5 Plazma Borlama

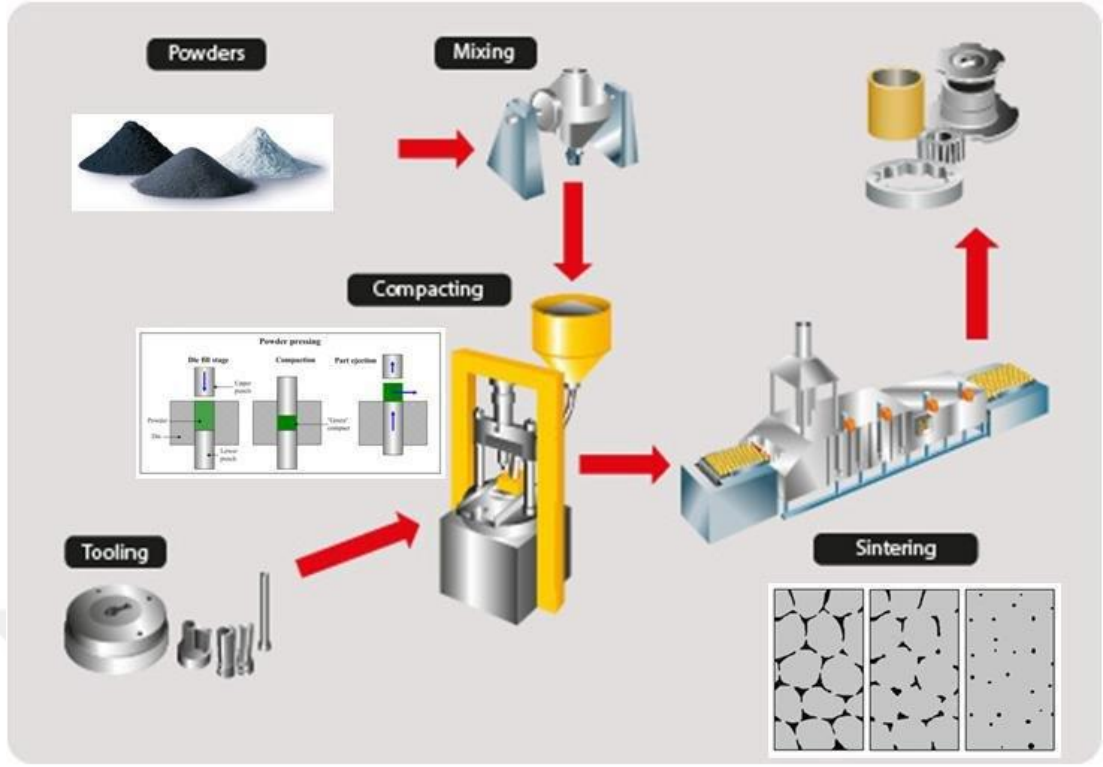
Plazma borlama işleminde bor kaynağı olarak BCl_3 , B_2H_6 , BF_3 veya $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$ gaz olarak ise Ar veya H_2 gazları kullanılmaktadır. Plazma borlama $800\text{-}1000^\circ\text{C}$ ve 10^{-2} Pa basınç altında borlama türüne denilmektedir. İşlem parametrelerinin kontrol edilebilir olması daha kontrollü bir borlama işlemi yapılarak istenilen kalınlıkta borür tabakalarının oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Otomotiv parçalarının borlanması yaygın olarak kullanılmaktadır (Nam ve diğ. 2005).

Ar veya H_2 gaz ortamında 2 plaka arasında elektriksel bir boşalma yaratarak ortamdaki gazların plazma haline geçerek borlama işleminin bu şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır (Sinha 1991).

3. TOZ METALURJİSİ (T/M)

T/M kısaca toz formundaki metallerin şekillendirilip sinterlenerek üretim yapılmasını sağlayan bir üretim yöntemi olarak tanımlanabilir. Gümümüzde T/M teknolojisi ile seramik teknolojisi çok benzer yöntemleri kullandığından toz ve seramiklerin üretildiği bir üretim teknoloji olarak tanımlayabiliriz. T/M'nin Tarihçesine bakıldığında çok eski tarihlerde hem seramik hem de metal üretimi yapıldığı görülmektedir. Hindistan Delhi'de günümüzden 1600 yıl öncesine tarihlenen, indirgenmiş demir tozlarından imal edilen 6,5 ton ağırlığında T/M sütun bulunmaktadır, İnkalara ait T/M üretimi mücevherler bulunmuştur (Jones 1960). Mısırlıların MÖ 3000'li yıllarda demir tozları kullanıldığı bilinmektedir (Carpenter ve diğ. 1930). 1840'larda karbonlu tozlardan üretilen elektrikli kömürler ve tungsten filamanlar ile T/M yöntemi endüstriyel anlamda önemli bir adım atmıştır. Sert metallerin üretimde kullanılmak için T/M yöntemlerinde önemli adımlar atılmıştır ve 2.Dünya Savaşı sırasında çeşitli sinterleme yöntemleri geliştirilerek havacılıkta parça üretimi sağlanmıştır (White, 1995). Günümüzde ise nanoteknoloji ve 3D baskı teknolojisi ile üretimde genişlemekte ve gelişmektedir.

T/M yöntemi temelde 4 ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar metal toz üretimi, metal tozların karıştırılması, karıştırılan tozların preslenerek şekil alması ve son aşama olan şekil almış metal tozlarının sinterlenerek üretimin tamamlanması. Bu 4 aşama Şekil 3.1'de görülmektedir. T/M'de presleme sonrasında üretilecek olan parça ham yoğunluğa ulaşmaktadır bu aşamada toz taneleri arasında herhangi bir bağlantı oluşmamaktadır. Sinterleme sonrasında toz taneleri birleşerek tek bir tane haline almaktadır ve bu yoğunluk artışı sonrası tam yoğunluğa ulaşarak katı yapı haline gelmektedir (German 2005).



Şekil 3.1: T/M üretim aşamaları şematik gösterimi (Tripathy ve diğ. 2018).

3.1 Toz Üretimi

Metal toz üretim yöntemleri, çok çeşitli uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geniş bir metal tozu yelpazesi oluşturmak için kullanılır. Neredeyse tüm metallerin tozları üretilebilmektedir. Farklı toz üretim yöntemleri, tozların kimyasal bileşimi ve fiziksel özelliklerinin daha kolay kontrol edilmesini sağlar ve hedef uygulamalara uygun özel özelliklerin elde edilmesine imkân tanır (German 2005). Metal tozlarının üretimini mekanik, kimyasal ve atomizasyon ile üretim yöntemleri olarak üç farklı üretim yöntemi ile gerçekleştirilebilir. T/M ile üretilecek olan parçanın üretim sonrası özellikleri büyük ölçüde toz üretimi sonucu elde edilen tozlara bağlı olacağından toz üretim yöntemini tercihi çok önemlidir. Tozların mekanik özelliklerine ve tozlardan istenilen özelliklere uygun olarak üretim yöntemi seçilir. Yüksek saflıkta tozlar üretmek için kimyasal ve elektrolitik yöntemler daha uygundur, gevrek tozlar için mekanik öğütme daha uygun olacaktır. Başlıca toz üretim yöntemleri

atomizasyon, öğüte, mekanik alaşımlama, elektroliz, kimyasal indirgeme olarak sayılabilir. Bu yöntemlerin toz üretiminin başında gelmektedir (Upadhyaya 1997).

3.1.1 Mekanik Yöntemler

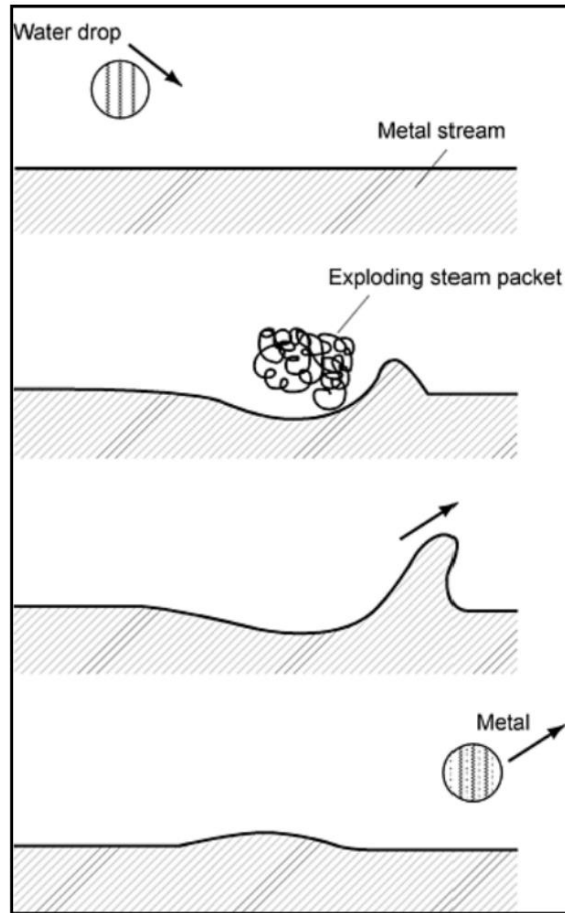
Mekanik yöntemler, metal tozlarının mekanik işlemler yoluyla üretilmesini içerir. Bu yöntemle tozların üretimi için darbe, basma, aşındırma ve öğütme olmak üzere dört ana yöntem vardır. Darbe yöntemi, malzemeye çok hızlı vurularak çok küçük parçalara ayrılmasını sağlar. Aşındırma yöntemi ise, aşındırıcıların birbirleri üzerinde hareket ederek birbirlerini aşındırması ve daha küçük parçalar elde edilmesi esasına dayanır. Kesme yönteminde, talaşlı imalata benzer şekilde parçalar kesilerek daha küçük parçalara ayrılır ve bu şekilde toz elde edilir. Son olarak, basma yönteminde, basma kuvveti kullanılarak malzemeler kırılma noktasına kadar deforme edilip küçük parçalar oluşturularak toz elde edilir (Mehta ve diğ. 1989; Díaz ve diğ. 2020). Bu süreçler, metal tozlarının üretiminde birincil yöntemler olarak pek tercih edilmezler. Gevrek kırılması kolay olan malzemelerde ve pullu yapıda veya mekanik yöntemle üretilmesi istenilen tozlarda tercih edilmektedirler (Upadhyaya 1997).

3.1.2 Kimyasal Yöntemler

Kimyasal yöntemler, metal tozlarının kimyasal reaksiyonlar yoluyla üretilmesini içerir. Bu yöntemler, yüksek saflıkta ve belirli partikül morfolojisine sahip tozlar üretmek için kullanılır. Kimyasal yöntemler ile metal tozu üretimi, toz özelliklerinde geniş bir çeşitlilik sağlar (Lindskog ve diğ. 1986; Okabe ve diğ. 2004). Mevcut birçok işleme değişkeni ve üretim parametresi, parçacık boyutu ve şeklinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır. Bu kategoriye giren yöntemler arasında oksit indirgenmesi, çözelti veya gazdan çökelme, termal ayrışma, kimyasal gevrekleşme, hidrit ayrışması ve termit reaksiyonları yer alır. En yaygın kullanılan işlemler ise oksit indirgeme, çözültiden çökelme ve termal ayrışmadır. (Upadhyaya 1997; German 2005).

3.1.3 Atomizasyon Yöntemleri

Atomizasyon, sıvı halindeki metalin basınçlı bir akışkan (gaz veya su) ile küçük damlacıklar halinde parçalanması ve hızlı bir şekilde katılaşması prensibine dayanır. En sık kullanılan atomizasyon teknikleri arasında su, gaz, plazma atomizasyonu ve santrifüj yöntemleri bulunur (Dawes ve diğ. 2015). Bu atomizasyon yöntemlerinden gaz ve su atomizasyon yöntemi üretimin %95'ini karşılamaktadır. Ön alaşımlı çekil tozları sadece atomizasyon yöntemiyle üretilmektedir.



Şekil 3. 2: Atomizasyon ile metal toz üretimi (Dawes ve diğ. 2015).

3.2 Karıştırma

T/M’de karıştırma aşaması, tozların homojen bir şekilde karıştırılmasını sağlamak için kritik bir adımdır. Bu aşama, tozların eşit dağılımını garantileyerek, son ürünün özelliklerinin tutarlı olmasını sağlar ve kaliteyi artırır. Homojen bir karışım, üretim sürecinde oluşabilecek kusurları azaltır ve ürünün istenilen özellikleri taşımamasını sağlar. Ayrıca, farklı metal tozları veya yağlayıcılar gibi katkı maddeleri, belirli fiziksel ve kimyasal özellikleri elde etmek amacıyla karıştırılır. Karıştırma, tozlar arasında kimyasal reaksiyonları teşvik edebilir ve bu, ürünün kimyasal bileşimini ve performansını etkileyebilir. İyi karışmış bir toz, presleme ve sinterleme gibi sonraki işlemlerde daha düzgün bir performans sergiler, üretim sürecini daha verimli ve güvenilir hale getirir. Karıştırma aşaması, nihai ürünün kalitesini ve performansını doğrudan etkileyen kritik bir adımdır (Upadhyaya 1997).

Karıştırma işleminde genellikle V-şekilli karıştırıcı, bıçaklı karıştırıcı, paddle karıştırıcı ve planetary karıştırıcı gibi mekanik yöntemler kullanılır. V-şekilli karıştırıcı, tozları V şeklindeki bir kap içinde homojen olarak karıştırır, bıçaklı karıştırıcı döner bıçaklarla tozları karıştırır, paddle karıştırıcı büyük miktarlarda toz için kullanılırken, planetary karıştırıcı özellikle ince tozlar için uygundur. Karıştırma süresi ve karıştırma hızı, toz türüne ve karışımdan istenilen homojenliğine göre ayarlanmaktadır. Karışımın homojenliğini kontrol etmek için çeşitli testler yapılabilir ve bu testler sonucunda hazır hale gelen tozlar kapalı ve kuru bir ortamda saklanmaktadır (German 2010).

3.3 Sıkıştırma (presleme)

Sıkıştırma işlemi, T/M üretim prosesinin en önemli aşamasıdır. Doğru presleme koşulları, homojen bir yoğunluk ve üstün mekanik özellikler elde etmek için esastır. İşlem sırasında uygun basınç, kalıp tasarımı ve toz karışımı kullanımı, başarılı bir presleme süreci için belirleyici faktörlerdir. Sıkıştırma aşamasında, toz kütlesine basınç uygulanarak istenilen parçanın şeklini oluşturmak ve sinterleme öncesi düşük

kuvvetlere dayanabilecek bir ham mukavemet ve yoğunluk kazandırmak amaçlanır (Canakci ve diğ. 2014).

Sıkıştırma aşamaları aşağıdaki gibidir;

1. Toz hazırlama: Presleme öncesinde tozların homojenize edilmesi ve yağlayıcı ilavesi,
2. Kalıplama: Tozların istenilen şeklini alması için uygun ölçülerde kalıplara yerleştirilmesi.
3. Sıkıştırma (presleme): Kalıplanmış haldeki tozların dinamik veya statik presleme yöntemleri ile yoğunluk artışı sağlanır.

Tozlar preslendiğinde ilk olarak elastik deformasyona uğrar ve şekil değiştirir. Yeterli sıkıştırma basıncı uygulandığında tozlar plastik deformasyona uğrayarak kalıcı bir yoğunluk artışı sağlanmaktadır. Bu aşamalardan sonra toz taneleri arasında temas noktalarında bağlanarak ham mukavemet kazanırlar.

Çelik tozlarında gerekli basınç malzeme türüne göre değişmekle birlikte 550 ila 830 MPa arasında değişmektedir. Presleme basıncı tozların sertliğine, boyutuna ve şekline bağlıdır (Upadhyaya 1997; German 2005).

Silindirik parçalarda, yüksekliği (L) çapına (D) eşit olan deneme parçaları ve düzeltme faktörü (k) yardımıyla presleme aşamasında istenilen yoğunluğa ulaşılması için uygun basınç değeri aşağıdaki formüller yardımıyla elde edilebilir; (Knight 1991)

$$P=P_1(1+k) \quad 3.1$$

P= büyük parçalar için basınç,

P₁= standart parçalar için basınç (L=D),

k=düzeltilme katsayısı.

k düzeltme katsayısı ise şu aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır;

$$k=\frac{0.25}{3}(L/D-1) \text{ eğer } L/D > 1 \text{ ise} \quad 3.2$$

$k=0$ eğer $L/D < 1$ ise

3.3

Sıkıştırma metotları tozlara ve istenilen yoğunluğa göre seçilebilir. Sıkıştırma metotları basınçlı ve basınçsız olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (German 2005).

Basınçlı teknikler;

- Kalıpta sıkıştırma
- İzostatik sıkıştırma
- Yüksek enerjili sıkıştırma
- Şahmerdanda sıkıştırma
- Ekstrüzyon ile sıkıştırma
- Titreşimle sıkıştırma
- Haddeleme daimî sıkıştırma
- Ilık presleme
- Metal enjeksiyon presleme

Basınçsız teknikler;

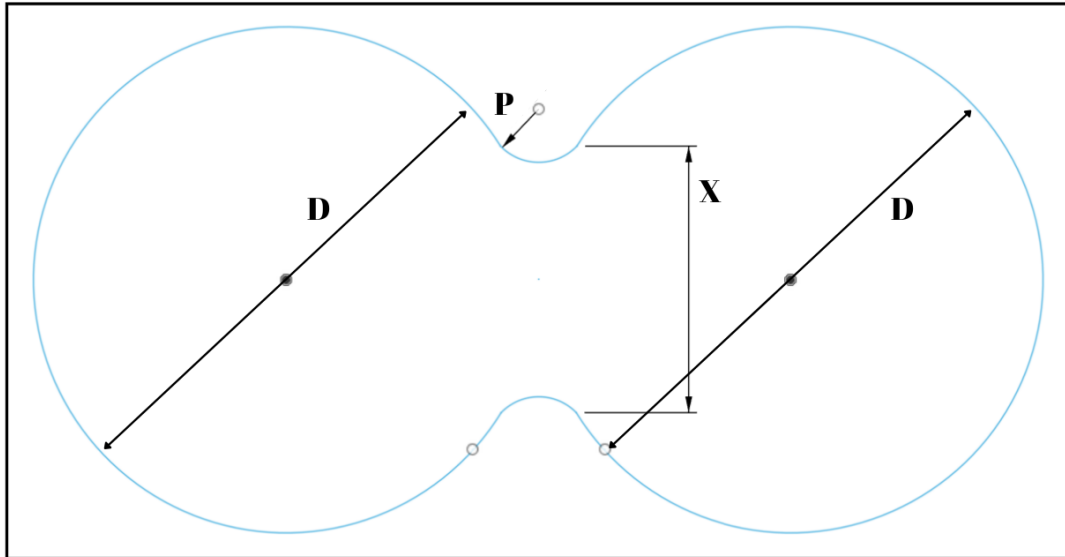
- Kaynaklı döküm
- Ağırlık sıkıştırması
- Daimî basınçsız sıkıştırma
- 3D yazıcı

3.4 Sinterleme

Sinterleme, T/M ve seramik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan bir ısıtılma işlemidir. Katı hal sinterleme, sıvı fazlı sinterleme, lazer sinterleme ve mikrodalga sinterleme gibi farklı yöntemleri bulunmaktadır. Sinterleme işlemi sırasında, preslenmiş ham mukavemete sahip parçalardaki tozlar, yüksek sıcaklıklara, yaklaşık olarak malzemenin ergime sıcaklığının 2/3 ile 4/5'i kadarına çıkarılarak toz tanelerinin komşularıyla bağ oluşturulması sağlanarak katı bir yapı oluşturulur (Fang 2010). Bu süreç, başlangıçta taneler arasında boyun oluşumu ve ardından birleşme ile gerçekleşir. İşlem, yüksek sıcaklıklarda atomların yayılımı ve küçük tanelerin yüzey

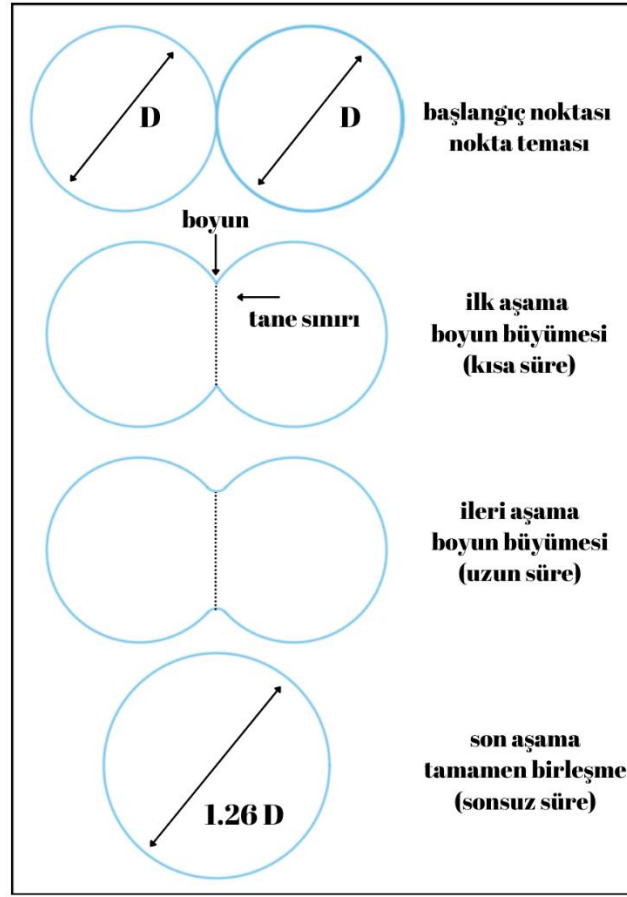
enerjilerinin azalması ile tamamlanır. Esasen sinterleme, çok sayıda atomun sıçramalarının toplamından oluşur (Rahaman 2015).

Atomların komşu atomlardan koparak serbestçe hareket edebilmesi için gereken enerjiye aktivasyon enerjisi denir. Bu enerji, yüksek sıcaklık sayesinde sağlanır. Yüksek sıcaklıklarda sıçrayan atomlar, rastgele hareket eder ve tanelerin birleşme noktalarına giderek yüzey alanını ve yüzey enerjisini azaltır. Birleşme noktalarına ulaşan atomlar, artık kolay kolay ayrılmaz, bu da sinterleme sürecinin devam etmesini sağlar. Ancak, atom boyutlarının çok küçük olması nedeniyle başarılı bir sinterleme için çok sayıda atomun sıçraması gereklidir (Samal ve diğ. 2015). Yüksek sıcaklıklar, atomların başarılı bir şekilde tane sınırlarına ulaşmasını sağlamak amacıyla kullanılır çünkü sıçrayan atomların yalnızca az bir kısmı sinterleme için doğru yerlere varır. Sinterleme sırasında atom hareketleri doğrudan gözlemlenemez, ancak hacim değişimleri aracılığıyla izlenebilir. Taneler arasındaki boyun büyümesi bu değişimlerden biridir (German 2010). Sinterlemenin temel ölçütlerinden biri, Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, boyun büyüklük oranıdır.



Şekil 3. 3: Boyun çapı X olan iki küresel parçacığın sinterleme profili (German 2010).

Boyun bölgesi atom bağlarının kusurlu olduğu, yüzey ve hacim taşıma işlemleri ile büyüyen bölgeyi temsil etmektedir.



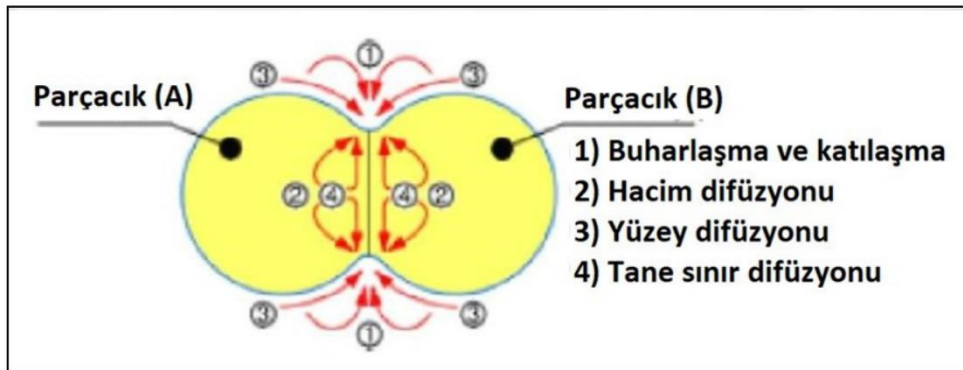
Şekil 3. 4: iki küresel tanenin sinterleme aşamaları (German 2010).

İki küre geometrisi için, uzun sinterleme süreleri boyunca tane sınırları hareket eder ve parçacıklar birleşerek, başlangıçtaki parçacık çapının 1,26 katı büyüklüğünde nihai çapa sahip tek bir küre oluşturur. Gerçekte bir toz tanesi yüzeyinin farklı yerlerinden bu birleşimi farklı taneler ile eş zamanlı olarak yapar (German 2010).

Farklı aşamalar ve katı taşınım mekanizmaları, sinterlemenin anlaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Katı hal sinterlemeyi içeren taşınım mekanizmaları arasında yüzey difüzyonu, hacim difüzyonu, tane sınırı difüzyonu, viskoz akış, plastik akış ve katı yüzeylerinden buhar taşınımı yer almaktadır. Bu mekanizmalar, katının taşınım yollarını ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. İlk aşama, kompaktlaşma sonrası parçacıkların temas noktalarında zayıf kohezif bağlar oluşturarak birleşmesiyle başlar.

Başlangıç sinterleme aşaması, ısıtma sırasında gerçekleşir ve parçacıklar arasındaki bağın hızlı bir şekilde büyümesiyle tanımlanmaktadır.

Difüzyon mekanizmaları, sinterleme sürecinin temel unsurlarındandır. Yüzey difüzyonu, atomların parçacık yüzeyleri boyunca hareket etmesiyle, temas noktalarındaki "boyun" bölgelerinin büyümesine yol açmaktadır. Bu mekanizma, genellikle sinterlemenin başlangıç aşamasında etkindir. Hacim difüzyonu ise atomların parçacıkların iç kısımlarına doğru hareketini ifade eder ve yüksek sıcaklıklarda baskın hale gelerek yoğunlaşmaya önemli katkı sağlar. Sınır difüzyonu, parçacık sınırları boyunca gerçekleşen atom hareketiyle sinterleme sırasında yoğunlaşmanın önemli bir kaynağıdır. Sinterleme sürecinin başında, toz parçacıkları arasında temas noktaları (boyunlar) oluşur ve bu boyunlar zamanla büyüyerek parçacıkların birbirine kaynaşmasına neden olmaktadır. Boyun büyümesi, malzemenin yoğunluğunun artmasına ve boşlukların azalmasına yol açmaktadır. Parçacıklar arasındaki boşluklar, difüzyon yoluyla dolarak malzemenin yoğunluğu %92'lere ulaştırmaktadır. Bu kütle taşınım mekanizmaları, sinterleme sürecinin temelini oluşturur ve malzemenin nihai özelliklerini belirler. Her mekanizma, sinterleme sürecinin farklı aşamalarında etkin olup, malzemenin yoğunluğunun ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Sinterleme parametrelerinin doğru ayarlanması, bu mekanizmaların etkinliğini artırarak istenilen malzeme özelliklerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Sinterleme kinetiğinin doğru bir şekilde anlaşılması ve modellenmesi, bu mekanizmaların etkilerini optimize ederek daha kaliteli ve dayanıklı malzemelerin üretimine imkân tanır. Şekil 3.5'te bazı difüzyon mekanizmalarının oluşumları gösterilmektedir.



Şekil 3. 5: Örnek difüzyon mekanizmalarının oluşumu (German 2010).

