

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Fe-Mo-B ESASLI SERT DOLGU ELEKTROTLARIN
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem Nur KURHAN

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ŞEN

Eylül 2021

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Fe-Mo-B ESASLI SERT DOLGU ELEKTROTLARIN
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem Nur KURHAN

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 16/09/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Gizem Nur KURHAN

16.09.2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Uğur ŞEN'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışma sırasında yaptığı yönlendirmeler ile büyük katkı sağlayan ve her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim değerli hocalarım Arş. Gör. Dr. Engin KOCAMAN ve Dr. Öğr. Üyesi Bülent KILINÇ'a teşekkür etmeyi borç bilirim. Laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen ve çalışmadaki manevi desteğinden ötürü Recep HOCAOĞLU'na teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Uluslararası Bor Enstitüsü (BOREN) kurumuna teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen ve bugünlere gelebilmemi sağlayan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1. Sert Dolgu Yüzey Kaplamalar	4
2.2. Sert Dolgu Yüzey Kaplama Alaşımları.....	5
2.2.1. Demir esaslı sert dolgu alaşımları.....	6
2.2.2. Kobalt esaslı sert dolgu alaşımları	7
2.2.3. Nikel esaslı sert dolgu alaşımları	7
2.2.4. Bakır esaslı sert dolgu alaşımları	8
2.2.5. Kompozit esaslı sert dolgu alaşımları	8
2.2.6. Yüksek silisyum esaslı sert dolgu alaşımları	8
2.2.7. Tungsten karbür esaslı sert dolgu alaşımları	8
2.2.8. Krom karbür esaslı sert dolgu alaşımları	9
2.2.9. Bor içeren sert solgu alaşımları.....	9
2.3. Sert Dolgu Alaşım Seçimi.....	9
2.4. Sert Dolgu Yüzey Kaplama Yöntemleri	11

2.4.1. Elektrik ark kaynağı	11
2.4.2. TIG kaynağı	12
2.4.3. MIG-MAG (gazaltı) kaynağı	13
2.4.4. Tozaltı ark kaynağı	14
2.4.5. Oksi-asetilen kaynağı	14
2.4.6. Plazma transfer ark kaynağı	15
2.4.7. Özlü tel ark kaynağı	15
2.5. Kaynak ile Yapılan Sert Dolgu Yüzey Kaplama Karakteristikleri.....	16
2.5.1. Kaplama kalınlığı	16
2.5.2. Altılığa yapışma	16
2.6. Bileşim İçeriğinin Sert Dolgu Alaşımlama Üzerindeki Etkisi	16
2.6.1. Fe-B sistemi	17
2.6.2. Fe-Mo sistemi	19
2.6.3. Fe-Mo-B sistemi	19

BÖLÜM 3.

BOR İÇERİKLİ SERT DOLGU YÜZEY ALAŞIMLAMA UYGULAMALARI .	22
3.1. Fe-Mo-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımlama Uygulamaları.....	22
3.2. Fe-Cr-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımlama Uygulamaları	23
3.3. Fe-W-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımlama Uygulamaları.....	24
3.4. Fe-Ti-B Esaslı Sert Dolgu Uygulamaları.....	25

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	26
4.1. Giriş.....	26
4.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler.....	26
4.3. Örtülü Elektrotların Üretilmesi	28
4.4. Sert Yüzey Alaşımlama.....	30
4.5. Analizler İçin Numunelerin Hazırlanması	31
4.6. Analiz ve Testler.....	31
4.6.1. SEM ve EDS analizi	32
4.6.2. Faz analizleri	33

4.6.3. Mekanik testler.....	34
4.6.3.1. Sertlik testleri.....	34
4.6.3.2. Aşınma testleri.....	35
4.6.4. Korozyon testleri.....	36
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR.....	37
5.1. Giriş.....	37
5.2. Mikroyapı İncelemeleri ve Faz Analizleri	37
5.2.1. Arayüzeylerin İncelenmesi.....	37
5.2.2. Faz analizleri ve mikroyapı.....	38
5.3. Sertlik Testleri	47
5.4. Aşınma Testleri	50
5.5. Korozyon Testleri.....	60
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR.....	65
KAYNAKÇA	67
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

δ	: Delta
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometrisi
HRC	: Rockwell sertlik değeri
HV	: Vickers sertlik değeri
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-ışını difraksiyonu
α -demir	: Ferrit (alpha)
γ	: Gama
μ	: Sürtünme katsayısı
μm	: Mikron
σ	: Sigma

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Sert yüzey alaşımlama uygulama alanlarına ait örnekler	2
Şekil 2.1. Kotecki diyagramı.....	10
Şekil 2.2. Elektrik ark kaynağı şematik gösterimi	11
Şekil 2.3. TIG kaynağı temsili gösterimi	12
Şekil 2.4. Gaz altı ark kaynağına ait temsili gösterim.....	13
Şekil 2.5. Fe-B ikili denge diyagramı	18
Şekil 2.6. Fe-Mo ikili denge faz diyagramı.....	19
Şekil 2.7. Fe-Mo-B faz diyagramı (1050°C).....	20
Şekil 4.1. Örtülü elektrot üretimi için kullanılan alt ve üst kalıp.....	29
Şekil 4.2. Örtülü elektrot üretimi şematik gösterim	30
Şekil 4.3. Üretilen örtülü elektrotlar	30
Şekil 4.4. Su soğutmalı hassas kesim cihazında numune kesim işlemi	31
Şekil 4.5. Uygulanan test ve analizlere ait iş akış şeması	32
Şekil 4.6. JEOL JSM-6060 LV taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	32
Şekil 4.7. RIGAKU D/MAX/2200/PC marka X-ışınları difraktometresi.....	33
Şekil 4.8. Mikro sertlik testleri gerçekleştirilen FutureTech FM700 marka mikro sertlik cihazı	34
Şekil 4.9. Makro sertlik testleri gerçekleştirilen Bulut Makine BMS-DIGIROCK-RB sertlik cihazı.....	35
Şekil 4.10. Aşınma testleri gerçekleştirilen TRIBOtechnic-TRIBOtester aşınma cihazı	35
Şekil 4.11. Elektrokimyasal test ünitesine bağlı üç elektrot yöntemi ile çalışan yatay hücre.....	36
Şekil 5.1. Sert dolgu kaplamalı numunelerin altlık-kaplama arayüzey görünümü. Sert dolgu kaplamalı numunelerin altlık-kaplama arayüzey görünümü	38

Şekil 5.2. Sert dolgu kaplamalara ait XRD analizi	39
Şekil 5.3. Farklı molibden oranlarına sahip sert dolgu kaplamalara ait SEM görüntüleri (a) $Fe_{43}B_5Mo_2$ bileşimi (b) $Fe_{41}B_5Mo_4$ bileşimi (c) $Fe_{39}B_5Mo_6$ bileşimi (d) $Fe_{37}B_5Mo_8$ bileşimi	40
Şekil 5.4. $Fe_{43}B_5Mo_2$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi	42
Şekil 5.5. $Fe_{41}B_5Mo_4$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi	44
Şekil 5.6. $Fe_{39}B_5Mo_6$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi	45
Şekil 5.7. $Fe_{37}B_5Mo_8$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi	47
Şekil 5.8. Üretilen sert dolgu kaplamalarının mikro sertlik sonuçları	48
Şekil 5.9. Üretilen sert dolgu kaplamalarının makro sertlik sonuçları.....	49
Şekil 5.10. Üretilen sert dolgu kaplamalarının sürtünme katsayısı sonuçları	51
Şekil 5.11. Üretilen sert dolgu kaplamaların aşınma testi sonrası SEM görüntüleri	53
Şekil 5.12. $Fe_{43}B_5Mo_2$ kaplamasına ait aşınma sonrası EDS analizi sonuçları	55
Şekil 5.13. $Fe_{41}B_5Mo_4$ kaplamasına ait aşınma sonrası EDS analizi sonuçları	56
Şekil 5.14. $Fe_{39}B_5Mo_6$ kaplamasına ait aşınma sonrası EDS analizi sonuçları	57
Şekil 5.15. $Fe_{37}B_5Mo_8$ kaplamasına ait aşınma sonrası EDS analizi sonuçları	58
Şekil 5.16. Üretilen sert dolgu kaplamalarının aşınma oranı sonuçları	59
Şekil 5.17. Sert dolgu kaplamalara ait tafel eğrileri.....	61
Şekil 5.18. Sert dolgu kaplamalara ait korozyon testi sonrası SEM görüntüleri	63

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Çelik malzemelere uygulanan kaplama çeşitleri.....	2
Tablo 4.1. Kullanılan ferro tozlar ve demir tozunun kimyasal bileşimleri (% ağ.).	27
Tablo 4.2. Örtü bileşiminde yer alan tozların kimyasal bileşimi ve kullanım amacı.....	27
Tablo 4.3. Kullanılan çekirdek telin kimyasal bileşimi (% ağ.).....	27
Tablo 4.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan 1010 çelik altlık kimyasal bileşimi (%ağ.)	28
Tablo 4.5. Belirlenen bileşimlerdeki ferro alaşım ve demir tozu bileşimleri (%at.)	28
Tablo 4.6. Kaynak parametreleri	31
Tablo 5.1. Sert dolgu kaplamalara ait Tafel polarizasyon test verileri.....	62

ÖZET

Anahtar kelimeler: Sert yüzey alaşımlama, elektrik ark kaynağı, elektrot, sertlik, aşınma, korozyon

Bu çalışmada, dört farklı bileşim sahip olan Fe-Mo-B esaslı sert dolgu elektrotları üretilerek, elektrik ark kaynağı yöntemi ile sert yüzey alaşımlama işlemi AISI 1010 çelik altlık üzerine gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kaplama tabakalarının özellikleri çeşitli analiz yöntemleri ile incelenmiştir. Çalışmada kullanılan örtülü elektrotların üretimi için gerekli ferro alaşım tozları ve demir tozu halkalı değirmende öğütülmüştür. Flaks ve bağlayıcı ilavesinden sonra plastik hamur kıvamına gelen karışım daha önceden tasarımı yapılan kalıp içerisinde 2,5 mm çapında 350 mm uzunluğunda çelik tel üzerinde preslenmiştir. Kurutma ve pişirme işlemlerinden sonra elektrot üretimi işlemleri tamamlanmıştır. AISI 1010 çelik altlıklar aseton ile kir ve yağdan temizlenmiş ve sonrasında elektrik ark kaynağı ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Standart numune hazırlama işlemlerine tabi tutulan kaplamaların mikroyapı incelemeleri, faz analizleri, mikro ve makro sertlik ölçümleri, aşınma ve korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen sert dolgu kaplamaların faz dağılımının homojen olduğu ve altlık malzeme ile metalürjik bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Kaplama mikroyapısında α -Fe, Fe₃B, Mo₂FeB₂ ve Fe₂B fazları tespit edilmiş ve bileşim içeriğindeki molibden miktarı arttıkça yapıdaki Fe₃B ve Fe₂B fazlarının azaldığı, Mo₂FeB₂ fazının ise arttığı görülmüştür. Matriksten kaplama tabakasının yüzeyine kadar ölçümü gerçekleştirilen mikrosertlik testinde arayüzeyden itibaren sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Makrosertlik sonuçları da mikrosertlik sonuçlarını destekler niteliktedir. Gerçekleştirilen karşılıklı (reciprocal) aşınma testi sonuçlarına göre, yapıdaki molibden artışına bağlı olarak mikroyapıda yer alan intermetalik fazların ve ötektik yapıların artması ile aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, Fe-Mo-B esaslı sert dolgu elektrotları üretilmiş ve AISI 1010 çelik altlık üzerine yüzey alaşımlama işlemi başarıyla gerçekleştirilmiş, sertliği yüksek, aşınma ve korozyona karşı oldukça dirençli kaplamalar elde edilmiştir.

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF Fe-Mo-B BASED HARD FILLING ELECTRODES

SUMMARY

Keywords: Hardfacing, electric arc welding, electrode, microstructure, hardness, wear, corrosion

In this study, Fe-Mo-B based hardfacing electrodes with four different compositions were produced and hard surface alloying process was carried out on AISI 1010 steel substrate by electric arc welding method. The properties of obtained coating layers were investigated by various analysis methods. Ferrous powders and iron powder required for production of covered electrodes used in the study were ground in a ring mill. After adding flux and binder, the mixture, which became doughy, was pressed on a steel wire with diameter of 2.5 mm and length of 350 mm in the previously designed mold. After drying and cooking processes, electrode production processes were completed. AISI 1010 steel substrates were cleaned from dirt and oil with acetone and then coated with electric arc welding. Microstructure investigations, phase analyzes, micro and macro hardness measurements, wear and corrosion tests of the coatings subjected to standard sample preparation processes were carried out. It is understood that the phase distribution of the produced hardfacing coatings is homogeneous and in metallurgically compatible with the substrate material. α -Fe, Fe₃B, Mo₂FeB₂ and Fe₂B phases were determined in the coating microstructure and it was observed that as the amount of molybdenum in the composition increased, the Fe₃B and Fe₂B phases in the structure decreased, while the Mo₂FeB₂ phase increased. In the microhardness test, which is measured from the substrate to up to the top of the coating, the hardness increases from the interface. The macrohardness results also support the microhardness results. According to the results of the reciprocal wear test, it was determined that the wear resistance increased with the increase of intermetallic phases and eutectic structures in the microstructure due to the increase in molybdenum in the structure. As a result, Fe-Mo-B based hardfacing electrodes were produced and surface alloying process was successfully performed on AISI 1010 steel substrate, coatings with high hardness and resistance to wear and corrosion were obtained.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan çoğu iş parçası zor koşullar altında çalışmaktadır. Bu zor koşullar altında, yaşanan sorunlar sonrası hasar alan parçanın değişimi ciddi ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Bu ekonomik kayıplardan dolayı kullanılan iş parçalarının servis ömürlerinin uzun olması, aşınma, korozyon, sertlik gibi önemli yüzey özelliklerinin yüksek olması tercih edilmektedir [1].

Bir malzemenin ortam ile teması yüzey ile gerçekleşir. Malzemenin davranışı aslında yüzeyin davranışı demektir. Dolayısı ile malzemeden beklenen özellikler genellikle malzemenin yüzeyinden beklenmektedir. Yüzey iyileştirme işlemleri ile altlık malzemenin sahip olmadığı özellikler kazandırılmaktadır. Bu yöntemler ile beklenen özellikleri karşılayan, daha ucuz ve kolay üretilen malzemelerin sadece yüzeyini iyileştirerek aynı özelliklere ulaşabilmesi sağlanabilmektedir. Bu nedenle, yüzey iyileştirmelerinin kullanımı son derece ilgi çekicidir [2]. Bu durumda, sadece yüzeyi iyileştirmek ekonomik olarak büyük bir tasarruf sağlar. Yüzey iyileştirmeleri tüm kesitin çok küçük bir bölümünü tutar fakat elde edilen iyileştirmeler ile malzemelerin ömrünü 10-100 kat arttırılabilmektedir [3].

Yukarıda da bahsedildiği gibi, malzemelerin yüzeyine yapılan çeşitli işlemler ile mekanik ve tribolojik özellikleri geliştirilebilir. Özellikle otomobil, hafriyat, petrokimya, nükleer, çimento sanayi, gemi inşa endüstrisi, tarım aletleri, madencilik sektöründe, yüzey özelliklerinin geliştirilmesi önemli bir yere sahiptir [4]. Uygulama alanlarına ilişkin örnekler Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Günümüz teknolojisindeki gelişmeler ve artan ihtiyaçlar sebebiyle, özellikle korozyon ve aşınma problemlerine çözüm üretmek için son yıllarda "yüzey mühendisliği" kavramının önemi artmıştır [5].



Şekil 1.1. Sert yüzey alaşımlama uygulama alanlarına ait örnekler [6].

Yüzey mühendisliği uygulamaları ile birbirinden farklı birçok malzeme grubunun özellikleri geliştirilebilmektedir fakat aşınma ve korozyon ortamlarında en çok kullanılan malzeme olan çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi büyük bir öneme sahiptir. Çelik malzemelere uygulanan yüzey işlemlerini genel olarak yüzeyin içyapısını değiştiren (difüzyon esaslı) ve kaplama (sadece yüzey modifikasyonunu değiştiren) olarak ikiye ayırmak mümkündür. Tablo 1.1.'de çelik malzemelere uygulanan yüzey işlemlerinden bazıları listelenmiştir [5].

Tablo 1.1. Çelik malzemelere uygulanan kaplama çeşitleri

Difüzyon Esaslı Yöntemler	Yüzey Modifikasyonu Esaslı Yöntemler
Karbürleme	PVD-CVD
Nitrürleme	Akımsız nikel kaplama
Karbonitrürleme	Termal sprey kaplama
Nitrokarbürleme	Sert krom kaplama
Borlama	Lazer ile sert yüzey sertleştirme
Termal difüzyon prosesleri	Sol-gel
	Kaynak ile yüzey sertleştirme

Kaplamadan beklenen özelliklere göre (kaplama kalınlığı, ekonomiklik vb.) kaplama yöntemi seçilebilir. Bu yöntemler arasında kaynak ile gerçekleştirilen yüzey kaplamalar diğerlerine göre aşağıda sıralanan özelliklerinden ötürü daha üstündür.

- İlk yatırım maliyeti daha düşüktür.
- Kaplama kalınlığı daha fazladır.,

- Uygulaması daha kolaydır.
- Diğerlerine göre daha hızlı uygulanabilir.
- Kaplama malzemeleri daha ekonomiktir.
- Altlık malzeme ile sert dolgu kaplaması arasında oluşan metalürjik bağ oluşması diğer yöntemlere göre bir avantajdır [7].

Sert dolgu alaşımlama birçok farklı kaynak yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Örtülü elektrot elektrik ark kaynağı, TIG kaynağı, plazma transfer ark kaynağı, MIG-MAG kaynağı, tozaltı ark kaynağı, özlü tel ark kaynağı, oksijen-gaz kaynağı vb. yöntemler örnek olarak verilebilir. Bu yöntemler arasında örtülü elektrot ark kaynağı ekonomiklik, düşük elektrot maliyeti, yüksek biriktirme oranı gibi avantajlarından dolayı diğer işlemler arasındaki üstünlüğünü korumaktadır [8].

Bu çalışmada, dört farklı bileşime sahip Fe-Mo-B esaslı örtülü sert dolgu kaynağı elektrot üretimi ferro alaşım tozları kullanarak gerçekleştirilmiş ve elektrik ark kaynağı yöntemi kullanılarak AISI 1010 çelik altlık üzerine sert dolgu yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Örtü bileşiminin kaplama tabakasının morfolojik ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Kaynak işleminden sonra üretilmiş olan kaplama tabakasının mikroyapı kontrolü optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile, faz analizleri X-ışınları difraksiyonu (XRD) incelemeleri ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma özellikleri ASTM G133 standardında karşılıklı git gel hareketli (reciprocal) lineer ball on disk cihazı ile gerçekleştirilmiş ve sürtünme katsayısı, aşınma oranı değerleri belirlenmiştir. Aşınan yüzeylerin aşınma mekanizması taramalı elektron mikroskobu ile incelenip, belirlenmiştir. Kaplamaların mikrosertlikleri Vickers sertlik ölçüm cihazı, makro sertlikleri ise Rockwell C makro sertlik testi ile gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, elde edilen kaplamaların korozyon testleri potansiyodinamik polarizasyon yöntemi ile gerçekleştirilerek yüzeylerin incelemesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile bileşim değişimine göre karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada elektrot üretimi ve kaplanması başarı ile gerçekleştirilmiş olup, molibden oranının artması ile mikroyapıda yer alan Fe-Mo-B sistemine ait borür ve diğer intermetalik fazların artması sonucunda sertlik, aşınma ve korozyon direncinde de artış gözlenmiştir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Sert Dolgu Yüzey Kaplamalar

Sert dolgu yüzey kaplama, malzemenin süneklik ve tokluğundan önemli bir kayıp olmadan, yüzeyine homojen bir şekilde, sertlik, aşınma, korozyon, darbe gibi özelliklerinin iyileştirilmesi ve ömrünün uzatılması amacı ile yapılan bir işlemdir. Otomobil, hafriyat, gemi inşa endüstrisi, tarımcılık, madencilik gibi zorlayıcı çalışma koşullarında çalışan iş parçalarının performanslarını iyileştirmek için uygulanır. Ek olarak bu zorlayıcı koşullar altında çalışan iş parçalarının hasar aldıktan sonra yenilenmesi yerine, hasarlı kısmın onarılması büyük bir ekonomik kazanç sağlamakla birlikte daha hızlıdır. Bu sebeple sert dolgu kaplamalar onarım amaçlı ile de kullanılmaktadır.

Sert dolgu ile yüzey kaplama işlemi kaynak ile yüzey kaplama işlemi kadar eskidir ve ilk olarak 1896 yılında W. Spencer tarafından uygulanmıştır. Bu yöntem altlık ile kaplama arasında metalürjik bağ kurduğundan diğer yüzey kaplama işlemlerine kıyasla eşsiz avantajlar sunar. Bunlardan bazıları;

- Kaplama kalınlığı 10 mm'ye kadar çıkabilir.
- Çalışma sahasında bile kolaylıkla uygulanabilir.
- Diğerlerine göre daha kolay uygulanabilir olduğundan çok yönlü bir esneklik sağlar.
- Bozulmaya karşı koruma için çok çeşitli malzemeler biriktirilebildiğinden çok yönlü bir procestir [8, 9].

Sert dolgu kaplamalar, genellikle zorlayıcı ortamlarda çalışan iş parçaları olan düşük karbonlu, orta karbonlu veya düşük alaşımlı çeliklere uygulanır [11]. Kaplama

malzemesi olarak yüksek sertlik ve aşınma değerlerinin görüldüğü metal-karbür veya metal-borür fazları oluşturacak bileşimler seçilir. Sert dolgu kaplama uygulama yöntemi olarak oksiasetlen gaz (OA), tungsten inert gaz (TIG) kaynağı, toz altı ark (SA) ve plazma transfer ark (PTA) gibi çeşitli kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasındaki farklardan en önemlileri; kaynak verimliliği, kaynak plakası seyrelme oranı, kaynak sarf malzemelerinin üretim maliyetidir [8]. Kaplama işlemi esnasında kaynak parametrelerinde yapılan küçük bir değişiklik, kaplama özelliklerini önemli bir şekilde etkilemektedir. Bu sebeple, uzun yıllardır sert dolgu kaplamaları üzerine yapılan araştırmalar büyük bir ilgiyle devam etmektedir.

2.2. Sert Dolgu Yüzey Kaplama Alaşımları

Sert dolgu yüzey kaplama için kullanılan çoğu malzemenin sertliği 200 HV'den yüksektir ve bu sebeple sert yüzey kaplama/sert yüzey alaşımları olarak adlandırılır. Bu malzemelerin çeşitliliği ve fazlalığından dolayı gruplandırmak zor fakat kolay incelenebilmesi açısından faydalıdır. Genellikle sert dolgu alaşımları aşınma türüne ve mikroyapısına göre gruplandırılmaktadır. Aşınma türüne göre sert dolgu alaşımları;

- Dolgu kaplama alaşımları
- Metal-metal aşınma alaşımları
- Metal-toprak abrazyon alaşımları
- Tungsten karbürler
- Demir dışı alaşımlar

Mikroyapısına göre sert dolgu alaşımları;

- Demir esaslı sert dolgu alaşımları
- Kobalt esaslı sert dolgu alaşımları
- Nikel esaslı sert dolgu alaşımları
- Bakır esaslı sert dolgu alaşımları
- Kompozit sert dolgu alaşımları
- Yüksek silisyumlu malzemeler

- Tungsten karbür esaslı malzemeler
- Krom-bor pastalar
- Krom karbür alaşımları

Mikroyapısına göre yapılan sınıflandırma daha fazla kabul gördüğünden bir sonraki bölümde bu sınıflandırmadan bahsedilecektir.