4. AŞINMA

Aşınma, temas halindeki iki yüzey arasındaki sürtünme nedeniyle malzemenin yüzeyinden küçük parçacıkların kopması veya yüzeyde meydana gelen deformasyonlarla sonuçlanan bir süreçtir. Aşınma, mekanik sistemlerde zamanla malzeme kaybına ve performans düşüşüne neden olabilmektedir. Alman standartlarına göre aşınma “iki temas yüzeyinin relatif hareketi sonucunda malzeme kaybı veya deformasyon şeklinde meydana gelen istenmeyen değişiklikler” olarak tanımlanmaktadır (Kaplan ve diğ. 2020; Ludema ve diğ. 2018). Aşınma, malzeme yüzeyinde kayma, kırılma, yorulma, gibi sebeplerden yüzeyde malzeme kaybının oluşması olarak tanımlanabilir. Farklı standartlarda aşınmanın tanımı yapılsa da hepsi benzer şekilde yapılmıştır. Aşınmanın tanımının yapılabilmesi için bazı etkilerin malzeme üzerine etki etmesi ve oluşması gerekmektedir, bunlar (Dwivedi 2018; Ludema ve diğ. 2018);

- Sürtünme (bağıl hareket)
- Mekanik etki
- Devamlı ve yavaş hareket
- Malzeme yüzeyinde aşınmadan kaynaklı değişiklikler

Aşınmaya etki eden faktörleri 4 ana başlıkta sıralamak mümkündür, bunlar ana malzeme, aşındırıcı malzeme, ortam koşulları ve servis şartları olarak tanımlanmaktadır. Kullanım şartlarına ve koşullarına bağlı olarak malzeme seçimi aşınmayı etkilemektedir. Malzemenin yüzey sertliği aşınmaya doğrudan etki eden en önemli parametredir. Malzemenin yüzey sertliği arttıkça aşınma azaltılabilir ve yüzeyde oluşan hasar indirgenebilmektedir (Dwivedi 2018; Ludema ve diğ. 2018). Yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin mikro yapısı da aşınmayı doğrudan etkileyen malzemeden kaynaklı parametrelerdir.

Aşındırıcı malzemenin tane boyutu, şekli ve dağılımı ana malzemenin aşınması üzerinde etkilidir keskin köşeli ve sert yapıları aşındırıcı veya karşı malzeme ana malzeme üzerinde aşınmayı artırmaktadır (Zhao ve diğ. 2022).

Ortam koşulları, malzemelerin çalışma koşullarına bağlı olarak aşınma davranışına değişmektedir. Ana malzeme ve aşındırıcı malzemenin temas yüzeyleri ortam

koşullarından ortamın nem ve sıcaklığından doğrudan etkilenmektedir (Xing ve diğ. 2023).

Servis şartları, en önemli aşınma faktörü olarak sayılabilir. Servis şartları dediğimizde malzemenin birim yüzeyine etki eden kuvvet, sürtünme hızı ve kayma mesafesi söylenebilir. Bu parametreler arttığında aşınma direkt olarak artmaktadır (Dwivedi 2018).

Aşınma, yüzeyler arasında meydana gelen malzeme kaybı veya şekil değişikliklerinin, malzeme ve yüzey özelliklerine bağlı olarak çeşitli mekanizmalarla gerçekleşebilir. Bu mekanizmalar (Dwivedi 2018; Li 2017; Ludema ve diğ. 2018);

- Adhezif aşınma
- Abrazif aşınma
- Titreşim aşınması
- Tabaka aşınması

Bu aşınma mekanizmalarına bağlı olarak aşınma yüzeylerinde farklı yüzey bozuklukları oluşmaktadır.

4.1 Aşınma Mekanizmaları ve Türleri

Adhezif aşınma: Temas eden iki yüzeyin birbirine yapışması ve daha sonra bu yapışmanın kopması sonucu meydana gelen malzeme transferi ve yüzey hasarını ifade etmektedir. Bu tür aşınma, iki yüzeyin birbirine göre hareket ettiği durumlarda ortaya çıkar ve özellikle metal yüzeyler arasında yaygındır. İki malzemenin temas yüzeyleri arasında mikroskobik düzeyde soğuk kaynaklar oluşmasıyla yani atomik ve moleküler olarak birbirine bağlanmasıyla temas ve yapışma gerçekleşmektedir. Malzemeler birbirine göre hareket etmesi sonucunda iki yüzeyde de malzeme kaybı görülür. Yüzeyden kopan parçalar karşı malzemeye yapışır ve yüzeyde çukurlar ve tepeler oluşturarak aşınmayı artırır. Adhezif aşınmaya en fazla aynı kafes yapısına sahip malzemelerde karşılaşılr; sürtünmeden kaynaklı sıcaklık, aynı kafes yapısına sahip malzemelerde yüzde kaynamaya sebep olmaktadır bu sıcaklık soğuk kaynak oluşumunu artırır. Adhezif aşınma en çok metaller arasındaki kayma sürtünmesi

sebebiyle gerçekleşir, aşınma daha çok yumuşak olan malzemenin sert malzemeye soğuk kaynak olması ile gerçekleşir. Yumuşak olan malzemenin sert malzemeye göre daha çok aşındığı yapılan testler sonucunda görülmüştür (Dwivedi 2018; Ludema 2018).

Adhezif aşınmayı azaltma yöntemleri:

1. Yağlayıcı: yüzeyler arasındaki soğuk kaynağı engellemek için yağlayıcı kullanmak.
2. Malzeme Seçimi: iki malzeme birbirinden farklı seçilmeli çünkü bu aşınma türü benzer ve yakın sertlik değerlerindeki malzemelerde daha fazla görülmekte.
3. Yüzey işlemler: yüzeyin parlak ve düze olması adhezif aşınmayı engeller.

Abrazif aşınma: Sert malzeme ile yumuşak malzemelerin sürtünme sonucunda sert aşındırıcı malzemenin yumuşak hâldeki malzeme yüzeyinde hasara neden olması sonucu oluşan aşınma türüdür. Yırtılma ve çizilme aşınması olarak da bilinen bu aşınma türü sistemlerde hızlı ve önemli hasarlara neden olmaktadır (Li 2017). Katı-katı, katı-mineral gibi farklı sürtünme mekanizmalarında görünmektedir. Aşındırıcı partiküllerin boyutu ve sertliği, abrazif aşınmaya etki eden ana faktörlerdendir. Bunlara ek olarak uygulanan yük ve sürat abrazif aşınmayı artırmaktadır. Sert malzeme yüzeyindeki pürüzler, yumuşak malzemede 3 farklı şekilde yüzey hasarına neden olmaktadır (Flegler ve diğ. 2020; Totten 2017). Bunlar;

- Kesme: sert malzemenin partikülleri yumuşak malzeme yüzeyinden küçük parçacıkları keser ve kopartır.
- Yırtma: sert malzeme partikülleri yumuşak malzeme yüzeyini yırtarak parça çıkartır.
- Plastik deformasyon: sert malzeme partikülleri, yumuşak malzeme üzerinde oluklar açarak yumuşak malzemeyi deforme eder fakat yüzeyden patça ayıramaz.

Abrazif aşınmadaki aşınma türleri, iki farklı aşınma yoluyla gerçekleşmektedir. Bu yollar, iki cisimli aşınma ve üç cisimli aşınma olarak bilinmektedir. İki cisimli aşınmada, sert malzeme yüzeyindeki partiküller yumuşak malzeme üzerinde deformasyona sebep olarak aşınma meydana getirir; aşınan malzeme yumuşak olan malzemedir. Üç cisimli aşınmada ise iki kayan malzeme arasındaki serbest haldeki sert partiküllerin sürtünmesiyle her iki malzeme de aşınır (Arık ve diğ. 2017).

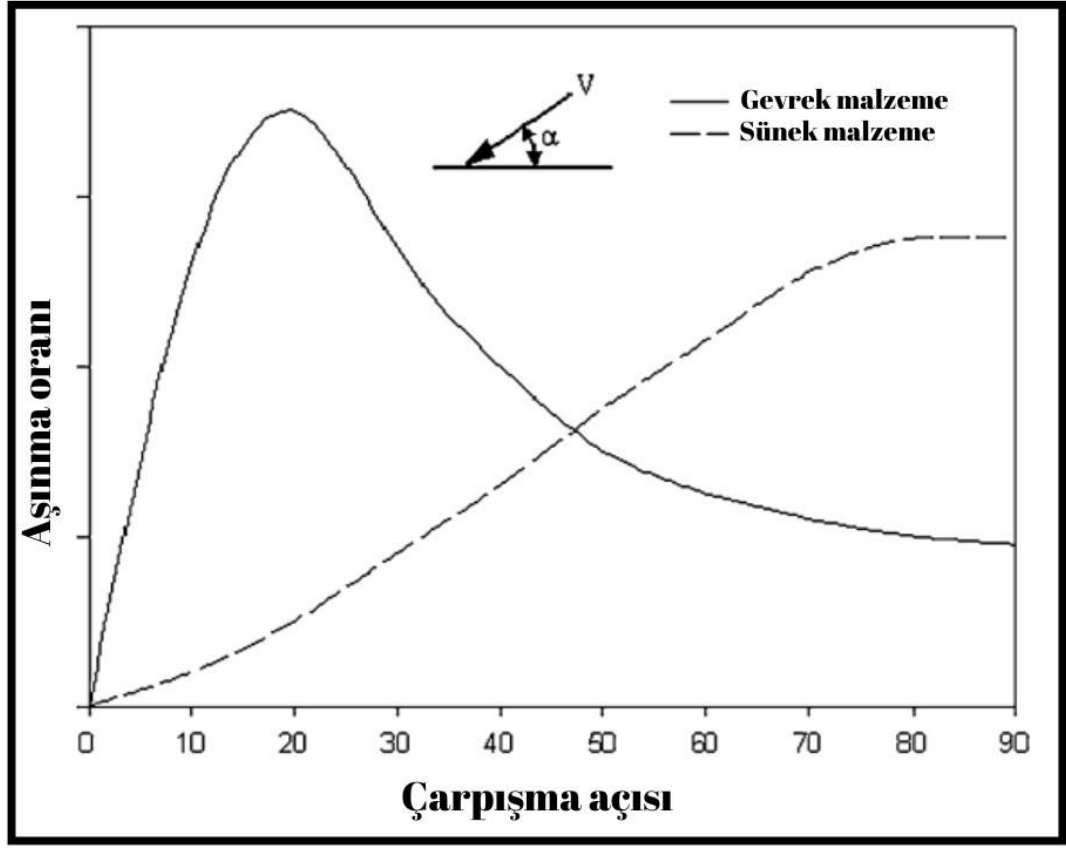
Abrazif aşınmayı azaltmak yöntemleri;

1. Yağlayıcı: sert partiküllerin yüzeye temasını azaltabilir
2. Yüzey işlemleri: yüzey işlemleri ile malzeme yüzeyleri sertleştirilebilir.
3. Sert yüzey kaplama: yumuşak malzeme yüzeylerinin kullanım koşullarına uygun şekilde termokimyasal veya farklı yöntemlerle yüzeyinin kaplanması ve yüzey sertliğinin artırılması.

Erozif aşınma: Sıvı veya gaz halindeki bir akışkanın içinde taşınan sert partiküllerin katı bir yüzeye çarparak yüzeyde oluşturdukları deformasyon ve malzeme kaybına Erozif aşınma olarak tanımlanmaktadır. Bu aşınma türünde genellikle içerisinden yüksek hızlı akışkan geçen boru hatlarında görülmektedir, boru hatları dışında türbinler ve pompalarda da görülmektedir. Erozif aşınmada yüksek hızda yüzeye çarpan sert partiküllerin geliş açısı yüzeyde oluşan aşınma türünü değiştirmektedir. Örnek vermek gerekirse, sert partiküller yüzeye paralel olacak şekilde çarptığında abrazif, dikey şekilde çarpma gerçekleşirse çarpma aşınması meydana gelmektedir (Jafari ve diğ. 2018).

Erozif aşınmada aşındırıcı partiküllerin geliş açısı ve hızları aşınmanın büyüklüğünü doğrudan etkilemektedir. Aşınmanın etkisini önlemek için diğer aşınma türlerine benzer şekilde malzeme seçimi ve yüzey sertliğinin artırılması önemlidir.

Partiküllerin çarpma açıları ve çarpma yüzeylerinde oluşan aşınma oranları Şekil 4.1’de görülmektedir (Pankaj 2015).



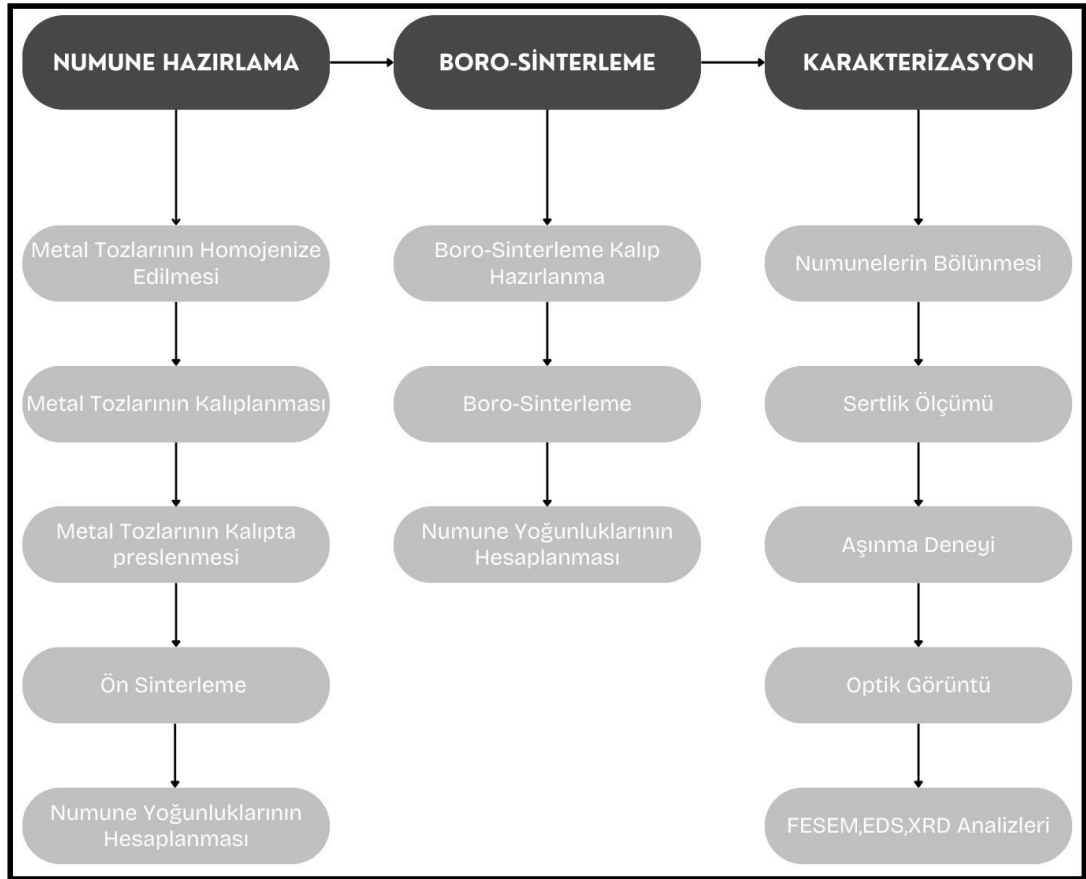
Şekil 4.1: Aşınma oranı ve Çarpışma açısı grafiği (Betti 2020).

Yorulma aşınması: sürekli tekrarlayan yükler altında çalışan malzemelerde gerçekleşen bir aşınma türüdür. Aşınmanın yüzeyinin sürekli mekanik yük ve stres altında çalışması sonucunda malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar oluşmaktadır. Yükleme sırasında oluşan çatlaklar dinamik yük altında ilerleyerek büyür ve diğer çatlaklarla birleşir. Birleşme sonucunda yüzeyden parçalar koparak yüzeyin aşınmasına neden olur (Maya ve diğ. 2017).

Yük büyüklüğü ve frekansı yorulma aşınmasında önemli faktörleridir. Çatlakların oluşmasında ve ilerleme hızlarında doğrudan etkili olurlar. Yüksek yorulma dayanımına sahip olan malzemeler daha yüksek yorulma aşınmasına da sahip olmaktadır (Dwivedi 2018).

5. MATERYAL METOT

Bu çalışmada, 31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozları ile T/M üretim yöntemi kullanılarak 31CrMo12 T/M çeliklerinin Boro-Sinterleme parametreleri belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca Boro-Sinterleme yöntemi uygulanarak üretilen numunelerin tribolojik davranışlarının incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışma Şekil 5.1’de görüldüğü gibi üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, 31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozlarından Boro-Sinterleme işlemine uygun numune üretimi yapılmıştır. İkinci bölümde, üretilen numunelere Boro-Sinterleme işlemi uygulanmıştır. Üçüncü bölümde ise Boro-Sinterleme sonrasında elde edilen numunelerin tribolojik davranışları incelenerek numunelerin karakterizasyonu yapılmıştır.



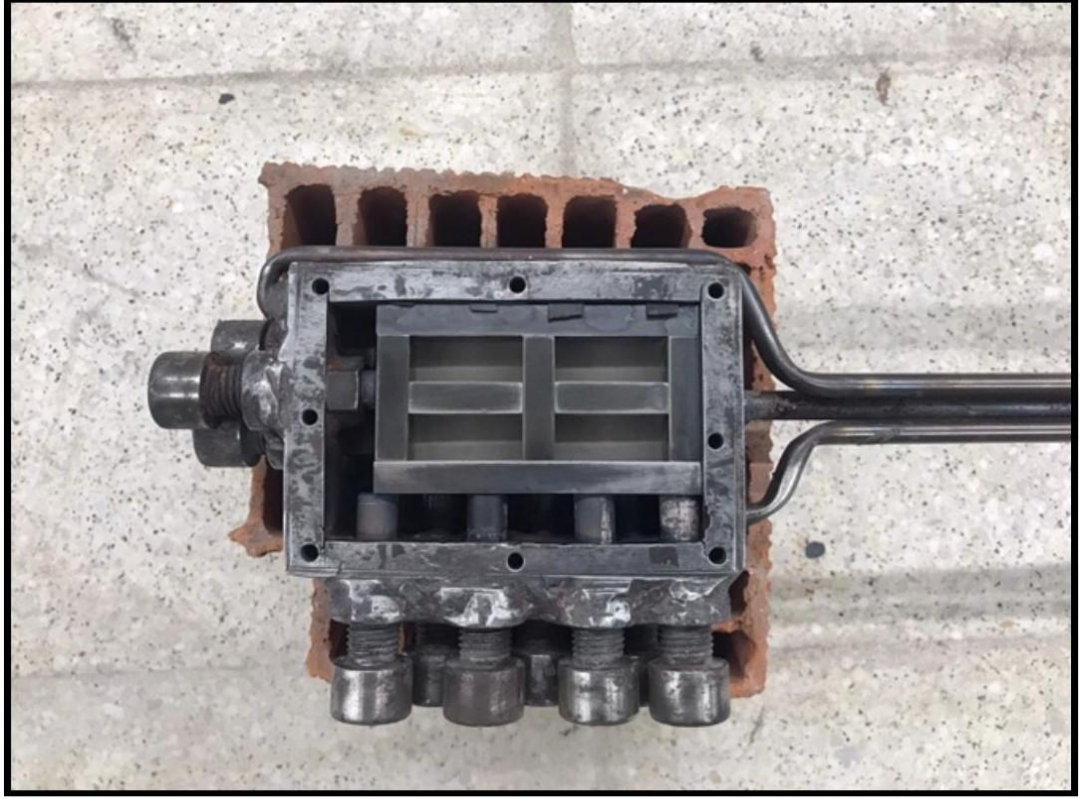
Şekil 5.1: Tez çalışmasında kullanılan materyal ve yöntemin şematik gösterimi.

5.1 Numune Hazırlama

Bu çalışmada, 31CrMo12 ön alaşımlı T/M çelik tozlarının Boro-Sinterleme parametrelerinin belirlenmesi ve tribolojik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında, 31CrMo12 ön alaşımlı T/M çelik tozları kullanılarak, kalıpta presleme yöntemi ile 200 MPa basınç altında oda sıcaklığında soğuk pres yöntemi uygulanmış ve ardından 300 MPa basınç altında 600°C’de ılık presleme yöntemi ile 32x13x9 mm boyutlarında toplam 13 adet numune üretilmiştir.

5.1.1 Kalıp Montajı

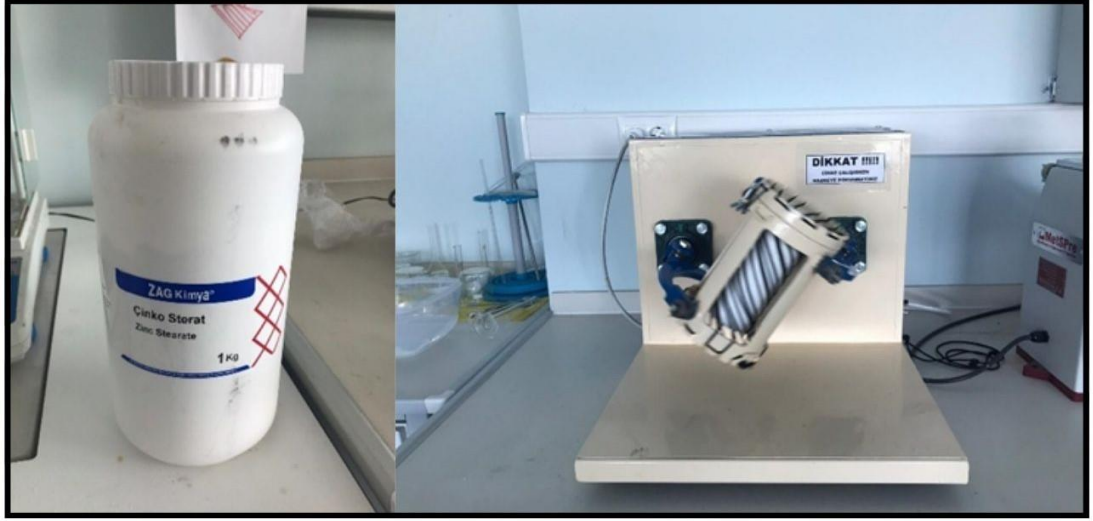
Kalıp montajlama işlemi numunelerin üretim aşamasının ilk basamağıdır. Bu aşamada toplamda 4 adet numune üretimine olanak tanıyan ve bu çalışma için özel tasarlanmış, yüksek sıcaklıklara dayanıklı 1.3343 Yüksek hız çeliğinden imal edilmiş(M2) kalıbın montajı yapılmıştır. Kalıp montajı ile 31CrMo12 tozlarının ilave edileceği 32x13 mm ölçülerinde 4 numune haznesi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu boşluklara homojen haldeki 31CrMo12 çelik tozları ilave edilerek kalıp üst zımbaları toz ilave edilen haznelerin üzerine yerleştirilmiştir. Montajı tamamlanan kalıp Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2: Montajı tamamlanan kalıp görüntüsü.

5.1.2 31CrMo12 Ön Alaşımli Çelik Tozlarının Hazırlanması

Çalışmada kullanılmak üzere temin edilen 31CrMo12 ön alaşımli çelik tozlarının, sevkiyat sırasında oluşabilecek homojenlik kaybının giderilmesi için üç boyutlu karıştırıcıda 48 dev/dk. karıştırma hızında 60 dakika süreyle karıştırılmıştır. Devamında %99,2 31 CrMo12 çelik tozu ve %0,8 çinko stearat tozu 0,0001 ölçme hassasiyetine sahip hassas terazide tartılarak hazırlanmış ve 3 boyutlu karıştırıcıda 48 dev/dk. karıştırma hızında 60 dakika süreyle karıştırılarak homojenize hale getirilmiştir. Tez çalışmalarında toz karıştırma işleminde kullanılan üç boyutlu karıştırıcıya ait resim Şekil 5.3'te verilmektedir.



Şekil 5.3: (a) çinko stearat, (b) 3D karıştırma cihazı.

5.1.3 31CrMo12 Ön Alaşımli Çelik Tozlarının Kalıplanması

Homojen hale getirilen ön alaşımlı çelik ve çinko stearat toz karışımları, montajı tamamlanmış olan kalıptaki 4 hazneye, hazne başına 25 g toz karışımı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kalıp haznesine yerleştirilen tozların hazne içerisinde homojen dağılımı sağlandıktan sonra tozların üzerinden kalıp üst zımbaları yerleştirilmiştir. Devamında kalıp haznesindeki boşlukların alınması ve tozların tamamıyla hazne formunu alması için tozlar kalıp içerisinde 300 ton presleme kapasitesine sahip preste 2 mm/dk. ilerleme hızında 200 MPa’lık basınç altında soğuk preslenme işlemine tabi tutulmuştur. Tez çalışmalarında kullanılan presleme cihazı ve soğuk presleme aşaması Şekil 5.4’te verilmektedir.



Şekil 5.4: Tozların soğuk preslenme aşaması.

Presleme işleminin ardından kalıp ağzı 0,3 mm kalınlığında alüminyum folyodan yapılan kapak ile kapatılmış ve bağlantı noktaları 1500°C yüksek sıcaklıklara dayanıklı mastik ile kapatılmıştır. Bu işlemlerin ardından kalıp içerisine argon gazı verilerek mastiğin kurumması beklenmiştir. Bu sayede kalıp içerisine oksijen girişinin engellenmesi ve tozların oksitlenmesinin önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

5.1.4 Çelik Tozlarının 600°C’de Preslenmesi

Kalıp içerisine homojen olarak yerleştirilen çelik tozlarının oda sıcaklığı altında 200 MPa basınç altında ön presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ön presleme işlemi ile tozların kalıp şeklini alması sağlanmış fakat ham mukavemet kazandırılmamıştır. Tozların preslenerek ham mukavemet kazanabilmesi için kalıplanan çelik tozları ılık presleme işleminin yapılabilmesi için önceden 600°C’ye ulaştırılan fırına yerleştirilmiştir. Kalıp iç sıcaklığı 600°C’ye ulaşınca dek, yüksek sıcaklıklardaki oksitlenmenin önüne geçebilmek için kalıp içerisine Argon gazı

verilmeye devam edilmiştir. Kalıp iç sıcaklığı 600°C'ye ulaştıktan sonra bu sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiştir, daha sonra fırından çıkarılıp zaman kaybetmeden ve kalıp iç sıcaklığı 600°C'nin altına düşmeden pres makinesine alınmıştır. Pres makinesine alınan kalıp 600°C sıcaklıkta ve 300 MPa'lık basınç altında 5 mm/dk. ilerleme hızında preslenerek ılık presleme işlemi tamamlanmıştır. Kalıp sıcaklığı 150°C sıcaklığının altına düşene dek kalıba Argon gazı verilmeye devam etmiştir. Bütün bu işlemler sırasında kalıp sıcaklığı kalıp merkezine yerleştirilen termokupl vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Ilık presleme sonrasında ön sinterleme ve doğrudan Boro-Sinterleme işleminde kullanılmak üzere 13 adet numune elde edilmiştir. Üretilen 13 adet numuneden 7 adeti ön sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Kalan 6 adet numune doğrudan Boro-sinterleme ısıl işleminde kullanılmıştır. Ön sinterlenmiş 7 adet numuneden 6 adeti ön sinterleme sonrası borlama işlemine tabi tutulurken kalan 1 adet numune ise ön sinterleme sonrası borlama ve doğrudan Boro-Sinterleme işlemlerinin etkilerinin karşılaştırılmasında kullanılmıştır.