2.2.1. Demir esaslı sert dolgu alaşımları

Demir esaslı sert dolgu alaşımları, düşük maliyet ile yüksek performans sunduğundan sert dolgu alaşımları içerisinde en fazla tercih edilen gruptur. Diğer alaşımlara nazaran daha kolay uygulanabilir. Kobalt, nikel esaslı alaşımlamalara göre daha düşük sıcaklıklarda da uygulanabilmektedir. Bu kaplama türü genel olarak çelik türlerine uygulanmaktadır.

- Perlitik çelikler: %0,2'ye kadar karbon içeren çeliklere denir. Diğer alaşım elementlerini de çok düşük miktarda içerebilir. Yüzey sertliğini 25-37 HRC arasında değiştirir. Diğerlerine göre daha düşük performans beklentisi ve maksimum servis sıcaklığı 200 °C olduğunda tercih edilir.
- Östenitik manganezli çelikler: Bileşimlerinde %12-15 Mn, %4 Cr ile bir miktar nikel ve molibden içermektedirler. Bileşimde bulunan krom karbürler sebebiyle serttirler ve yüzeyin darbeye maruz kalmasıyla beraber sertlik daha da artar. Bu nedenle darbe altında çalışan kazıcı ve delici ekipmanlarda kullanılmaktadır [12].
- Martenzitik çelikler: Bileşiminde %0,7 karbon ve %12 krom bulunmaktadır. Yapıda bulunan krom sertleştirilebilirliği ve dayanımı artırır ve martenzitik yapının oluşumuna destek olur. 45-60 Rockwell-C sertlik değeri vardır. Orta şiddette darbe etkisinde aşınma dirençleri iyidir [5]. Yüksek sıcaklıkta çalışan yatak parçaları ve haddeleme milleri gibi parçalarda kullanılmaktadır [12].
- Yüksek krom çelikleri: Bileşimlerinde %6-35 krom ve %2-6 arasında karbon içerirler. Aşınma dirençleri yüksektir. Sertlikleri 52-62 HRC arasında değişebilir.

- Dökme demirler: Bileşimlerinde %2,1'den fazla karbon içeren demir alaşımlarına denir. Sert yüzey alaşımlama da en çok kullanılan dökme demir bileşimde %12 civarında krom ile beyaz dökme demirdir [9].

2.2.2. Kobalt esaslı sert dolgu alaşımları

Kobalt esaslı sert dolgu alaşımlarını diğerlerinden ayıran en önemli özellikleri yüksek aşınma dirençlerinin yanı sıra mükemmel korozyon ve oksidasyon direnci olmasıdır. 980 °C sıcaklıklara ulaşan yüksek sıcaklıklarda da sertliklerini koruyabilmektedirler. Ancak, diğer alaşım çeşitlerine göre daha pahalıdır [9].

En yaygın olarak kullanılan ve ilk geliştirilen kobalt esaslı alaşım ‘‘Stellite’’ adı verilen kobalt-krom-tungsten alaşımıdır. Bileşiminde %35 krom, %13 tungsten, %4 kadar ise karbon içermektedir. İçerdikleri krom, karbür oluşturuucu etkisi göstermektedir ve buna bağlı olarak sertlikleri çok yüksektir. Krom aynı zamanda, yüzeyde krom-oksit tabakası oluşturur ve bu sayede korozyon direncini arttırmaktadır.

Yüksek sıcaklıklardaki dayanımları, aşınma ve korozyon dirençlerinin yüksek olması sebebiyle türbin kanatları, jet motorları, valfler, vana, cerrahi gereçler, nükleer santral parçalarında kullanılmaktadırlar [2, 11].

2.2.3. Nikel esaslı sert dolgu alaşımları

Nikel esaslı sert dolgu alaşımları, bileşimlerinde %70-80 oranında nikel, %10-15 krom, %2-4 bor içermektedirler. Demir esaslı sert dolgu alaşımlarına göre üstün yüksek sıcaklık aşınma direnci gösterir. Sertliklerini 550 °C'a kadar koruyabilmektedirler. Bu nedenle bu alaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamalarına demir ve kobalt esaslı alaşımlara göre daha uygundur. Kolay uygulanabilir ve demir esaslı malzemeleri ve diğer alt tabakaları çoğu demir dışı sert kaplama alaşımlarından daha iyi ıslatabilirler. Aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklık koşulları altında mükemmel performansları nedeniyle son yıllarda giderek daha da popüler hale gelmiştir [9, 13].

2.2.4. Bakır esaslı sert dolgu alaşımları

Bakır esaslı sert dolgu alaşımları uzun yıllardır yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır. Tribolojik özellikleri iyi olarak bilinmesine rağmen, belirli tribolojik koşullar altında iyilerdir. Korozyon, kavitasyon, erozyon, metal-metal aşınmalarının karşılaşıldığı ve yüksek ısı iletkenliği istenen çalışma koşullarında kullanılmaktadırlar. Tribolojik özellikleri iyi olmasına karşın abrazyon dirençleri düşüktür [9, 12].

2.2.5. Kompozit esaslı sert dolgu alaşımları

Endüstride birbirinden farklı birçok sert dolgu alaşımları vardır. Yeni nesil uygulamalar için kompozit sert dolgu alaşımlarına başvurulur. Kompozit sert dolgu alaşımları matris fazı ve takviye faz olarak iki kısımdan oluşurlar ve genellikle titanyum, vanadyum, krom gibi elementlerin karbür, borür ve nitrürleri takviye faz olarak tercih edilir. Takviye fazdaki sert fazların artışı aşınma direncinin artmasını sağlarken, kırılma tokluğunu da düşürür. Karbür bileşenlerinin oranı arttığında, karbür ara yüzeylerinde meydana gelebilecek termal yorulmalar ve çatlaklar nedeniyle darbe direnci düşmektedir [2, 8].

2.2.6. Yüksek silisyum esaslı sert dolgu alaşımları

Yüksek silisyum içerikli paslanmaz çelikler son zamanlarda kobalt esaslı sert dolgu alaşımlarına alternatif olarak türetilmiştir. Sürtünmeye ve kavitasyon erozyonuna karşı dirençlidir. Yüksek silisyum sert dolgu alaşımları, yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikleri, termal kararlılıkları, korozyon dayanımları açısından diğer karbür içeren kobalt esaslı alaşımlardan farklılık gösterirler [5].

2.2.7. Tungsten karbür esaslı sert dolgu alaşımları

Tungsten karbür esaslı sert dolgu alaşımları yüksek sertliğe sahiptir. Abrazyon aşınma dirençleri yüksek olduğundan direkt olarak abrazyon aşınmaya maruz kalan makine parçalarının aşınan yüzeylerinde koruyucu olarak kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlar

demir esaslı bir matris içindeki tungsten karbür kristalleri ile oluşurlar. Bu yapıdaki tane boyutlarının kontrol edilebilir olması ile aşınma direncinin kontrol edilebilmesine olanak sağlamaktadır [12].

2.2.8. Krom karbür esaslı sert dolgu alaşımları

Krom karbür esaslı sert dolgu alaşımları, yüksek sertlik ve abrazyon direncine sahiptirler. Tungsten karbür alaşımlarına göre daha yumuşak olduklarından, darbe dirençleri tungsten karbür alaşımlarına göre daha fazladır. Bileşimlerinde krom bulunduğundan üstün oksidasyon direnci sergilerler. Yüksek sıcaklıklarda sertliklerini korurlar [12].

2.2.9. Bor içeren sert dolgu alaşımları

Bor elementi küçük atom boyutu sayesinde metal yapısına kolaylıkla nüfuz edebilmektedir. Bu sebeple bor içeren sert dolgu yüzey kaplamalarında oluşan borür fazlar, mikroyapıda pozitif etki gösterir. Yüksek aşınma direnci, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci gibi önemli özellikler oluşan borür fazlar sayesinde sergilemektedirler [14].

2.3. Sert Dolgu Alaşım Seçimi

Sert dolgu alaşım seçiminde, istenen mekanik özelliklere ulaşma ve maliyeti azaltmanın yanı sıra malzemenin çalışacağı çalışma ortamı, altlık ile uyumu, uygulanacak kaplama prosesi gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Sert dolgu alaşımlarında karbür içeriği arttıkça darbe direnci azalır. Çalışma koşullarında darbe etkisi önemliyse, östenitik mangan çelikleri tercih edilmez.

Demir esaslı sert dolgu alaşımlarının çok azı korozyon direncine sahiptir. Korozyon direnci önemli olduğunda, nikel ve kobalt esaslı sert dolgu alaşımları istenilen performansı sergilemektedir.

Ayrıca demir esaslı sert dolgu alaşımlarının performansı, oksidasyon ve yüksek sıcaklık korozyon direnci önemli olduğunda da yeterli kalmamaktadır. Borür içeren Nikel esaslı alaşımların matrisi oksidasyon dayanımı gösterebilecek matrise sahip değildir. Karbür içeren nikel ve kobalt esaslı alaşımlar ise aşınma direncinin oksidasyon ve yüksek sıcaklık korozyon direnci ile desteklediği uygulamalarda kullanılmaktadır [5].

Beklenen aşınma direncine göre alaşım seçimi Kotecki diyagramına bakılarak yapılabilir. Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kotecki diyagramı [15]

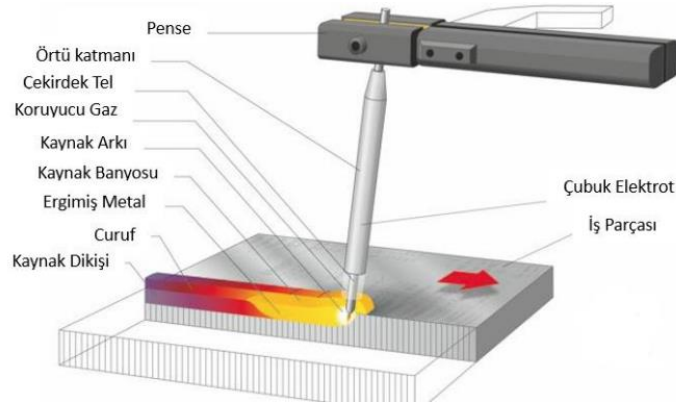
Yüksek sıcaklık çalışma koşulları önemli olduğunda, kullanılacak alaşımın o koşullardaki aşınma dayanımı önemlidir. Martenzit yapıdaki demir esaslı sert dolgu alaşımları yüksek sıcaklık altında sertliklerini koruyamamaktadır. Sert dolgu alaşımlarındaki yüksek sıcaklık direnci tungsten ve molibden içeriği artırılması ile sağlanabilmektedir. Yüksek sıcaklık ve aşınma direnci istenilen koşullarda kobalt esaslı sert dolgu alaşımları diğerlerine göre üstün performans sergilemektedir [2, 5].

2.4. Sert Dolgu Yüzey Kaplama Yöntemleri

Sert dolgu yüzey kaplamak için birbirinden farklı birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu birçok yöntem arasından seçim yapılırken, uygulanabilirlik ve ihtiyaçlara cevap verme açısından en uygun yöntem olmasına dikkat edilir [16]. Sert dolgu yüzey kaplamada en çok kullanılan yöntem kaynaktır. Bu bölümde sert dolgu yüzey kaplamada kullanılan kaynak yöntemlerinden bahsedilecektir.

2.4.1. Örtülü elektrotla elektrik ark kaynağı

Elektrik ark kaynağı, örtülü elektrodun ucu ile altlık malzemenin yüzeyi arasında oluşturulan elektrik arkının ısısı ile elektrodunun eritilmesi sayesinde gerçekleşen bir kaynak yöntemidir. Bu yönteme ait şematik gösterim Şekil 2.2.'de verilmiştir. Şekil 2.2.'den de görüldüğü üzere, elektrot örtüsündeki cüruf yapıcı bileşenlerin oluşturduğu gazlar, kaynak banyosunu korumak üzere katman oluşturmaktadır. Bu koruyucu katman sayesinde kaynak dikişi problemsiz bir şekilde oluşturulur [2, 15].



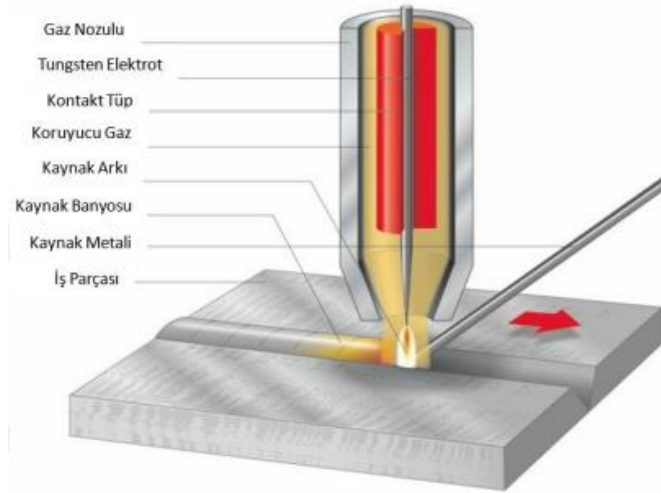
Şekil 2.2. Elektrik ark kaynağı şematik gösterimi [18]

Elektrik ark kaynağının avantajları olarak, diğer kaynak yöntemlerine göre daha ekonomik olması, ekipmanları hafif olduğu için taşınması ve uygulaması kolay olması, gaz atmosferinde çalışan kaynak yöntemleri kadar rüzgara duyarlı olmadığından açık atmosferde daha kolay kullanılması örnek verilebilir. Bu yöntemin başka bir avantajı olarak, kullanılan örtülü elektrot bileşimine göre kaynak dikişinin ayarlanabilmesi verilebilir.

Yönteme ait dezavantajlar ise, kaliteli dikişlerin elde edilmesi operatörün becerisine bağlıdır. Ek olarak, MIG-MAG, toz altı ve plazma ark kaynağı gibi yöntemlere göre biriktirme hızı düşüktür ve uzun kaynak dikişlerinde elektrot değiştirilmesine ihtiyaç duyulması yöntemin dezavantajları olarak sıralanabilir [2, 15].

2.4.2. TIG kaynağı

TIG kaynağı, tungsten (tükenmeyen) bir elektrot ile altlık malzemenin yüzeyi arasında oluşan ark ve yandan beslenen kaynak teli ile koruyucu gaz atmosferi altında gerçekleşen bir kaynak yöntemidir. Koruyucu gaz olarak inert gazlar kullanılır. Genellikle argon gazı tercih edilmektedir fakat nadir de olsa helyum ve gaz karışımları da kullanılmaktadır. Bu yönteme ait temsili gösterim Şekil 2.3.'de verilmiştir.



Şekil 2.3. TIG kaynağı temsili gösterimi [19]

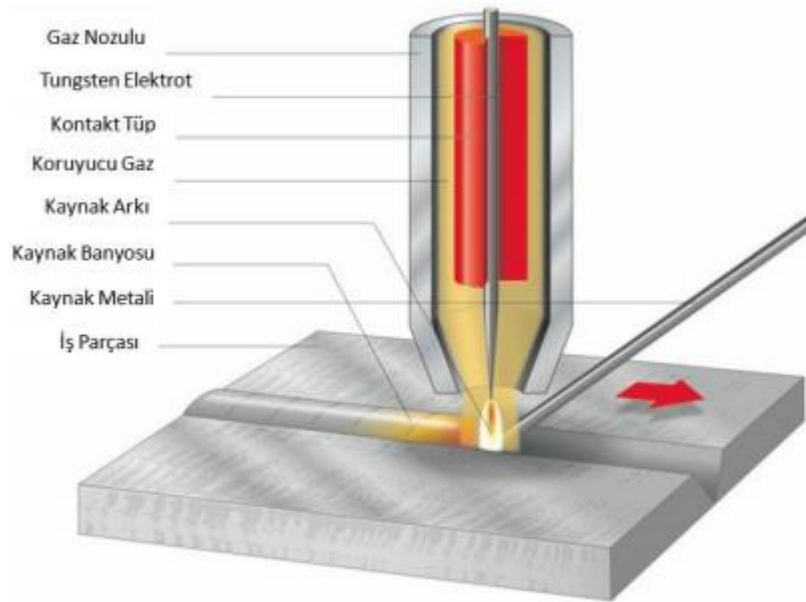
TIG kaynağı elektrik ark kaynağına alternatif olabilecek bir kaynak yöntemidir fakat bu yöntemde üretilen ark elektrik, elektrik ark kaynağında olduğu kadar güçlü değildir ve kullanılan sistem, ekipmanlar elektrik ark kaynağına göre daha pahalıdır. Bu yöntemin avantajı olarak, demir dışı malzemelerin kaynağı yapılabilmesi, aralıklı ve sürekli olarak kaynak yapılabilirliği, gözeneksiz bir kaynak görüntüsü, düşük distorsiyon oranı gösterilebilir. Dezavantajları ise metal yığıma hızı diğer kaynak

yöntemlerine göre daha yavaştır ve nüfuziyet sebebi ile kesitli parçalara uygulamada ekonomik bir yöntem değildir [2, 14, 15].

2.4.3. MIG-MAG (gazaltı) kaynağı

Bu yöntemde kaynak işlemi için gereken ısı, otomatik olarak beslenen ve ergiyen kaynak teli ile altlık malzeme arasında oluşan ark yolu ile sağlanır. Elektrot çıplak bir teldir ve besleme esnasında tertibatıyla kaynak bölgesine sabit bir hızla sevk edilir. Bu çıplak elektrot, kaynak bölgesi ve arkın atmosferden gelebilecek kirlenmelere karşı uygun bir gaz veya gaz karışımı ile korunur. Koruyucu gaz olarak argon, helyum gibi inert bir gaz kullanılıyorsa yöntem MIG (metal inert gaz) kaynağı, aktif bir gaz kullanılıyorsa MAG (metal aktif gaz) kaynağı olarak isimlendirilir. Bu yönteme Amerika'da "GMAW - Gaz Metal Ark Kaynağı ", İngiltere, Almanya ve ülkemizde ise

"MIG/MAG Kaynağı" adı verilmektedir [20]. Yönteme ait temsili gösterim Şekil 2.4.'de verilmiştir.



Şekil 2.4. Gaz altı ark kaynağına ait temsili gösterim [21]

Hızlı bir şekilde kaynak işleminin gerçekleştirilebilmesi yöntemin avantajı olarak verilebilir. Aynı zamanda bu yöntemin sert dolgu işleminde sıklıkla kullanılmasının

sebebi de seri bir şekilde uygulanabilir olmasıdır. Dezavantajları ise, uygulama esnasında koruyucu gaz gerektirmesi, rüzgarlı ortamlarda yapılan işlemlerde porozite gibi hatalara neden olmaktadır. Ayrıca sistemin diğer yöntemlere göre ağır olması yerinde yapılacak sert dolgu işlemi için dezavantaj oluşturmaktadır [17].

2.4.4. Tozaltı ark kaynağı

Bu kaynak yönteminde tüketilebilir çıplak tel elektrot ve altlık malzemenin arasında oluşan ark ile koruyucu bir toz tabakasının altında gerçekleştirilen kaynak yöntemidir. Kaynak dikişinin üzerine, içerisinde flaks malzemeler olarak silikat ve toprak alkali metaller bulunan bir toz tabakası koruyucu olarak örtülür ve kaynak bölgesini atmosferden kaynaklı oluşabilecek olumsuz etkilere karşı korur. Toz ile tamamen kaplanan ark, tozun altında yanar ve gözle görülmez, herhangi bir sıçrama meydana gelmez.

Tozaltı kaynak yönteminin avantajları olarak; otomatik bir kaynak yöntemi olması ve bu sebeple operatör becerisi gerektirmemesi, yüksek biriktirme hızı ile porozitesiz kaplamalar elde edilmesi, geniş kaynak dikişi sayesinde büyük aşınmış iş parçalarının onarılmasında pratik bir yöntem olması gösterilebilir.

Dezavantajları olarak ise, yöntemin diğer kaynak yöntemlerine göre daha pahalı olması, ekipman büyüklüğü, genellikle düz parçalara uygulanabiliyor olması, silindirik parçalarda ise uygulama sınırlılığı olması gösterilebilir [5, 15, 20].

2.4.5. Oksi-asetilen kaynağı

Bu kaynak yönteminde, kaynak için gereken ısı, biri yanıcı (asetilen, propan, metal vb.) ve diğeri ise yakıcı (oksijen) olan gazların yakılmasıyla oluşan yüksek sıcaklıktaki alev ile sağlanır. Yanıcı gaz olarak genellikle asetilen kullanılmasından dolayı yönteme bu isim verilmiştir.

Alevden gelen ısı, sert yüzey alaşımlama malzemelerini eritir. İşlem sırasında ise altlık malzeme yüzeysel olarak eritilir [5].

Oksi-asetilen kaynağı ile küçük boyuttaki alanların üzerine ince katmanlar halinde sert dolgu kaplaması yapmak mümkündür. Ayrıca bu yöntemde, kalın kaynak dikişi oluşmaz. Düzgün ve pürüzsüz kaynaklar elde edilmesi ile birlikte kaynak yöntemi ekonomik ve taşınması kolaydır. Uygulama konusunda ise operatör becerisi gerektirir. Yöntem her ne kadar efektifliği ile ön plana çıksa da, uygulama hızının düşük olması sebebi ile iş parçalarında gerilmelere sebep olabilmektedir [12].

2.4.6. Plazma transfer ark kaynağı

Plazma transfer ark kaynağında, kaynak torcunun içerisinden toz beslenerek ya da TIG kaynağında olduğu gibi tükenmeyen bir tungsten elektrot ile altlık arasında gaz korumalı ark ile kaynak işlemi gerçekleştirilir [2, 5].

Bu yöntem yüksek sıcaklıklara çıkabildiğinden, yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin alaşımlamasına imkan sunar. Bu sebeple diğer birçok yönteme nazaran modern bir kaynak yöntemidir.

Plazma transfer ark kaynağı, homojen bir mikroyapı ve düşük parça gerilmesine olanak sağlar. Yüksek biriktirme hızı sayesinde zaman kaybı azdır. Bu avantajlar ile birlikte ekipmanlarının nispeten daha pahalı olması, işlem sırasında argon tüketiminin fazla olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

2.4.7. Özlü tel ark kaynağı

Gazaltı ark kaynağı ile aynı çalışma prensibine sahip olup, arasındaki tek farkın kullanılan elektrotun özlü olması olan bu yöntem, otomatik bir kaynak yöntemidir.

Gaz düzenleyici ve flaksı arka yönlendirmesi için herhangi bir ekipmana ihtiyaç duyulmaz. Yalnızca torç ile kesintisiz teli besleyen ekipmana ihtiyaç olduğundan

ekonomik bir kaynak yöntemidir. Biriktirme hızları yüksektir. Kullanılan özlü tel sayesinde ark kararlıdır.

Yöntemde oluşan ark, inert gaz veya flaks örtüsü ile korunduğundan kaynak sırasında sıçrama ve kaplama yüzeyinde porozite beklenebilir. Özlü tel ark kaynağı, yüksek kaynak akımından dolayı özellikle küçük iş parçalarının sert yüzey alaşımlaması için uygun bir yöntem değildir.

2.5. Kaynak ile Yapılan Sert Dolgu Yüzey Kaplama Karakteristikleri

Kaynak işlemini diğer yüzey kaplama işlemlerinden ayıran temel özellikler aşağıdaki gibidir.

2.5.1. Kaplama kalınlığı

Kaynak yöntemi ile yüzey kaplama, kaplama kalınlığı açısından diğer yöntemler ile kıyaslandığında, çok daha iyidir. Sert yüzey alaşımlarının çoğu için bazı kısıtlamalar olduğundan, genellikle 3-10 mm kalınlıklarda uygulanabilmektedir. İnce kaplama kalınlığı gerektiğinde, bunu üreten birkaç kaynak işlemi vardır.

2.5.2. Altlığa yapışma

Doğru malzeme ile doğru kaynak prosesi uygulanan işlemlerde kaplama ile altlık arasında termal ve mekanik şoklara ayrılmadan dayanabilen kuvvetli bir metalürjik bağ oluşur. Ergime esaslı kaynak yöntemlerinde bu metalürjik bağ, proses sırasında ince bir altlık katmanı ergiterek sağlanır. Diğer proseslerde ise dövme işlemi ile elde edilir [10].

2.6. Bileşim İçeriğinin Sert Dolgu Alaşımlama Üzerindeki Etkisi

Sert dolgu alaşımlama, malzemelerin nihai yüzey özelliklerini çevre koşullarına karşı iyileştirmek için yapılır. Malzemenin yüzey özellikleri birçok faktöre bağlıdır.

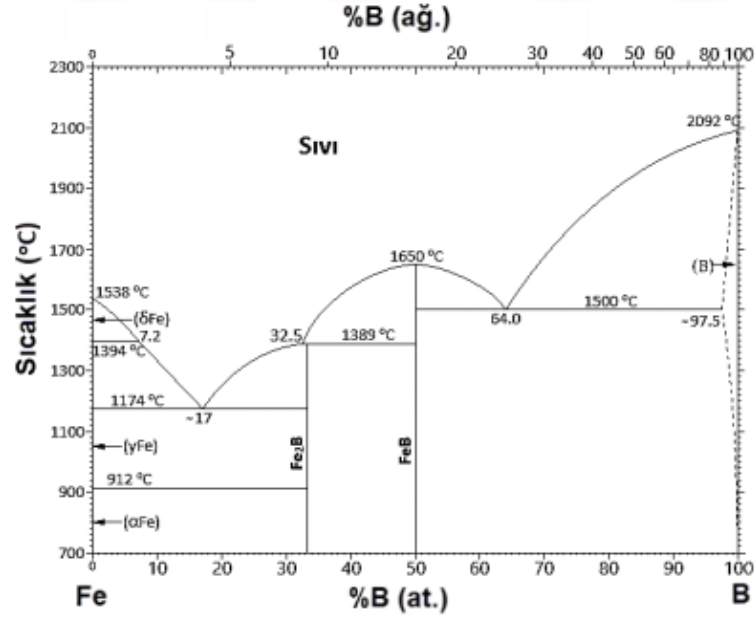
Uygulama yöntemi, yöntemin parametreleri bunlardan birkaçıdır. Yüzeye kaplanmak istenen bileşim, kaplama özelliklerini direkt olarak etkilemektedir.

Yüzeyde geliştirilmek istenen özellik (aşınma, korozyon, sertlik gibi), biriktirilen bileşimdeki fazların oranı, sertliği, yapı içerisindeki dağılımı gibi faktörlere bağlıdır. İstenilen özellik, bu gibi faktörler ile oynanarak elde edilebilir [23].

Sert yüzey alaşımları ile birlikte bugüne kadar birçok alaşım geliştirilmiştir. Bileşim içerisinde eklenen eser miktardaki alaşım elementinin bile nihai yüzey özelliklerine ciddi etki etmesi, günümüzde hala çok sayıda kombinasyona sahip sistemlerden yeni tür bileşimler geliştirmesine sebep vermektedir ve bu sebep ile sert yüzey alaşımlamada nihai yapının anlaşılması, alaşımı oluşturan ilgili elementlere ait sistemlerin anlaşılmasına önemli ölçüde bağlıdır [17].

2.6.1. Fe-B sistemi

Atomların kristal kafeslerindeki çözünürlükleri Hume-Rotary kurallarına göre gerçekleşir. Bu kurallar içerisinde en önemli koşul olan boyut faktörü, bir elementin diğer bir elementin kafes yapısı içindeki çözünürlüğü atom çapları arasındaki farkın %15'den az olmasına dayanmaktadır [24]. Borun atom yarıçapı demire göre yaklaşık %27 oranında daha küçüktür ve hem arayer hem de yer alan katı eriyiği konumunda bulunabilmektedir. [25].



Şekil 2.5. Fe-B ikili denge diyagramı

Şekil 2.5.'de gösterilmiş olan Fe-B ikili denge diyagramından da görülebileceği gibi, % 7,2 B konsantrasyonuna kadar 1394°C'de γ -Fe'den γ +sıvıya dönüşen bir metatektik reaksiyon yer alırken, 912°C'de γ -Fe+Fe₂B'den α -Fe₂B'e dönüşen bir reaksiyon yer almaktadır. Yaklaşık olarak % 17 B bileşiminde α -Fe ile Fe₂B arasında 1174°C'de bir ötektik reaksiyon, 1389°C'de sıvı+FeB arasında bir peritektik reaksiyon ve % 33,3 B bileşiminde Fe₂B intermetalik bileşiğinin yer aldığı görülmektedir [26].

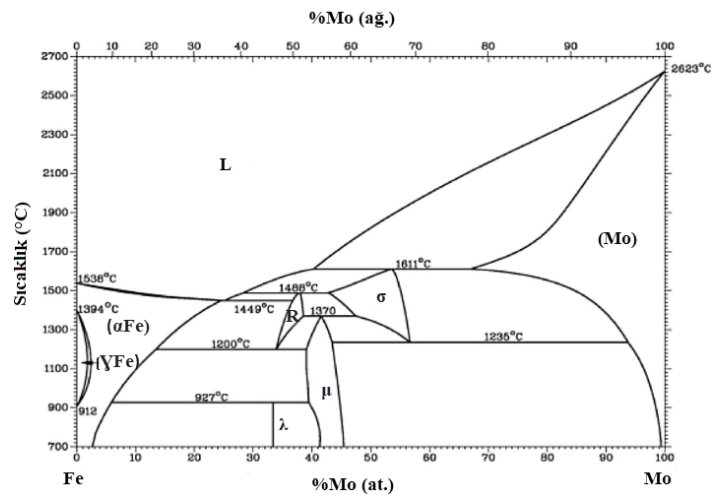
Bu sistemde oluşabilecek önemli iki faz FeB ve Fe₂B'dir [27]. FeB fazı ortorombik, Fe₂B fazı ise tetragonal kristal yapısına sahiptir. FeB'nin bileşiminde %16 oranında, Fe₂B'nin bileşiminde ise %9 oranında bor bulunur. Denge diyagramında yüzde 9-16 arasında bor içeren alaşımın faz yapısı Fe₂B ve FeB kristallerinden ibarettir [27]. Fe₂B fazının ergime sıcaklığı 1389-1410 °C arasında ve FeB fazının ise 1540-1657 °C arasında yer aldığı görülmektedir [28].

Bor içeriği yüzde 16'dan fazla alaşım ise FeB ve B kristallerinden oluşur. Yaklaşık %16 B bor içeren FeB fazı, %9 B içeren Fe₂B fazına göre daha kırılkan olduğundan tercih edilmemektedir [29]. Ek olarak, FeB ve Fe₂B fazlarının ısıl genişleme katsayıları birbirinden farklıdır bu sebep ile çift fazlı katmanların FeB/Fe₂B faz ara yüzeylerinde çatlak oluşumlarına rastlanabilmektedir. Mekanik bir yüke maruz kaldıklarında bu

çatlaklar çoğunlukla pullanmaya sebep vermektedirler. Bu ara yüzeyde FeB fazının çekme gerilmelerine, Fe₂B fazının ise basma gerilmelerine maruz kaldığı düşünüldüğünden termal şok ya da mekanik etkiler altında ayrılmalar meydana gelmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları tercih edilmektedir [28].

2.6.2. Fe-Mo sistemi

Şekil 2.6.'de gösterilen Fe-Mo faz diyagramı, MoFe, Mo₆Fe₇, Mo₂Fe₃ ve MoFe₂ fazlarını içerir. Bunlar arasında, MoFe (σ fazı) ve Mo₂Fe₃ (R fazı) yalnızca sırasıyla 1200 °C ve 1235 °C'in üzerindeki yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkar [30].



Şekil 2.6. Fe-Mo ikili denge faz diyagramı [31]

Faz diyagramından da görülebileceği gibi, Fe'deki Mo(α -Fe) ve Mo'daki Fe'nin maksimum çözünürlük kompozisyonu sıcaklıktaki artış ile birlikte artar ve ara difüzyon bölgesinde sadece μ intermetalik fazı ile birlikte Fe(Mo) büyümektedir [32].

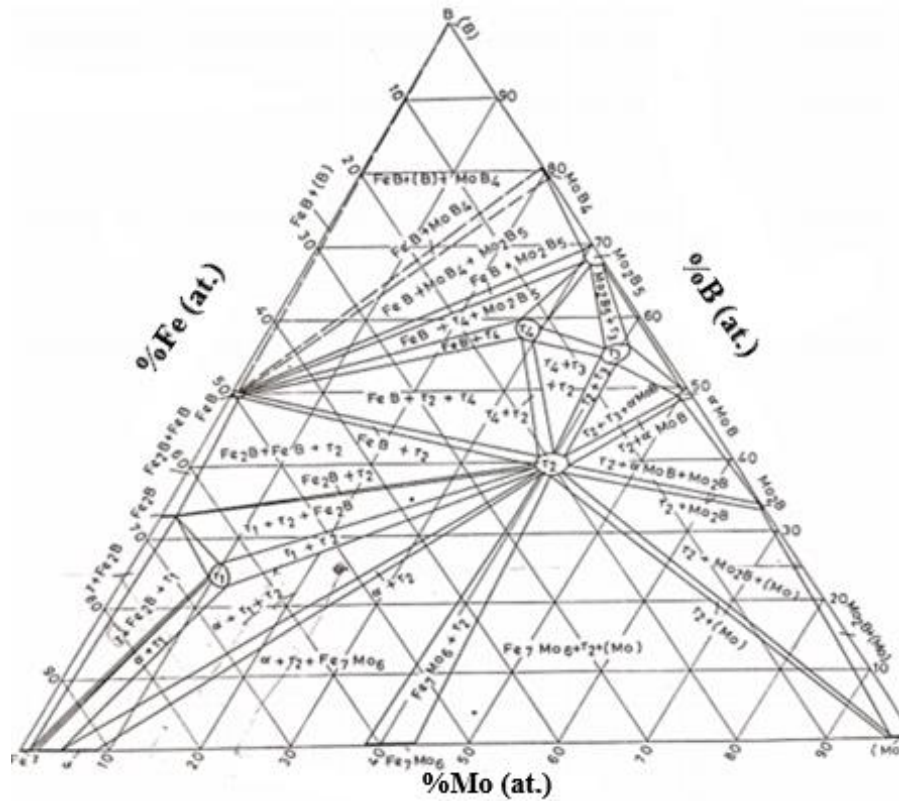
2.6.3. Fe-Mo-B sistemi

Fe-Mo-B sistemi, tungsten karbür içermeyen sert malzemelerin (sermetler) yanı sıra üçlü Mo₂FeB₂ bileşiğine dayalı aşınmaya ve korozyona dirençli kaplamaların geliştirilmesi için ilgi çeken bir sistemdir.

Bu sistemin Fe bakımından zengin alaşımları oldukça yüksek amorfizasyon kabiliyetine ve dikkat çekici manyetik özelliklere sahiptir [33]. Ayrıca bu karmaşık borürler, manyetik bantlar üzerinde güçlendirici ve koruyucu kaplamalar ve erimiş çinko içeren banyoların duvarları için malzeme olarak uygulama alanı bulmaktadır [34].

Fe-B faz diyagramı, 1150-1250°C sıcaklık aralığında kararlı olduğunu düşünülen Fe_3B borürü içerir [34]. Fe_3B bazlı bir borür, $Mo_xFe_{3-x}B$, az miktarda Mo ile stabilize edilir. İki fazlı nanokompozit kalıcı mıknatısların imalatı için kullanıma potansiyeline sahip, büyük doygunluk manyetizasyonuna ve oldukça güçlü manyetik anizotropiye sahip ferromanyetik bir bileşiktir [33].

Üçlü alaşım sistemi Fe-Mo-B, yüksek sıcaklıklarda daha geniş homojenlik aralığı ile oda sıcaklığındaki stokiyometrik bileşikler olan dört üçlü borid fazına ($Mo_{(1+x)}Fe_{(2-x)}B_4$ – $Mo_xFe_{(3-x)}B$ ve β -MoB fazları) ev sahipliği yapar [33].



Şekil 2.7. Fe-Mo-B faz diyagramı (1050°C)

Birkaç ikili borür fazı FeB, Mo₂B, α -MoB, MoB₂ ve Mo₂B₅, üçlü sistemde önemli uzantılara sahiptir. Fe-Mo sistemindeki üç intermetalik faz ihmal edilebilir derecede küçük bor çözünürlüğüne sahiptir [33].

Utkin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Fe-Mo-B sisteminde üç farklı faz tespit etmişlerdir. Bunlar, CrB yapısındaki M_(1-x)Fe_xB, TaB₄ yapısındaki Mo_(1+x)Fe_{2-x}B₄ ve U₃Si₂ yapısındaki Mo₂FeB₂ fazıdır. Ti₃P tipi borür fazının Mo_{0.2}Fe_{2.8}B bileşimiyle saptanır ve yalnızca 1080 – 1110 °C gibi dar bir aralıkta kararlı olduğu kabul etmişlerdir [34].

BÖLÜM 3. BOR İÇERİKLİ SERT DOLGU YÜZEY ALAŞIMLAMA UYGULAMALARI

3.1. Fe-Mo-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımlama Uygulamaları

Molibden ve demir güçlü borür fazları oluşturan elementlerdir. Bu elementler yapı içerisinde FeB, Fe₂B, Mo₂B, MoB, Mo₂B₅, Fe₁₃Mo₂B₅, Fe₁₄MoB₅, FeMo₂B₂, FeMo₈B₁₁ gibi kararlı formdaki borür fazlarını oluşturmaktadır. Bu üçlü alaşım sisteminden oluşan bileşikler yüksek ergime derecesine sahip ve yüksek düzeyde sertlik ve aşınma dayanımına sahiptir.

Abakay ve arkadaşları, AISI 1010 çeliğinin yüzeyine farklı bileşim oranlarındaki Fe-Mo-B alaşımlarını TIG kaynağı yöntemi ile yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirerek oluşturdukları kaplamanın faz analizi, sertlik ve aşınma dirençlerini araştırmışlardır. Kaplamada Fe₂B, Fe₁₃Mo₂B₅, Mo₂FeB₄ ve α-demir fazlarının oluştuğu tespit etmişlerdir. Bileşimdeki molibden miktarı arttıkça borür fazlarının oluşumunun arttığı ve molibdenin bileşim içindeki artışıyla aşınma oranında bir düşüş görüldüğünü belirtmişlerdir. Bu duruma istinaden de şiddetli abrazif aşınma, yerini adhesiv aşınma davranışına bırakmıştır [35, 36].

Kılınç ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Fe-Mo-B bileşimi TIG kaynağı ile AISI 1010 çeliği üzerine uygulanarak aşınma davranışları araştırılmıştır. Bir önceki çalışmayı destekler şekilde, bileşimdeki molibden oranı arttıkça borür fazların arttığını tespit etmişlerdir. Yüzey alaşımlamadaki olası fazların Fe₂B, FeMo₂B₂, Fe_{9,7}Mo_{0,3} ve MoB₂ olduğunu ve bileşimdeki molibden oranı arttıkça sürtünme katsayı değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir [37].

Wang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, demir esaslı sert dolgu alaşımlama işlemi elektrik ark kaynağı yöntemi ile AISI 1010 çelik tel üzerine uygulanarak

molibden değişiminin mikroyapı ve aşınma direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. Sert dolgu alaşımlanmış yüzeyinin sertliği ve aşınma direnci, Fe-Mo içeriğinin artmasıyla artmış ve Mo elementli alaşımlı sert dolgu alaşımı, Mo içermeyen sert dolgu alaşımından daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Mo içeren sert dolgu alaşımı nispeten pürüzsüz aşınmış yüzey sergilemiş ve Mo'in katı eriyik sertleştirme etkisiyle plastik deformasyona ve çizilmeye karşı yüksek direnç gösterdiği gözlenmiştir [38].

Jin ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, Fe-Mo-B alaşımlı tozlar, TIG kaynağı yöntemi kullanılarak Q235 çeliği üzerine Mo_2FeB_2 fazlı kaplamalar üretmek amacı ile uygulanmış ve Mo içeriğinin kaplamaların mikroyapı, faz içeriği, sertlik ve aşınma direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bileşimdeki Mo içeriği arttıkça aşınma sonrası ağırlık kaybının azaldığı görülmüştür. Ek olarak matrisin seyrelme oranının kaplamanın mikro sertliği üzerindeki etkisinin büyük olduğu ve mikro sertliğin seyrelmenin düşük olduğu bölgede en yüksek olduğu tespit edilmiştir [39].

3.2. Fe-Cr-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımlama Uygulamaları

Sert dolgu alaşımlama işlemlerinde Fe-Cr-B bileşimine sıklıkla rastlanmaktadır. Bu bileşim yapıda Fe_2B , FeB , CrB , Cr_2B , Cr_4B , Cr_5B_3 , Cr_3B_4 ve CrB_2 fazları oluşturmaktadır. Bu fazlar yüksek sertlik ve aşınma direnci, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek korozyon direnci ve iyi elektriksel iletkenliğe sahiptir [40].

Fe-Cr-B alaşım sisteminde kritik element B'dur. Bor miktarının değişimi mikroyapısal özellikleri değiştirmektedir. Fe-B ve Cr-B denge diyagramında ötektik nokta görülmektedir. Fe-Cr-B bileşimindeki sert dolgu alaşımları da ötektik altı, ötektik veya ötektik üstü mikroyapı gösterebilirler [17].

Kocaman ve arkadaşlarının $Fe_{(18-x)}Cr_xB_2$ ($x=3,4,5$) alaşımları üzerine yapmış olduğu çalışmada, değişen Cr oranının kaplamanın özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Nihai mikroyapılarda in-situ olarak oluşan ötektik borür fazlar gözlenmiştir. Artan yük ile azalan sürtünme katsayısı değerleri ise bileşimdeki Cr içeriğinden bağımsız olarak

hareket etmiştir. Aşınma oranı, artan Cr oranı ile azalmış ve artan yük ile azaldığı tespit edilmiştir. Korozyon direncinin ise artan Cr oranı ile arttığı gözlenmiştir [41].

Kim ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada, Fe–20Cr– 2.4C–1.0Si–xB bileşiminde B oranı değişiminin (0'dan 2,6'ya (%ağ.)) etkilerini araştırmışlardır. Yapı içerisindeki B oranı ağ. %0,6'ya kadar önemli ölçüde aşınma direncini etkilemiştir. Yapıdaki primer borür fazların oluşumunun arttığını ve kaba bir yapıda çökeldiğini, martenzitik dönüşümün hızlandığını tespit etmişlerdir. %0,6'ya kadar B ilavesi, aşınma sonrası ağırlık kaybını azaltmış ve aşınma direncini arttırmıştır. B ilavesi %0,6'yı geçtiğinde gerçekleşen değişimlerin ihmal edilebilir seviyede olduğunu gözlemlemişlerdir [42].

Yüksel ve Şahin'in yapmış oldukları çalışmada, ferro krom ve ferro bor tozlarının Fe-Cr-C esaslı sert yüzey alaşımlarının aşınma direnci üzerine etkisi araştırılmıştır. FeCr ve FeB tozları ile açık ark kaynağı kullanılarak Cr_7C_3 , $Fe_{23}(C, B)_6$ ve $B_{0.7}Fe_3C_{0.3}$ sert fazları elde edilmiştir. Artan bor içeriğinin birincil Cr_7C_3 'ün büyümesini teşvik ettiğini ve böylece sertlik ve aşınma direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Aşındırıcı parçacığın sertliği (SiO_2) matris veya matris/karbür ötektiklerinden daha yüksektir bu sebeple aşınma, sert fazlardan ziyade nispeten yumuşak matriste meydana gelmiştir. Artan B, C ve Cr içeriği, yalnızca birincil karbürlerin gelişimini değil, aynı zamanda ikincil karbür/matris ötektik oluşumunu da destekleyerek mikroyapıyı değiştirdiğini ve bu değişimin aşınma direncini arttırdığı sonucuna varmışlardır [2].

3.3. Fe-W-B Esaslı Sert Dolgu Alaşımlama Uygulamaları

Geçiş metali borürleri, kendilerini önemli malzeme haline getiren çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Bunlardan bazıları yüksek sertlik ve aşınma direnci, yüksek sıcaklık elektrik direnci gibi göze çarpan özelliklerdir. Tungsten borür malzemeler, termal şoka dayanıklı iyi iletkenlerdir bu sebeple hassas metalurji uygulamalarında, pota ve ingot kalıpları gibi yüksek sıcaklık direnci gerektiren yerlerde kullanılırlar [4].

Abakay ve arkadaşları, AISI 1010 çelik üzerine TIG kaynağı ile Fe-B-W esaslı sert dolgu yüzey alaşımlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan XRD analizi kaplamanın majör olarak Fe_2B , FeB, FeW_2B_2 , eser miktarda ise W_2B ve W_2B_5 fazlarından oluştuğunu göstermiştir. Kaplama Fe-W katı eriyiğin birincil dendritlerini, $Fe+Fe_2B$ ve $FeW_2B_2+ \alpha-Fe$ ötektik mikroyapısını içerdiğini gözlemlemişlerdir. Aşınma testinde ise uygulanan yük miktarı arttıkça sürtünme katsayı değeri azalmış, aşınma oranının ise arttığını gözlemlemişlerdir. Aşınma mekanizması, yükün 5N'dan 10N'a artmasıyla değişmiş, uygulanan yük 2,5 ve 5N iken aşınma mekanizması oksidasyon aşınması, 10N iken oksidasyon aşınmasının yanında abrazif aşınmanın da olduğu görülmüştür [4].

3.4. Fe-Ti-B Esaslı Sert Dolgu Uygulamaları

Titanyum elementi düşük mukavemet/ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci, üstün biyouyumluluk özelliklerinden dolayı havacık, denizcilik ve tıbbi uygulamalarda ilgi çeken bir metaldir [43]. Aynı sebeplerden ötürü de sert dolgu uygulamalarında çeşitli bileşimlerde uygulanmaktadır.