Şekil 5.5: Ilık presleme sonrasında kalıbın oda sıcaklığında soğuması.

5.1.5 Üretilen Numune Serileri

Soğuk pres ve sonrasında ılık pres yöntemi ile üretimi tamamlanan numuneler sadece sinterleme işlemi için, Ön Sinterleme + Borlama işlemi için ÖSB ve doğrudan Boro-Sinterleme işlemi için BS şeklinde kodlanmıştır. Uygulanan ısı işlem türü, sıcaklığı ve süresine bağlı olarak numunelere ait kodlama biçimleri Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1: Üretilen numune serileri ve üretim koşulları.

Uygulanan ısı işlem	Isıl işlem sıcaklığı (°C)	Isıl işlem süresi (Saat)	Numune kodu	Numune no
Sinterleme	1250	2	S1250	1
Ön Sinterleme + Borlama	950	2	ÖSB950-2	2
		4	ÖSB950-4	3
		6	ÖSB950-6	4
	1050	2	ÖSB1050-2	5
		4	ÖSB1050-4	6
		6	ÖSB1050-6	7
Boro-Sinterleme	950	2	BS950-2	8
		4	BS950-4	9
		6	BS950-6	10
	1050	2	BS1050-2	11
		4	BS1050-4	12
		6	BS1050-4	13

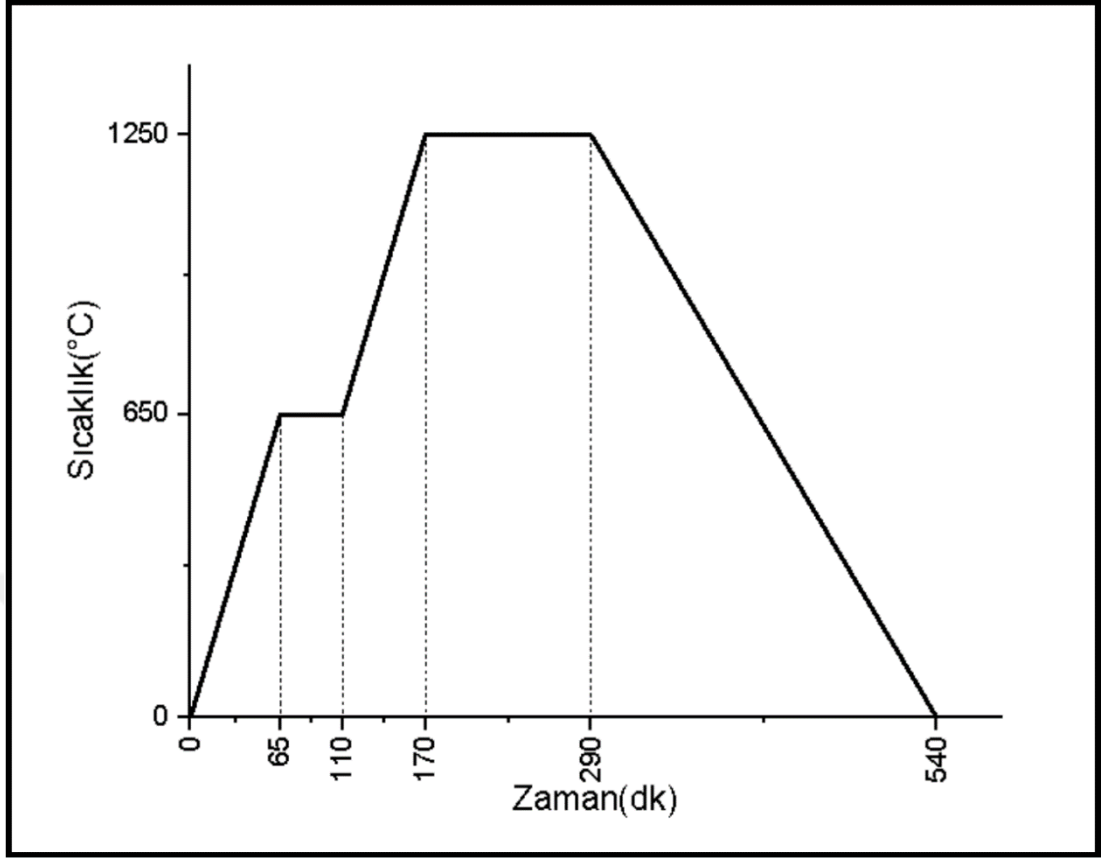
5.2 Ön Sinterleme

Ilık presleme işlemi sonucu elde edilen numuneler, serilerine göre ayrılarak ön sinterleme aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada sinterleme işlemleri Uşak Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü Endüstriyel Malzemeler ve Üretim Süreçleri Laboratuvarında bulunan tüp fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. Fırının atmosfer kontrolünü sağlamak için fırın içerisine Şekil 5.6’da görüldüğü gibi argon gazı verilerek numunelerin yüksek sıcaklıkta oksitlenmeleri önlenmiştir. Tez çalışmalarında kullanılan cihaz Şekil 5.6’da verilmektedir.



Şekil 5.6: Sinterlenme fırını.

Ön sinterlenmiş numune olarak kullanılması hedeflenen numune serileri Şekil 5.7'deki ısıtma işlem grafiğinde görüldüğü gibi 1250°C'de 2 saat ön sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. 2 saat sonunda numuneler fırın ortamında soğumaya bırakılmıştır. Numuneler oda sıcaklığına düştüğünde fırından alınarak 1250°C'de sinterlenmiş numune serileri elde edilmiştir. Sinterleme ısıtma işlemi sırasında fırın ısıtma hızı 10°C/dk. olarak belirlenmiş ve ani sıcaklık değişimlerinin parçalarda oluşturabileceği gerilim farklılıklarını engellemek, parçalarda homojen bir ısı dağılımı elde etmek için 650°C sıcaklıkta 45 dk. beklenmiştir. Isıtma işlem aşaması ve fırın ortamında soğuma süresi ile toplamda 540 dk. tamamlanmıştır.



Şekil 5.7: Ön sinterleme işleminin ısı işlem grafiği.

5.3 Boro-Sinterleme

Ilık presleme ve ön sinterleme sonrası elde edilen numuneler, Boro-Sinterleme işlemi gerçekleştirilmeden önce işlemin düzgün ve kaliteli gerçekleşmesi için 180-240-360-400-600-800-1000-1200 mesh boyutlarındaki SiC zımpara kağıtları kullanılarak yüzey zımparalama ve parlatma işlemi yapılmıştır. Yüzey parlatma işleminden sonra numuneler etüv fırınına alınarak nem giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Zımparalama-parlatma işlemi Boro-Sinterleme işlemi yapılacak olan numunelere işlemden hemen önce uygulanmıştır.

Boro-Sinterleme işlemi 950°C'de 2-4-6 saat ve 1050°C'de 2-4-6 saat olmak üzere iki farklı sıcaklıkta ve üç farklı sürede yapılmıştır. İşlem sırasında numuneler 600°C'de 30 dakika bekletilip daha sonra Boro-Sinterleme sıcaklıklarına ulaştıktan sonra (950°C-1050°C) 2-4-6 saat Boro-Sinterleme sıcaklığında bekletilmiştir. Boro-

Sinterleme işleminde bor kaynağı olarak Ekabor2 tozları kullanılmıştır. Borlama metodu olarak katı borlama metodu uygulanmıştır. Numuneler Boro-Sinterlemenin yapılacağı 316 östenitik paslanmaz çelikten imal edilen kalıba, bir adet ılık presleme işlemi uygulanmış ve doğrudan Boro-Sinterleme yapılacak numune yerleştirilmiştir. Bunun yanında doğrudan Boro-Sinterleme işleminin ön alaşımlı çelik tozların sinterlenebilirlikleri üzerine etkilerinin karşılaştırabilmek için bir adet 1250°C’de 2 saat ön sinterleme işlemi uygulanmış numune de kalıba yerleştirilerek borlama işlemine tabi tutulmuştur. Numune yerleşim şekli Şekil 5.8’de verilmektedir.

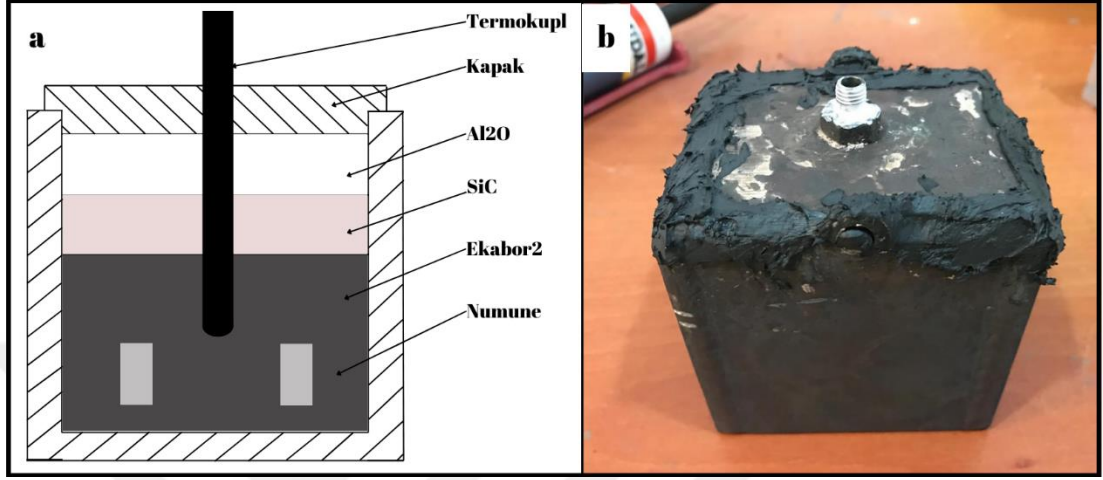


Şekil 5.8: Boro-Sinterleme kutusuna numunelerin dizilişi.

Boro-Sinterleme kalıbının bölümleri ve yerleşim şekli;

- En altta 15 mm kalınlığında Ekabor2 tozu,
- Aralarında 34 mm olacak şekilde iki numune yatay halde enlemesine olacak şekilde kalıbın ortasına yerleştirilmiştir,
- Numunelerin aralarını dolduracak şekilde ve üzerlerinde 15 mm kalınlığında olacak şekilde Ekabor2 tozu,

- Ekabor2 tozunun üzerine 15 mm kalınlığında SiC tozu,
- SiC tozlarının üzerine 13 mm kalınlığında Alümina tozu,
- Kalıp kapağındaki delikten kalıp göbeğine kadar termokupl yerleştirilmiştir.



Şekil 5.9: (a) Boro-Sinterleme kutusu iç dizilimi, (b) Boro-Sinterleme öncesinde kutunun son hali.

Boro-Sinterleme işleminde 80x80x80 mm boyutunda olan 316 östenitik paslanmaz çelikten imal edilen kalıbın taban kısmına yaklaşık olarak 45 mm kalınlığında Ekabor2 tozları doldurulmuştur. Doldurulan Ekabor2 tozlarının orta noktasına, Boro-Sinterleme sıcaklığına uygun tercih edilen iki numune belirli aralıklarla yerleştirilmiştir. Ekabor2 tozlarının üzerlerine 15 mm kalınlığında oksidasyon engelleyici SiC tozu koyulup onun üzerine de yaklaşık 15 mm kalınlığında Oksijen girişini engellemek için Alümina tozu doldurularak kalıp hacmi tamamen kaplanmıştır daha sonra kalıbın üst kapağı kapatılarak, kapakta yer alan delikten kalıbın iç sıcaklığını ölçebilmek amaçlı termokupl yerleştirilerek kalıp sıcaklığı takibi yapılmıştır. Kalıp tamamlandıktan sonra kalıba oksijen girebilecek bölgeler yüksek sıcaklık mastiği ile kaplanmıştır.



Şekil 5.10: Boro-Sinterleme fırını.

Boro-Sinterleme süreleri kalıp iç sıcaklığının Boro-Sinterleme için istenilen sıcaklığa ulaşması beklenmiştir. Kalıp istenilen Boro-Sinterleme sıcaklığına ulaştığında 2-4-5 saatlik süre ile fırın içerisinde bekletilmiştir, 2-4-6 saatlik sürelerin sonunda fırın kapatılarak, fırın sıcaklığının 400°C'nin altına düştüğünde kalıp fırından çıkartılarak Şekil 5.11'de görüldüğü gibi oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına gelen kalıp açılarak Boro-Sinterlenmiş numuneler kalıptan çıkartılmıştır.



Şekil 5.11: Boro-Sinterleme sonrası kutunun soğumaya bırakılması.

5.3.1 950°C’de 2-4-6 Saat Boro-Sinterleme

950°C’de yapılan Boro-Sinterleme işleminde 2 saat, 4 saat ve 6 saatlik süreler olmak üzere üç farklı Boro-Sinterleme süresi vardır. Boro-Sinterleme işlemi Pamukkale Üniversitesi BAP birimi kapsamın da temin edilen Thermnevo markalı fırında yapılmıştır.

2 saatlik Boro-Sinterleme işleminde, Ön Sinterleme + Borlama ısıt işlemi için ÖSB950-2 kodlu 2 numaralı numune kullanılırken, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi için ise BS950-2 kodlu 8 numaralı numune kullanılmıştır.

4 saatlik Boro-Sinterleme işleminde, Ön Sinterleme + Borlama ısıt işlemi için ÖSB950-4 kodlu 3 numaralı numune kullanılırken, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi için ise BS950-4 kodlu 9 numaralı numune kullanılmıştır.

6 saatlik Boro-Sinterleme işleminde, Ön Sinterleme + Borlama ısıt işlemi için ÖSB950-6 kodlu 4 numaralı numune kullanılırken, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi için ise BS950-6 kodlu 10 numaralı numune kullanılmıştır.

5.3.2 1050°C’de 2-4-6 Saat Boro-Sinterleme

1050°C’de yapılan Boro-Sinterleme işleminde 2 saat, 4 saat ve 6 saatlik süreler olmak üzere 3 farklı Boro-Sinterleme süresi vardır.

2 saatlik Boro-Sinterleme işleminde, Ön Sinterleme + Borlama ısıt işlemleri için ÖSB1050-2 kodlu 5 numaralı numune kullanılırken, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi için ise BS1050-2 kodlu 11 numaralı numune kullanılmıştır.

4 saatlik Boro-Sinterleme işleminde, Ön Sinterleme + Borlama ısıt işlemleri için ÖSB1050-4 kodlu 6 numaralı numune kullanılırken, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi için ise BS1050-4 kodlu 12 numaralı numune kullanılmıştır.

6 saatlik Boro-Sinterleme işleminde, Ön Sinterleme + Borlama ısıt işlemleri için ÖSB1050-6 kodlu 7 numaralı numune kullanılırken, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi için ise BS1050-6 kodlu 13 numaralı numune kullanılmıştır.

5.4 Numune Yoğunluklarının Hesaplanması

Üretilen numunelerden her işlem sonrası yoğunluk hesabı yapılarak Boro-Sinterleme işleminin istenilen düzeyde ilerleyip ilerlemediği analiz edilmiştir. Yoğunluk hesaplama işlemi denklem 5.1’de belirtildiği üzere numunenin ağırlığı, numune hacmine bölünerek hesaplanmıştır. Ilık pres işlemi sonunda alınan yoğunluk değerine ek olarak yapılan ön sinterleme ve Boro-Sinterleme işlem basamaklarında işlem sonlarında da yoğunluk hesaplamaları yapılmıştır. Yoğunluğun hesabı denklem 5.1’e göre yapılmıştır.

$$\text{Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Kütle (g)}}{\text{Hacim (cm}^3\text{)}} \quad 5.1$$

5.5 Boro-Sinterleme Sonrası Karakterizasyon İşlemleri

Soğuk ve ılık pres işlem basamakları sonunda üretimi gerçekleştirilen 32x13x9 mm boyutlarındaki numunelere Boro-Sinterleme işlemi uygulanmıştır. Boro-

Sinterleme sonrasında analiz işlemlerine uygun olarak numuneler 13x10x9 mm boyutlarında bölünmüştür. Elde edilen numunelere XRD (X- Isını Difraktometresi), FESEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu), EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizleri yapılarak sertlik ve aşınma deneyi ile karakterize edilmiştir.

5.5.1 Numunelerin Kesim İşlemi

Boro-Sinterleme işleminden sonra elde edilen numunelerin bölünerek aşınma, sertlik, mikro yapı ve XRD numunelerinin elde edilmesi için AKSÖZ ARGE MÜHENDİSLİK SANAYİ ve TİCARET LTD. ŞTİ. bünyesinde bulunan sarmal tel erozyon cihazı kullanılarak numuneler Şekil 5.12’de görüldüğü gibi uygun parçalara bölünmüştür.



Şekil 5.12: Örnek bölünmüş numuneler.

5.5.2 Zımparalama, Parlatma ve Dağlama İşlemleri

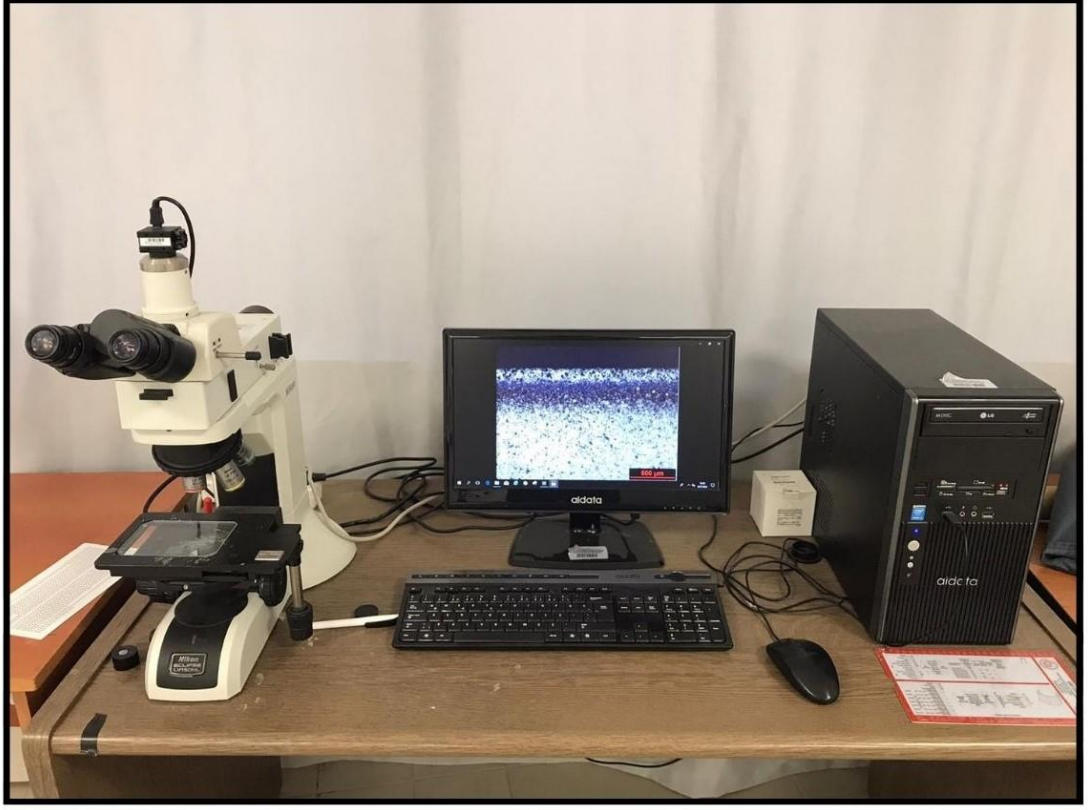
Boro-Sinterleme sonrası elde edilen numunelerden, optik görüntünün alınabilmesi için numune kesitinden Metkon marka FORCIPOL 1V modeli zımparalama ve parlatma cihazında 180 meshten başlanılarak 1200 meshlik zımparaya kadar zımparalanmıştır. Zımparalama sonrasında 6 mikronluk parlatma keçesinde parlatma solüsyonu ile parlatılan numuneler, %2’lik Nitrik asit (HNO_3) içeren Nital çözeltisi ile 5 saniye dağlanarak optik görüntü alımı için hazırlanmıştır. Tez çalışmalarında kullanılan cihaz Şekil 5.13’te verilmiştir.



Şekil 5.13: Zımparalama ve parlatma cihazı.

5.5.3 Optik Mikroskop Görüntüleri

Dağlanan numunelerden Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Nikon marka Eclipse LV150NL model optik mikroskop (OM) ile 50X den 200X büyötmeye kadar görüntü alınmıştır. Tez çalışmalarında kullanılan cihaz Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14: Optik mikroskop cihazı.

5.5.4 Mikro Sertlik

Mikro sertlik ölçümlerinin alınmasında Pamukkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Hardway marka DV-1AT-4.3 model Vickers sertlik cihazı kullanılmıştır. Tel erozyon yöntemi ile kesilen numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri sonrasında kesitleri boyunca yüzeyden merkeze doğru 50 μm aralıklarda 18 farklı noktadan sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri 100g yük 10sn süre ile ($\text{HV}_{0.1}$) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmalarında kullanılan Vickers sertlik cihazı Şekil 5.15’te verilmiştir.



Şekil 5.15: Vickers sertlik ölçüm cihazı.

5.5.5 Aşınma Deneyi

Aşınma deneyleri Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan Pin-on disk aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma öncesinde ve sonrası numune ağırlıkları 0,0001 ölçme hassasiyetine sahip hassas terazi ile ölçülerek ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Numuneler aşınma deneyinde 10N ve 15N'luk yükler altında, her yükte 50 metre, 100 metre ve 150 metre mesafe katetecek şekilde 320 meshlik SiC zımparada aşındırıldı. Aşınma sırasında cihaz tarafından Şekil 5.16'da görüldüğü gibi loadcell programı ile sürtünme grafiği sürekli olarak kaydedildi. Aşınma deneyinde, numunelerin Boro-Sinterleme sırasında Ekabor2 ile temas eden yüzeyleri kullanıldı. Deney numuneleri 13x10x9 mm boyutlarında tercih edilmiştir. Tez çalışmalarında kullanılan Pin-on disk aşınma cihazı Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16: Pin-on disk aşınma cihazı.

Aşınma sonrasında ulaşılan ağırlık kayıpları ve sürtünme verileri ile sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve aşınma oran grafikleri çizilmiştir. Hesaplamalarda aşağıdaki formüller kullanılmıştır (ASTM S. 1995).

Hacim kaybı;

$$[\text{Ağırlık kaybı(g) / yoğunluk(g/cm}^3\text{)}] \times 1000 \quad (5.2)$$

Aşınma oranı;

$$[\text{Hacim kaybı (mm}^3\text{) / kuvvet (N) x alınan yol (m)}] \quad (5.3)$$

Sürtünme katsayısı;

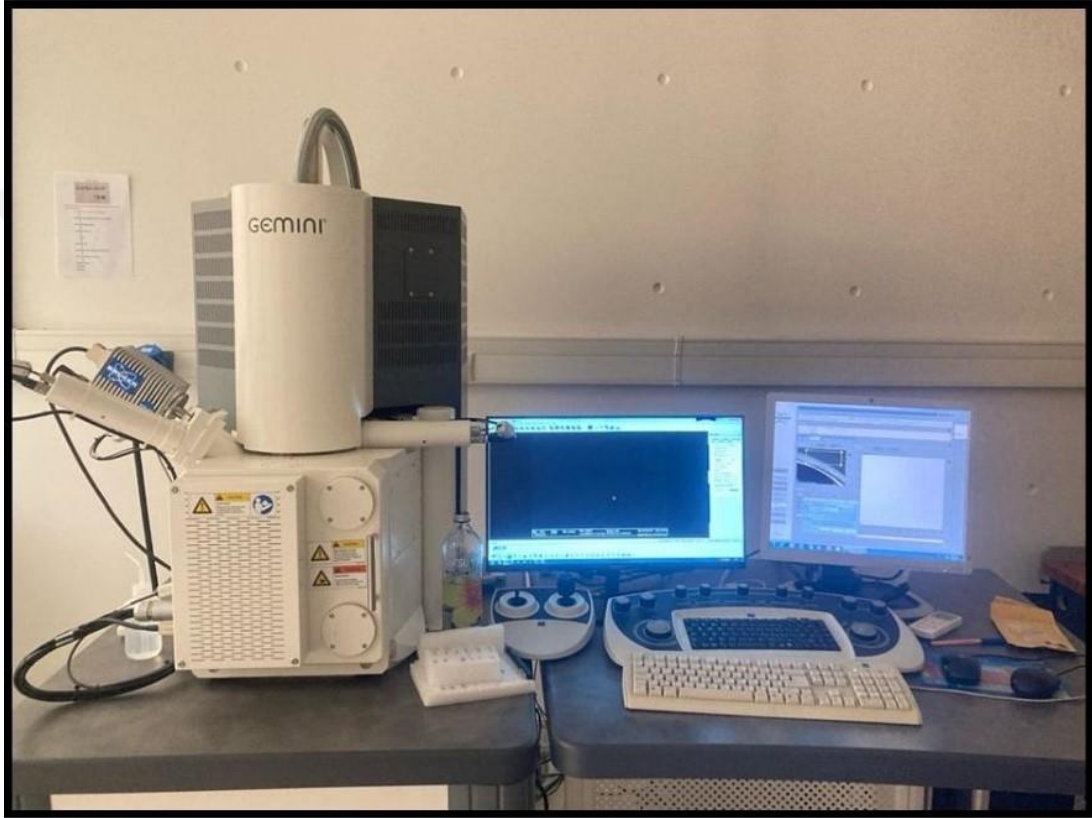
$$\mu = F/P \quad (5.4)$$

F= Loadcell tarafından kaydedilen sürtünme kuvveti,

P= Numunelere uygulanan normal yük.

5.5.6 FESEM ve EDS Analizleri

FESEM ve EDS analizleri, Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde yer alan ZEISS marka ve SUPRA 40VP model Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM), FESEM cihazına entegre edilmiş Elementel Dağılım Spektrometresin (EDS) ile yapılmıştır. Tez çalışmalarında kullanılan FESEM cihazının resmi Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17: FESEM analiz cihazı.

6. BULGULAR

6.1 Pres Basıncı ve Presleme Sıcaklığı

Yapılan denemeler sırasında 31CrMo12 ön alaşımlı T/M çelik tozlarının oda sıcaklığında doğrudan preslenemediği tespit edildi. Devam eden çalışmalarda kalıplama sonrası 200 MPa'lık basınçta ön presleme ve 600°C'de 300 MPa'lık basınçta ılık presleme işleminin ham numunelerin elde edilmesinde yeterli olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmalar sırasında 31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozlarının oksitlenmemesi için işlemlerin Argon gazı atmosferinde yapılmasının faydalı olduğu tespit edilmiştir.

6.2 Yoğunluk Ölçümleri

Numune üretim aşamasından, Boro-Sinterleme işlemlerinin sonucuna kadar yoğunluk ölçümü yapılmıştır.

Ilık presleme sonrası elde edilen numune ham yoğunlukları Tablo 6.1'de belirtilmiştir. Bu aşamada numune yoğunlukları üretim aşamasına bağlı olarak farklı olmasına rağmen, üretilen numunelerin ham yoğunluğu beklenen değerlerde 5,90 g/cm³ ile 6 g/cm³ aralığında ölçülmüştür.

Tablo 6.1: İlk pres sonrası numunelerin ham yoğunlukları.

Numune No	Ham Yoğunluk(g/cm ³)
1	6,106
2	5,995
3	6,083
4	6,048
5	6,054
6	6,130
7	6,079
8	6,045
9	6,071
10	6,108
11	5,963
12	6,000
13	6,012

İlk pres sonrasında ön sinterleme yapılan numunelerin yoğunlukları Tablo 6.2’de görülmektedir. 1250°C’de 2 saat ön sinterleme yapılan numunelerin yoğunlukları 6,90-7,10 g/cm³ aralığında ölçülmüştür.

Tablo 6.2: 1250°C’de ön sinterleme sonrası numune yoğunlukları.

Numune No	Ön Sinterleme Yoğunluğu(g/cm ³)
1	6,936
2	7,109
3	7,107
4	7,008
5	7,000
6	6,987
7	6,928

Boro-Sinterleme sonrası yapılan yoğunluk ölçümleri Tablo 6.3’te görülmektedir. En yüksek yoğunluk değeri 1250°C’de 2 saat ön sinterleme yapılan numunelerde ölçülmüştür. 1050°C’de yapılan Boro-Sinterleme işleminin daha fazla yoğunluk artışı sağladığı tespit edilmiştir. Tablo 6.3 incelendiğinde 6 saatlik Boro-Sinterleme süreleri 2 farklı sıcaklıkta da kendi Boro-Sinterleme sıcaklıklarında en yüksek numune yoğunluklarının ölçüldüğü süreler olarak görülmüştür.

Tablo 6.3: Boro-Sinterleme sonrası numunelerin yoğunlukları.

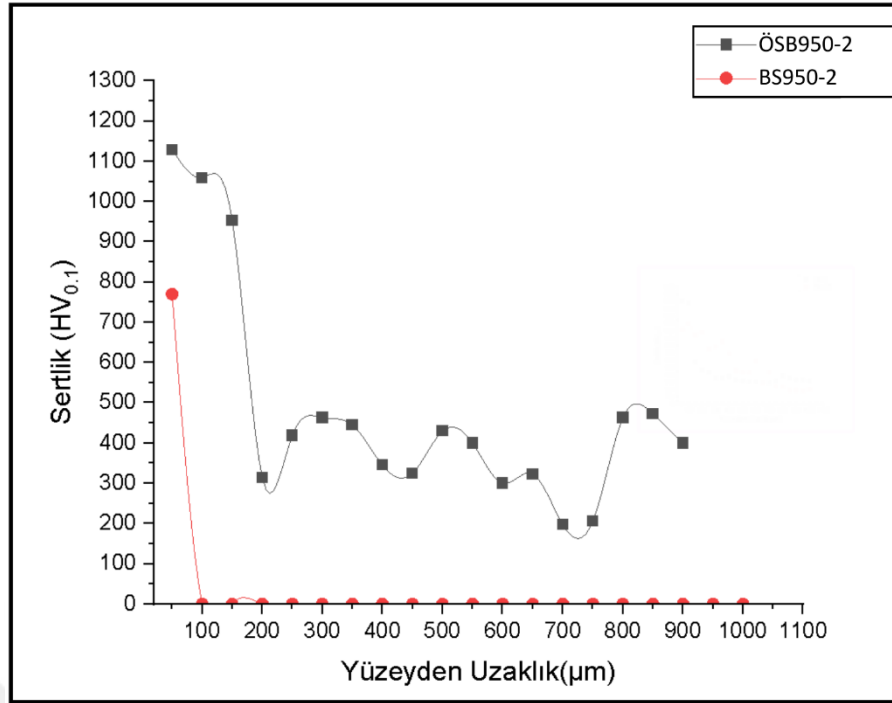
Uygulanan ısı işlem	Isıl işlem sıcaklığı (C°)	Isıl işlem süresi (Saat)	Numune kodu	Numune Yoğunluğu(g/cm ³)
Ön Sinterleme + Borlama	950	2	ÖSB950-2	7,101
		4	ÖSB950-4	7,182
		6	ÖSB950-6	7,096
	1050	2	ÖSB1050-2	7,044
		4	ÖSB1050-4	7,115
		6	ÖSB1050-6	7,194
Boro-Sinterleme	950	2	BS950-2	6,198
		4	BS950-4	6,269
		6	BS950-6	6,303
	1050	2	BS1050-2	6,354
		4	BS1050-4	6,125
		6	BS1050-4	6,331

6.3 Sertlik Verileri

Boro-Sinterleme yapılan numunelerin sertlik ölçümleri 50 µm aralıklarla kesit boyunca dıştan içe olacak şekilde numunenin orta noktasına kadar yapılmıştır.

Şekil 6.1’de 950°C ve 2 saat Boro-Sinterleme işlemi uygulanmış doğrudan Boro-Sinterleme ve Ön Sinterleme + Borlama numunelerine ait sertlik ölçümleri görülmektedir. ÖSB950-2 kodlu numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının sertliği 1150-1000 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. Borür tabakasının kalınlığı ise yoğunlukla homojen bir yapıda olup 100 µm olarak ölçülmüştür. ÖSB950-2 numunenin borür tabakası sonrası sertlik değerleri 500 HV_{0.1} ile 200 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.

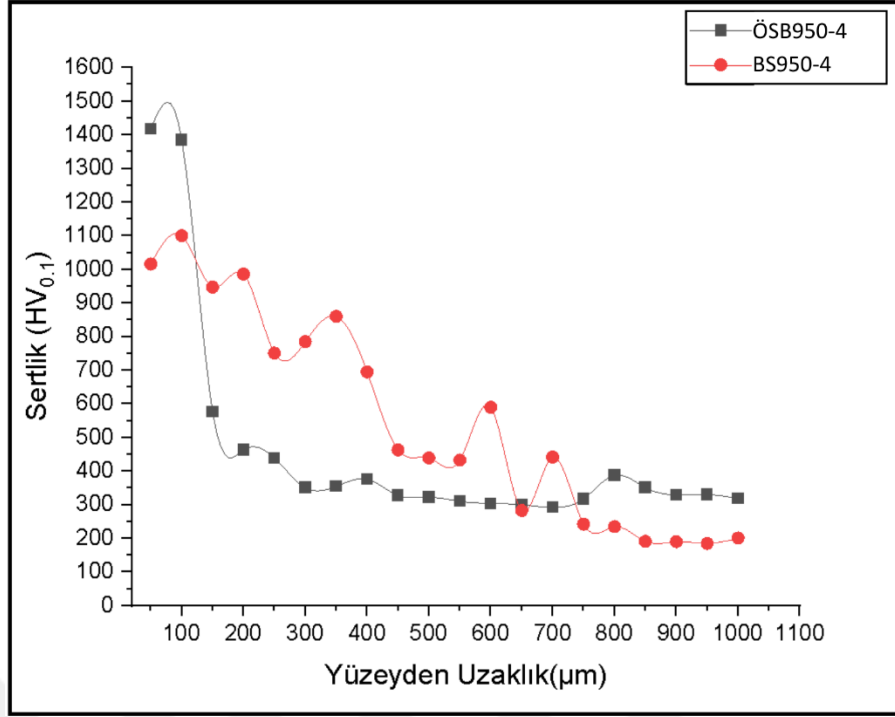
Doğrudan Boro-Sinterleme numunesi olan BS950-2 kodlu numunede 35 µm kalınlığında borür tabakasının oluştuğu görülmüştür, oluşan bu borür tabakasının sertliği 770 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. Borür tabakasının oluşmasına rağmen ölçüm derinliği arttıkça sertlik değeri alınamamış ve sinterlemenin başarılı olamadığı görülmüştür. Bu değerler sonucunda Boro-Sinterleme işleminin yapıldığı 950°C sıcaklığının yanı sıra 2 saatlik Boro-Sinterleme süresinin sinterleme için yetersiz kaldığı sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 6.1: 950°C’de 2 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB950-2 ve BS950-2 kodlu numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 6.2’de 950°C’de 4 saat Boro-Sinterleme işlemi uygulanmış doğrudan Boro-Sinterleme ve Ön Sinterleme + Borlama numunelerine ait sertlik ölçümleri görülmektedir. ÖSB950-4 kodlu numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının sertliği 1385-1418 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. Borür tabakasının kalınlığı ise çoğunlukla homojen bir yapıda olup 100 μm olarak ölçülmüştür. ÖSB950-4 numunenin borür tabakası sonrası sertlik değerleri keskin şekilde düşerek 350 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.

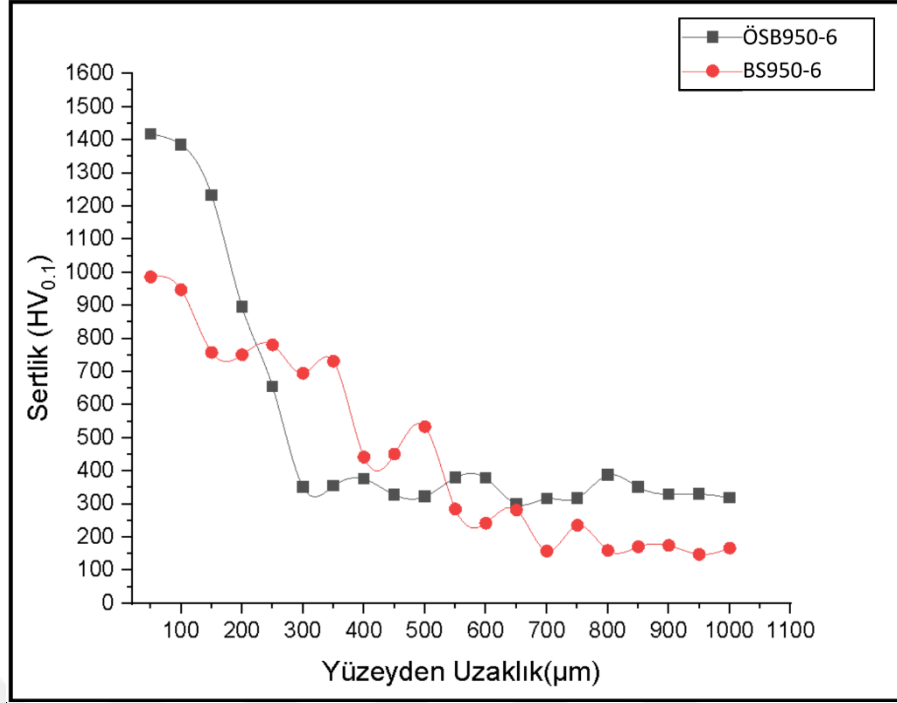
Doğrudan Boro-Sinterleme numunesi olan BS950-4 kodlu numunede 370 μm kalınlığında borür tabakasının oluştuğu görülmüştür, oluşan bu borür tabakasının sertliği 900-1000 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. 350-800 μm derinliklerdeki sertlik değerleri Şekil 6.2’deki grafikte görüldüğü gibi yüzeyden derine doğru azalarak devam etmektedir. Matris malzeme sertliği ise ortalama 210 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.2: 950°C’de 4 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB950-4 ve BS950-4 kodlu numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 6.3’te 950°C’de ve 6 saat Boro-Sinterleme işlemi uygulanmış doğrudan Boro-Sinterleme ve Ön Sinterleme + Borlama numunelerine ait sertlik ölçümleri görülmektedir. ÖSB950-6 kodlu numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının sertliği 1220-1420 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. Borür tabakasının kalınlığı ise çoğunlukla homojen bir yapıda olup 150 μm olarak ölçülmüştür. ÖSB950-6 kodlu numunenin borür tabakası sonrası sertlik değerleri ortalama 350 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür bu değerlerin ÖSB950-4 kodlu numuneye kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda süre ve sıcaklık artışı ile bor difüzyonunda artışın sağlandığı söylenebilir.

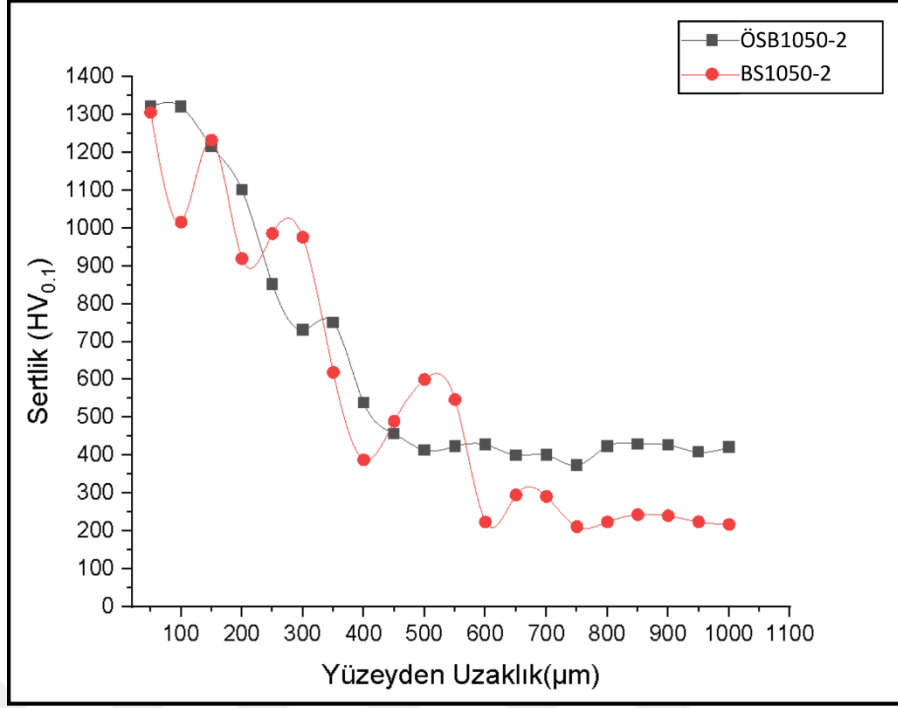
Doğrudan Boro-Sinterleme numunesi olan BS950-6 kodlu numunede 350 μm kalınlığında borür tabakasının oluştuğu görülmüştür, oluşan bu borür tabakasının sertliği 700-1000 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. 350-800 μm derinliklerdeki sertlik değerleri Şekil 6.3’teki grafikte görüldüğü gibi yüzeyden merkeze doğru 500 HV_{0.1}’den 200 HV_{0.1} ye azalarak devam ettiği görülmüştür. Matris sertliği ise 280-180 HV_{0.1} arasında ölçülmüştür.



Şekil 6.3: 950°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB950-6 ve BS950-6 kodlu numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 6.4’te 1050°C ve 2 saat Boro-Sinterleme işlemi uygulanmış doğrudan Boro-Sinterleme ve Ön Sinterleme + Borlama numunelerine ait sertlik ölçümleri görülmektedir. ÖSB1050-2 kodlu numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının sertliği 1100-1320 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. Borür tabakasının kalınlığı ise 300 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 6.4’te görüldüğü gibi borür tabakası sonrası 300-450 μm aralığındaki derinliklerde sertlik değerleri 500-800 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. ÖSB1050-2 kodlu numunenin matris malzeme sertliği ise 400-450 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür.

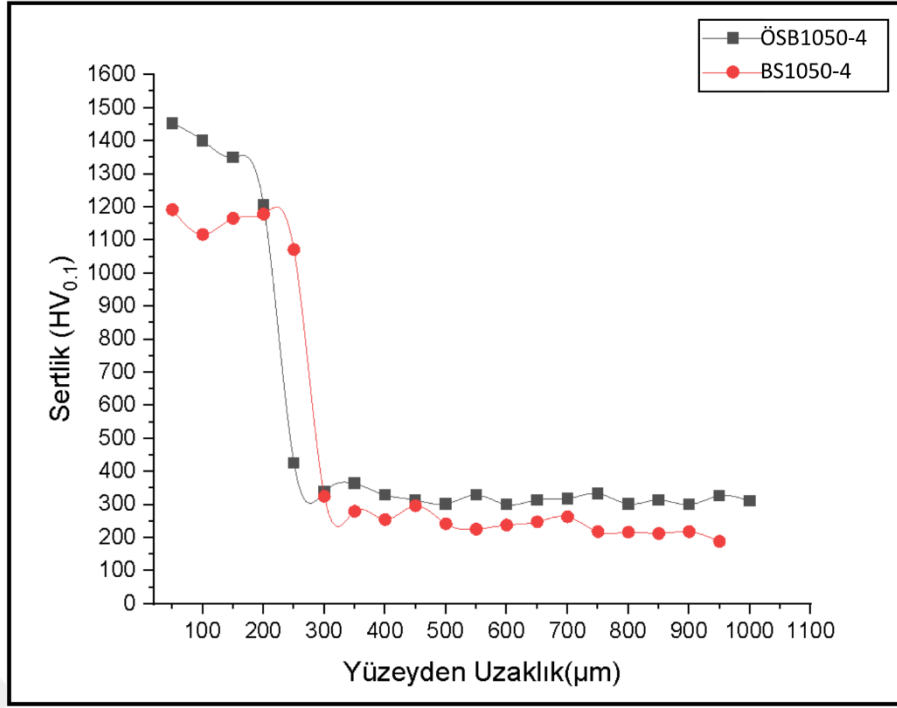
Doğrudan Boro-Sinterleme numunesi olan BS1050-2 kodlu numunede 350 μm kalınlığında borür tabakasının oluştuğu görülmüştür, oluşan bu borür tabakasının sertliği 700-1300 HV_{0.1} arasında farklılık göstermiştir. Ölçüm derinliği arttıkça sertlik değerleri 500 HV_{0.1}’den 200 HV_{0.1} ye inmiştir. Numunenin matris sertliği ortalama 200 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.4: 1050°C’de 2 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB1050-2 ve BS1050-2 kodlu numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 6.5’te 1050°C ve 4 saat Boro-Sinterleme işlemi uygulanmış doğrudan Boro-Sinterleme ve Ön Sinterleme + Borlama numunelerine ait sertlik ölçümleri görülmektedir. ÖSB1050-4 kodlu numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının sertliği 1250-1450 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. Borür tabakasının kalınlığı ise çoğunlukla homojen bir yapıda olup 250 μm olarak ölçülmüştür. 250 μm derinlikten sonra yapılan sertlik ölçümleri matris malzemesinin sertliği ortalama 350 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.

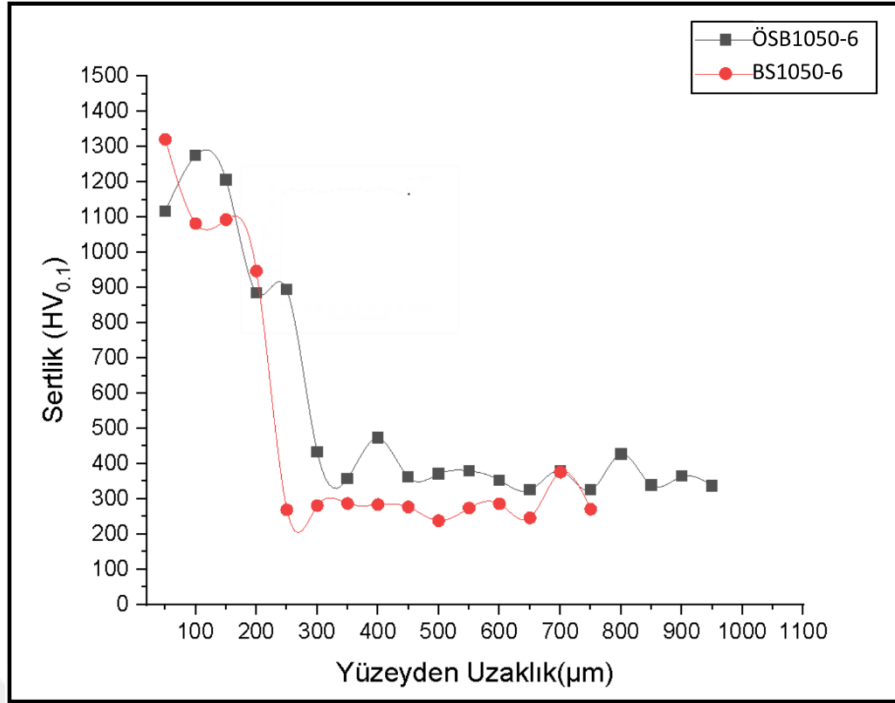
Doğrudan Boro-Sinterleme numunesi olan BS1050-4 kodlu numunede oluşan borür tabakasının kalınlığı 300 μm olarak ölçülmüştür. Oluşan bu borür tabakasının sertliği 1100-1250 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. Matris malzeme sertliği ise Şekil 6.5’te verilen grafikte görüldüğü gibi ortalama 280 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.5: 1050°C’de 4 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB1050-4 ve BS1050-4 kodlu numunelerin sertlik değerleri.

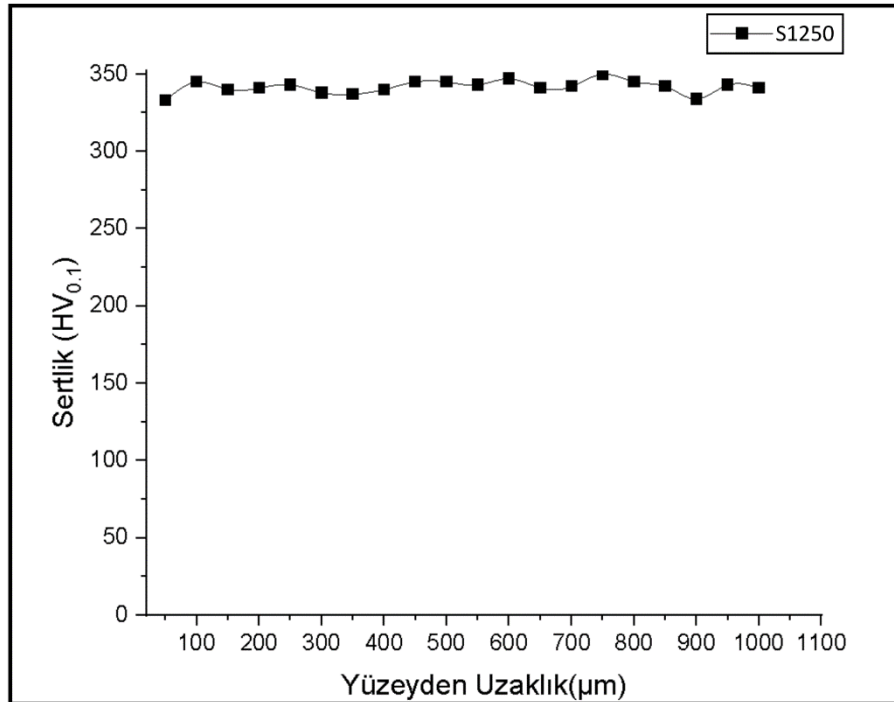
Şekil 6.6’da 1050°C ve 6 saat Boro-Sinterleme işlemi uygulanmış doğrudan Boro-Sinterleme ve Ön Sinterleme + Borlama numunelerine ait sertlik ölçümleri görülmektedir. ÖSB1050-6 kodlu numunenin yüzeyinde oluşan borür tabakasının sertliği 1100-1300 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. Borür tabakasının kalınlığı ise 150 μm olarak ölçülmüştür. 150 μm derinlikten sonra 150-250 μm aralığındaki ölçümlerde sertlikler 890 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. Matris malzemesinin sertliği ortalama 380 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.

Doğrudan Boro-Sinterleme numunesi olan BS1050-6 kodlu numunede oluşan borür tabasının kalınlığı 250 μm olarak ölçülmüştür. Bu borür tabakasının sertliği 1000-1320HV_{0.1} aralığında, matris malzeme sertliği ise Şekil 6.6’da verilen grafikte görüldüğü gibi ortalama 280 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.6: 1050°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme sonrası ÖSB1050-6 ve BS1050-6 kodlu numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi mikro sertlik ölçümleri sonucunda sadece 1250° C’de sinterlenen S1250 kodlu numunenin sertlik sonuçları oldukça homojen olup 335-345 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür.



Şekil 6.7: 1250°C’de 2 saatlik sinterleme işlemi uygulanan S1250 kodlu numunenin sertlik değerleri.

Mikro sertlik grafikleri incelendiğinde malzemelere uygulanan Boro-Sinterleme işlemi, malzemelerin yüzeyinde sert bir borür tabakası oluştururken, uygulanan süreye ve sıcaklığa bağlı olarak grafiklerde görüldüğü gibi numune yüzeyinden şartlara ve numune türüne göre belirli bir derinliğe kadar numune sertliğini artırmıştır. Numunelerin orta nokta sertliklerine yani matris sertliklerine bakıldığında, 1250°C’de Ön Sinterlenmiş olan tüm numunelerin sertlikleri, Boro-Sinterleme (Borlama) işlemi sonrasında ortalama 350-400 HV_{0.1} aralığında olduğu görülmüştür. Sadece Ön Sinterlenmiş S1250 kodlu numunenin sertlik değerinin de bu değere oldukça yakın olduğu Şekil 6.7’deki grafikte görülmektedir.

Doğrudan Boro-Sinterleme numunesi olan numunelerin orta nokta yani matris sertlikleri ise Ön Sinterleme+Borlama numunelerine kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonuç Boro-Sinterleme işleminin yapıldığı 950°C ve 1050°C sıcaklıkların 1250°C sinterleme sıcaklığına göre düşük kaldığına ve bunun toz taneleri arasında bağ oluşumunun daha yetersiz kalmasına atfedilmektedir. Doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelerin orta nokta sertlikleri grafiklerde görüldüğü gibi sıcaklık ve süre artışına bağlı olarak artış göstermektedir.

Elde edilen grafikler incelendiğinde oluşan borür tabakalarının sertliklerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Fakat doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelerde oluşan borür tabakasının kalınlığının, 1250°C’de 2 saat Ön Sinterlenmiş numunelerde oluşan borür tabakasının kalınlığından fazla olduğu görülmüştür. Bu durum doğrudan Boro-Sinterleme uygulana numunelerin sahip oldukları düşük yoğunluktan kaynaklanmaktadır. Hem Ön Sinterleme+Borlama hem de doğrudan Boro-Sinterleme numunelerinde oluşan bu borür tabakasının kalınlığının süreye bağlı olarak arttığı görülmüştür.

950°C’de yapılan doğrudan Boro-Sinterleme numunelerinde borür tabakasının devamında sertliklerin 300 µm derinlikten 800 µm derinliğe kadarki bölgede sertliklerin yaklaşık 400-800 HV_{0.1} aralığında olduğu ölçülmüştür ve daha sonraki derinliklerde grafiklerde görülen matris sertlik değerleri elde edilmiştir. Ön Sinterleme+Borlama uygulanan numunelerde böyle bir durumun olmadığı, borür tabakasından sonraki derinliklerde sertliklerin doğrudan matris sertliğine indiği görülmüştür. Bu sonuç doğrudan Boro-Sinterlenmiş numunelerdeki yüksek gözenekli

yapıların bor atomlarının daha derinlere difüzyonuna imkân vererek borlama derinliğini arttırması şeklide açıklanmaktadır. Ön sinterlenmiş numunelerin sahip oldukları yüksek yoğunlukları bor atomlarının difüzyonunu yavaşlatmakta ve borür tabakasının derinliğinin düşük seviyede kalmasına neden olmaktadır. Ön Sinterleme+Borlama numunelerinin matris sertlikleri doğrudan Boro-Sinterleme numunelerine kıyasla yaklaşık olarak 200 HV_{0.1} daha yüksek ölçülmüştür.