Fe-Ti-B sistemi incelendiğinde ise, FeB, Fe_2B ve TiB_2 gibi yüksek sertliğe sahip olan fazlar içerdiği görülmektedir. [17].

Baoshuai'nin yapmış olduğu çalışmada, lazer kaplama yöntemi kullanılarak düşük karbonlu çelik üzerine Fe-Ti-B kompozit kaplamalar biriktirilmiştir. Fe-Ti-B kaplamalarda TiB_2 ve Fe_2B fazlarının elde edilebileceği görülmüştür. TiB_2 fazının miktarı, kaplama bileşimindeki ferro titanyum ve ferro borun miktarının artmasıyla artmıştır. Kaplama içerisinde oluşan bu sert fazlar, sertlik ve aşınma direncini altlık malzemeye kıyasla büyük ölçüde arttırmıştır [44].

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Bu çalışmada Fe-Mo-B esaslı örtülü elektrotların üretimi ve üretilen elektrotlar kullanılarak elektrik ark kaynağı yöntemi ile AISI 1010 çelik plaka üzerine kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kaplamaların, örtülü elektrot bileşim değişiminin etkisine göre morfolojik ve mekanik özelliklerinin değişimi araştırılmıştır.

Kaplamaların morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile, aşınma özellikleri ASTM G133 standardında ball on disk cihazı ile, mikro sertlikleri Vickers sertlik ölçüm cihazı, makro sertlikleri ise Bulut Makina BMS-DIGIROCK-RB sertlik cihazı kullanılarak Rockwell C testi ile, faz analizleri ise X-ışınları difraksiyon analizi (XRD) ile, korozyon testleri ise ASTM G59-97 standardına uygun Gamry Instruments marka Interface 1010E model elektrokimyasal test ünitesine bağlı klasik üç elektrot yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda, elektrot örtü bileşiminde alaşımlama amacıyla kullanılacak olan tozlar; nispeten daha ucuz olmasından dolayı ferro alaşım olarak tercih edilmiştir. Aveks İç ve Dış Tic. A.Ş. ve Gensa Kimya San. ve Tic. A.Ş. firmalarından temin edilen ferro tozlar ve ASC100.29 kodlu saf demir tozuna ait kimyasal bileşimler Tablo 4.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Kullanılan ferro tozlar ve demir tozunun kimyasal bileşimleri (% ağı.)

Toz	Fe	Mo	B	Si	C	Al	P	S
Ferro molibden	38,350	60,000		1,5000			0,050	0,100
Ferro bor	80,602		18,580	0,390	0,312	0,065		
Demir tozu	99,900							

Örtü bileşimine, ferro tozlar ve demir tozu haricinde, elektrotun üretebilirliğine etki eden flaks malzemeleri ve bağlayıcı malzemeler gibi bazı tozlar da ilave edilmiştir. Elektrot örtü bileşiminde yer alan bu tozlara ait kimyasal bileşimler ve kullanım amaçları Tablo 4.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Örtü bileşiminde yer alan tozların kimyasal bileşimi ve kullanım amacı

Bileşen	Kimyasal Bileşim	Kullanım Amacı
Rutil	TiO ₂	Ark stabilizasyonu
Kuvars	SiO ₂	Bağlayıcı, cüruf yapıcı
Alumina	Al ₂ O ₃	Deoksidan ve cüruf sökülebilirliğini artırma
Fluşpat	CaF ₂	Hidrojen gaz giderimi ve gözenek oluşumu engelleyici, cüruf yapıcı
Potasyum aljinat	C ₆ H ₇ KO ₆	Plastikleştirici etkisi vardır ve preslenebilirliği kolaylaştırır
Kalsiyum karbonat	CaCO ₃	Gaz yapıcı
Potasyum titanat	K ₂ TiO ₃	Ark stabilizasyonu sağlar ve cüruf oluşturuucu etkisi vardır
Sodyum feldispat	NaAlSi ₃ O ₈	Bağlayıcı
Potasyum silikat	K ₂ Si ₂ O ₅	Toz bileşenleri için temel bağlayıcıdır ve ark stabilizasyonu sağlar
Demir tozu	Fe	Dolgu veriminin artırılması
Ferro bor	Fe-B	Alaşımlama
Ferro molibden	Fe-Mo	Alaşımlama

Elektrotlarda kullanılan çekirdek tel kaynak sırasında ergiyerek dolgu metali görevi görmektedir. Endüstride genel olarak soğuk çekilmiş filmaşın tel kullanılmaktadır. Bu çalışmada da elektrot çekirdek tel malzemesi olarak 2,5 mm çapında 350 mm uzunluğunda soğuk çekilmiş filmaşın tel kullanılmıştır. Kullanılan çekirdek telin kimyasal bileşimi Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Kullanılan çekirdek telin kimyasal bileşimi (% ağı.)

Çekirdek Tel	C	Mn	Si	Cr	P	S	Fe
AISI 1010	<0,1	0,37	0,1	0,064	<0,02	<0,02	Kalan

Sert dolgu alaşımlama işlemi için altlık malzeme seçiminde, düşük aşınma ve korozyon direncine sahip, kolay kaynak edilebilir bir malzeme olmasına dikkat edilmiştir. Endüstride yaygın olarak kullanılan ve Tablo 4.4.'de kimyasal bileşimi verilen AISI 1010 çeliği tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu altlıklar 6x30x70 mm boyutlarında kesilmiştir. Yüzeyleri kir ve yağdan arındırılarak kaynak işlemine hazırlanmıştır.

Tablo 4.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan 1010 çelik altlık kimyasal bileşimi (%ağ.)

Altlık	C	Mn	Si	P	S	Fe
AISI 1010	0,10	0,40	0,024	0,026	0,022	Kalan

4.3. Örtülü Elektrotların Üretilmesi

Örtülü elektrot; çekirdek görevi gören bir tel ve bu telin üzerinde yer alan örtü kaplamasından oluşmaktadır. Çekirdek tel, kaynak arkı için akım taşıyıcı görevi ve örtü kaplaması için de altlık malzeme görevi görmektedir. Çekirdek telin kimyasal bileşiminde tercih edilen alaşım türüne göre kaynak dolgusuna alaşım takviyesi yapmak da mümkündür. Bu sebep ile örtülü elektrotlarda alaşımlama, hem çekirdek tel, hem de örtü bileşimiyle gerçekleştirilebilmektedir [12].

Örtü bileşimini; ferro alaşım tozları ve demir tozu haricinde, deoksidantlar, curuf yapıcılar gibi diğer bileşenler de oluşmaktadır. Bu çalışmada Fe-Mo-B elektrot bileşimlerini belirlerken, Fe-Mo-B üçlü faz diyagramı ve literatür çalışmaları esas alınarak, örtü bileşimindeki değişimin, kaplamanın mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla, ferro alaşımların bileşim oranlarının değiştirilip, diğerlerinin sabit tutulduğu dört farklı bileşim oluşturulmuştur. Belirlenen bileşim oranları Tablo 4.5.'de gösterilmiştir.

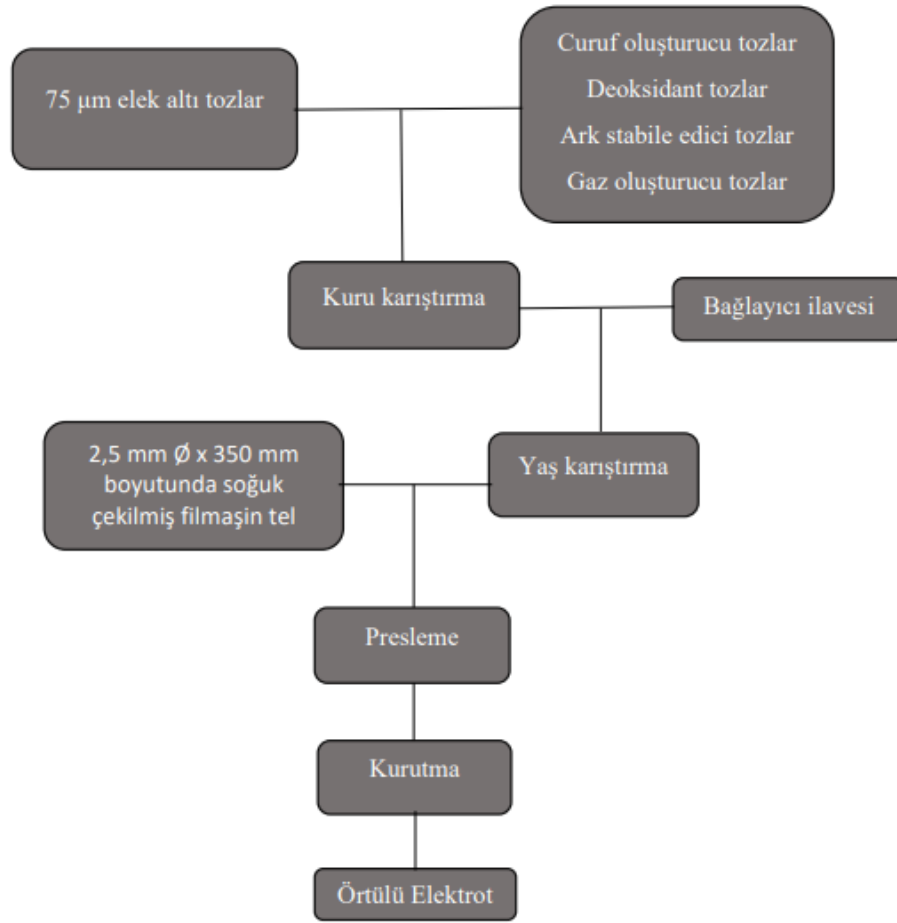
Tablo 4.5. Belirlenen bileşimlerdeki ferro alaşım ve demir tozu bileşimleri (%at.)

Gösterim	Fe	Mo	B
Fe ₄₃ B ₅ Mo ₂	Kalan	4	10
Fe ₄₁ B ₅ Mo ₄	Kalan	8	10
Fe ₃₉ B ₅ Mo ₆	Kalan	12	10
Fe ₃₇ B ₅ Mo ₈	Kalan	16	10

Kullanılan ferro alaşımlar kayaç halinde olduğundan Retch marka halkalı değirmen kullanılarak 75 µm elek altı olacak şekilde öğütülmüştür. Demir tozu 75 µm elek altı boyutunda temin edildiğinden herhangi bir öğütme işlemine tabi tutulmamıştır. Hazırlanan tozlar belirlenen bileşim oranlarına göre kuru olarak karıştırılmış daha sonrasında bağlayıcı ilavesi ile yağ karıştırma işlemi yapılmıştır. Şekil 4.1’de gösterilen önceden tasarımı yapılan ve üretilen kalıp içerisine yağ karışım şarj edilip, kalıp sıkıştırılmıştır. Daha sonrasında çekirdek metal kalıbın ortasından geçirilerek elektrot üretimi gerçekleştirilmiştir. Kalıptan çıkarılan elektrotlar 24 saat açık atmosferde kurumaya bırakılmış sonrasında 350 °C’ de 2,5 saat süre ile fırın atmosferinde pişirme işlemi gerçekleştirilerek elektrot üretimi tamamlanmıştır. Bahsedilen örtülü elektrot üretimine ait iş akış şeması Şekil 4.2.’de, üretilmiş olan örtülü elektrotlar ise Şekil 4.3.’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Örtülü elektrot üretimi için kullanılan alt ve üst kalıp



Şekil 4.2. Örtülü elektrot üretimi şematik gösterim



Şekil 4.3. Üretilen örtülü elektrotlar

4.4. Sert Yüzey Alaşımına

Üretimi gerçekleştirilen örtülü elektrotların AISI 1010 çelik altlık üzerine kaplanması Magmaweld RD 650 E elektrik ark kaynak makinesi kullanılarak doğru akım ters kutup yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametreleri Tablo 4.6.'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Kaynak parametreleri

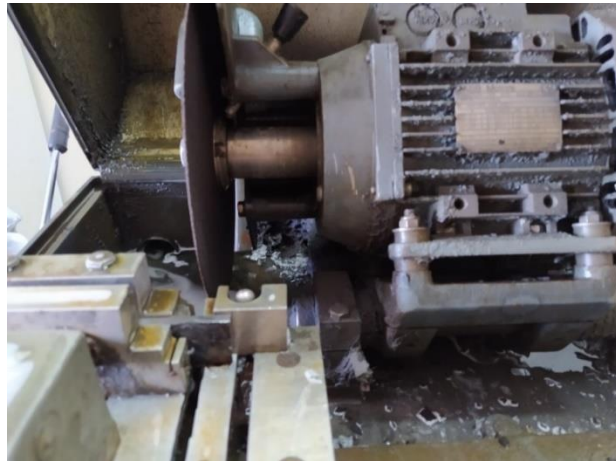
Kaynak parametreleri	
Kaynak akımı	125-130 A
Kaynak gerilimi	25 V

4.5. Analizler İçin Numunelerin Hazırlanması

Kaynak işlemi gerçekleştirilen altlığın metalografik incelemeleri için kaynak dikişine 90° açıda olacak şekilde ile su soğutmalı hassas kesme cihazında numuneler kesilmiştir.

Kaynak sonrası numunelerin yüzeyinde çok fazla girinti çıkıntı olduğundan numune hazırlama işlemine uygun değildir. Bu sebeple numunelerin yüzeyi analizlere hazırlanmadan önce taşlanmıştır.

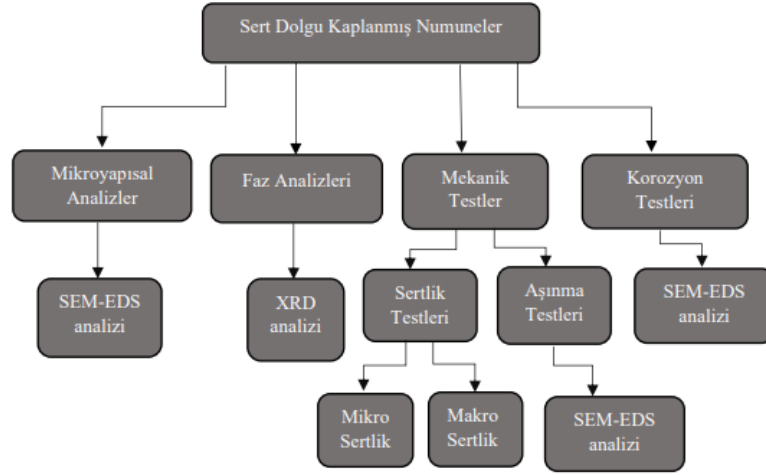
Kesilen numuneler sırasıyla 120, 240, 400, 600, 1000, 1200 grid SiC zımpara kullanılarak zımparalanmış, 1 µm elmas solüsyon ile parlatılmış ve %3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır.



Şekil 4.4. Su soğutmalı hassas kesim cihazında numune kesim işlemi

4.6. Analiz ve Testler

Sert dolgu kaplanma gerçekleştirilmiş numunelerin mikroyapı, faz analizi, mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi için çeşitli testler ve analizler uygulanmıştır. Uygulanan test ve analizlere ait iş akış şeması Şekil 4.5.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Uygulanan test ve analizlere ait iş akış şeması

4.6.1. SEM ve EDS analizi

Numunelerin mikroyapısal incelemeleri Şekil 4.6.'da gösterilen JEOL JSM-6060 LV taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıdaki elementel analiz ve dağılımlarını SEM cihazına entegre halde bulunan IXRF Systems Inc. EDS (Electron Dispersive Spectroscopy) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. JEOL JSM-6060 LV taramalı elektron mikroskobu (SEM)

4.6.2. Faz analizleri

Sert yüzey alaşımlanan numunelerin faz analizleri Şekil 4.7.'de gösterilen RIGAKU D/MAX/2200/PC marka X-ışınları difraktometresi (CuK_α $\lambda=1,5408 \text{ \AA}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Faz analizi sonrası elde edilen ham verilerden X'pert Highscore ve MDI Jade 6 bilgisayar yazılımları kullanılarak kaplama içerisindeki mevcut fazlar tespit edilmiştir. Faz analizleri sırasında, programın veri tabanındaki seçenekleri daha verimli değerlendirebilmesi için, numune içerisinde bulunabilecek fazlara ait elementler birer data olarak programa girilmiştir. Program, girilen datalar ile kendi data tabanındakileri kıyaslayarak, en uygun fazların ne olabileceğine dair bir liste verir ve bu liste içerisinde X-ışını difraksiyon paternleri ile en uygun eşleştirme gerçekleştirilerek faz çözümü işlemi tamamlanır.



Şekil 4.7. RIGAKU D/MAX/2200/PC marka X-ışınları difraktometresi

4.6.3. Mekanik testler

4.6.3.1. Sertlik testleri

Sert yüzey alaşımlanan kaplamaların sertlik ölçümleri, mikro ve makro sertlik olarak iki farklı metot kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bakalite alınan numunelere altlık malzemedan başlayarak kaplamanın tepe noktasına kadar 0,5 mm aralıklarla Vickers sertlik ölçüm metodu ile mikro sertlik testi gerçekleştirilmiştir. Vickers sertlik ölçümleri için FutureTech FM700 marka mikro sertlik cihazı kullanılmış ve testler 200 gram yük altında gerçekleştirilmiştir.

Mikro sertlik, mikro boyuttaki fazların sertliğinin belirlenmesinde kullanılır. Kaplama yüzey sertliğinin tespitinde daha doğru sonuç almak için mikro sertlik ölçümü ile beraber numunelere makro sertlik testi uygulanmasına ihtiyaç duyulmaktadır [17]. Makro sertlik testi, Bulut Makine BMS-DIGIROCK-RB sertlik cihazında 5 mm aralıklar ile Rockwell C testi uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



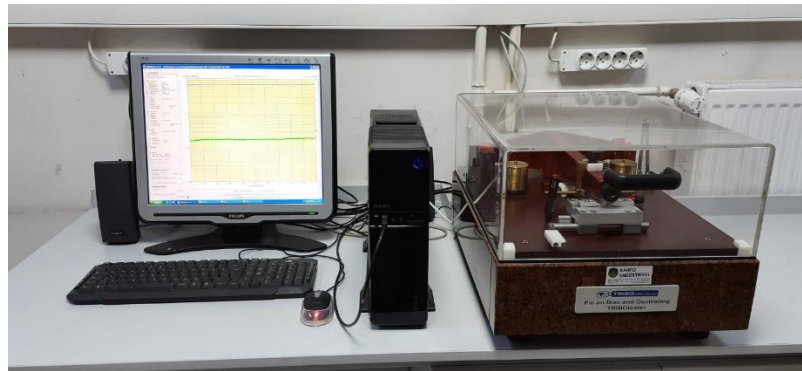
Şekil 4.8. Mikro sertlik testleri gerçekleştirilen FutureTech FM700 marka mikro sertlik cihazı



Şekil 4.9. Makro sertlik tesleri gerçekleştirilen Bulut Makine BMS-DIGIROCK-RB sertlik cihazı

4.6.3.2. Aşınma testleri

Sert yüzey alaşımlanan numunelerin aşınma deneyleri ASTM G-133 standardına göre uygun olarak TRIBOtechnic-TRIBOtester aşınma cihazı ile salınım hareketli aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir. Alümina (Al_2O_3) bilyeler kullanılarak 3N, 6N ve 9N yük altında 200 m mesafede 30 mm/sn hız ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonucunda sert yüzey alaşımlanmış kaplamalarda meydana gelen aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu ile incelenmesi sonucunda aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Aşınma testleri gerçekleştirilen TRIBOtechnic-TRIBOtester aşınma cihazı

4.6.4. Korozyon testleri

Sert dolgu yüzey alaşımlanmış numunelere, korozyon ortamındaki davranışlarını inceleyebilmek için potansiyodinamik polarizasyon testi uygulanmıştır. Korozyon testleri Şekil 4.11.'de gösterilen Gamry Instruments marka Interface 1010E model elektrokimyasal test ünitesine bağlı üç elektrot yöntemi ile çalışan yatay hücre kullanılarak 0,5 M NaCl çözeltisi içerisinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Korozyon testleri (-0,5)-(+1,5) V potansiyel aralığında ve 2 mV/sn tarama hızında, standart doymuş kalomel referans elektrot ve grafit karşıt elektrot kullanılarak yapılmıştır. Oluşan polarizasyon eğrilerinden faydalanılarak I_{kor} ve E_{kor} değerleri belirlenmiştir. I_{kor} değeri Eşitlik 4.1'de verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$I_{kor} = \frac{\beta_a \beta_k}{2,3R_p(\beta_a + \beta_k)} \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte β_a anodik Beta Tafel sabiti (volt/onyıl) ve β_k katodik Beta Tafel sabiti (volt/onyıl), R_p polarizasyon direncini temsil eder. Gamry Echem Analyst programı kullanılarak β_a ve β_k Tafel sabitleri tespit edilmiştir. Test sırasında programın çizdiği teğetlerden alınan datalar ile yukarıda verilen Eşitlik 4.1 kullanılarak I_{kor} değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.11. Elektrokimyasal test ünitesine bağlı üç elektrot yöntemi ile çalışan yatay hücre

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Giriş

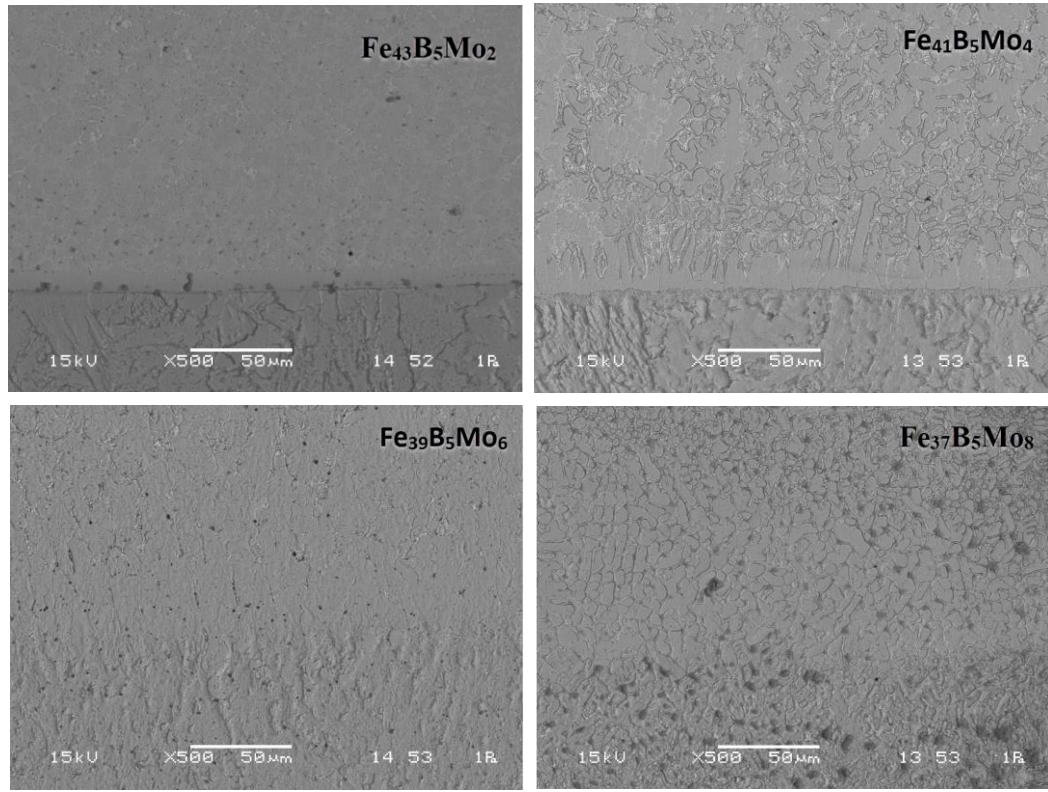
Bu çalışmada, farklı bileşimlere sahip Fe-Mo-B esaslı örtülü sert dolgu elektrotları üretilmiş, üretilen elektrotlar ile AISI 1010 çelik altlık üzerine örtülü elektrotla elektrik ark kaynağı metodu kullanılarak sert yüzey kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama tabakasının mikroyapısal değişimleri, faz analizleri, sertlikleri, aşınma ve korozyon dirençleri incelenmiştir. Tezin bu bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

5.2. Mikroyapı İncelemeleri ve Faz Analizleri

Sert yüzey alaşımlanmış kaplamaların mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak faz analizleri ise XRD ve SEM cihazına entegre EDS ataçmanı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Arayüzeylerin İncelenmesi

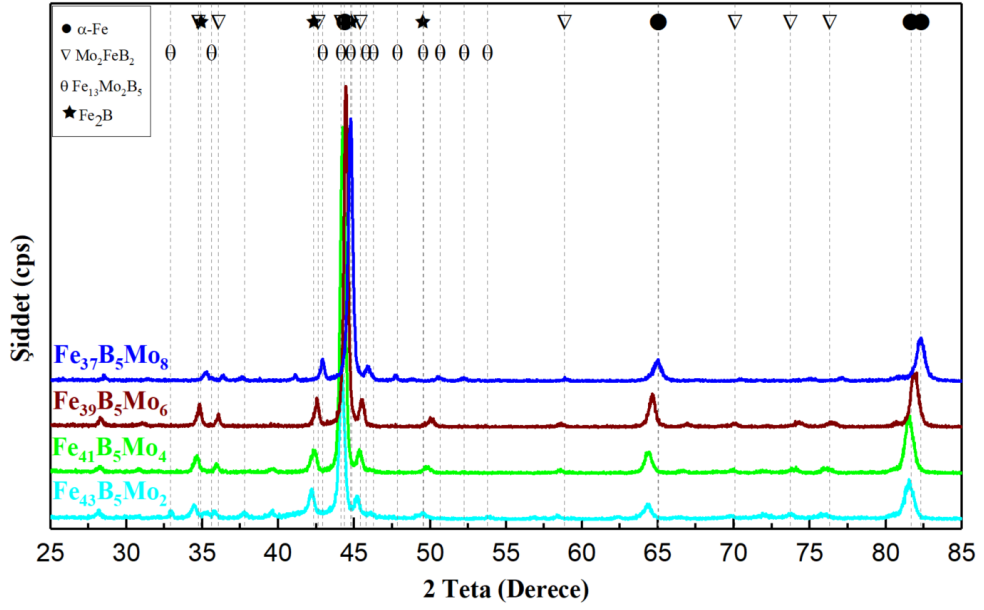
Şekil 5.1.'de sert dolgu alaşımları ile kaplanmış numunelere ait altlık-kaplama arayüzey görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde geçiş bölgesinin, altlık, ara yüzey, kaplama tabakası olarak üç bölgeden oluştuğu anlaşılmaktadır. Yine aynı görüntülerde altlık-kaplama geçiş bölgesinde porozite olmadığı ve kaplama tabakasının metalurjik olarak altlık malzemeye bağlandığı tespit edilmiştir. AISI 1010 çelik altlık üzerine gerçekleştirilen Fe-Mo-B esaslı sert dolgu kaplamaların geçiş bölgesinde sutunsal büyümenin hakim olduğu ve kaplama bölgesine doğru sutunsal büyümenin yerini eş eksenli tanelere bıraktığı görülmektedir. Bu durum kaynak prosesi ile gerçekleştirilen kaplama uygulamaları için beklenen bir sonuçtur [17].



Şekil 5.1. Sert dolgu kaplamaman numunelerin altlık-kaplama arayüzey görünümü. Sert dolgu kaplamaman numunelerin altlık-kaplama arayüzey görünümü

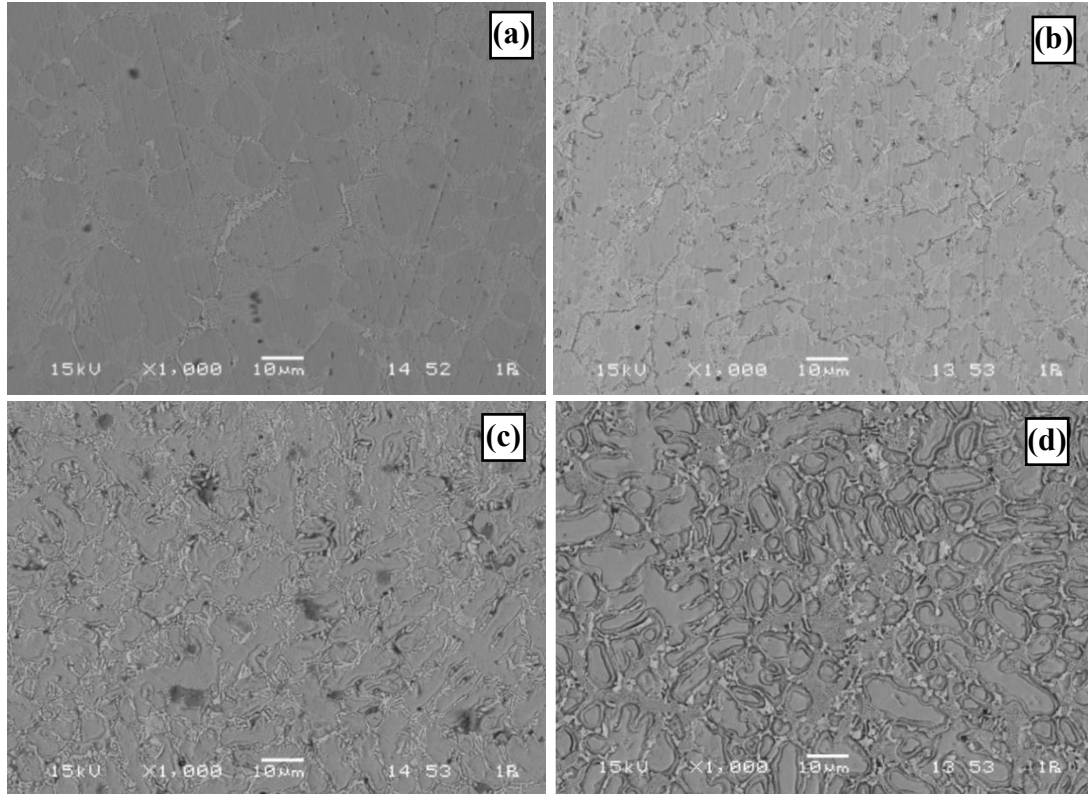
5.2.2. Faz analizleri ve mikroyapı

Şekil 5.2.'de sert dolgu kaplanan numunelere gerçekleştirilen XRD analiz sonucu verilmiştir. XRD analizine göre, kaplama mikroyapılarından α -Fe, τ_1 ($\text{Mo}_2\text{Fe}_{13}\text{B}_5$), τ_2 (Mo_2FeB_2) ve Fe₂B fazlarını içerdiği tespit edilmiş ve bu fazların elektrot örtü bileşiminde değişen molibden miktarına göre değiştiği tespit edilmiştir. Geliştirilen sert dolgu elektrotlar içerisinde en az molibden içeriğine sahip Fe₄₃B₅Mo₂ esaslı sert dolgu kaplamaman mikroyapısında yer alan τ_1 ($\text{Mo}_2\text{Fe}_{13}\text{B}_5$) ve Fe₂B fazlarının, elektrot örtü bileşimindeki artan molibden oranı ile azaldığı gözlemlenmiştir. Elektrot örtü bileşiminde artan molibden miktarı ile kaplama tabakasında τ_2 (Mo_2FeB_2) fazının arttığı görülmektedir.



Şekil 5.2. Sert dolgu kaplamalara ait XRD analizi

Şekil 5.3.'de farklı oranlarda molibden içeren sert dolgu kaplamalardan alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde elektrot örtü bileşiminde değişen molibden miktarı ile mikroyapıda önemli değişikliklere yol açtığı, Fe-Mo-B bazlı kaplamaların genel mikroyapısının dendritik olduğu ve bileşimdeki molibden oranı arttıkça α -Fe'in tane boyutu azaldığı anlaşılmaktadır.

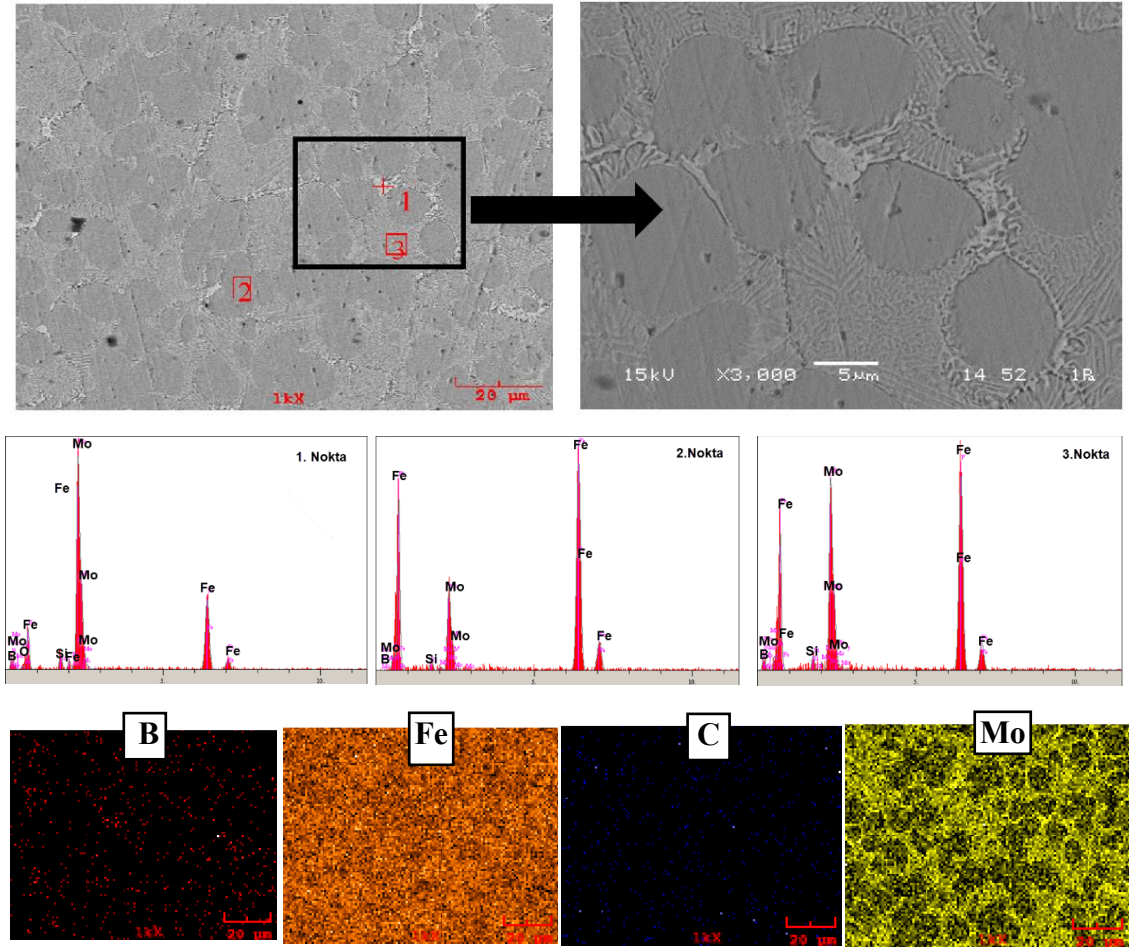


Şekil 5.3. Farklı molibden oranlarına sahip sert dolgu kaplamalara ait SEM görüntüleri (a) $\text{Fe}_{43}\text{B}_5\text{Mo}_2$ bileşimi (b) $\text{Fe}_{41}\text{B}_5\text{Mo}_4$ bileşimi (c) $\text{Fe}_{39}\text{B}_5\text{Mo}_6$ bileşimi (d) $\text{Fe}_{37}\text{B}_5\text{Mo}_8$ bileşimi

Şekil 5.4.'de $\text{Fe}_{43}\text{B}_5\text{Mo}_2$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, mikroyapı içerisinde üç farklı yapının yer aldığı ve bunların matris fazı, ötektik benzeri yapılar ve ötektik fazların arasında çökelen yapılar olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.2.'te verilen XRD analizinde $\text{Fe}_{43}\text{Mo}_5\text{B}_2$ esaslı sert dolgu kaplamasının $\alpha\text{-Fe}$, M_2B tip borür ve $\text{Mo}_2\text{Fe}_{13}\text{B}_5$ borürlerini içerdiği görülmektedir. Şekil 5.4.'te gösterilmiş olan MAP analizinde ise molibdenin ötektik yapılarda dağıldığı ve koyu gri adacıkların içinde eser miktarda bulunduğu anlaşılmaktadır. SEM görüntülerinde ise koyu gri bölgelerin $\alpha\text{-Fe}$ olduğu anlaşılmaktadır.

Çalışmada seçilen bileşimler, Fe-Mo-B üçlü faz diyagramının sıvı projeksiyonuna göre ilgili bileşimin katılaşmaya başladığı bölge HMK yapıları demir olarak gözükmemektedir [45]. SEM görüntüsünde yer alan koyu gri bölgeler ilk katılaşan bölge olduğu düşünülmektedir. Aynı bölgeden alınan 2 numaralı EDS analizinde bu noktanın molibden içerdiği görülmektedir. Normal şartlar altında molibdenin demir içerisindeki

çözünürlüğü sınırlı olmakla birlikte yaklaşık olarak 1450 °C’de çözünürlüğü ~%24 at. olduğu rapor edilmiştir [46,47]. Fakat kaynak gibi katılaşmanın dinamik olduğu bir proseste, bölgesel veya yapısal olarak hızlı soğumalar gerçekleşebilir [41]. Bu sebeple molibdenin α -Fe içerisindeki çözünürlüğü bir miktar artması beklenebileceğinden ilgili noktada yer alan faz α -(Fe,Mo) olarak tanımlanabilir. Katılaşmanın devamında ötektik yapıların arasında kalan uzunlamasına fazların τ_1 fazının katılaşması beklenmektedir. $\text{Fe}_{43}\text{B}_5\text{Mo}_2$ esaslı sert dolgu kaplamanın nihai mikroyapısı SEM görüntüsünden görülebileceği gibi, mikroyapı ötektik yapıların katılaşması ile tamamlanacaktır. Yin ve arkadaşları [48] tarafından yapılan çalışmada ağ. Fe-%3,5B-%8Mo içeren alaşımın ötektik bileşim olduğu ve bu bileşimden daha düşük oranda molibden içeren alaşımların ötektikaltı bir mikroyapı sergileyeceği rapor edilmiştir. Ayrıca yaptıkları çalışmada ötektikaltı mikroyapıda yer alan fazların α -(Fe,Mo), Fe_3B ve ağsı (ötektik) $(\text{Fe,Mo})_2\text{B}$ yapısında olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte bu çalışmada XRD analizinde dengeli katılaşma şartlarında bulunmayan Fe_3B fazı tespit edilememiş Fe-Mo-B sistemi içerisinde yer alan τ_1 fazının olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan XRD analizinde tespit edilen M_2B tip borür sinyallerinin bu bölgelerden alındığı ve α -Fe+ M_2B olarak katılaşacağı düşünülmektedir. İlgili bileşim, Raghavan [49] tarafından önerilen 1050 °C’deki Fe-Mo-B faz diyagramının demirce zengin tarafında yer alır ve ilgili sıcaklık için Fe_2B katılaşma çizgisine komşu bir faz bölgesinde yer almaktadır. Bu sebeple nihai mikroyapıda Fe_2B fazının bulunması beklenmektedir. Öte yandan MAP analizinde ötektik bölgelerden alınan molibden sinyalinin ötektik yapı içerisinde molibdenin olduğuna işaret etmektedir. Yang ve arkadaşları [45] tarafından yapılan çalışmada Fe_2B fazının 1373 °K’de %0.6 at. olarak molibden çözebileceği rapor edilmiştir. Ötektik bölgeden alınan 3 numaralı EDS analizinde analiz edilen bölgenin atomik olarak yaklaşık %10 oranında molibden içerdiği anlaşılmaktadır. Bu sebeple yapı α -(Fe,Mo) + $(\text{Fe,Mo})_2\text{B}$ olduğu tespit edilmiştir.



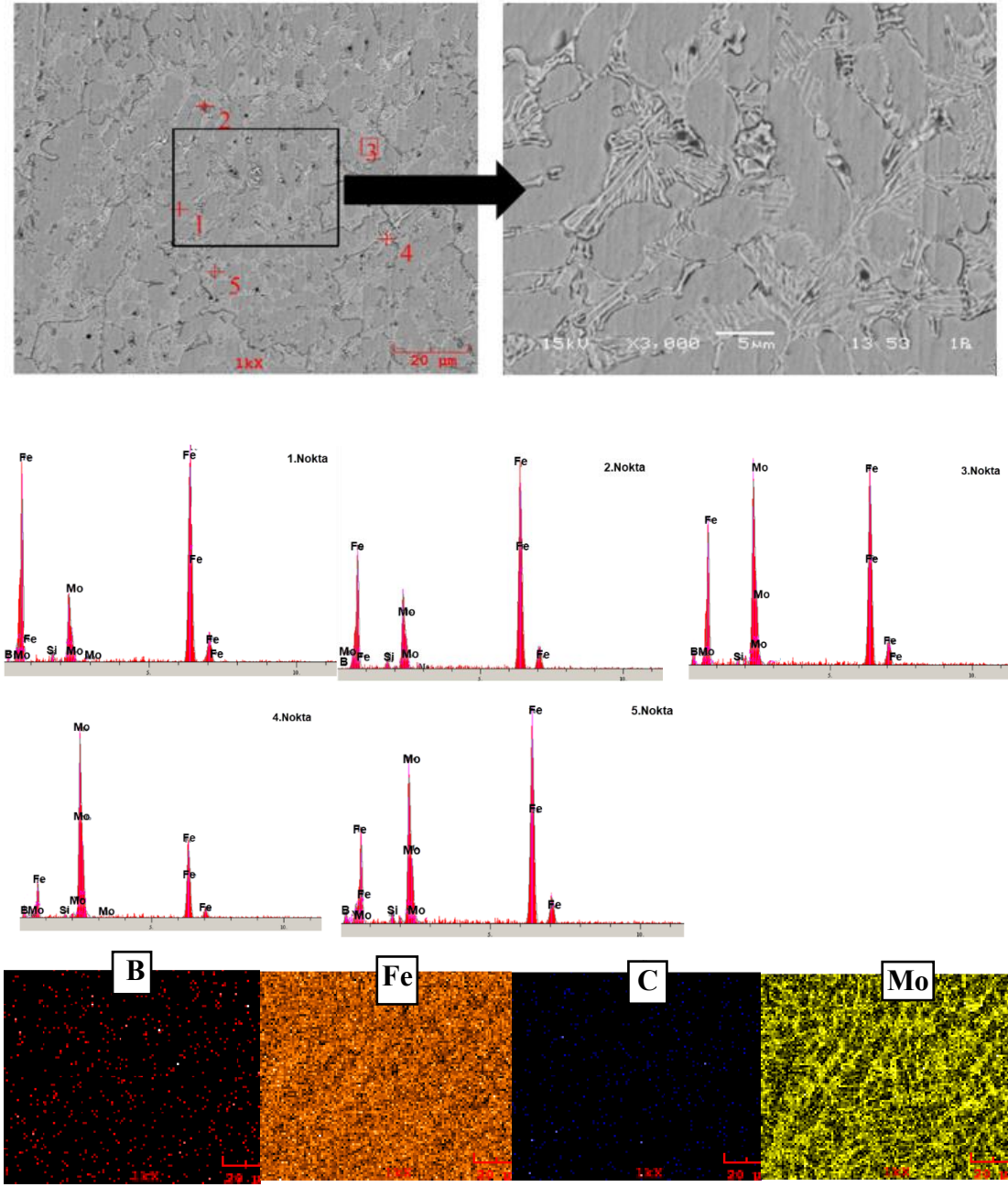
Şekil 5.4. $\text{Fe}_{43}\text{B}_5\text{Mo}_2$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi

Şekil 5.5.'de $\text{Fe}_{41}\text{B}_5\text{Mo}_4$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi verilmiştir. Bir önceki bileşime göre %4 (at.) daha fazla molibden içeren kaplama tabakasında, artan molibden ile mikroyapısal değişimlerin olduğu görülmektedir. $\text{Fe}_{41}\text{B}_5\text{Mo}_4$ esaslı sert dolgu kaplama alaşımı Fe-Mo-B faz diyagramının sıvı projeksiyonuna göre katılaşmaya HMK demir ile başlaması beklenmektedir [50]. Bu sebeple SEM görüntüsünde verilen gri adacıkların α -Fe olduğu ve Şekil 5.5.'te verilen EDS analizinde de görülebileceği gibi, bu fazın molibden içermesinden dolayı α -(Fe-Mo) olarak adlandırılmaktadır. Öte yandan mikroyapıda matrisden (α -(Fe, Mo)) farklı olarak ötektik yapı ve blok yapıli fazların yer aldığı görülmektedir.

Artan molibden miktarı ile sıvı projeksiyondaki katılaşmanın başladığı nokta bir önceki bileşimle aynı faz bölgesinde yer almaktadır. Fakat artan molibden oranı katılaşmanın devamında gerçekleşen faz dönüşümlerini etkilemektedir. Raghavan [49]

tarafından önerilen Fe-Mo-B faz diyagramının 1050 °C'deki kesitinde ilgili bileşimin bulunduğu bölge sağa kaymış ve τ_1 , τ_2 ve α -Fe fazının kararlı olduğu alana geçmiştir. Şekil 5.2.'de verilen XRD analizinde bu bileşimde $\text{Mo}_2\text{Fe}_{13}\text{B}_5$ fazının mevcut olduğu görülmektedir. $\text{Mo}_2\text{Fe}_{13}\text{B}_5$ veya τ_1 olarak katılaştıran yapının blok yapılı fazlar olduğu anlaşılmaktadır.