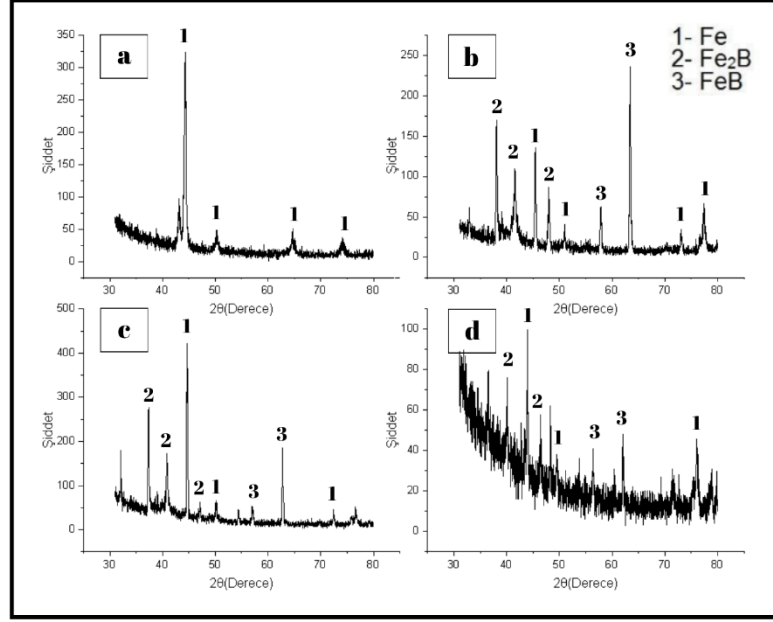
1050°C’de yapılan Boro-Sinterleme sonrasında ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde Ön Sinterleme+Borlama uygulanan ve doğrudan Boro-Sinterleme numunelerinin sertlik değerlerinin grafikleri Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da görüldüğü gibi paralellik gösterdiği görülmüştür. 1050°C’de yapılan Boro-Sinterleme sonrasında Ön Sinterleme+Borlama uygulanan ve doğrudan Boro-Sinterleme numunelerinin matris sertlik değerleri arasında tüm sürelerinde yaklaşık 100 HV_{0.1}’lik fark olduğu görülmüştür.

Elde edilen sertlik grafikleri incelendiğinde Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da değerleri verilen 1050°C’de 4 ve 6 saatte yapılan Boro-Sinterleme işlemlerinde numune yüzeyinde oluşan borür tabakasının daha ince olduğu görülmüştür. Borür tabakasının ardından, sertlik ölçümü derinleştikçe numunelerin daha homojen sertlik değerleri verdiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin, yüzeyde oluşan borür tabakasının bor atomlarının daha derine difüze olmasını engellemesi veyahut sinterleme ile toz taneleri arasındaki boşlukların çok daha az oluşundan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

6.4 XRD Analizi

Çeliklerin borlanması sonrasında yapıda Fe₂B, FeB ve Fe fazlarına karşılık gelen pikler tespit edilmektedir (Erdoğan ve diğ. 2020). Boro-Sinterleme işlemi yapılan numunelerde, oluşacak yeni fazların tespiti için XRD analizine başvurulmuştur. Şekil 6.8’de 1250°C’de 2 saat sinterlenmiş S1520 numunesi ile 950°C sıcaklıkta ve 6 saat Ön Sinterleme sonrası Borlama işlemi uygulanmış ÖSB950-6 numunesi ve doğrudan Boro-Sinterleme uygulanmış BS950-4 ve BS950-6 kodlu numunelerin XRD analiz sonuçları verilerek karşılaştırılmıştır. Numunelerin XRD

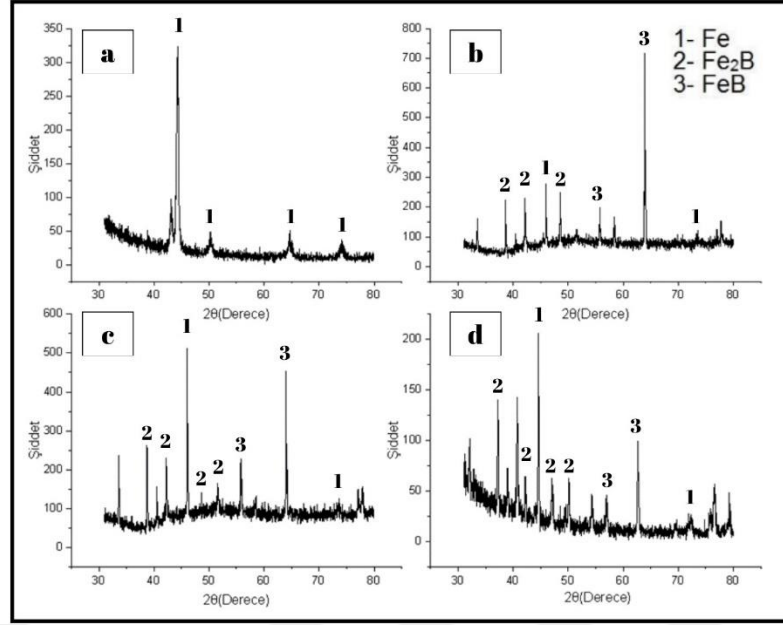
analiz verileri karşılaştırıldığında ÖSB950-6 ve BS950-4, BS950-6 kodlu numunelerde Fe_2B , FeB ve Fe fazlarına karşılık gelen pikler görülürken S1250 kodlu numunenin XRD verilerinde sadece Fe'ye karşılık gelen pikin olduğu görülmektedir. BS950-6 kodlu numunenin XRD verilerinde gürültülerin olmasına rağmen Fe_2B , FeB ve Fe fazlarının pikleri görüntülenebilmiştir.



Şekil 6.8: (a) S1250 kodlu numunenin XRD grafiği, (b) ÖSB 950-6 kodlu numunenin XRD grafiği, (c) BS950-4 kodlu numunenin XDR grafiği, (d) BS950-6 kodlu numunenin XRD grafiği.

Numunelerde oluşan Fe_2B ve FeB fazları malzemenin sertliğini artıran ana unsurlar olarak görülmektedir. Boro-Sinterleme süresine ve sıcaklığına bağlı olarak Fe_2B ve FeB fazlarına karşılık gelen piklerin şiddetlerinin arttığı görülmüştür. (Koç 2019)

Şekil 6.9’de 1050°C sıcaklıkta ve 6 saat Ön Sinterleme sonrası Borlama işlemi uygulanmış ÖSB1050-6 ve doğrudan Boro-Sinterleme uygulanmış BS1050-4 ve BS1050-6 kodlu numuneler ve bunlara ek olarak sadece 1250°C’de sinterlenmiş olan S1250 kodlu numunenin XRD analiz grafikleri görülmektedir.



Şekil 6.9: (a) S1250 kodlu numunenin XRD grafiği, (b) ÖSB1050-6 kodlu numunenin XRD grafiği, (c) BS1050-4 kodlu numunenin XRD grafiği, (d) BS1050-6 kodlu numunenin XRD grafiği.

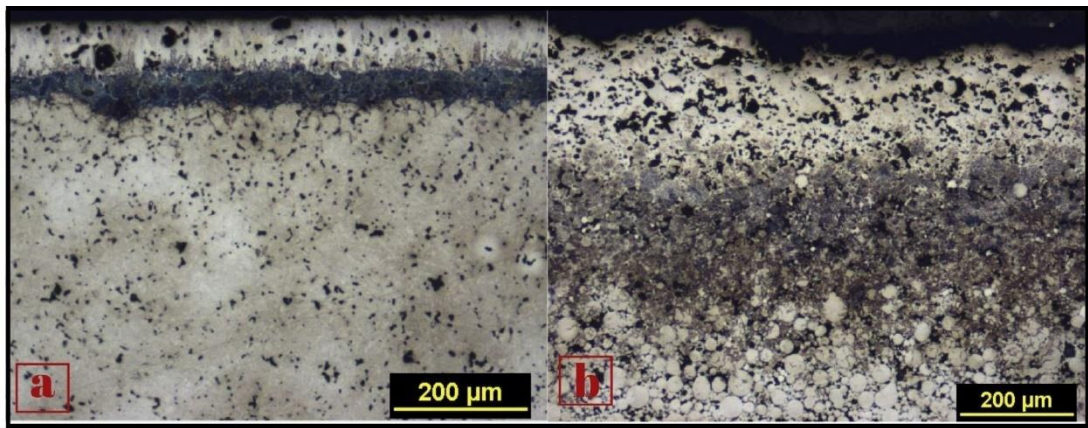
1050°C sıcaklıkta yapılan Boro-Sinterleme numunelerine yapılan XRD analizindeki Fe_2B ve FeB fazlarına karşılık gelen piklerin şiddetlerinin 950°C sıcaklıkta yapılan Boro-Sinterleme numunelerine göre Şekil 6.9’da görüldüğü gibi daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. 1050°C sıcaklıkta yapılan Boro-Sinterleme işleminde de 1250°C de ön sinterlenen ve sonrasında 6 saat Borlama yapılan ÖSB1050-6 kodlu numunenin Fe_2B ve FeB fazlarına karşılık gelen piklerinin daha şiddetli olduğu tespit edilmiştir. Fe’ye karşılık gelen pikin şiddeti ise Boro-Sinterleme yapılan tüm numunelerde yakın şiddet değerlerini göstermekte iken, sadece S1250 kodlu numune verilerinde Fe’ye karşılık gelen pikin şiddeti diğer numunelere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

6.5 Boro-Sinterleme Sonrası Optik Mikroskop Görüntüleri

31CrMo12 çelik tozlarından üretilen numunelerin, Boro-Sinterleme işlemi sonrası elde edilen optik görüntüleri incelenmiştir. OM görüntüleri 100X büyütmede alınmıştır. Şekil 6.10'da 950°C'de 2 saat, Boro-Sinterleme işlemi uygulanan numunelerin OM görüntüleri verilmektedir.

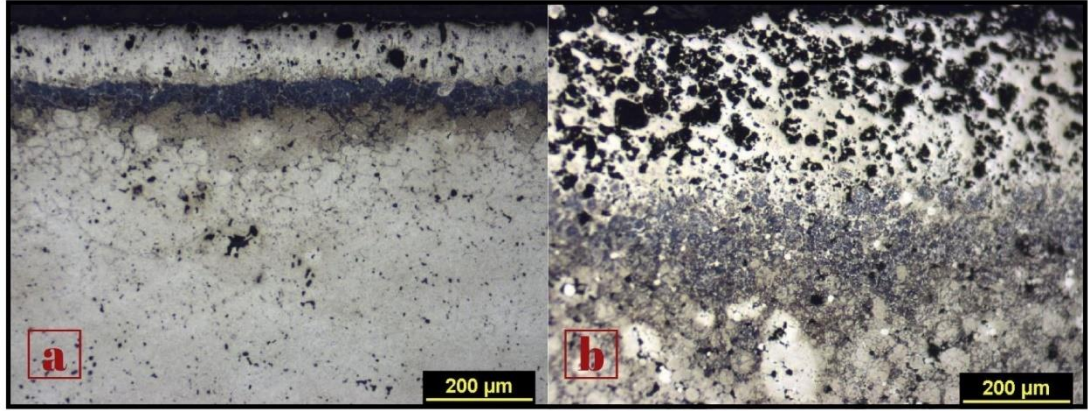
Şekil 6.10'da görüldüğü gibi numunelerin, Bor kaynağı olarak kullanılan Ekabor2 tozları ile temas halinde olan yüzey kısımlarında borür tabakasının oluştuğu görülmüştür. Mikroskop görüntüsü incelendiğinde, dıştan içe doğru sırasıyla bor tabakası, bor difüzyon bölgesi ve matris malzemesi net bir şekilde görülmektedir. Mikroskop görüntülerinde görülen borür tabakasının, yapılan XRD analizleri incelendiğinde Fe_2B ve FeB fazlarından meydana geldiği görülmüştür. Çeliklerin borlanması sonucu yüzeyde, iki fazlı bir yapı sergilenir. En dıştaki bölge FeB fazı (daha koyu) olup, bunun altında Fe_2B bulunur. Borlanmış katmanların altında, birkaç mikrondan birkaç on mikrona kadar değişen boyutlarda ekstra parçacıkların daha az ya da daha belirgin şekilde var olduğu tipik geçiş bölgesi yer alır (Orihel ve diğ. 2024).

OM görüntüleri incelendiğinde, ÖSB950-2 kodlu numunede oluşan borür tabakasının kalınlığının ortalama 60 μm olduğu görülmüş ve diğer numuneye kıyasla çok daha ince yapıda oluştuğu gözlemlenmiştir. BS950-2 kodlu numunede oluşan bor tabakasının kalınlığı ise ortalama 200 μm olarak ölçülmüştür.



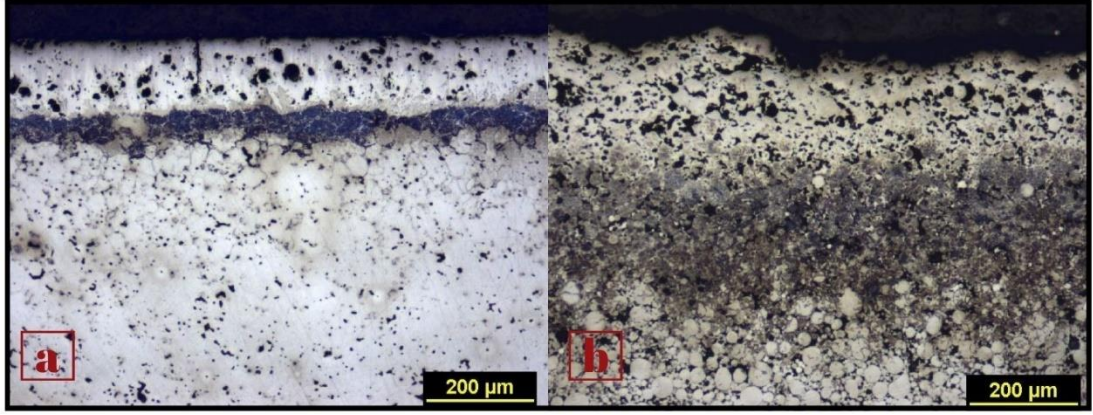
Şekil 6.10: 950°C'de 2 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB950-2 kodlu numune, (b) BS950-2 kodlu numune.

Şekil 6.11'e bakıldığında 950°C'de 4 saatlik Boro-Sinterleme işlemi sonucunda elde edilen numunelerin mikro yapıları görülmektedir. Şekil 6.11'de görülen Boro-Sinterleme işlemine tabi tutulan BS950-4 kodlu numunede oluşan borür tabakasının kalınlığı ortalama 370 μm olarak ölçülürken ÖSB950-4 kodlu numunede oluşan borür tabakasının kalınlığı ortalama 90 μm ölçülmüştür. Süreye bağlı olarak numunelerde oluşan borür tabakalarında artışlar gözlemlenmiştir (Kayalı 2013).



Şekil 6.11: 950°C'de 4 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB950-4 kodlu numune, (b) BS950-4 kodlu numune.

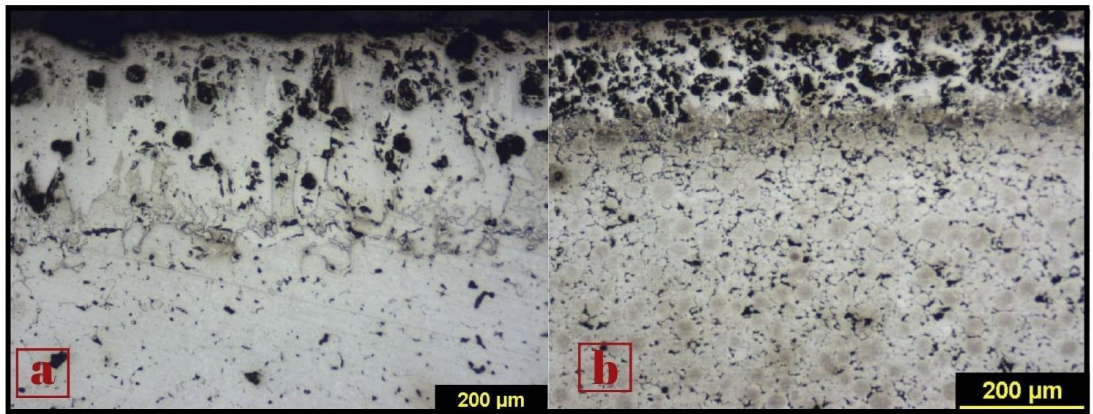
Şekil 6.12'de 950°C'de 6 saat Boro-Sinterleme işlemi yapılan numunelerin mikro yapı görüntüleri görülmektedir. ÖSB950-6 kodlu numunede oluşan borür tabakasının kalınlığı 135 μm ve doğrudan Boro-Sinter numunesi olan BS950-6 kodlu numunede oluşan borür kalınlığı ortalama 318 μm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.12: 950°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB950-6 kodlu numune, (b) BS950-6 kodlu numune.

Bor atomlarının malzemeye olan nifüziyetleri sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişmektedir (Uluköy ve diğ. 2006). OM görüntüleri incelendiğinde 950°C sıcaklıkta yapılan Boro-Sinterleme işlemi sonrasında oluşan borür tabakasının kalınlığının, Boro-Sinterleme süresine bağlı olarak arttığı görülmüştür.

1050°C’de 2 saat Boro-Sinterlenen numunelerin OM görüntüleri incelendiğinde 950°C’de yapılan Boro-Sinterlemeye kıyasla, daha kalın borür tabakasının oluştuğu görülmüştür. Şekil 6.13’te OM görüntüleri görülen ÖSB1050-2 ve BS1050-2 kodlu numunelerde oluşan borür tabakasının kalınlığı sırasıyla 320 µm ve 160 µm olarak ölçülmüştür.



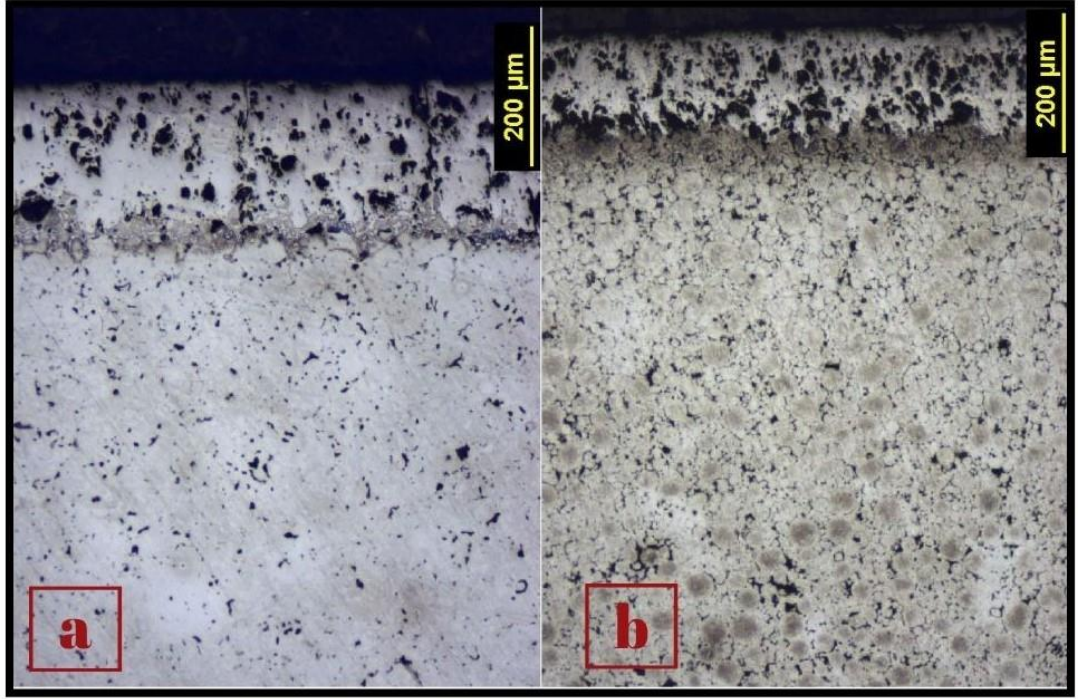
Şekil 6.13: 1050°C’de 2 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB1050-2 kodlu numune, (b) BS1050-2 kodlu numune.

1050°C’de 4 saat Boro-Sinterlenen numunelerin OM görüntüleri incelendiğinde 950°C’de yapılan Boro-Sinterlemeye kıyasla, daha kalın borür tabakasının oluştuğu görülmüştür. Şekil 6.14’te OM görüntüleri görülen ÖSB1050-4 ve BS1050-4 kodlu numunelerde oluşan borür tabakasının kalınlığı sırasıyla 200 μm ve 250 μm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.14: 1050°C’de 4 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB1050-4 kodlu numune, (b) ÖSB1050-4 kodlu numune.

1050°C’de 6 saat Boro-Sinterlenen numunelerin OM görüntüleri incelendiğinde 950°C’de yapılan Boro-Sinterlemeye kıyasla, daha kalın borür tabakasının oluştuğu görülmüştür. Şekil 6.15’te mikroskop görüntüleri görülen ÖSB1050-6 ve BS1050-6 kodlu numunelerde oluşan borür tabakasının kalınlığı sırasıyla 250 μm ve 200 μm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.15: 1050°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme sonrası OM görüntüleri (a) ÖSB1050-6 kodlu numune, (b) BS1050-6 kodlu numune.

Malzeme yüzeyinde meydana gelen borür tabakasının kalınlığının sıcaklığa ve süreye bağlı olarak arttığı bilinmektedir (Casteletti ve diğ. 2013; Kayalı 2013). 1250°C’de Ön Sinterleme + Borlanmış numunelerde oluşan borür tabakasının kalınlığı aynı sıcaklık ve sürede doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelere kıyasla daha ince yapıda olduğu görülmektedir. Bu durumun ile borür tabakası kalınlığı üzerinde yoğunluğun doğrudan etkili olduğuna ve artan yoğunlukla beraber borür tabakası kalınlığında azalma meydana geldiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Şekil 6.10-Şekil 6.15’te görülen OM görüntüleri incelendiğinde, Ön Sinterleme + Borlanmış numunelerde oluşan borür tabakasının literatür taramasında görülen testere dişli yapıya daha yakın olduğu görülürken, doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelerde görülen borür tabakasının çift fazlı Fe_2B ve FeB fazlarının yer aldığı tabaka yapılı borür tabakasına benzediği görülmektedir. Bor atomları, metal tozu taneleri arasındaki boşluklardan rahatlıkla ilerleyerek daha derine difüze olabilirler (Koç 2019). EDS analizleri incelendiğinde bu tespitin doğruluğu anlaşılmaktadır

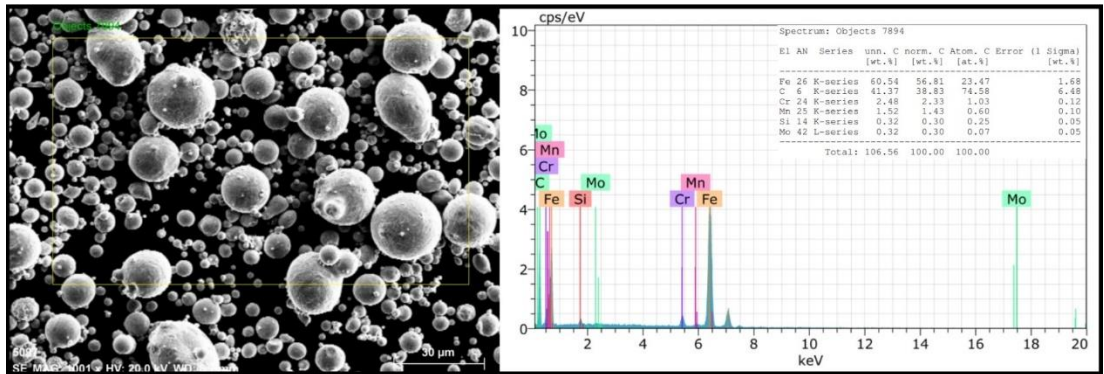
Ön Sinterleme + Borlama numunelerinde oluşan borür tabakalarının, doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelerde oluşan borür tabakalarına kıyasla daha homojen bir yapıda olduğu görülmektedir. Doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelerin bor difüzyon bölgesinin daha geniş olduğu ve Bor'un derinlere difüze olduğu görülmüştür.

6.6 Boro-Sinterleme Sonrası FESEM Görüntüleri ve EDS analizleri

950°C ve 1050°C de 2-4-6 saatlik sürelerde Ön Sinterleme + Borlama ve doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelerde oluşan bileşimlerin incelenmesi ve sinterleme kalitesinin anlaşılması için FESEM ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

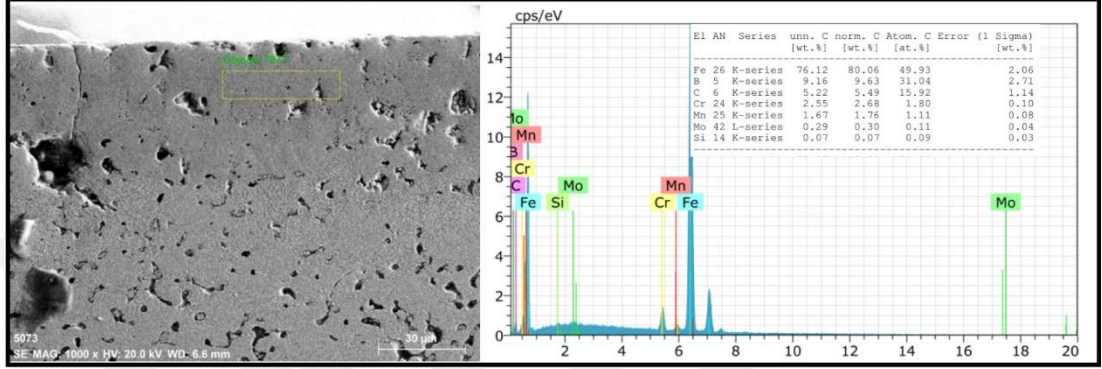
Boro-Sinterleme işlemi yapılan numunelere sinterlenme kalitesi ve homojenliğin incelenmesi için FESEM görüntüleri alınmıştır. Numunelerin element içeriği ve Bor miktarı gibi verilerin eldesi için EDS analizi yapılmıştır. EDS analizleri, FESEM görüntüleri üzerinden yapılmıştır. FESEM görüntüleri 1000X büyütme oranıyla yapılmıştır.

Şekil 6.16'da numune üretiminde kullanılan 31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozlarının FESEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir. Toz tane boyutlarının yaklaşık olarak 20-30 µm çapında olduğu görülmektedir. Yapılan EDS analizlerinde 31CrMo12 çeliğini oluşturan alaşım elementleri Fe, C, Cr, Mn, Si ve Mo tespit edilmiştir.



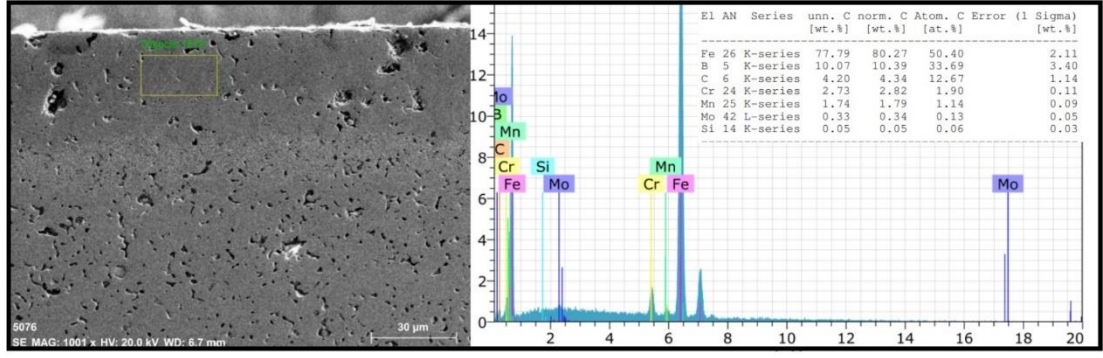
Şekil 6. 16: 31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozlarının FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 6.17’de ÖSB950-2 kodlu yani 1250°C’de 2saat ön sinterlenmiş ve 950°C’de 2 saat Borlama yapılan numunenin FESEM görüntüleri incelendiğinde Borlama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Yapılan EDS analizi sonucunda 31CrMo12 ön alaşımlı çeliğini oluşturan alaşım elementleri başarılı bir şekilde görülmüştür, alaşım elementleri dışında numune yüzeyinden başlayarak belirli bir derinliğe kadar Bor’un difüze olabildiği tespit edilmiştir.



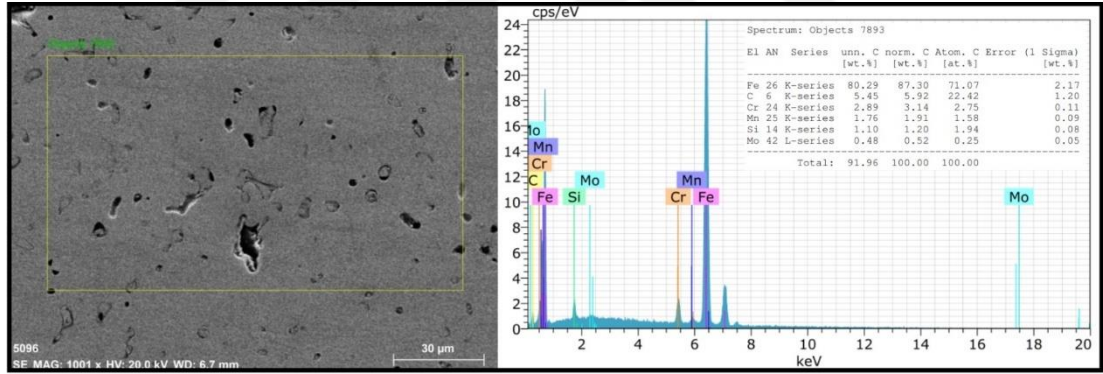
Şekil 6. 17: ÖSB950-2 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 6.18’de görülen ÖSB950-6 kodlu yani 1250°C’de 2 saat ön sinterlenmiş ve 950°C’de 6 saat Borlama yapılan numunenin FESEM görüntüleri incelendiğinde, Borlama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve Şekil 6.17’de verilen ÖSB950-2 kodlu numuneye kıyasla yapının daha az gözenekli olduğu, bunun sonucunda artan sinterleme süresi ile toz taneleri arasındaki bağ oluşumu artarak sinterlenebilirliğin iyileştiği belirlenmiştir. Yapılan EDS analizi sonucunda 31CrMo12 ön alaşımlı çeliğini oluşturan alaşım elementleri başarılı bir şekilde görülmüş olup, alaşım elementleri dışında numune yüzeyinden başlayarak belirli bir derinliğe kadar Bor’un difüze olabildiği tespit edilmiştir. Tespit edilen Bor miktarı Şekil 6.17’deki Bor miktarı ile yaklaşık olarak eşit düzeydedir, fakat bu numunede Bor’un Şekil 6.17’de verilen SB950-2 kodlu numuneye kıyasla daha derine difüze olabildiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin Borlama süresindeki artış olduğu düşünülmektedir.



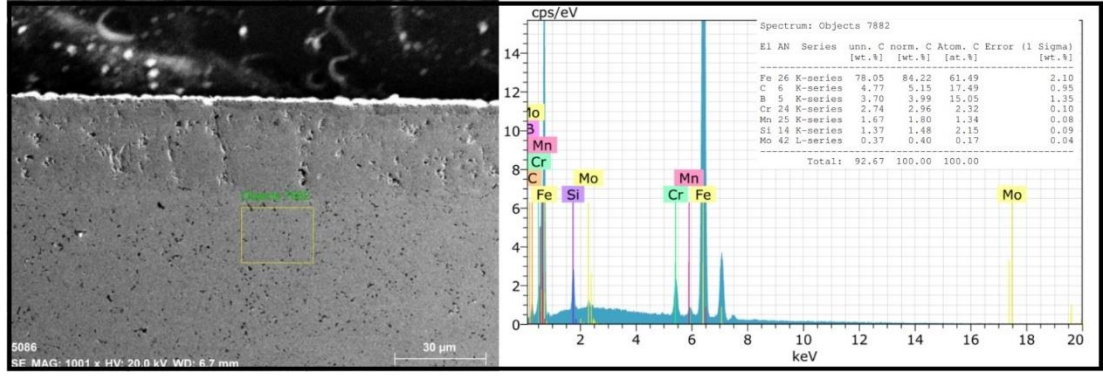
Şekil 6. 18: ÖSB950-6 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 6.19’da S1250 kodlu 1250°C’de 2 saat sadece sinterleme işlemi uygulanan numunenin ait FESEM görüntüsü ve EDS analizleri verilmektedir. FESEM görüntüsü incelendiğinde yapıda az sayıda gözenek görülmektedir bunun sonucunda 1250 °C de yapılan ön sinterlemenin yeterli olduğu görülmüştür. Yapılan EDS analizinde alaşım elementleri eksiksiz olarak tespit edilmiştir.



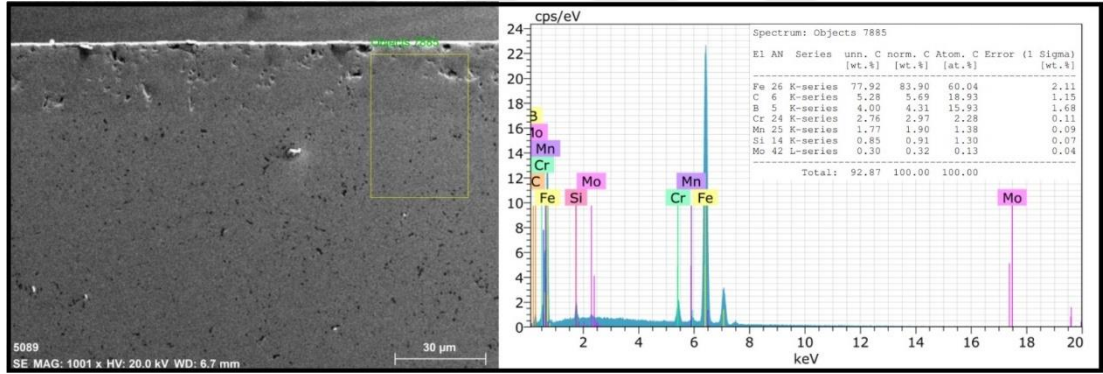
Şekil 6. 19: S1250 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 6.20’de ÖSB1050-2 kodlu yani 1250°C’de ön sinterlenmiş ve 1050°C’de 2 saat Borlama yapılan numunenin FESEM görüntüleri incelendiğinde Borlama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Yapılan EDS analizi sonucunda 31CrMo12 ön alaşımlı çeliği oluşturan alaşım elementleri başarılı bir şekilde görülmüştür, alaşım elementleri dışında numune yüzeyinden başlayarak belirli bir derinliğe kadar Bor’un difüze olabildiği tespit edilmiştir. Borür tabakası altındaki bölgede bor miktarında azalma görülmekte ve merkeze doğru ilerledikçe bor difüzyonunda azalma meydana gelmektedir.



Şekil 6. 20: ÖSB1050-2 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

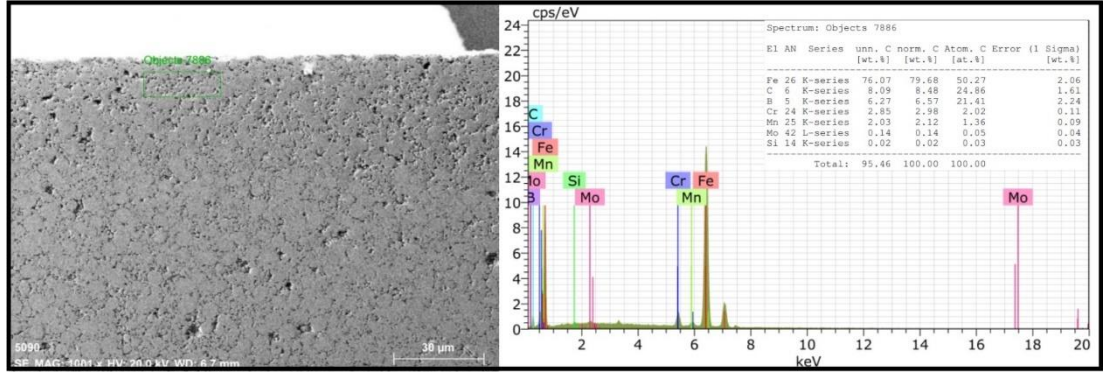
Şekil 6.21’de ÖSB1050-6 kodlu yani 1250°C’de ön sinterlenmiş ve 1050°C’de 6 saat Borlama yapılan numunenin FESEM görüntüleri incelendiğinde Borlama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Yapılan EDS analizi sonucunda 31CrMo12 ön alaşımlı çeliğini oluşturan alaşım elementleri başarılı bir şekilde görülmüştür, alaşım elementleri dışında numune yüzeyinden başlayarak belirli bir derinliğe kadar Bor’un difüze olabildiği tespit edilmiştir.



Şekil 6. 21: ÖSB1050-6 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

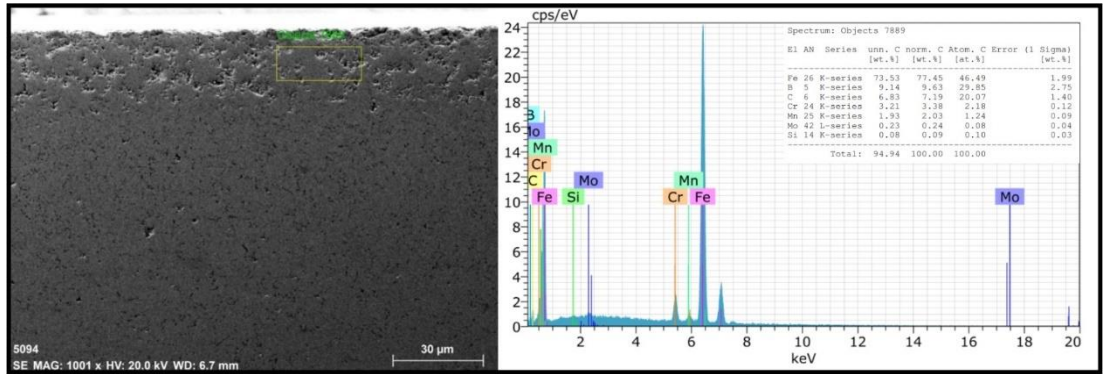
Şekil 6.22’de BS950-6 kodlu yani 950°C’de 6 saat Boro-Sinterleme yapılan numunenin FESEM görüntüleri incelendiğinde Boro-Sinterleme işlemi sonucunda yapıdaki boşlukların Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelere kıyasla daha fazla olduğu görülmekte, bunun sonucunda sinterlemenin Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelere kıyasla daha zayıf olduğu görülmüştür, fakat bu seviyede de yeterli düzeyde gerçekleşmiştir. Yapılan EDS analizi sonucunda 31CrMo12 ön alaşımlı çeliğini oluşturan alaşım elementleri başarılı bir şekilde görülmüştür, alaşım elementleri dışında numune yüzeyinden başlayarak belirli bir derinliğe kadar Bor’un

difüze olabildiği tespit edilmiştir. Bor'un difüzyon derinliği Ön Sinterleme+Borlama numunelerine göre artış göstermiştir.



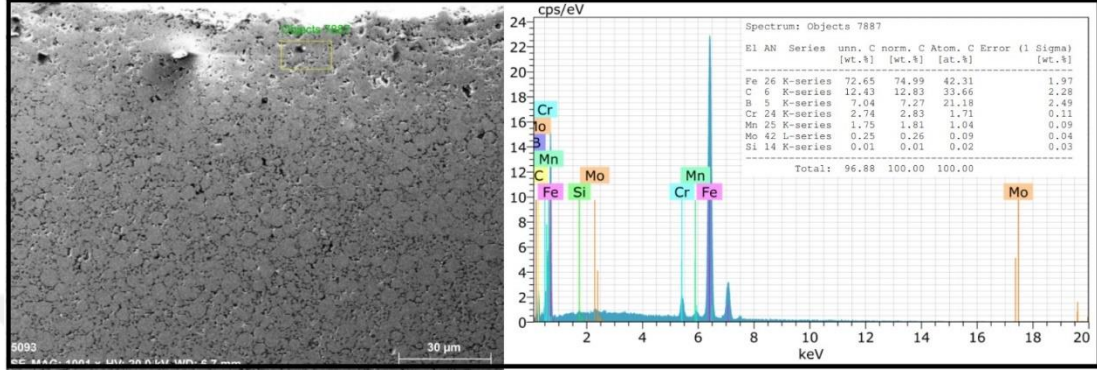
Şekil 6. 22: BS950-6 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 6.23'te BS1050-2 kodlu yani 1050°C'de 2 saat Boro-Sinterleme yapılan numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir. FESEM görüntüsü incelendiğinde yapıdaki gözenek miktarı Şekil 6.22'de gösterilen BS950-6 kodlu numuneye kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Sinterleme sıcaklığındaki artışın bunda etkili olduğu düşünülmektedir. Yapılan EDS analizi sonucunda 31CrMo12 ön alaşımlı çeliği oluşturan alaşım elementleri başarılı bir şekilde görülmüştür, alaşım elementleri dışında numune yüzeyinden başlayarak belirli bir derinliğe kadar Bor'un difüze olabildiği tespit edilmiştir. Bor'un difüzyon derinliği Ön Sinterleme+Borlama numunelerine göre artış göstermiştir.



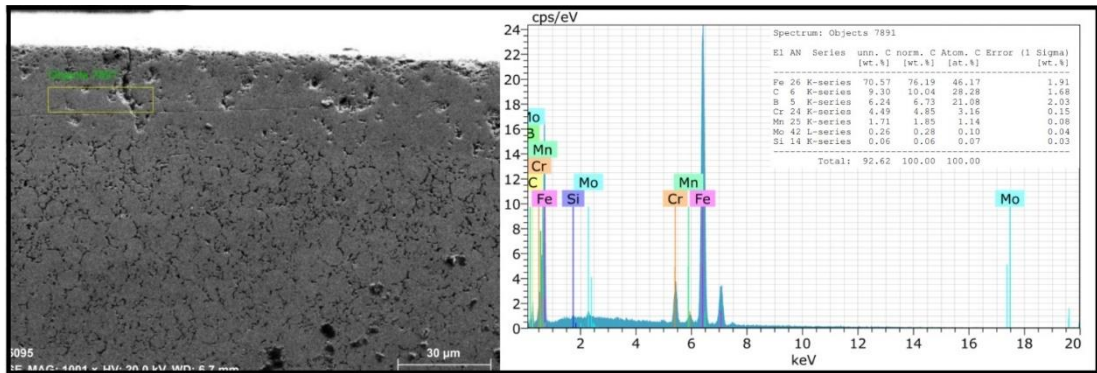
Şekil 6. 23: BS1050-2 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 6.24'te BS1050-4 kodlu yani 1050°C'de 4 saat Boro-Sinterleme yapılan numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir. Sinterlenme kalitesinin Şekil 6.23'te görülen BS1050-2 kodlu numuneye kıyasla biraz daha arttığı görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde yapıda beklenen alaşım elementleri tespit edilmiş olup ek olarak bor elementi de tespit edilmiştir.



Şekil 6. 24: BS1050-4 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 6.25'te BS1050-6 kodlu yani 1050°C'de 6 saat Boro-Sinterleme yapılan numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir. Sinterlenme kalitesinin Şekil 6.23'te görülen BS1050-2 kodlu numuneye kıyasla arttığı görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde yapıda beklenen alaşım elementleri tespit edilmiş olup ek olarak bor elementi de tespit edilmiştir.



Şekil 6. 25: BS1050-6 kodlu numunenin FESEM görüntüsü ve EDS analizi.

FESEM görüntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde, doğrudan 1050°C'de Boro-Sinterleme işlemi yapılan numunelerin doğrudan 950°C de Boro-Sinterleme

işlemi yapılan numunelere kıyasla daha iyi sinterlendiği görülmüştür. 1050°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme süreçleri uygulanan numunelerin, Şekil 6.23, Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’te verilen FESEM görüntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde numunelerdeki boşlukların birbirlerine benzer yapıda oldukları ve sayısal olarak yaklaşık eşit olduğu görülmektedir. Fakat yüzeyde oluşan borür tabakasının kalınlığının ve Bor’un difüzyon derinliğinin zamana ve sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de verilen FESEM ve EDS analizleri incelendiğinde 1250°C de ön sinterleme sonrasında 950°C ve 1050°C’de Borlama işlemi yapılan numunelerin Şekil 6.22, Şekil 6.23, Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’te FESEM ve EDS analizleri verilen doğrudan 950°C ve 1050°C’de Boro-Sinterleme işlemi yapılan numunelere kıyasla daha düşük gözeneye sahip oldukları görülmektedir. Bu sonuçlar 1250°C yüksek sinterleme sıcaklığının getirmiş olduğu yüksek difüzyon hızı ile toz taneleri arasındaki boyun oluşumu artarak, gözeneklilikte azalma ve yoğunlukta artışla meydana gelmektedir.

Yüzeyde oluşan borür tabakasının kalınlığına bakıldığında, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi uygulanan numunelerin sıcaklığa ve zaman bağlı olarak Ön Sinterleme+Borlama işlemi uygulanan numunelere kıyasla daha kalın borür tabakasına sahip olduğu FESEM ve OM görüntülerinde görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde Bor’un difüzyon derinliği, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi uygulanan numunelerde sıcaklığa ve zaman bağlı olarak Ön Sinterleme+Borlama işlemi uygulanan numunelere kıyasla daha derine difüze olabildiği görülmüştür.

Sıcaklık ve zaman arttıkça borür tabakasının kalınlığı artmakta olduğu, Bor’un difüzyon derinliğinin de aynı şekilde sıcaklık ve zaman arttıkça arttığı görülmüştür. Ön Sinterleme+Borlama numunelerinde de aynı durum söz konusu olmaktadır fakat borür tabakasının kalınlığı ve Bor’un difüzyon derinliği, doğrudan Boro-Sinterleme numunelerine kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelerin sahip oldukları düşük yoğunluk değerleri bu sonuçların elde edilmesinde etkili olmuştur.

Doğrudan Boro-Sinterleme uygulanmış numunelerde oluşan borür tabakası incelendiğinde, literatürde karşılaşılan borür tabakasının testere diş formuna FESEM

görüntüsünde ve OM görüntüsünde de rastlanılmamıştır. FESEM ve OM görüntüleri incelendiğinde borür yapısının tabaka şeklinde oluştuğu görülmüştür. XRD analizleri borür tabakasının yapısında FeB ve Fe₂B fazlarının olduğunu göstermiştir.

6.7 Boro-Sinterleme Sonrası Aşınma Deney Sonuçları ve Yüzey Morfolojisinin incelenmesi

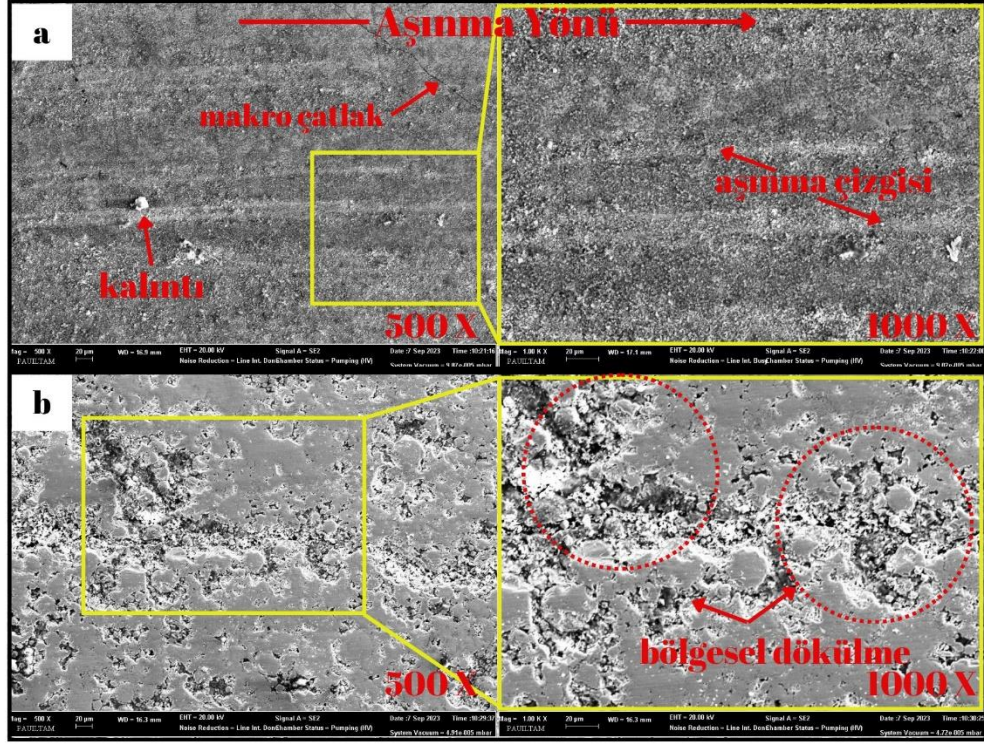
Boro-Sinterleme sonrasında yüzeyde oluşan borür tabakasının aşınma değerlerinin incelenmesi için numunelere aşınma deneyi uygulanmıştır. Aşınma deneyi sonucunda hacim kaybı-yük, sürtünme katsayısı- kayma mesafesi grafikleri çizilmiştir. Aşınma sonrasında yüzey morfolojisinin incelenmesi ve anlaşılması için aşınma yüzeyinin FESEM görüntüsü ve EDS analizi yapılmıştır.

6.7.1 Boro-Sinterleme Sonrası Aşınma Deneyi Yapılan Numunelerin Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi

Aşınma görüntüleri, aşınma deneyinde 15N yükün uygulandığı aşınma yüzeyinden alınmış olup, aşınmadan kaynaklı sorunların olduğu bölgelere odaklanılarak o bölgelerden alınmıştır.

Şekil 6.26'da 1250°C'de 2 saat Ön Sinterleme sonrası 950°C'de 2 saat Borlama yapılan ÖSB950-2 kodlu numune ve 950°C'de 2 saat doğrudan Boro-Sinterleme yapılan BS950-2 kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin FESEM görüntüleri yer almaktadır.

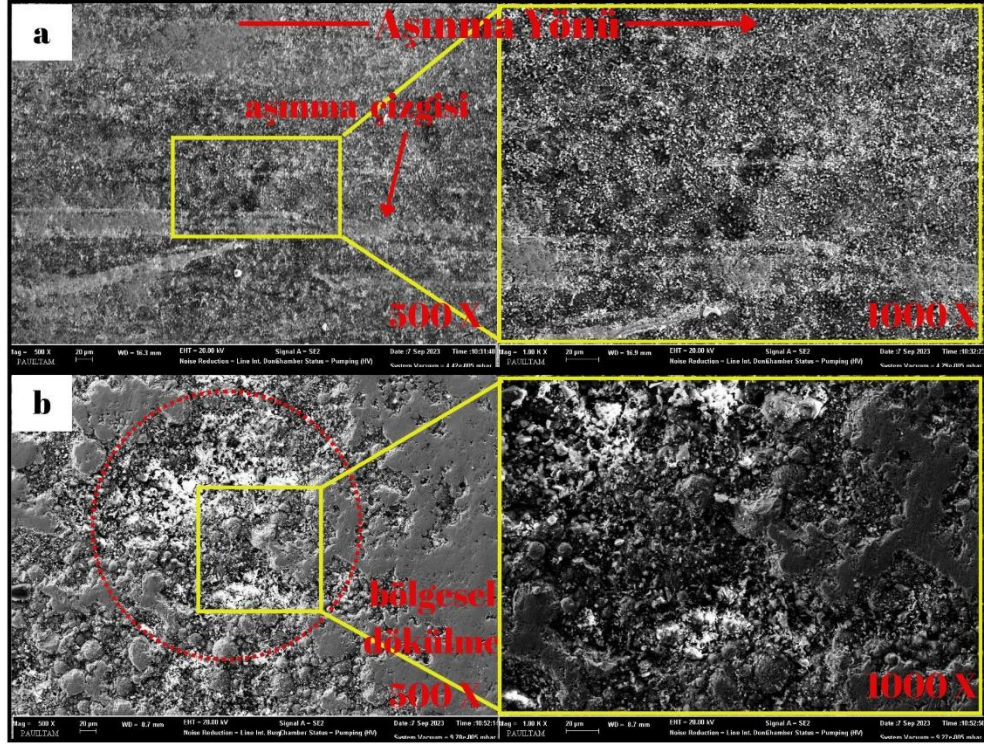
Şekil 6.26.a'da görülen ÖSB950-2 kodlu numunenin aşınma yüzeyinde makro çatlakın oluştuğu görülmektedir. Makro çatlakın, yüzeyde oluşturulan borür tabakasının sert ve gevrek yapıda oluşundan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Şekil 6.26.b'de görülen BS950-2 kodlu numunenin aşınma yüzeyinde aşınma çizgisi boyunca ve çevresinde bölgesel dökülmelerin olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 26: 950°C’de 2 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB950-2 kodlu numune (b) BS950-2 kodlu numune.

Şekil 6.27’de 1250°C’de 2 saat Ön Sinterleme sonrası 950°C’de 4 saat Borlama yapılan ÖSB950-4 kodlu numune ve 950°C’de 4 saat doğrudan Boro-Sinterleme yapılan BS950-4 kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin FESEM görüntüleri yer almaktadır.

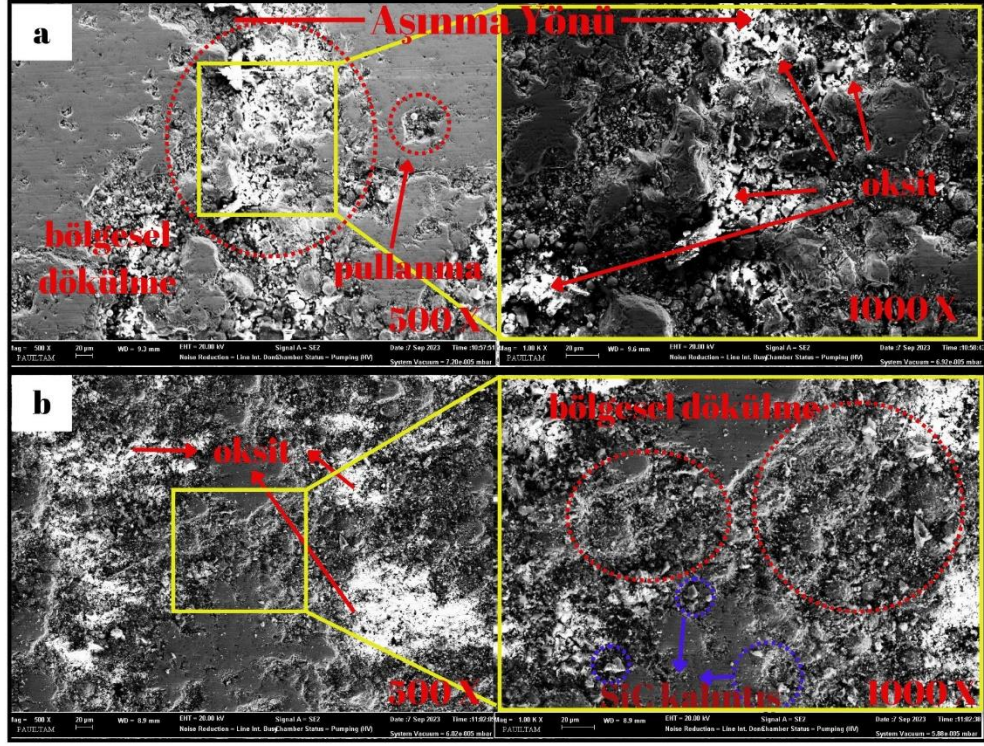
Şekil 6.27.a’da görülen ÖSB950-4 kodlu numunede aşınma sonrası aşınma çizgileri oluşurken yüzeyde bölgesel dökülme, pullanma gibi aşınma kaynaklı hatalar görülmektedir. Şekil 6.27.b’de görülen BS950-4 kodlu numunenin aşınma yüzeyinde bölgesel dökülmelerin gerçekleştiği açıkça görülmektedir ve aşınmadan kaynaklı oksit oluşumları beyaz renkte görülmektedir.