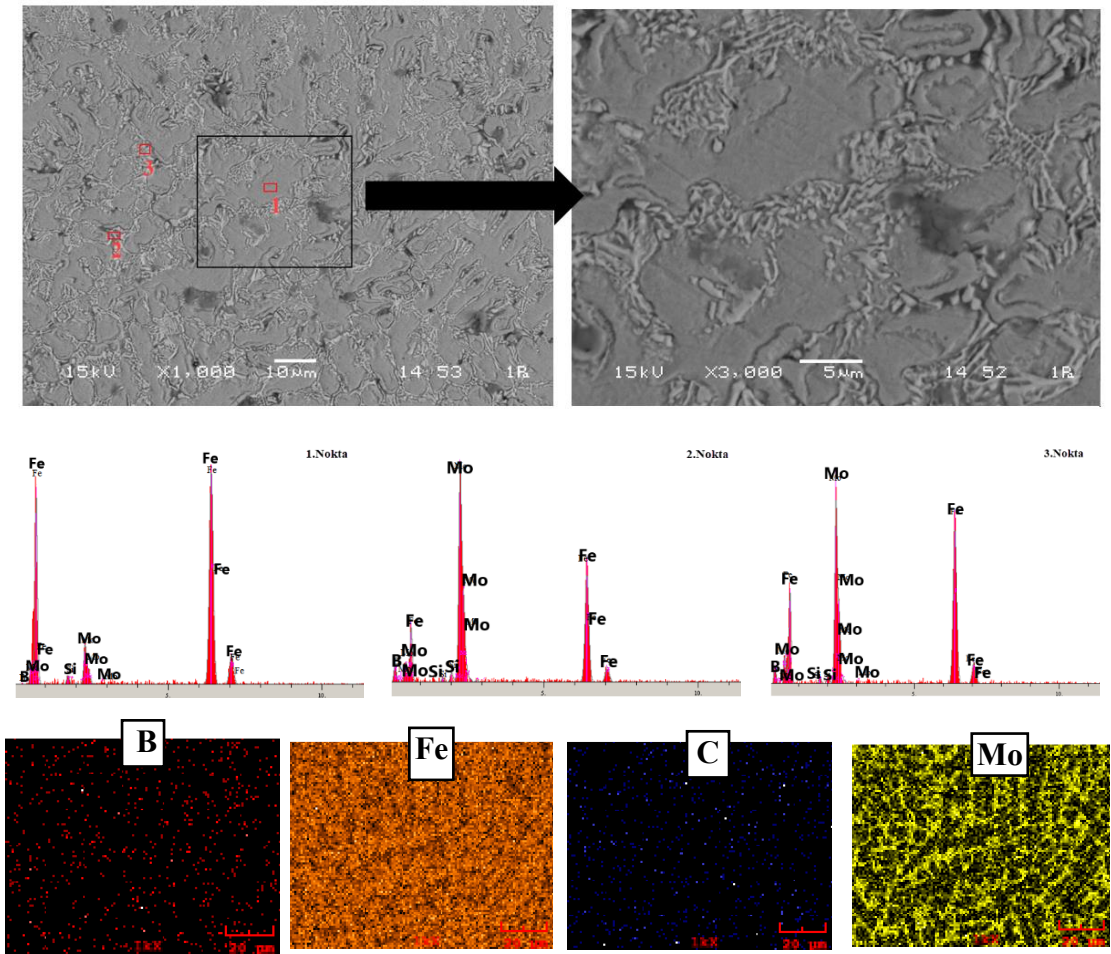
Elektrot örtü bileşiminde artan molibden ile bileşimin faz diyagramında bulunduğu nokta sağa kaymaktadır. Bu sebeple SEM görüntüsünde yer alan ötektik fazların ise bir önceki bileşimden farklı olarak α -Fe+ τ_2 ötektik yapısı olarak katılaştığı anlaşılmaktadır. Nihai mikroyapının ise α -Fe, τ_1 ve α -Fe+ τ_2 fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen benzer çalışmalarda α -Fe'in τ_2 (Mo_2FeB_2) ile α -Fe+ Mo_2FeB_2 ötektiğini oluşturduğu bilinmektedir. Bu sebeple SEM görüntüsünde görülen ötektik yapı α -Fe+ Mo_2FeB_2 olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte SEM görüntüsünde görülen ötektik yapının bir önceki bileşime göre parçalı olduğu tespit edilmiştir. Yin ve arkadaşları [48] tarafından yapılan çalışmada (α -Fe+ Mo_2FeB_2) ötektik yapısının, (α -Fe+ Fe_2B) ötektik yapısının bütünlüğünü bozduğu rapor edilmiştir. Bu sonuca paralel olarak $\text{Fe}_{41}\text{B}_5\text{Mo}_4$ esaslı sert dolgu kaplamanın mikroyapısında yer alan ötektiğin artan molibden ile parçalandığı ve ötektik yapının α -Fe+ Mo_2FeB_2 olarak katılaştığı söylenebilir.



Şekil 5.5. $\text{Fe}_{41}\text{B}_5\text{Mo}_4$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi

Şekil 5.6.'da $\text{Fe}_{39}\text{B}_5\text{Mo}_6$ esaslı kaplamaya ait SEM, EDS ve MAP analiz sonuçları verilmiştir. Molibden oranının atomik olarak %12'ye artırıldığı bu bileşimin mikroyapısı önceki kaplama mikroyapılarına benzer şekilde α -Fe, ötektik yapının hakim olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca mikroyapı içerisinde eser miktarda blok yapıli fazların olduğu görülmektedir. Bununla birlikte diğer bileşimlerden farklı olarak mikroyapıda ötektik miktarının diğerlerine göre daha az olduğu anlaşılmaktadır. Mikroyapıda oluşan fazların kimyasal kompozisyonları ötektik yapının oranını

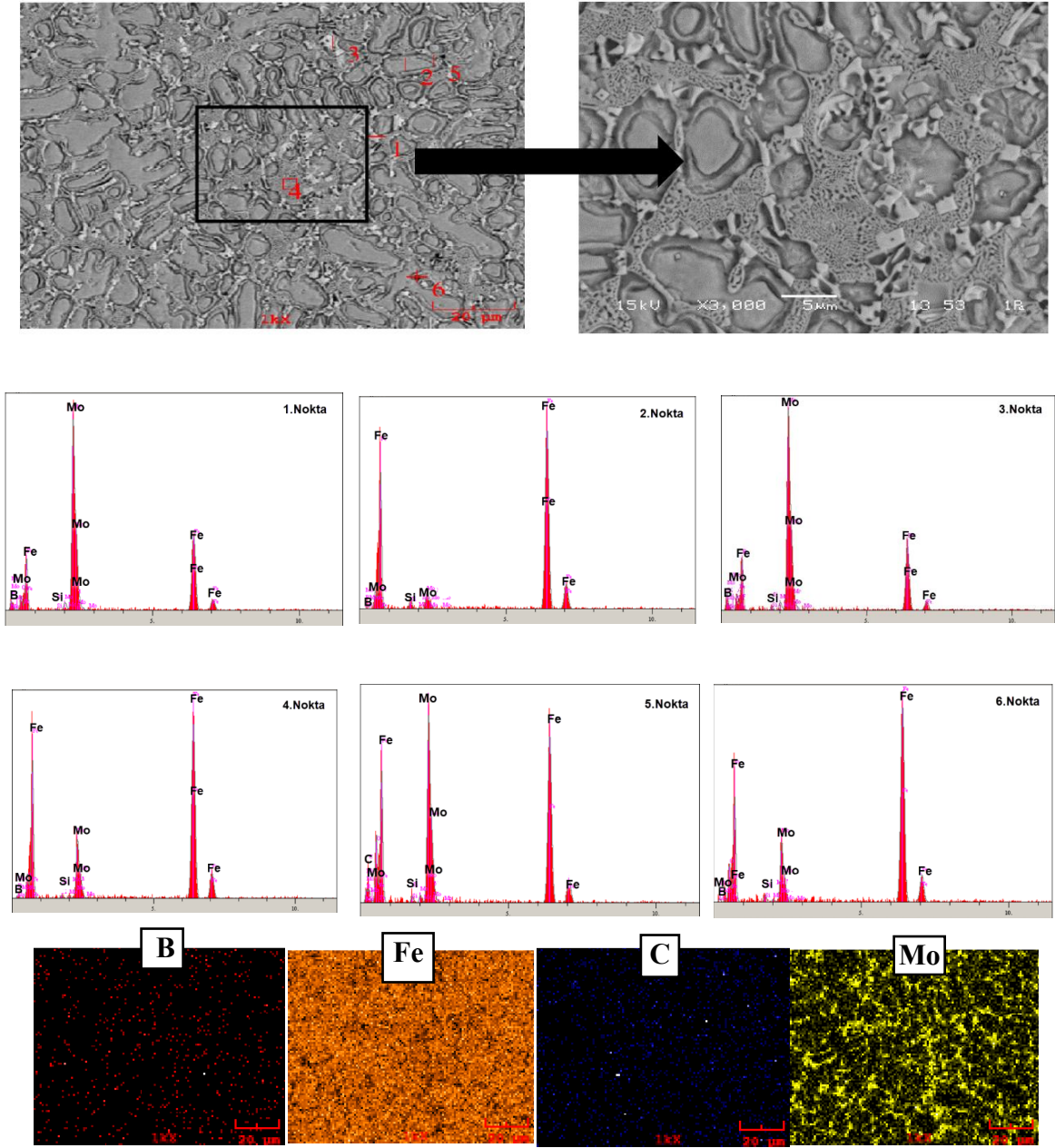
etkilediği bilinmektedir [51]. Jin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada mikroyapıda yer alan Mo_2FeB_2 bileşimine sahip sert blok fazların içerdiği yüksek oranda molibden sebebiyle ötektik içerisindeki molibdenin azaldığı rapor edilmiştir [39]. Öte yandan ötektik yapının önce bileşimde oluşan ötektik yapıya benzer şekilde parçalı olduğu görülmektedir. $\text{Fe}_{39}\text{B}_5\text{Mo}_6$ esaslı sert dolgu kaplamasının nihai mikroyapısının ise $\alpha\text{-(Fe,Mo)}$, Mo_2FeB_2 ve $\alpha\text{-(Fe,Mo)}+\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ ötektik yapısından oluştuğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.6. $\text{Fe}_{39}\text{B}_5\text{Mo}_6$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi

Şekil 5.7.'de $\text{Fe}_{37}\text{B}_5\text{Mo}_8$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi verilmiştir. Örtülü elektrot bileşimleri arasında en yüksek molibden içeriğine sahip alaşımın mikroyapısının tipik olarak dendritler arası ötektik faz içeren bir katılma sergilediği görülmektedir. Artan molibden miktarı ile mikroyapıda ötektik yapı morfolojisinde değişimlerin meydana geldiği ve ötektik yapı ve $\alpha\text{-Fe}$ ile birlikte blok

yapılı fazların da oluştuğu tespit edilmiştir. Yin ve arkadaşları ağırlıkça %3,5 bor içeren Fe-Mo-B alaşımında molibden oranının %8 ağırlık oranını geçmesi ile yapıda Mo_2FeB_2 blok yapılı sert fazların oluştuğunu rapor etmişlerdir [48]. Öte yandan Jin ve arkadaşları ağırlıkça %4 bor içeren Fe-Mo-B esaslı kaplamanın mikroyapısındaki molibden bileşiminin %20 ağırlık oranına çıkılması ile yapıda blok fazların oluştuğunu rapor etmişlerdir [39]. SEM görüntüsü verilen $\text{Fe}_{37}\text{B}_5\text{Mo}_8$ esaslı sert dolgu kaplamanın mikroyapısında blok yapılı (Mo_2FeB_2) fazlarının oluştuğu görülmektedir. Mo_2FeB_2 fazının çekideklenmesi ile başlayan katılaşmanın devamını bu faz çubuksu, küresel, köşeli, kelebek tipli vb. olarak büyümesini devam ettirmektedir. Literatürde bu fazın oluşumu sonucu hızlı katılaşmanın engellendiği rapor edilmektedir [39,51]. Bu sebeple bileşim nispeten dengeli bir katılaşma sergilemektedir. Katılaşma ötektik yapının oluşumu ile devam edecektir. Ayrıca $\text{Mo}_2\text{Fe}_2\text{B}$ fazının yüksek oranda molibden içermesinden dolayı sıvı demir ve borca zengin hale gelmektedir. Bu sebeple Şekil 5.7.'de verilen ötektik faz üzerinden alınan EDS analizinde molibden oranının düşük olduğu görülmektedir. Bu sebeple bu faz $\text{Fe}_{37}\text{B}_5\text{Mo}_8$ esaslı sert dolgu kaplamanın mikroyapısında görülen ötektik yapıdan farklı olarak $\alpha\text{-Fe}+\text{Fe}_2\text{B}$ olarak katılaşmaktadır. Katılaşmanın devamında $\alpha\text{-Fe}$ 'in oluşması beklenir. Yine bu faz üzerinden alınan EDS analizinde önceki bileşimlere göre daha az miktarda molibdeni çözdüğü görülmektedir. Fakat hala eser miktarda molibdenin $\alpha\text{-Fe}$ içerisinde çözüldüğü anlaşılmaktadır. Sonuç olarak nihai mikroyapının Mo_2FeB_2 , $\alpha\text{-(Fe,Mo)}$ ve $\alpha\text{-(Fe,Mo)}+(\text{Fe,Mo})_2\text{B}$ ötektik yapısından oluştuğu anlaşılmaktadır.

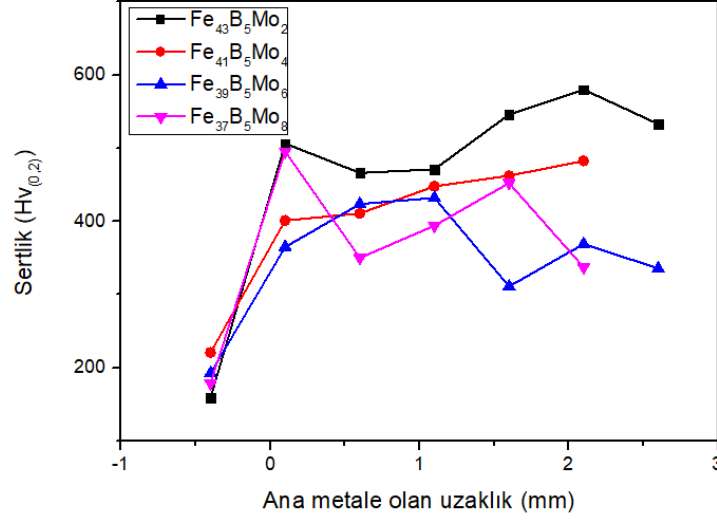


Şekil 5.7. $\text{Fe}_{37}\text{B}_5\text{Mo}_8$ esaslı kaplamaya ait SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi

5.3. Sertlik Testleri

Dört farklı bileşim oranına sahip Fe-Mo-B esaslı sert dolgu elektrotları ile çelik altlık üzerinde elektrik ark kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sert dolgu kaplamalarda altlık malzemeden dikiş tepe noktasına kadar 0,5 mm aralıklarla 200 gr yük altında Vickers ($\text{HV}_{0,2}$) sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8.'de gösterilmiş olan mikrosertlik sonuçlarından da görülebileceği gibi altlıktan kaplama

tabakasına doğru mikro sertlik değeri artmaktadır. Bu sonuç kaynak uygulamalarında görülmekte olan seyrelme probleminin az olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.8. Üretilen sert dolgu kaplamalarının mikro sertlik sonuçları

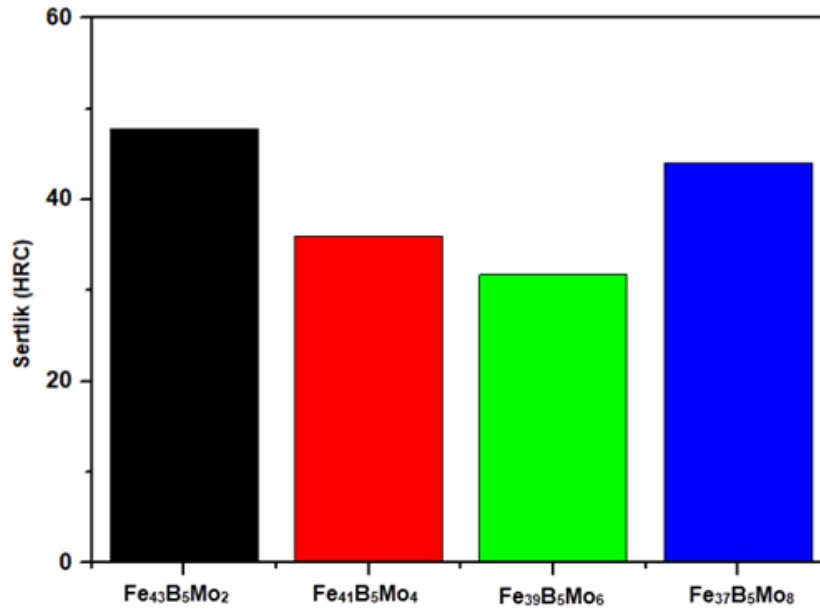
Şekil 5.8.'de kaplamanın üst tabakasından alt tabakasına doğru, mikrosertlik değerlerinin önce arttığı sonra azaldığı, orta katmanda ise mikrosertlik değerlerinin daha yüksek olduğunu görülmektedir. Bu durum dinamik kaynak prosesi sebebiyle kaplama sırasında meydana gelen seyrelme ve diğer katılma koşullarına bağlı olarak bölgesel olarak konsantrasyonda meydana gelen değişimlerin bir sonucu olabilir [39].

Bununla birlikte benzer bir durum Jin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada tespit edilmiştir. Jin ve arkadaşları kaplamanın üst bölgesinde meydana gelen sertlik düşüşünü atmosfere açık kısımda kalan metallerin buharlaşarak konsantrasyonu azaltmasına bağlamışlardır [39].

Elektrot örtü bileşiminde artan molibden miktarı ile sertlikte doğrusal bir değişim olmadığı görülmektedir. Vickers sertlik ölçme yöntemi ile sertlik ölçümü çok küçük noktalardan alınmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen bütün kaplamalarda bor oranı sabittir. Borun demir içerisinde çözünürlüğü bulunmayıp demir ile bor atomik olarak yaklaşık %17 bor içeren noktada ötektik olarak katılmaktadır. Bu sert ötektik faz kaplama içerisinde oldukça yüksek hacimsel orana

sahiptir. Bununla birlikte demir içerisinde ilave edilen molibden yine bor ile çeşitli fazlar oluşturmaktadır. Bu fazların hacimsel oranı muhtemelen α -Fe+Fe₂B ötektik yapısına göre daha azdır. Bu sebeple mikro sertlik ölçümlerinde artan molibden oranı ile dalgalanmalar görülmektedir.

Sıra sertlik ölçümü, geçiş bölgesi sertliğinin yorumlanması açısından önemli olmasına rağmen yapı içerisinde oluşan fazların boyut, dağılım oranı gibi özellikleri mikro sertlik sonuçlarında dalgalanmalara sebep olabildiğinden kaplama tabakasının genel sertliğini yorumlamak için yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple kaplamalara makro sertlik testi de uygulanmıştır. 5 mm aralıklarla ölçülen Rockwell C makro sertlik testi sonuçları Şekil 5.9.'da gösterilmektedir.



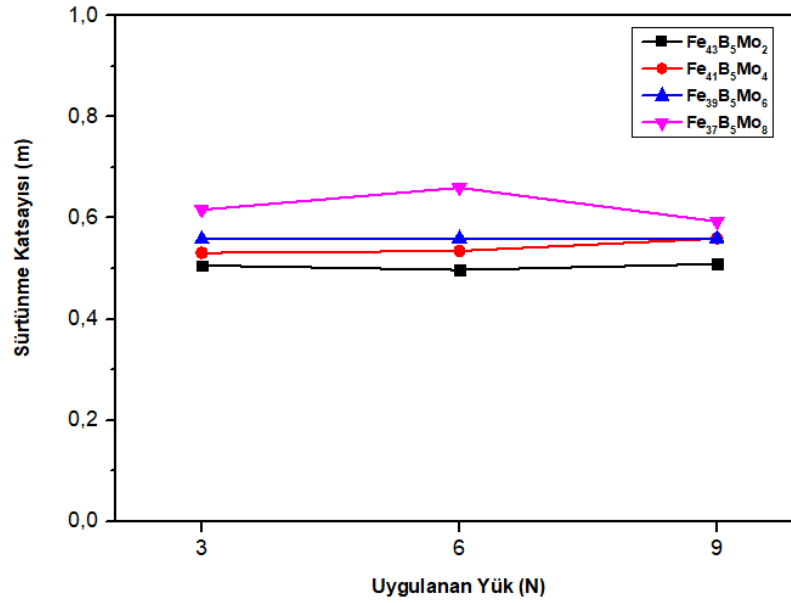
Şekil 5.9. Üretilen sert dolgu kaplamalarının makro sertlik sonuçları

Şekil 5.9.'da verilen kaplamalara ait makro sertlik testi sonuçlarında görülebileceği gibi, en düşük molibden oranına sahip Fe₄₃B₅Mo₂ bileşiminin sertliği en yüksektir. İlgili bileşim içerisinde bor oranı molibden oranından fazla olduğundan yapı içerisinde borun bileşik oluşturması için yeterli miktarda molibden bulunmamakla birlikte bor, demir ile birlikte α -Fe+Fe₂B ötektiğini oluşturur. İlgili bileşimin en yüksek sertliğe sahip olmasının sebebi olarak oluşan α -Fe+Fe₂B ötektiğinin hacimsel fraksiyonunun yüksek olması düşünülmektedir. Bir diğer yaklaşım olarak Fe₂B ötektiği molibdenin

oluşturduğu diğer intermetalik fazlara göre daha yüksek sertliğe sahip olabileceğinden, ilgili bileşim en yüksek sertliğe sahip olabilir. Bileşim içerisindeki molibdenin artışı ile birlikte yapıda τ_1 fazı oluşmaya başlar ve sertlikte düşüş meydana gelir. Mo oranının at. olarak %12'ye artırılmasından sonra blok fazların oluşmasıyla birlikte sertlikte artış meydana geldiği görülmektedir.