Şekil 6.27: 950°C’de 4 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB950-4 kodlu numune (b) BS950-4 kodlu numune.

Şekil 6.28’de 1250°C’de 2 saat Ön Sinterleme sonrası 950°C’de 6 saat Borlama yapılan ÖSB950-2 kodlu numune ve 950°C’de 6 saat doğrudan Boro-Sinterleme yapılan BS950-6 kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin FESEM görüntüleri yer almaktadır.

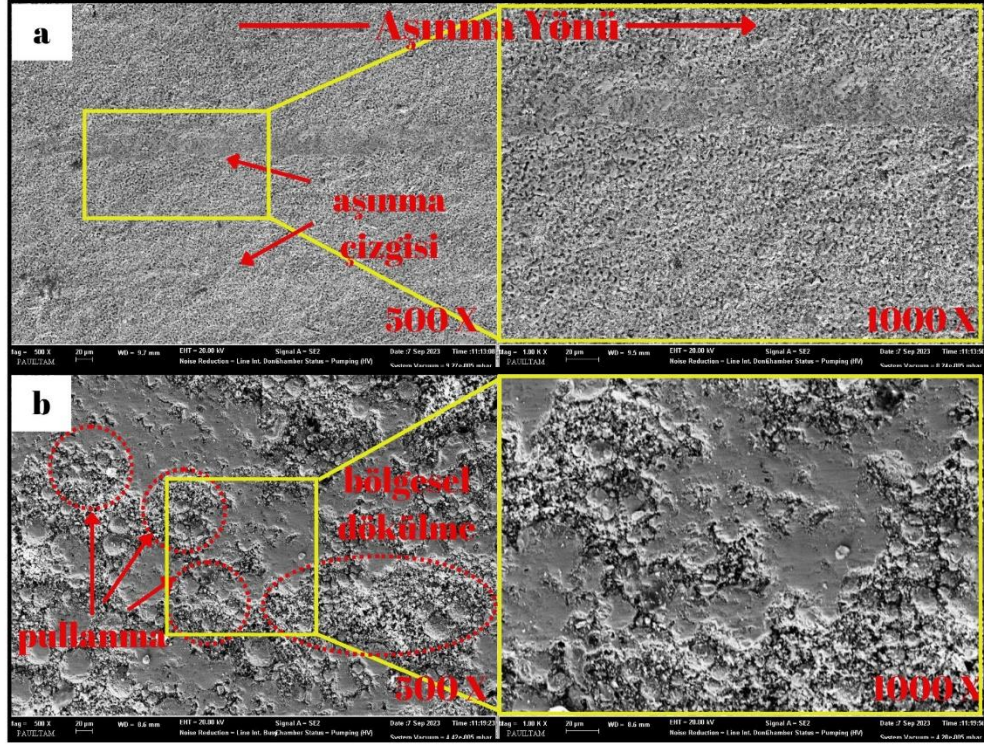
Şekil 6.28.a’da ÖSB950-6 kodlu numunede aşınma sonrasında yüzeyde aşınmadan kaynaklı oksit oluşumları görülmektedir. Aşınma sonrasında pullanma ve bölgesel dökülmelerin de olduğu görülmektedir. Şekil 6.28.b’de de aynı şekilde bölgesel dökülmeler ve oksit oluşumları görülmekte olup aşındırıcı zımparadan bulaşan SiC kalıntıları da görülmektedir.



Şekil 6.28: 950°C’de 6 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB950-6 kodlu numune (b) BS950-6 kodlu numune.

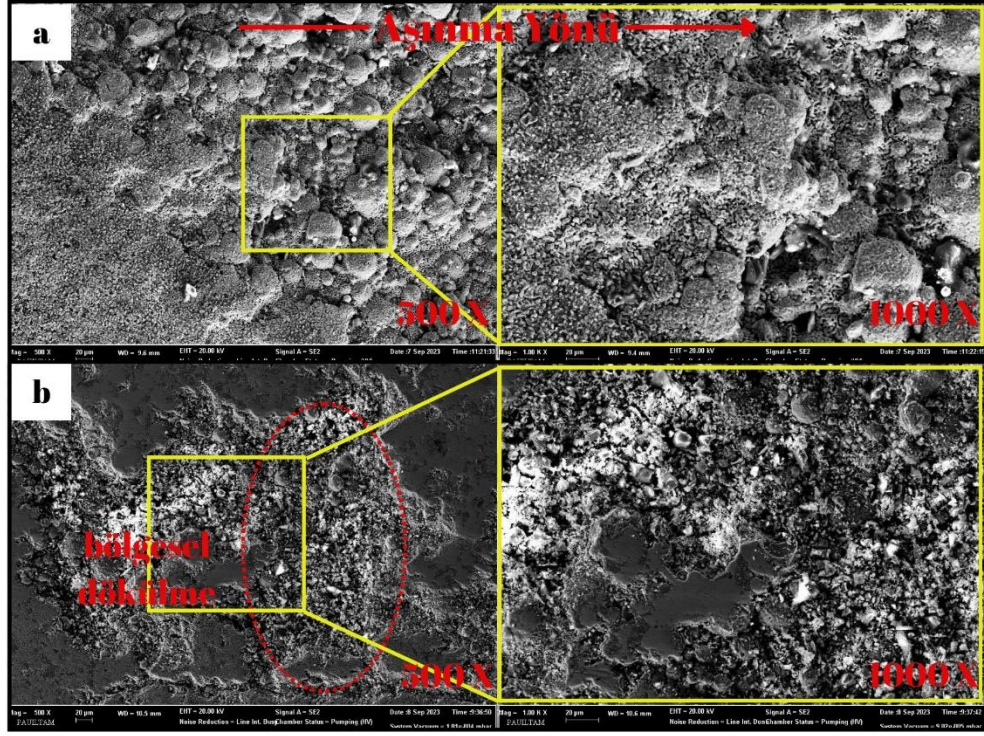
Şekil 6.29’da 1250°C’de 2 saat Ön Sinterleme sonrası 1050°C’de 2 saat Borlama yapılan ÖSB1050-2 kodlu numune ve 1050°C’de 2 saat doğrudan Boro-Sinterleme yapılan BS1050-2 kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin 500X ve 1000X’de FESEM görüntüleri yer almaktadır.

Şekil 6.29.a’da ÖSB1050-2 kodlu numunenin aşınma yüzeyinde aşınmadan kaynaklı çizikler olduğu görülmektedir. Şekil 6.29.b’de bölgesel dökülmelerin yanından çok sayıda pullanmanın olduğu görülmektedir.



Şekil 6.29: 1050°C’de 2 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB1050-2 kodlu numune (b) BS1050-2 kodlu numune.

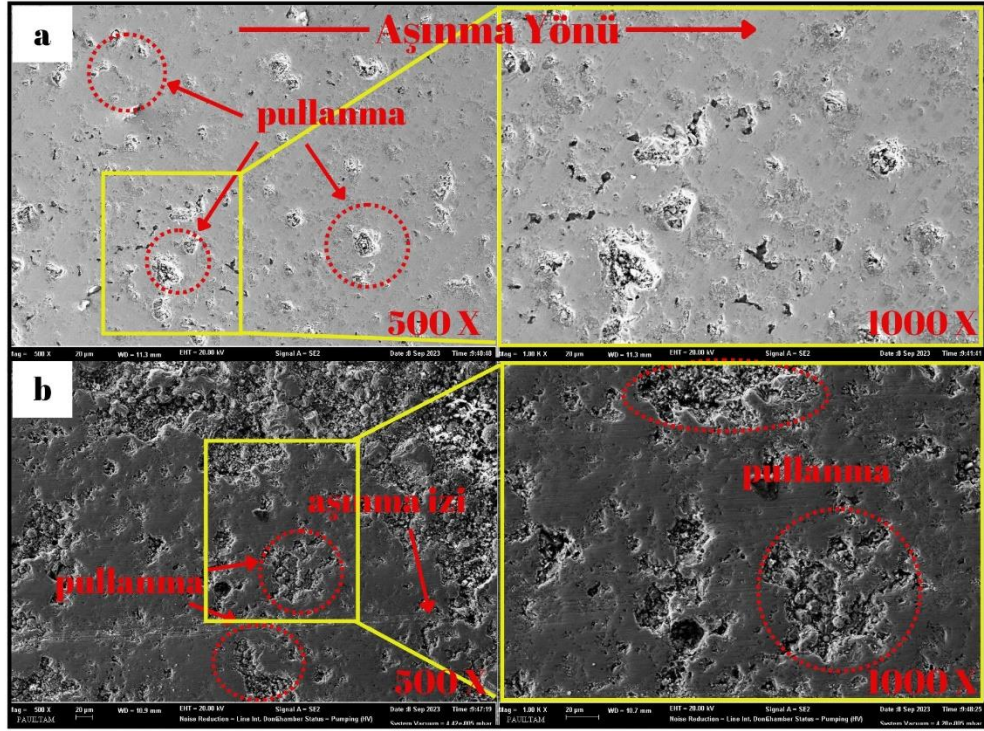
Şekil 6.30’da 1250°C’de 2 saat Ön Sinterleme sonrası 1050°C’de 4 saat Borlama yapılan ÖSB1050-4 kodlu numune ve 1050°C’de 4 saat doğrudan Boro-Sinterleme yapılan BS1050-4 kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin 500X ve 1000X’de FESEM görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 6.30: 1050°C’de 4 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB1050-4 kodlu numune (b) BS1050-4 kodlu numune.

Şekil 6.31’de 1250°C’de 2 saat Ön Sinterleme sonrası 1050°C’de 6 saat Borlama yapılan ÖSB1050-6 kodlu numune ve 1050°C’de 6 saat doğrudan Boro-Sinterleme yapılan BS1050-6 kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin 500X ve 1000X’de FESEM görüntüleri yer almaktadır.

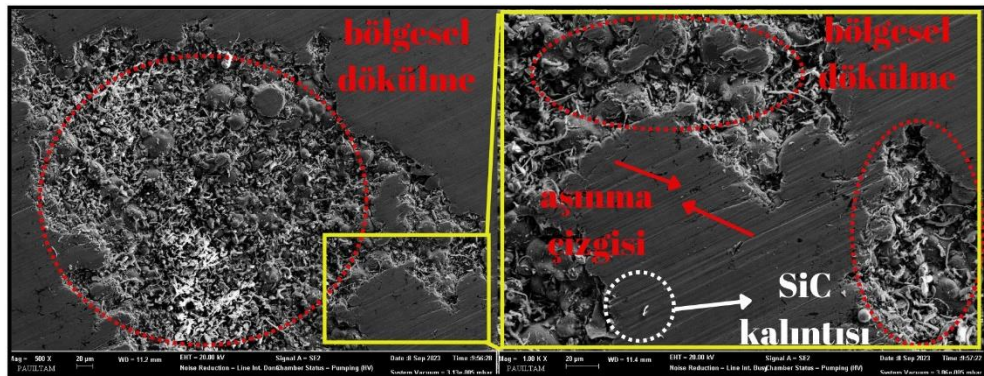
Şekil 6.31.a’da ÖSB1050-6 kodlu numunede aşınma yüzeyinde pullanmaların olduğu görülmektedir. Şekil 6.31.b’de pullanma ve bölgesel dökülmelerin olduğu görülmektedir.



Şekil 6.31: 1050°C’de 6 saatlik Boro-Sinterlenme sonrası 15 N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü (a) ÖSB1050-6 kodlu numune (b) BS1050-6 kodlu numune.

Şekil 6.32’de 1250°C’de 2 saat Sinterleme yapılan S1250 kodlu numunenin aşınma yüzeyinin 500X ve 1000X’de FESEM görüntüleri yer almaktadır.

Şekil 6.32’de S1250 kodlu numunenin yüzeyinde aşınmadan kaynaklı bölgesel dökülmelerin olduğu görülmektedir buna ek olarak aşındırıcı zımparadan kaynaklı SiC kalıntısı görülmektedir.



Şekil 6.32: 1250°C’de 2 saat sinterlenen S1250 kodlu numunenin 15N yük altında aşınma deneyi yapılan yüzeyin FESEM görüntüsü.

Aşınma yüzeylerinin FESEM görüntüleri incelendiğinde en az hatanın Şekil 6.31.a’da görülen ÖSB1050-6 kodlu numunede meydana geldiği görülmektedir, en çok hatanın ise 2 saat Boro-Sinterleme uygulanan numunelerde meydana geldiği görülmektedir.

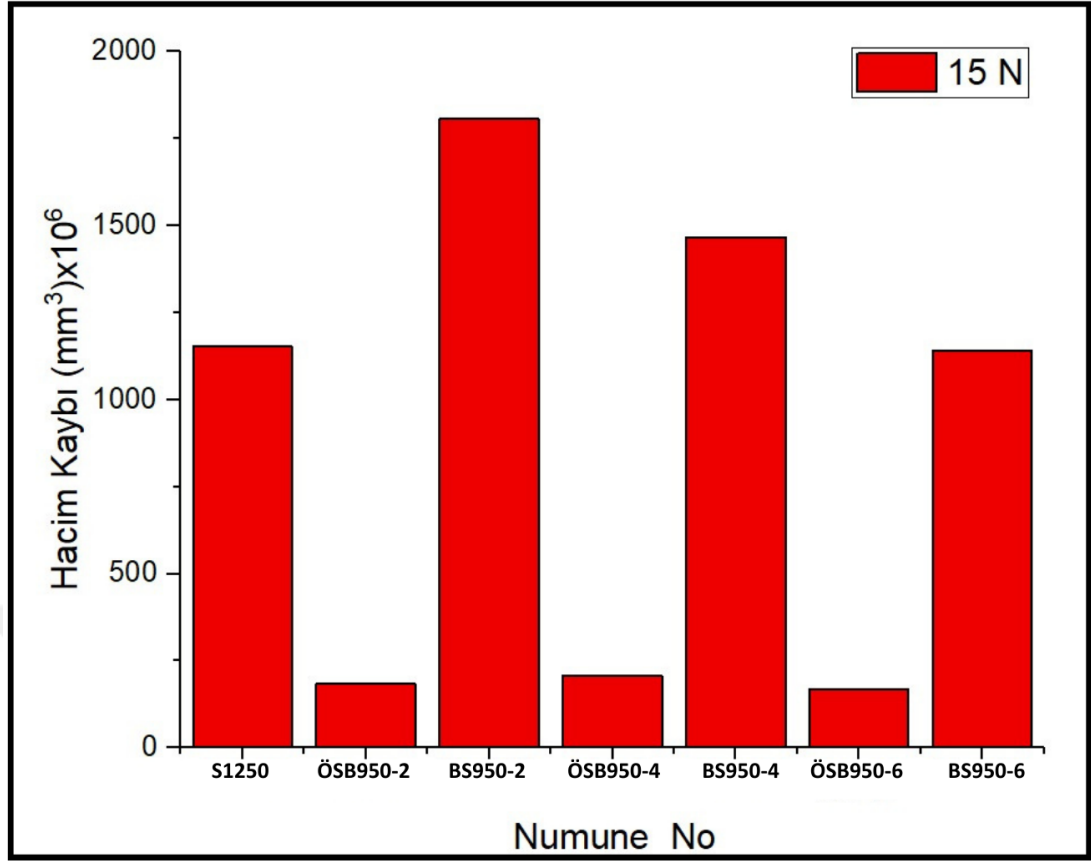
Şekil 6.26- Şekil 6.32’de görülen aşınma yüzlerinde genelinde aşınmadan kaynaklı olarak oluşan bölgesel dökülmelerin ve pullanmaların olduğu görülmektedir. Şekil 6.29-6.30-6.31’de görülen aşınma hataları, Şekil 6.26-6.27-6.28’de görülen aşınma hatalarına kıyasla daha az olduğu görülmektedir.

Şekil 6.31.a’da görülmekte olan ÖSB1050-6 kodlu numune yüzeyinde meydana gelen aşınma türü genel olarak pullanma şeklinde olduğu görülmektedir ve en az aşınma hasarının bu numunede gerçekleştiği görülmektedir. Genel olarak şekillere bakıldığında Ön Sinterleme+Borlama uygulanan numune yüzeylerinin doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelere kıyasla daha az miktarda aşındığı görülmektedir.

Sıcaklığa ve süreye bağlı olarak yüzeydeki gevrekliğin artarak aşınma sırasında pullanmaların meydana geldiği görülmektedir (Başman ve diğ. 2023).

6.7.2 Aşınma Deney Sonuçları

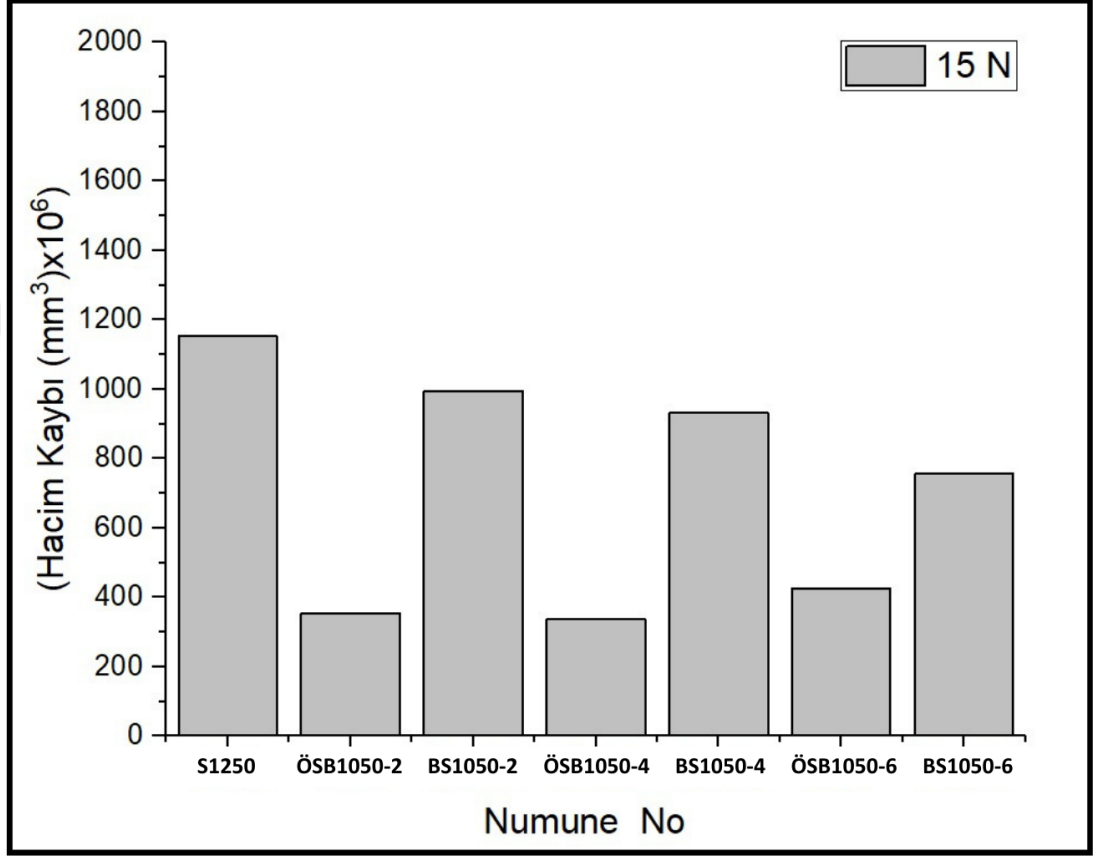
Şekil 6.33’te 950°C’de 2-4-6 Ön Sinterleme + Borlama ve doğrudan Boro-Sinterleme uygulanmış numuneler ile sadece ön sinterleme uygulanmış numuneye ait, Pin-on disk aşınma cihazında 15N yük altında ve 150 metre kayma mesafesinde yapılan aşınma testi sonrası hacim kaybı grafiği verilmiştir.



Şekil 6. 33: 950°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme yapılmış numunelerin 15N yük altında hacim kayıp grafiği.

Şekil 6.33’te görüldüğü gibi doğrudan Boro-Sinterleme yapılan BS950-2, BS950-4, ve BS950-6 kodlu numunelerin hacim kayıpları Ön Sinterleme+Borlama işlemi yapılan ÖSB1050-2, ÖSB1050-4 ve ÖSB1050-6 kodlu numunelere kıyasla daha fazla hacim kaybı yaşadığı görülmektedir. Doğrudan Boro-Sinterleme işlemine tabi tutulan numuneler arasında 6 saat Boro-Sinterleme işlemi uygulanan BS950-6 kodlu numunenin $1150 \mu\text{m}^3$ ile en düşük hacim kaybı gerçekleşen numune olduğu görülmektedir. En yüksek hacim kaybının ise yaklaşık $1800 \mu\text{m}^3$ ile BS950-2 kodlu 2 saatlik Boro-Sinterleme işlemi uygulanan numunede gerçekleştiği görülmüştür, bu değer Boro-Sinterleme işlemine tabi tutulmayan S1250 kodlu numunede gerçekleşen hacim kaybından bile fazla olduğu görülmektedir. Aşınma özellikleri üzerine 1250°C sıcaklıkta 2 saat sinterlemenin 950°C sıcaklıkta 2 ve 4 saat borlama işlemine göre daha etkin olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Şekil 6.34'te 1050°C'de 2-4-6 saatlik Ön Sinterleme + Borlama ve doğrudan Boro-Sinterleme uygulanmış numuneler ile sadece ön sinterleme uygulanmış numuneye ait, Pin-on disk aşınma cihazında 15N yük altında ve 150 metre kayma mesafesinde yapılan aşınma testi sonrası hacim kaybı grafiği verilmiştir.

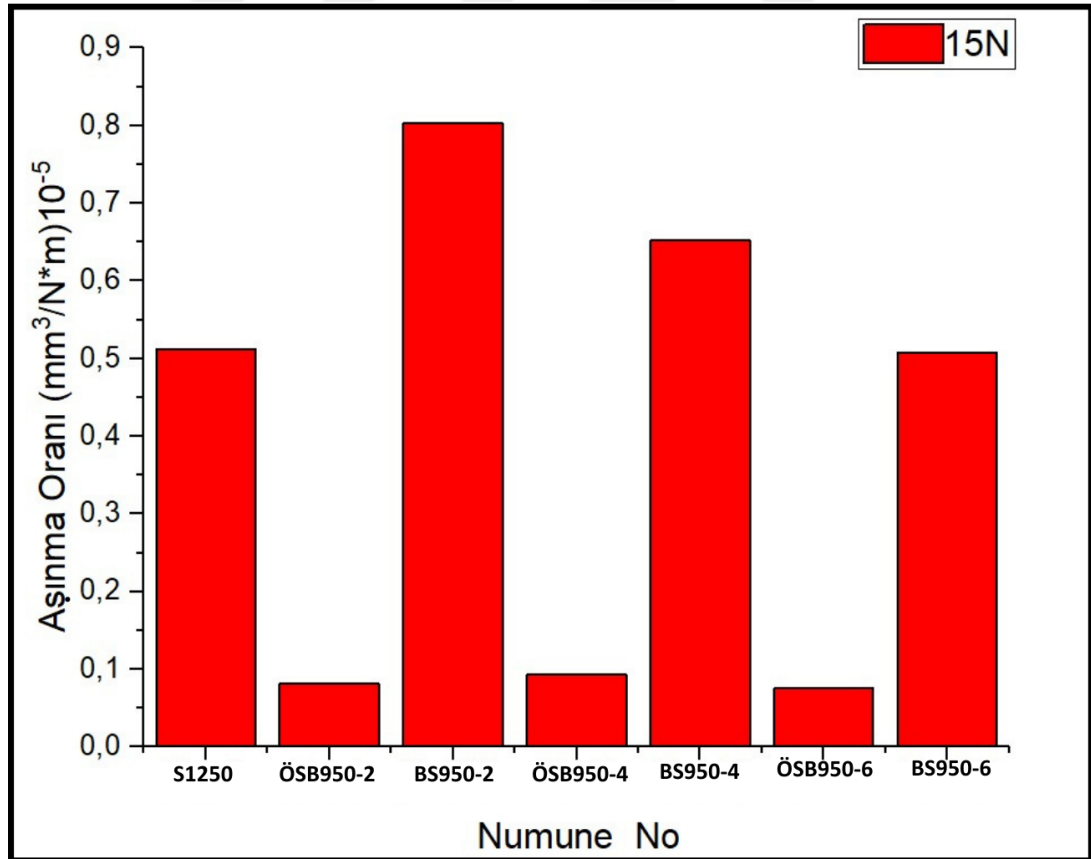


Şekil 6. 34: 1050°C'de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme yapılmış numunelerin 15N yük altında hacim kayıp grafiği.

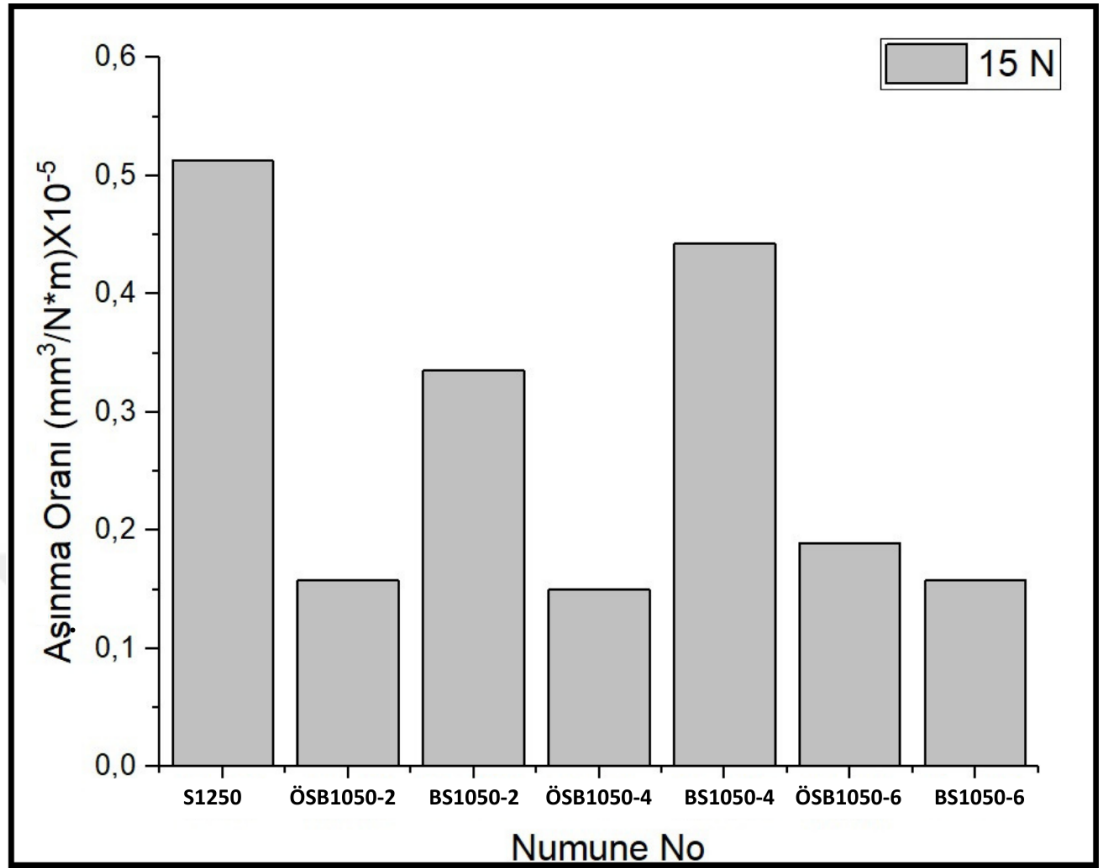
Şekil 6.34'te ki grafik incelendiğinde en yüksek hacim kaybının 1170 μm^3 ile Boro-Sinterleme işlemine tabi tutulmayan sadece 1250°C'de ön sinterleme işlemi uygulanan S1250 kodlu numunede olduğu görülmektedir. Doğrudan Boro-Sinterleme işlemine tabi tutulan numunelerde en düşük hacim kaybının yaklaşık 700 μm^3 ile BS1050-6'da gerçekleştiği görülmektedir. Ön Sinterleme+Borlama işlemine tabi tutulan numunelerin hacim kayıpları 950°C'deki hacim kayıpları ile yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'te doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numuneler kıyaslandığında iki grafik arasında büyük bir hacim kaybı farkı olduğu görülmektedir. 1050°C'de doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelerde meydana gelen hacim kayıpları 950°C'de doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelere kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç ile 1050°C sıcaklıkta yapılan Boro-Sinterleme işleminin sinterlenebilirliği arttırdığı ve bunun aşınma özelliklerini geliştirdiği düşünülmektedir. Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelere bakıldığında, hacim kayıplarının birbirlerine yakın değerlerde gerçekleştiği görülmektedir bu değerler sertlik verileri ile uyumaktadır.

Şekil 6.35'te 950°C'de ve Şekil 6.36'da 1050°C'de Ön Sinterleme + Borlama ve doğrudan Boro-Sinterleme uygulanmış numuneler ile sadece ön sinterleme uygulanmış numuneye ait, Pin-on disk aşınma cihazında 15N yük altında ve 150 metre kayma mesafesinde yapılan aşınma testi sonrası aşınma oranı grafiği verilmiştir.



Şekil 6. 35: 950°C'de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme yapılmış numunelerin 15N yük altında aşınma oranı grafikleri.



Şekil 6. 36: 1050°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme yapılmış numunelerin 15N yük altında aşınma oran grafiği.

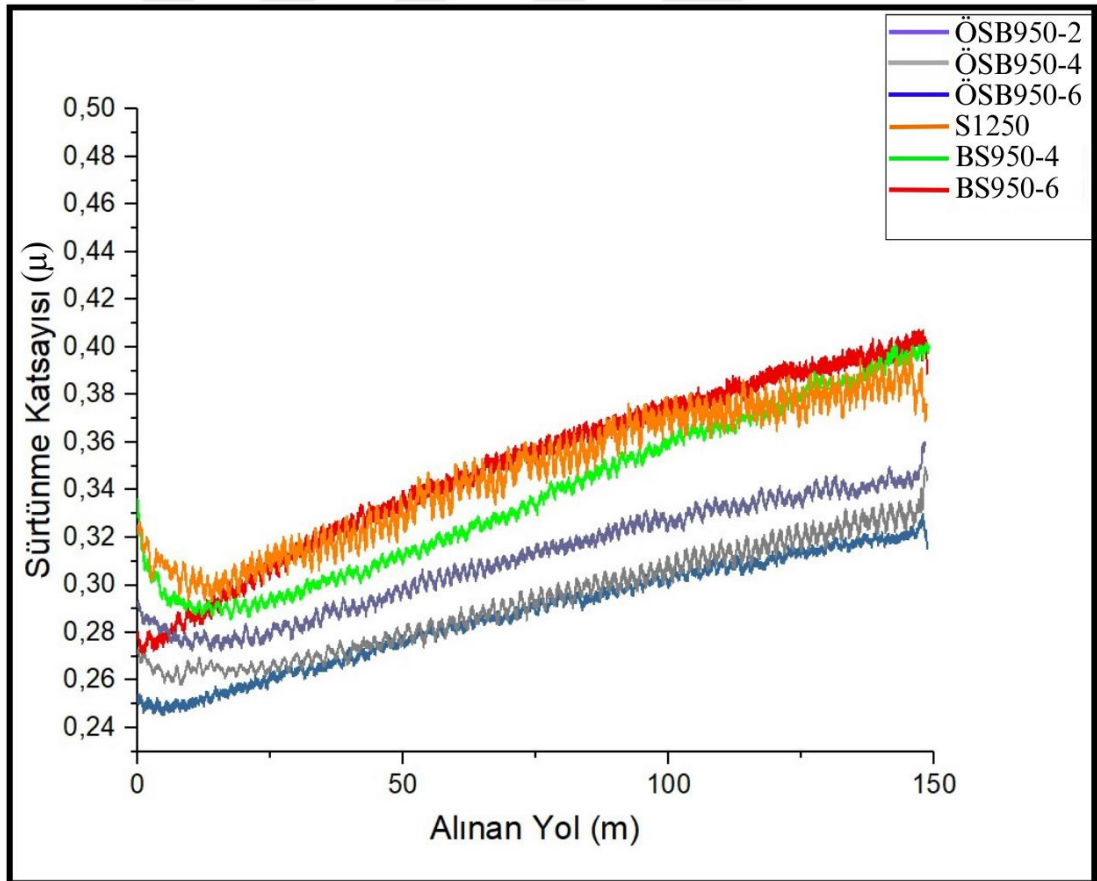
Boro-Sinterleme işlemi sonrasında numunelerin tribolojik davranışlarının karakterizasyonunda kayma mesafesinin ve uygulanan yükün hacim kaybına etkisinin belirlenmesi amacıyla aşınma oranları incelenmiştir.

Şekil 6.33 ve Şekil 6.34’te verilen hacim kayıp oranlarıyla Şekil 6.35 ve Şekil 6.36’da verilen aşınma oranlarının birbirleri ile paralellik gösterdiği görülmektedir. Doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelerde en düşük aşınma kaybının BS1050-6 numunesinde meydana geldiği ve Ön Sinterleme+Borlama işlemine tabi tutulan numunelere yakın bir aşınma oranı sergilediği görülmektedir. Bu veriler sertlik değerleri ile tutarlılık göstermektedir. Sertlik grafikleri incelendiğinde de Ön Sinterleme+Borlama işlemine tabi tutulan numunelere en yakın sertlik değerlerine ulaşan numunenin BS1050-6 kodlu numune olduğu görülmektedir.

Şekil 6.33-Şekil 6.36 incelendiğinde Boro-Sinterleme işlemi uygulanmayan S1250 kodlu numuneye kıyasla aşınma değerlerindeki iyileşmenin 950°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme işlemi ile başladığı görülmektedir. 950°C’de yapılan 2 ve 4 saatlik doğrudan Boro-sinterlenen numunelerinin aşınma değerlerinin S1250 numunesinden daha düşük seviyede kaldığı ve Boro-Sinterleme işleminin uygulandığı 950°C sıcaklığın sinterleme için yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Ön Sinterleme+Borlama uygulanan numunelerden elde edilen aşınma değerlerine, 1050°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme yapılan BS1050-6 kodlu numunede ulaşıldığı görülmektedir.

S1250 kodlu numunenin aşınma değerlerine, 950°C’de 6 saatlik Boro-Sinterleme yöntemiyle ulaşıldığı görülmüştür.

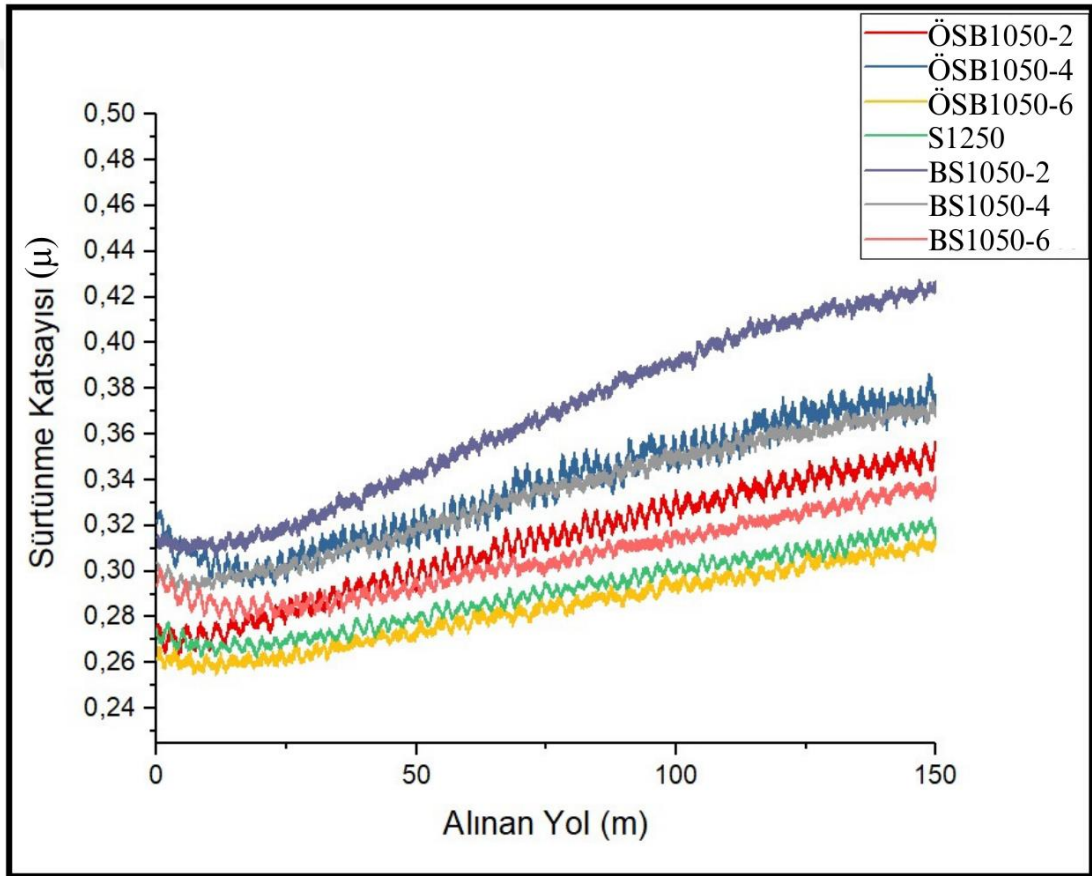
Şekil 6.37’de, 950°C’de 15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda numunelerin sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir.



Şekil 6. 37: 950°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme işlemi sonrası numunelerin alınan yol, sürtünme katsayısı grafiği.

Grafik incelendiğinde, doğrudan Boro-Sinterleme işlemi uygulanan numunelerin sürtünme katsayılarının (μ) ortalama 0,35 civarında olduğu, Ön Sinterleme+Borlama işlemi uygulanan numunelerde ise sürtünme katsayısının (μ) ortalama 0,28 olarak hesaplandığı görülmüştür. Doğrudan Boro-Sinterleme işlemine tabi tutulan numuneler ile sadece ön sinterleme uygulanan S1250 kodlu numunenin sürtünme katsayılarının birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. BS950-2 kodlu numunenin sürtünme verileri düzenli olmadığı için alınamamıştır.

Şekil 6.38’de, 1050°C’de 15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda numunelerin sürtünme katsayısı grafiği verilmiştir.



Şekil 6. 38: 1050°C’de 2-4-6 saatlik Boro-Sinterleme işlemi sonrası numunelerin alınan yol, sürtünme katsayısı grafiği.

Şekil 6. 38’de verilen grafik incelendiğinde doğrudan Boro-Sinterleme işlemine tabi tutulan numuneler ve Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelerin sürtünme katsayılarının Şekil 6.37’de verilen sürtünme katsayılarına kıyasla

birbirlerine daha yakın olduğu gör÷lmektedir. Grafik incelendiğinde doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelerin sürtünme katsayıları (μ) 0,29 değeriinde olduğu gör÷lmektedir fakat BS1050-2 kodlu numenin sürtünme katsayısının (μ) 0.37 değeriinde olduğu gör÷lmektedir. Bu ölçümün yüzeyde meydana gelen abrasif aşınmadan kaynaklandığı düşün÷lmektedir. Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelerin sürtünme katsayıları (μ) bu grafikte de yaklaşık 0,28 değeriindedir.

Aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma katsayılarının, grafiklerde gör÷ldüğü gibi düşük de olsa bir artış eğiliminde olması, malzeme yüzeyindeki homojen yapılı borür tabakasının aşınarak yüzey homojenliğinin bozulmasından kaynaklandığı düşün÷lmektedir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

31CrMo12 ön alaşımlı çelik tozları presleme ve Boro-Sinterleme işlemine tabi tutularak numuneler elde edilmiştir. Numunelerin üretimi sırasında presleme basıncı ve sıcaklığı optimize edilmiş olup, Boro-Sinterleme aşamasında numuneler farklı sıcaklık ve sürelerde Boro-Sinterleme işlemine tabi tutulup en uygun Boro-Sinterleme sıcaklığı ve süresi belirlenmiştir. Boro-Sinterleme sonrası numunelerin tribolojik davranışları incelenerek tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- 31CrMo12 çelik tozlarının presleme aşamasında, inert gaz ortamında 200 MPa basınç altında soğuk presleme ve sonrasında kalıp sıcaklığı 600°C’de iken 300 MPa’lık basınç uygulanarak ılık pres işleminin yapılması sayesinde en yüksek ham yoğunluk değerlerine (5,90 g/cm³ ile 6 g/cm³) ulaşılmıştır.
- OM, FESEM ve EDS analizleri ile Boro-Sinterleme sonrasında numunelerin yüzeylerinde borür tabakasının oluştuğu görülmüştür.
- 950°C’de 2 saat Boro-Sinterleme sonrasında elde edilen sertlik değerleri ve aşınma verileri incelendiğinde, en düşük sertlik ve kötü aşınma dayanımları elde edilmiştir.
- Oluşan borür tabakaları Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelerde testere dişi formunda görülürken, doğrudan Boro-Sinterleme numunelerinde tabaka şeklinde oluştuğu görülmüştür.
- Zamana ve sıcaklık artışına bağlı olarak oluşan borür tabakasının kalınlığının arttığı ve Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelerde oluşan borür tabakasının genişliğinin doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelere göre daha düşük olduğu görülmüştür.
- Presleme sonrasında doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelerde borür tabakası haricinde Bor’un yüzeyden 800 µm derinliklere kadar difüze olabildiği tespit edilmiştir.
- Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelere kıyasla doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelerin geçiş bölgesinin daha geniş olduğu tespit edilmiştir.
- Borür tabakasının beklenildiği gibi yüzey sertliğini doğrudan etkileyen Fe₂B ve FeB fazlarından oluştuğu XRD analizlerinden tespit edilmiştir.

- 950°C’de doğrudan Boro-Sinterleme işlemi uygulanan numunelerde oluşan borür tabakasının sertliği ortalama 800-900 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. Tüm sertlik verileri mukayese edildiğinde, sertlik değerlerinde artış görülmesine rağmen, borlama sonrasında beklenen sertlik değerlerinin çok altında kaldığı görülmüştür. Yüzeyde borür fazlarının oluşmasına rağmen 950°C’de sinterlenmenin yeterli seviyelerde olamadığı görülmüştür.
- 1050°C’de doğrudan Boro-Sinterleme işlemi uygulanan numunelerde oluşan borür tabakasının sertlikleri ortalama 1000-1320 HV_{0.1} aralığında iken Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelerin sertlikleri ortalama 1250-1450 HV_{0.1} aralığında ölçülmüştür. İki proses sürecinde sertlik değerlerinin yaklaşık eşit olması, 1050°C’de doğrudan Boro-Sinterleme işleminin çalışma için başarılı olduğunu göstermiştir.
- Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelerin matris sertlikleri 300-400 HV_{0.1} olarak ölçülürken, doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelerin matris sertlikleri 200-300 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür.
- Yapılan aşınma deneyi sonrasında FESEM görüntüleri incelendiğinde numunelerde Abrasif aşınmadan kaynaklı bölgesel dökülmeler ve pullanma formunda benzer aşınma izleri görülmüştür. Aşınma deneyi sonucunda numunelerin sürtünme katsayıları Ön Sinterleme+Borlama işlemi uygulanan numunelerde her iki sıcaklık içinde ortalama 0,28(μ) iken doğrudan Boro-Sinterleme yapılan numunelerde 1050°C’de 0,29(μ) iken 950°C’de 0,35(μ) olarak tespit edilmiştir. 1050°C’de yapılan doğrudan Boro-Sinterleme işlemi sonucunda, Ön Sinterleme+Borlama işlemi uygulanan numunelere eşit bir sürtünme katsayısı elde edilmiştir.
- En yüksek aşınma değerlerinin 950°C’de 4 saat Boro-Sinterleme işlemi uygulanan BS950-4 kodlu numunede gerçekleştiği tespit edilirken, en düşük aşınma değerlerinin ise ÖSB1050-4 kodlu numunede gerçekleştiği tespit edilmiştir. Genel olarak aşınma deney sonuçları incelendiğinde Ön Sinterleme+Borlama yapılan numunelerin doğrudan Boro-Sinterleme uygulanan numunelere kıyasla daha az aşındıkları tespit edildi.

ÖNERİLER

- 31CrMo12 ön alaşımlı T/M çelikleri, sıcak izostatik presleme ile üretilebilir.
- Boro-Sinterleme yöntemi ile üretilen 31CrMo12 ön alaşımlı T/M çeliklerin korozyon dayanımları incelenebilir.
- T/M üretim yöntemi ile üretilecek olan çeliklerde farklı termokimyasal yüzey sertleştirme işlemleri, sinterleme adımıyla eş zamanlı olarak yapılabilir.



8. KAYNAKÇA

Aksöz, S., Kaplan, Y., Tan, E., “Boro-sinterleme işleminin ham T/M parçaların mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkilerinin incelenmesi”, *Journal of Boron*, 4(2), 77-84, (2019).

Arık, H., Kırmızı, G., Semerci, P., “Ilık Presleme ile Alüminyum Matrisli ve Al₂O₃ Takviyeli Toz Metal Kompozit Malzeme Üretimi ve Abrasif Aşınma Davranışının Araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, (2017).

Arslan, D., Uzun, R. O., “Adhesive Behavior of the Pack-Borided AISI 304L Steel with Microwave Hybrid Heating”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2), 181-191, (2021).

ASTM S. “ASTM G 99–95”. Philadelphia, PA 1995.

Bayça, S. U., Şahin, S., “Borlama”, *Mühendis ve Makina*, 532, 51–59, (2004).

Betti Z.A., “Studying the Effect of Different Heat Treatments on Mechanical and Wear Properties of High Chromium Cast Iron” Doktora Tezi, Republic of Iraq Ministry of Higher Education and Scientific Research, Irak., 2020.

Campos, I., Ramírez, G., Figueroa, U., Martínez, J., Morales, O., “Evaluation of boron mobility on the phases FeB, Fe₂B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels”, *Applied Surface Science*, 253(7), 3469-3475, (2007).

Campos, S. I. E., Rodríguez, C. G. A., “Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels”, *Thermochemical Surface Engineering of Steels* 651-702, (2015).

Carbucicchio, M., Zecchi, E., Palombarini, G., Sambogna, G. “Phase composition and structure of boride layers grown on laboratory-cast low-chromium alloys”, *Journal of Materials Science*, 18(11), 3355-3362, (1983).

Carpenter, H., Robertson, J. M., “The Metallography of some Ancient Egyptian Implements”, *Nature*, 125(3162), 859-862, (1930).

Carrera, E. R., Figueroa, L., U., Martínez, T. J., Campos, S. I., Hernández, S. E., Motallebzadeh, A., “Tribological behavior of borided AISI 1018 steel under linear reciprocating sliding conditions”, *Wear*, 362-363, 1-7, (2016).

Casteletti, L. C., Lombardi, A. N., Totten, G. E., Boriding: Encyclopedia of Tribology, Springer US. 249-255, (2013).

Çanakçı, A., Varol, T., “Microstructure and properties of AA7075/Al–SiC composites fabricated using powder metallurgy and hot pressing”, *Powder Technology*, 268, 72-79, (2014).

Danninger, H., Gierl-Mayer, C., “Advanced powder metallurgy steel alloys”, *Advances in Powder Metallurgy*, 149-201, (2013).

Dawes, J., Bowerman, R., Trepleton, R., “Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain”, *Johnson Matthey Technology Review*, 59(3), 243-256, (2015).

Dwivedi, D. K., Surface Engineering, springer-India, (2018).

Efe, G. Ç., İpek, M., Özbek, İ., Bindal, C., “Kinetics of borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 steels”, *Materials Characterization*, 59(1), 23-31, (2008).

Erden, M. A., “Presleme Basıncının Toz Metalurjisi ile Üretilen Alaşımsız Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 257-264. (2017).

Erdoğan, A., Kurşuncu, B., Günen, A., Kalkandelen, M., Gök, M. S., “A new approach to sintering and boriding of steels “Boro-sintering”: Formation, microstructure and wear behaviors”, *Surface and Coatings Technology*, 386, (2020).

Fang, Z. Z., (Ed.), Sintering of Advanced Materials, (2010).

Flegler, F., Neuhäuser, S., Groche, P., “Influence of sheet metal texture on the adhesive wear and friction behaviour of EN AW-5083 aluminum under dry and starved lubrication”, *Tribology International*, 141, 105956, (2020).

German, R. M., Thermodynamics of sintering: Sintering of Advanced Materials, 3-32, (2010).

German, R. M., Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing, New York, (2005).

Goeuriot, P., Fillit, R., Thevenot, F., Driver, J. H., Bruyas, H., “The influence of alloying element additions on the boriding of steels”, *Materials Science and Engineering*, 55(1), 9-19, (1982).

Graf von Matuschka, A., “Borieren”, Carl Hanser Verlag München-Wien, 1977.

Huda, Z., Taib, N. I., Zaharinie, T., “Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy”, *Materials Chemistry and Physics*, 113(2-3), 515-517, (2009).

Jafari, A., Dehghani, K., Bahaaddini, K., Abbasi Hataie, R., “Experimental comparison of abrasive and erosive wear characteristics of four wear-resistant steels”, *Wear*, 416-417, 14-26, (2018).

Jones, W.D., Fundamental Principles of Powder Metallurgy, (1960).

Kaplan, Y., Yıldırım, A., Aksöz, S., “Nitrokarbürizasyon Sonrası Oksidasyon İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerine Etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 23(4), 1357-1362, (2020).

Kayalı, Y., “Investigation of the diffusion kinetics of borided stainless steels”, *The Physics of Metals and Metallography*, 114(12), 1061-1068, (2013).

Kayalı, Y., Güneş, İ., Ulu, S., “Diffusion kinetics of borided AISI 52100 and AISI 440C steels”, *Vacuum*, 86(10), 1428-1434, (2012).

Keddam, M., Chentouf, S. M., “A diffusion model for describing the bilayer growth (FeB/Fe₂B) during the iron powder-pack boriding”, *Applied Surface Science*, 252(2), 393-399, (2005).

Keddam, M., Jurči, P., “Simulating the Growth of Dual-Phase Boride Layer on AISI M2 Steel by Two Kinetic Approaches”, *Coatings*, 11(4), 433, (2021).

Kianian, B., “Comparing Acquisition and Operation Life Cycle Costs of Powder Metallurgy and Conventional Wrought Steel Gear Manufacturing Techniques”, *Procedia CIRP*, 81, 1101-1106, (2019).

Knight, W. A., “Design for Manufacture Analysis: Early Estimates of Tool Costs for Sintered Parts”, *CIRP Annals*, 40(1), 131-134, (1991).

Koç, V., “Effect of boro-sintering process on mechanical properties and wear behaviour of low alloy steel produced by powder metallurgy”, *Materials Research Express*, 6(12), (2019).

Küper, A., Qiao, X., Stock, H. R., Mayr, P., “A novel approach to gas boronizing”, *Surface and Coatings Technology*, 130(1), 87-94, (2000).

Li, D., *Abrasive Wear: Friction, Lubrication, and Wear Technology*: ASM International, 243-251, (2017).

Lindskog, P., Arbstedt, P., “Iron Powder Manufacturing Techniques: A Brief Review”, *Powder Metallurgy*, 29(1), 14-19, (1986).

Ludema, K. C., Ajayi, O. O., “Friction, Wear, Lubrication”. *CRC Press*, (2018).

Martini, C., Palombarini, G., Carbucicchio, M., “Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron”, *Journal of Materials Science*, 39(3), 933-937, (2004).

Massalski, B., “Binary alloy phase diagrams”, ASM, Metals Park, Ohio (1986).

Maya-Johnson, S., Felipe Santa, J., Toro, A., “Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue - Wear mechanisms and crack growth”, *Wear*, 380-381, 240-250, (2017).

Mehta, A., Edwards, S. F., *Statistical mechanics of powder mixtures*, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 157(3), 1091-1100, (1989).

Nam, K.S., Lee, K.H., Lee, D. Y., Song, Y.S., “Metal surface modification by plasma boronizing in a two-temperature-stage process”, *Surface and Coatings Technology*, 197(1), 51-55, (2005).

Okabe, T. H., Oda, T., Mitsuda, Y., “Titanium powder production by preform reduction process (PRP)”, *Journal of Alloys and Compounds*, 364(1-2), 156-163, (2004).

Orihel, P., Ptačinová, J., Gogola, P., Keddam, M., Jurči, P., “Pack-boriding of Sleipner steel: microstructure analysis and kinetics modeling”, *Materials Testing*, 66(1), 43-55, (2024).

Ortiz D.M., “Comparison and Analysis of Diffusion Models for the Fe 2 B Layers Formed on the AISI 12L14 Steel by Using Powder-Pack Technique”. *Heat and Mass Transfer- Advances in Science and Technology Applications*, (2019).

Rahaman, M. N., Sintering Theory and Fundamentals. Powder Metallurgy: ASM International, 205-236, (2015).

Rojas-Díaz, L. M., Verano-Jiménez, L. E., Muñoz-García, E., Esguerra-Arce, J., Esguerra-Arce, A., “Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chips and its processing through powder metallurgy”. *Powder Technology*, 360, 301-311, (2020).

Samal, P., Newkirk, J. (Ed.), Powder Metallurgy ASM International, (2015).

Selçuk, B., “Borlanmış AISI 1020 ve 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, *Fen Bil. Ents.*, Kayseri., 1994.

Sinha, A. K., Boriding (Boronizing), ASM Handbook, Vol.4., (C. 4), (1991).

Sun, W., Wang, Q., Zhou, Y., Wu, J., “Material and energy flows of the iron and steel industry: Status quo, challenges and perspectives”. *Applied Energy*, 268, 114946, (2020).

Tong, W. P., Tao, N. R., Wang, Z. B., Lu, J., Lu, K., “Nitriding Iron at Lower Temperatures”, *Science*, 299(5607), 686-688, (2003).

Totten, G. E. (Ed.), Friction, Lubrication, and Wear Technology: ASM International, (2017).

Tripathy, A., Kumar S.S., Kumar C.A., “A Review of Solid State Processes in Manufacture of Functionally Graded Materials”, *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.39), 1-5, (2018).

Uluköy, A., Can, A. Ç., “ÇELİKLERİN BORLANMASI”. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 12(2), 189-198, (2006).

Upadhyaya, G. S., Powder Metallurgy Technology, Cambridge: Int Science Publishing, (1997).

White, D.G., The growth of PM in North America. Metal Powder Report, 50(12), 46-49, (1995).

Xing, M., Zhou, C., Li, Y., Zheng, M., “Wear prediction considering dynamic load for spur gear in mixed elastohydrodynamic lubrication. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers”, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 237(3), 645-654, (2023).

Yu, L., Chen, X., Khor, K., Sundarajan, G., “FeB/FeB phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics”. *Acta Materialia*, 53(8), 2361-2368, (2005).

Zhao, J., Yu, X., Sheng, W., Li, Z., Zhang, H., Zhu, R., “Effect of Machined Tooth Surface Mixed Lubrication Sliding Wear on Gear Dynamic Characteristics”. *Machines*, 11(1), 25, (2022).