5.4. Aşınma Testleri

Üretilen sert dolgu yüzey kaplamalar, atmosfer koşullarında ve oda sıcaklığında ASTM G133 standardına uygun TRIBOtechnic-TRIBOtester aşınma cihazı ile salınım hareketli (karşılıklı – git gel hareketli) aşınma testi uygulanmıştır. Testler 3 N, 6 N, 9 N olarak üç farklı yük altında, 30 mm/sn sabit aşınma hızı ile Al_2O_3 aşındırıcı bilyeye karşı 200 m aşınma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Ardından, kaplamaların aşınma mekanizmasının tespit edilmesi için SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizi ile yüzey kimyası incelenmiştir. Kaplamaların sürtünme katsayılarına ait sonuçlar Şekil 5.10.'da gösterilmiştir. Kaplamaların bileşimlerine ve aşınma sırasında uygulanan yüke bağlı olarak ortalama sürtünme katsayısı değerleri 0,49-0,65 arasında değişmektedir. Chen ve arkadaşları Fe-Mo-B esaslı alaşımların ortalama sürtünme katsayısı değerlerini 0,43-0,52 arasında rapor etmiş olup [54]; bu çalışmada elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

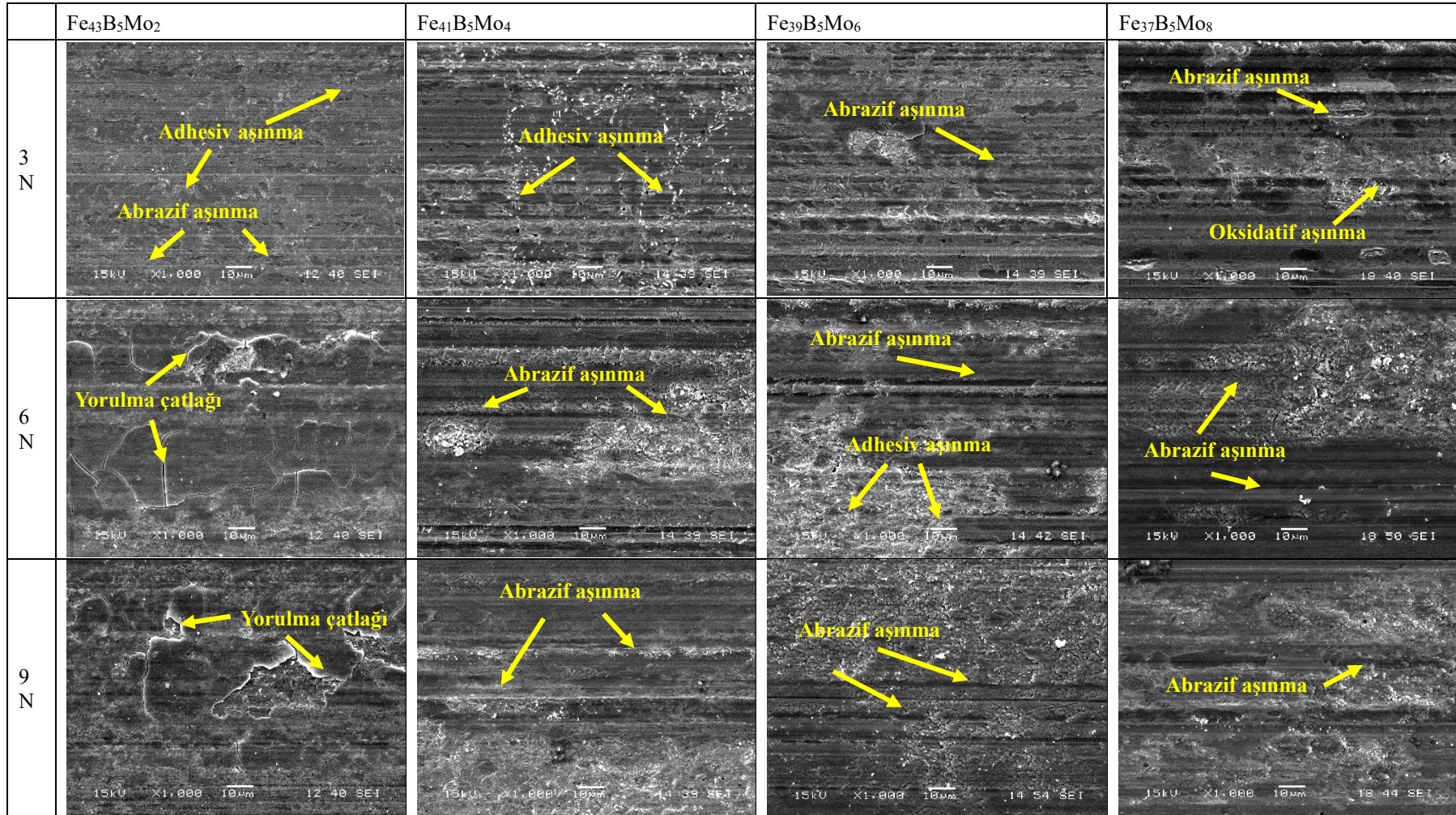


Şekil 5.10. Üretilen sert dolgu kaplamalarının sürtünme katsayısı sonuçları

Şekil 5.10.'da gösterilen sert dolgu kaplamalara ait sürtünme katsayısı sonuçları incelendiğinde, bileşimler içerisinde en düşük molibden oranına sahip Fe₄₃B₅Mo₂ bileşimine ait sürtünme katsayısının en düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak; ilgili bileşimin yapısında yer alan α -Fe+Fe₂B ötektiklerinin tüm hacim boyunca yayılmış olduğu düşünülmektedir. Sert kaplamaların aşınma direnci, yapıdaki sert fazların tipi, şekli, dağılımı ve matris tokluğu ve davranışı gibi birçok faktöre bağlıdır [55]. Çalışılan bileşimlerde bor oranının sabit olmasına karşın molibden oranı artmaktadır, dolayısıyla artan molibden oranı ile birlikte oluşacak sert fazların sayısı ve oranının artması beklenirken, bor oranı sabit olduğundan oluşan sert fazların sayısı ve oranı da sınırlı kalmaktadır. Şekil 5.3'te de görülebileceği gibi artan molibden oranı ile birlikte ötektik yapıda parçalanmalar meydana gelmektedir, ardından blok yapılı fazların oluşmasının sürtünme katsayısına negatif yönde etki ettiği anlaşılmaktadır.

Sürtünme katsayısı sonuçları uygulanan aşınma yüküne göre incelendiğinde, Fe₃₇B₅Mo₈ bileşimi dışında, aşınma yükü arttıkça sürtünme katsayısının hafifçe arttığı görülmektedir. Yapılan EDS analizlerinde de görülebileceği gibi (Şekil 5.12 – Şekil 5.15) yük artışı ve Mo miktarının artışı ile birlikte aşınma yüzeyinden alınan analizlerde oksijen pikinin arttığı görülmektedir. Bu durum sürtünme sırasında Mo

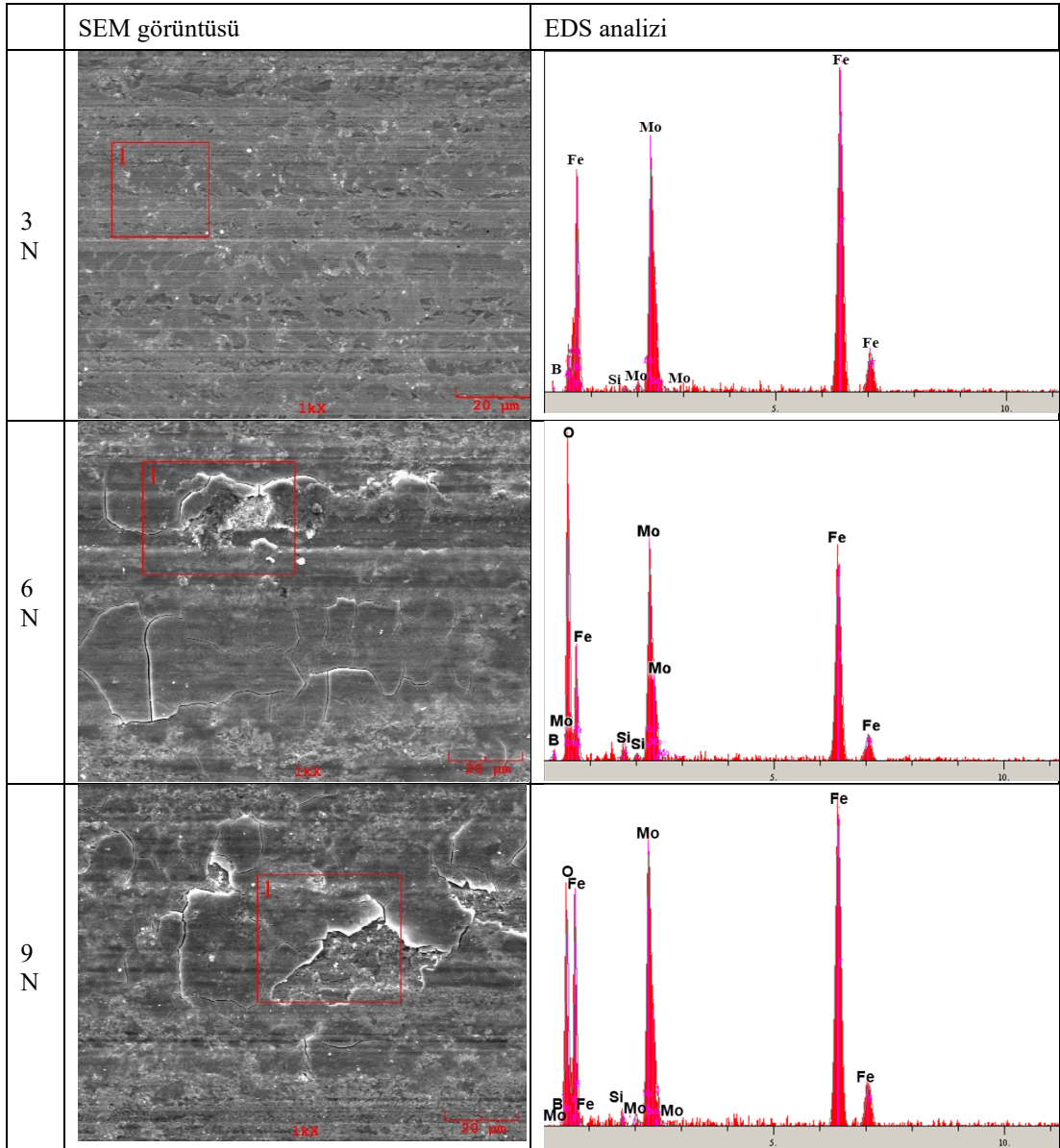
miktarının artmasıyla oksidasyonun arttığına kanıttır. Yüken artışı sıcaklık etkisi ile oksijenle reaksiyonu arttıran bir unsur olmaktadır.



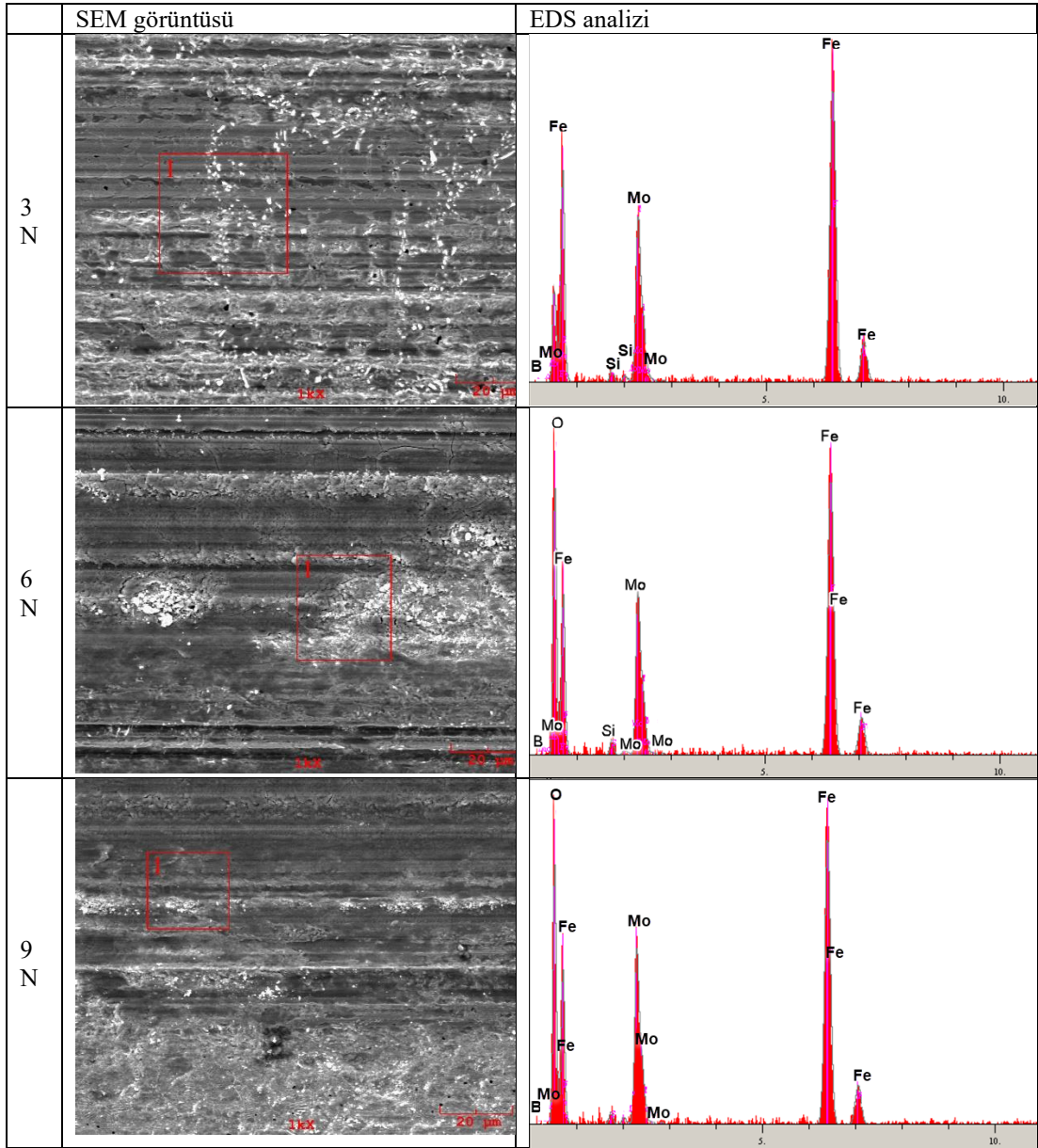
Şekil 5.11. Üretilen sert dolgu kaplamaların aşınma testi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 5.11.'de gösterilen kaplamaların 3 N, 6 N ve 9 N yük altındaki aşınma testi sonrası SEM görüntülerinde, genel olarak yapıya abrazif aşınma mekanizmasının hakim olduğu, yer yer ise adhesiv aşınmanın görüldüğü anlaşılmaktadır. En düşük molibden oranına sahip $Fe_{43}B_5Mo_2$ bileşimi için SEM görüntüleri incelendiğinde, 3 N yük altında yapıya adhesiv aşınma ile birlikte abrazif aşınmanın da görüldüğü, aşınma yükü arttığında ise yapı içerisinde bulunan nispeten daha yumuşak olan bölgelerin plastik deformasyona uğrayarak aşınma izlerinin belirginleşmesiyle yorulma aşınmasının bir kanıtı olan mikro çatlakların oluştuğu görülmektedir. Bileşim içerisindeki molibden oranı arttıkça abrazif aşınma oranı da artmaktadır. Abrazif aşınma, yapıdaki ana matris ve oluşan sert fazlar arasındaki aşınma izlerine sebep olmaktadır. Şekil 5.16.'da gösterilmiş olan kaplamalara ait aşınma oranlarının da desteklediği gibi, bu sonuca bağlı olarak aşınma yükü arttıkça aşınma oranı da artmaktadır.

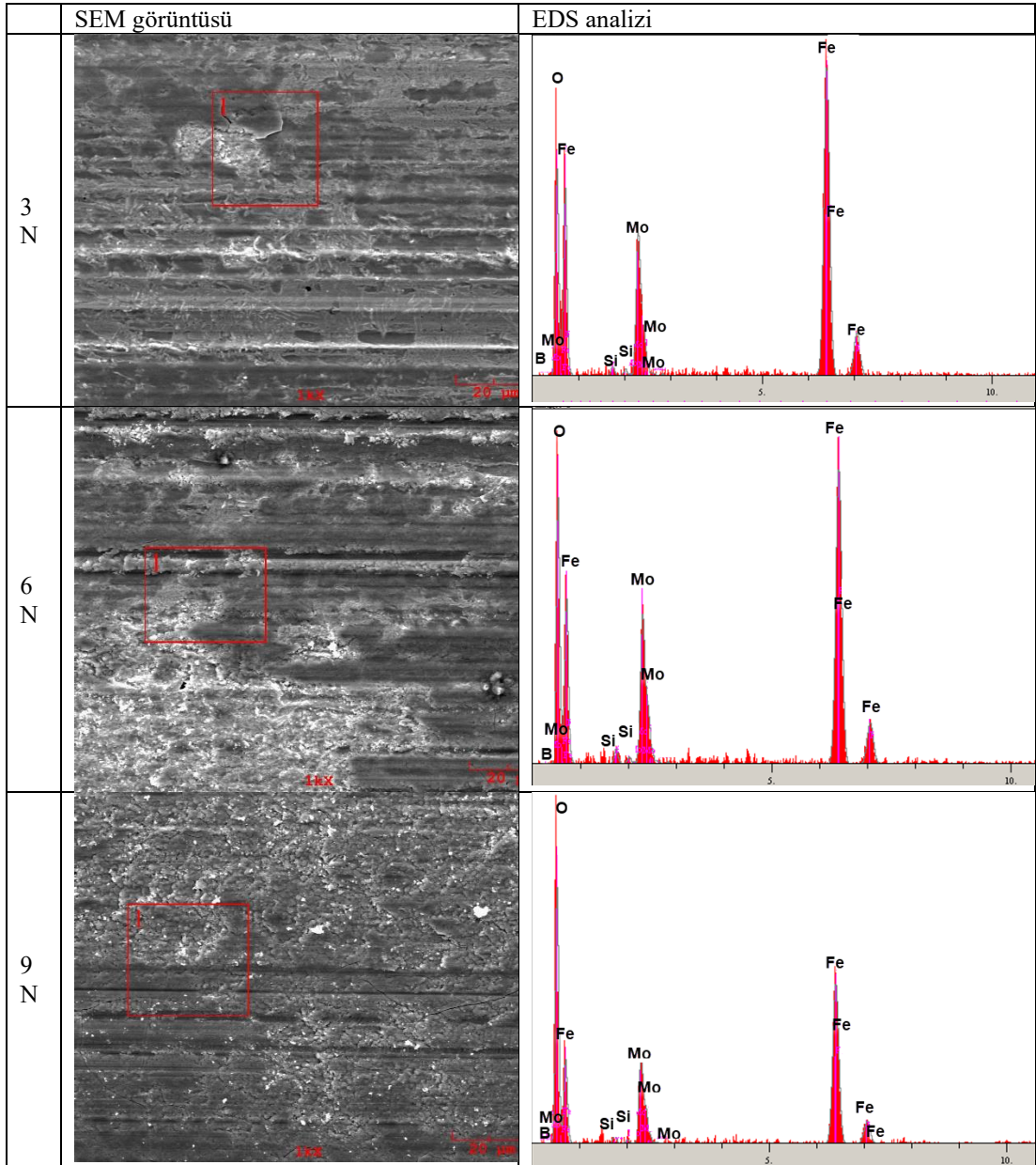
Aşınma testi sırasında, sürtünmeden kaynaklı oluşan aşınma ürünlerinin oksitlenmesiyle malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşur. Malzeme yüzeyi ve Al_2O_3 aşındırıcı bilye arasındaki sürtünmeye bağlı olarak ısı artışı olur ve yüzeyde oluşan oksit tabakası, ısı artışına bağlı olarak parçalanmaya başlar. Oluşan oksit tabakası malzeme yüzeyini aşınmaya karşı korurken, parçalanmaya başladığında ise koruyucu etkisi azalır. SEM görüntülerinde görülmekte olan beyaz bölgeler bahsedilen oksitlenmiş bölgeleri temsil etmektedir. Bu bölgelerden alınmış olan Şekil 5.12.-5.15.'de gösterilen EDS sonuçları da oksijen varlığını destekler niteliktedir. Sonuç olarak üretilmiş olan sert dolgu kaplamalarına abrazif aşınma, adhesiv aşınma, oksidatif aşınma ve yorulma aşınma mekanizmalarının hakim olduğu görülmektedir.



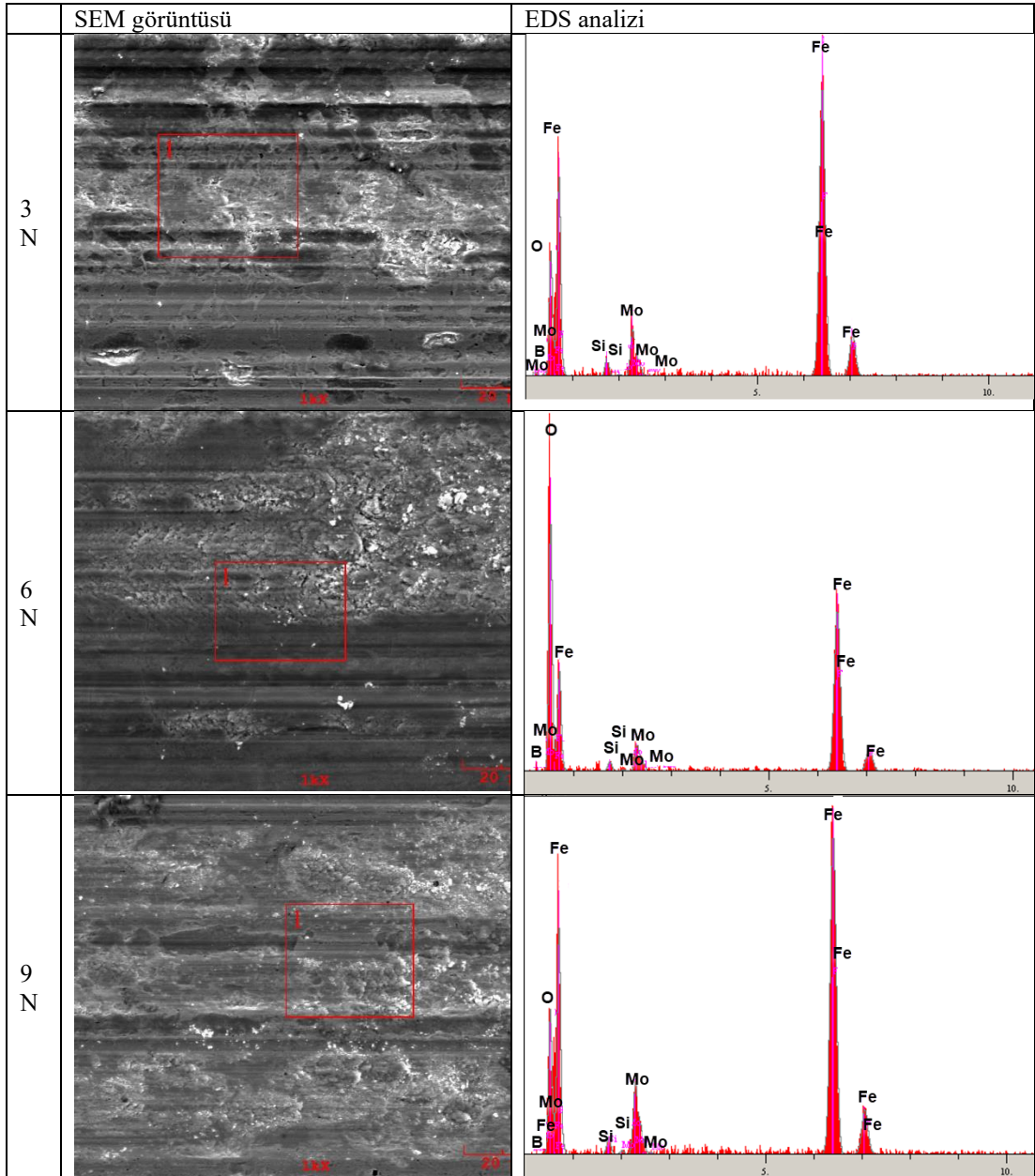
Şekil 5.12. Fe₄₃B₅Mo₂ kaplamasına ait aşınma sonrası EDS analizi sonuçları



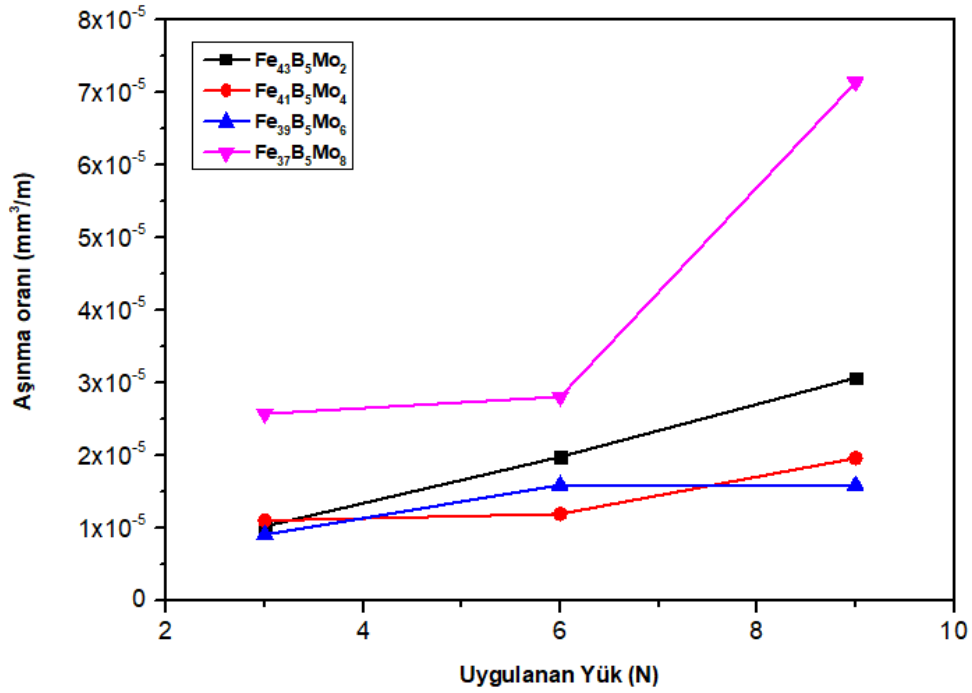
Şekil 5.13. $\text{Fe}_{41}\text{B}_5\text{Mo}_4$ kaplamasına ait aşınma sonrası EDS analizi sonuçları



Şekil 5.14. $\text{Fe}_{39}\text{B}_5\text{Mo}_6$ kaplamasına ait aşınma sonrası EDS analizi sonuçları



Şekil 5.15. $Fe_{37}B_5Mo_8$ kaplamasına ait aşınma sonrası EDS analizi sonuçları



Şekil 5.16. Üretilen sert dolgu kaplamalarının aşınma oranı sonuçları

Şekil 5.16.'da gösterilmiş olan üretilen kaplamalara ait aşınma oranları incelendiğinde, grafiğin doğrusal olarak değişmediği görülmektedir. En yüksek molibden oranına sahip Fe₃₇B₅Mo₈ bileşimi en yüksek aşınma oranına sahiptir. Şekil 5.11'de görülebileceği gibi, en yüksek molibden oranına sahip Fe₃₇B₅Mo₈ bileşimi için hakim olan mekanizma abrazif aşınma olduğundan ve bu mekanizmada kopan parçalar da aşınmaya dahildir. Bu sebeple ilgili bileşimin aşınma oranının en yüksek olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.3.'de gösterilmiş olan üretilen kaplamalara ait mikroyapılar incelendiğinde, yapı içerisindeki tanelerin Mo eklenmesiyle birlikte daha ince hale geldiği görülmektedir. Mo içeriği arttıkça, daha fazla ağ benzeri morfolojik sert fazlar oluşmaktadır. Bundan dolayı, kaplamaların aşınma oranı azalmakta ve aşınma direnci artmakta, ancak mikro sertliği azalmaktadır [56]. Çalışma kapsamında üretilen kaplamalar kompozit karakterde bir yapı sergilediğinden yapıya etkin olan aşınma mekanizmaları sürekli değişmektedir. Bu sebeple grafik doğrusallıktan sapar ve dalgalanmalar meydana gelir.

Kaplamaların içerdikleri molibden miktarına göre aşınma oranı kıyaslandığında ise, en yüksek molibden oranına sahip Fe₃₇B₅Mo₈ bileşimi dışında, genel olarak molibden

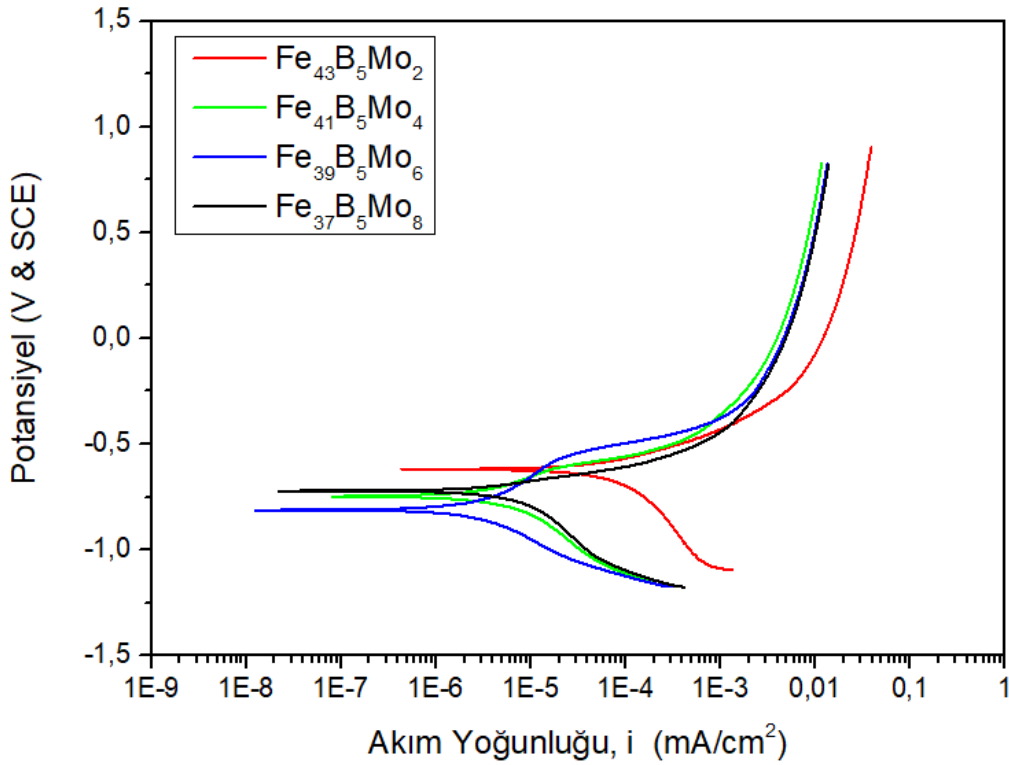
oranı arttıkça aşınma oranının azaldığı görülmektedir. Yapı içerisinde molibden miktarının artması, aşınma direnci yüksek borür fazların oluşumunu destekler. Bu fazların oranı yapı içerisinde arttıkça, aşınma oranı azalmaktadır. Kılınç ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma [37], bu sonucu destekler niteliktedir.

5.5. Korozyon Testleri

Tezin bu bölümde sert dolgu kaplamaların korozif özelliklerinin araştırılması amacıyla uygulanan korozyon testlerine ait sonuçlar üzerinde durulmuştur. Elde edilen kaplamalara atmosfer koşullarında gerçekleştirilen potansiyodinamik polarizasyon testi, Gamry Instruments marka Interface 1010E model elektrokimyasal test ünitesine bağlı üç elektrot yöntemi ile çalışan yatay hücre kullanılarak 0,5 M NaCl çözeltisi içerisinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Potansiyel-Akım yoğunluğu polarizasyon eğrileri (tafel eğrileri) yorumlanıp, korozyon potansiyeli (E_{kor}), akım yoğunluğu (I_{kor}), anodik eğim (β_a) ve katodik eğim (β_k) değerleri belirlenmiştir. Korozyon testi sonrası, kaplamaların yüzey SEM görüntüleri alınarak korozyon davranışları incelenmiştir.

Şekil 5.17’de kaplamalara uygulanan korozyon testi sonrası elde edilen tafel eğrisi verilmiştir. Tafel eğrilerinde görülen korozyon potansiyel değerlerinin, kaplama bileşiminde değişen molibden oranına göre doğrusal bir değişim göstermediği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte en düşük molibden içeriğine sahip $Fe_{43}B_5Mo_2$ esaslı alaşımın en yüksek korozyon potansiyeline sahip olduğu, en düşük korozyon potansiyeline sahip alaşımın ise $Fe_{39}B_5Mo_6$ esaslı sert dolgu kaplamaya ait olduğu görülmektedir. Literatürde molibdenin çeliğin korozyon davranışına etkileri üzerine yapılan çalışmalarda çeşitli uyumsuzlukların olduğu görülmektedir. Örneğin Hazza ve Dahshan tarafından [57] yapılan çalışmada paslanmaz çelik içerisine bulunan krom ve nikel bağli olarak korozyon direncini azalttığı ve molibdenin etkisinin belirsiz olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan Ha ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada östenitik paslanmaz çelik içerisine ilave edilen molibdenin pasif film direncini ve dolayısıyla güçlü asitlerde bile korozyon karşı direncini artırdığı rapor edilmiştir [58]. Tablo 5.1.’de verilen Tafel eğrilerinden elde edilen Tafel polarizasyon test verilerinin

görülmektedir. Galvele'e göre akım yoğunluğu değerlerinin malzemenin korozyon potansiyeli hakkında daha doğru sonuçlar verebileceği belirtilmiştir [17,58]. Fakat Tablo 5.1'de verilen akım yoğunluğu değerlerinin de kaplama bileşimde değişen molibden miktarına göre doğrusal bir değişim göstermediği anlaşılmaktadır. Şekil 5.17.'de gösterilmiş olan Tafel eğrilerinden de görülebileceği gibi, örtü bileşimindeki molibden oranının değişimi korozyon direncinde değişiklikler meydana getirmiştir. Tablo 5.1.'de verilen tafel polarizasyon test verilerine göre bileşimlere ait i_{kor} değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek korozyon direncine sahip bileşimin $Fe_{39}B_5Mo_6$ olduğu ve sonrasında ise bu sıralamanın $Fe_{41}B_5Mo_4$, $Fe_{37}B_5Mo_8$, $Fe_{43}B_5Mo_2$ ile devam ettiği görülmektedir.



Şekil 5.17. Sert dolgu kaplamalara ait tafel eğrileri

Esasen bu durum sert dolgu kaplamaların mikroyapısal gelişimi ile açıklanabilir. Sert yüzey alaşımlanmış kaplamalar mikroyapısal olarak kompozit yapı sergilediğinden korozyon davranışları karmaşıklık gösterebilmektedir [41]. Kompozit yapı içerisinde var olan her faz, korozyon direncine olumlu veya olumsuz yönde etki edebileceğinden

hem yapı içerisindeki fazların korozyon direncine katkısı, hem de yapının bütün olarak incelenmesi korozyon direncinin yorumlanması açısından önem arz etmektedir.

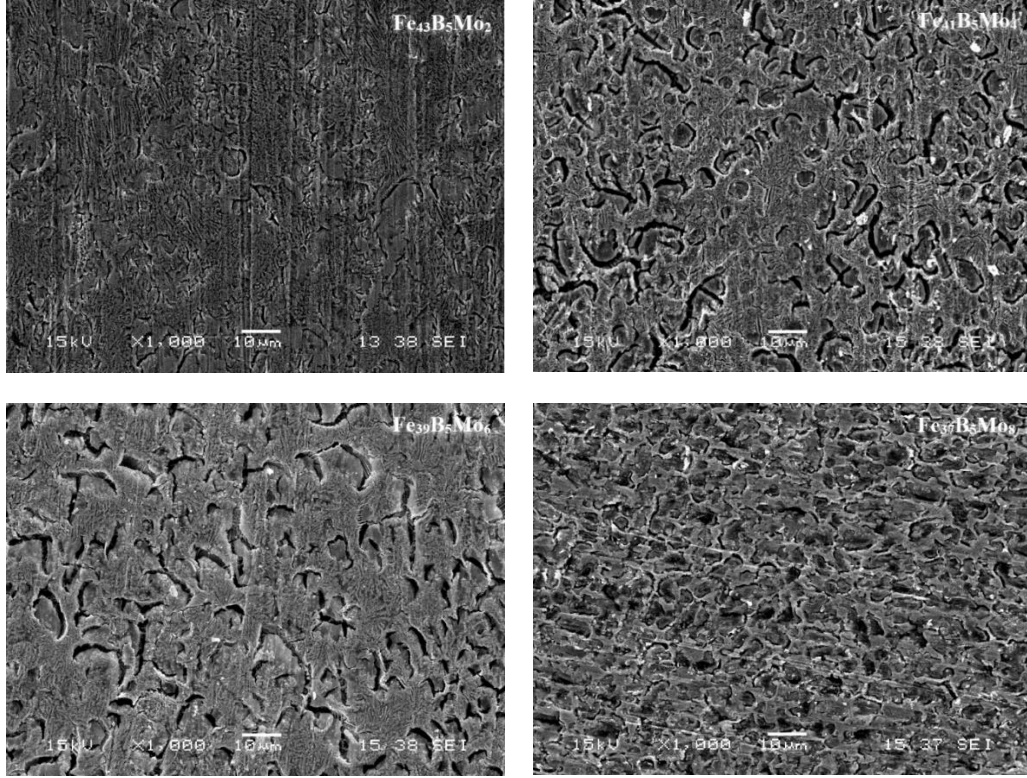
Tablo 5.1. Sert dolgu kaplamalara ait Tafel polarizasyon test verileri

Elektrot	E_{kor} (mV/SCE)	I_{kor} (μ A/cm ²)	β_a (mV/dec)	β_k (mV/dec)
Fe₄₃B₅Mo₂	-614,312	17,249	148,9	339,6
Fe₄₁B₅Mo₄	-689,354	3,489	93,6	300,7
Fe₃₉B₅Mo₆	-814,819	2,644	280,1	233,8
Fe₃₇B₅Mo₈	-725,791	6,880	106,5	337,1

Kaplamalar içerisinde en düşük molibden oranına sahip Fe₄₃B₅Mo₂ esaslı sert dolgu kaplamanın mikroyapısal olarak α -Fe+(FeMo)₂B fazından oluştuğu mikroyapısal incelemeler kısmında belirtilmiştir. Molibdenin genel olarak yüzeyde korozyona dirençli bir pasif oksit film tabakası oluşturabileceği bilinmektedir [58,59]. Bu sebeple en düşük molibden oranına sahip Fe₄₃B₅Mo₂ bileşiminde yapı içerisinde yüzeyde pasif film oluşturup korozyon direncini arttırabilecek oranda molibden olmadığından en düşük korozyon direncine sahiptir [61].

Çalışma kapsamında üretilen sert dolgu kaplamalarda, Mo içeriğinin artmasıyla akım yoğunluğu değerleri önce azalır sonra artar. Bunun sebebi NaCl çözeltisinde yapılan korozyon testlerinde, Cl metal iyonu ile reaksiyona girebilen ve çözünür klorür oluşturabilen kaplamanın yüzeyinde adsorbe edilmesidir. Bu işlem kaplamanın yüzeyini kırabilir ve yüzeyde korozyon oluşmasına sebep olabilir. Yapıya Mo'in eklenmesi pasivasyon olgusuna yol açabileceğinden kaplamanın korozyon direncini de iyileştirebilir [48]. Fakat artan molibden miktarı ile mikroyapı içerisinde yer alan yeni fazlar mikroyapının daha kompleks ve çok fazlı kompozit bir hal almasına neden olmakta ve korozyon için mikro ölçekte yeni yüzeylerin açılmasına sebep olmaktadır. Oluşan bu yüzeyler korozyon için daha aktif bölgeler olup Grabke ve arkadaşlarının dediği gibi klorürün bu bölgelere penetre olması sonucu korozyonu hızlandıracağı düşünülmektedir [17,61] Bu sebeple en yüksek molibden içeriğine sahip Fe₃₇B₅Mo₈ esaslı sert dolgu kaplamanın korozyon direnci düşük çıkmaktadır. Bu durum Wang ve arkadaşlarını tarafından yapılan [63] molibdenin düşük alaşımlı çelik üzerindeki etkilerini inceledikleri benzer bir çalışmada bildirilmiştir. Wang ve arkadaşları düşük

alaşımli çelik üzerinde yaptıkları çalışmada artan molibden miktarının çeliğin korozyon direncini önce iyileştirdiği sonra kötü yönde etkilediği rapor etmişlerdir. Bir diğer yaklaşım olarak, yapıya belirli bir miktar Mo eklendiğinde, kaplamanın yüzeyinde Cl'i engelleyen bir pasivasyon filmi oluşturarak korozyon direncinde artış meydana gelir. Üretilen sert dolgu kaplamalara yapılan MAP analizleri (Şekil 5.4.-Şekil 5.7.) incelendiğinde, molibden oranının artmasıyla birlikte yapı içerisinde dağılımının değiştiği, en yüksek molibden oranına sahip $Fe_{37}B_5Mo_8$ bileşiminde Mo elementinin genel olarak tane sınırlarında biriktiği görülmektedir. Böyle düzensiz bir dağılım, kaplamanın korozyon direncini azaltabilmektedir [63].



Şekil 5.18. Sert dolgu kaplamalara ait korozyon testi sonrası SEM görüntüleri

Şekil 5.18.'de sert dolgu kaplamalara ait korozyon sonrası SEM görüntüleri görülmektedir. Yapıda yer yer görülen çukurlar, çukurcuk veya oyuklanma korozyonun varlığını işaret etmektedir. Artan molibden miktarı sonucu oluşan çok fazlı kompozit yapının çukurcuk korozyonu oluşumunu desteklediği ve korozyonu hızlandırdığı düşünülmektedir. Bu sebeple korozyon testi sonucu elektrot örtü bileşiminde artan molibden miktarı ile korozyon potansiyeli veya akım yoğunluğunda

lineer bir değişim olmadığı tespit edilmiş ve kaplamanın korozyon direnci önce artan molibden miktarı ile artmış fakat molibden miktarındaki artışın devam etmesi ile korozyon direncinde bir miktar azalma gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada dört farklı bileşime sahip Fe-Mo-B esaslı sert dolgu elektrotları başarıyla üretilerek AISI 1010 çelik altlık üzerine elektrik ark kaynak yöntemi kullanılarak kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sert yüzey alaşımlanan kaplamaların mikroyapısal incelemeleri, sertlik testleri, aşınma testleri ve korozyon testleri yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir;

- Sert yüzey alaşımlanan kaplamalar altlık malzeme ile uyumlu bir yapı sergilemiş ve metalürjik olarak kaplamalar altlık malzemeye bağlanmıştır.
- Fe-Mo-B bazlı kaplamaların genel olarak mikroyapısının dendritik olduğu ve bileşim içeriğindeki molibden oranı arttıkça α -Fe'in tane boyutu azaldığı tespit edilmiştir.
- Kaplama mikroyapılarında α -Fe, τ_1 (Fe_3B), τ_2 (Mo_2FeB_2) ve Fe_2B fazlarını içerdiği ve bileşim içeriğindeki molibden miktarı arttıkça yapıdaki τ_1 (Fe_3B) ve Fe_2B fazlarının azaldığı, τ_2 (Mo_2FeB_2) fazının ise arttığı tespit edilmiştir.
- En düşük molibden oranına sahip $\text{Fe}_{43}\text{B}_5\text{Mo}_2$ bileşiminin sertliği en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bileşim içerisindeki molibdenin artışı ile birlikte yapıda τ_1 fazı oluşmaya başlamış ve sertlikte düşüş meydana gelmiştir. Mo oranının at. olarak %12'ye artırılmasından sonra blok fazların oluşmasıyla birlikte sertlikte artış meydana gelmiştir.
- En düşük molibden oranına sahip $\text{Fe}_{43}\text{B}_5\text{Mo}_2$ bileşimine ait sürtünme katsayısının en düşük olduğu tespit edilmiştir. Artan molibden oranı ile birlikte ötektik yapıda parçalanmalar meydana gelmesi ve ardından blok yapılı fazların oluşması sürtünme katsayısına negatif yönde etki etmiştir.
- Aşınma testi sonrası alınan SEM görüntülerinde, genel olarak yapıya abrazif aşınma mekanizmasının hakim olduğu, yer yer ise adhesif aşınma ve yorulma

aşınmasının görüldüğü anlaşılmıştır. Aşınma yükü arttıkça yapı içerisinde bulunan nispeten daha yumuşak olan bölgeler plastik deformasyona uğramıştır.

- Korozyon testi sonuçları, bileşim içeriğindeki molibden ve molibdenin oluşturduğu fazların korozyon potansiyelini azalttığını göstermiştir. Molibden oranı at. %16'ya kadar, artan molibden oranı ile akım yoğunluğunun azaldığından korozyon direncinin arttığını, %16'ya ulaştığında ise ilgili bileşimde molibdenin tane sınırlarında yoğunlaşmasından ve düzensiz dağılmasından dolayı korozyon direncinin azaldığını göstermiştir.
- Korozyon akım yoğunluğu verilerine göre, en yüksek korozyon direncine sahip bileşim $Fe_{39}B_5Mo_6$ bileşimidir.
- Korozyon sonrası alınan SEM görüntülerinde yapıda yer yer görülen çukurlar oyuklanma korozyonu varlığını ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] E. Abakay, S. Sen, and U. Sen, "Wear properties of the surface alloyed AISI 1020 steel with Fe(15-x)MoxB5 by TIG welding technique," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 125, no. 2, pp. 587–589, 2014, doi: 10.12693/APhysPolA.125.587.
- [2] N. Yüksel and S. Şahin, "Wear behavior – hardness – microstructure relation of Fe – Cr – C and Fe – Cr – C – B based hardfacing alloys," vol. 58, pp. 491–498, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.032.
- [3] E. Keleşoğlu, "Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri," .
- [4] E. Abakay, B. Kilinc, S. Sen, and U. Sen, "Wear properties of TIG surface alloyed steel with 50%Fe-10%W-40%B alloy," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 127, no. 4, pp. 957–960, 2015, doi: 10.12693/APhysPolA.127.957.
- [5] B. KILINÇ, "Fe-M-B Esaslı Sert Yüzey Alaşımların Çelik Yüzeyinde TIG Kaynak Yöntemiyle Oluşturulması ve Özelliklerinin İncelenmesi," 2018.
- [6] "Hardfacing Application Areas." <https://www.ifexport.com/wp-content/uploads/2020/06/BLOG-Hardfacing-What-is-it-and-how-to-do-it-right.jpg>.
- [7] S. Takalapally, S. Kumar, S. H. Pusuluri, and M. Palle, "A critical review on surface coatings for engineering materials," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 5, pp. 80–85, 2016.
- [8] M. F. Buchely, J. C. Gutierrez, L. M. León, and A. Toro, "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys," *Wear*, vol. 259, no. 1–6, pp. 52–61, 2005, doi: 10.1016/j.wear.2005.03.002.
- [9] M. Roy, *Surface engineering for enhanced performance against wear*, vol. 9783709101. 2013.
- [10] S. Grainger and J. Blunt, *Engineering coatings - design and application - second edition*, 2nd ed. 1998.
- [11] W. Wu and L. T. Wu, "The wear behavior between hardfacing materials," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 27, no. 11, pp. 3639–3648, 1996, doi: 10.1007/BF02595455.

- [12] Y. Yavuz, “Fe-Cr-W-B-C Esaslı Sert Dolgu Örtülü Elektrot Üretimi ve Karakterizasyonu,” 2018.
- [13] K. Gurumoorthy, M. Kamaraj, K. P. Rao, and S. Venugopal, “Microstructure and wear characteristics of nickel based hardfacing alloys deposited by plasma transferred arc welding,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 8, pp. 975–980, 2006, doi: 10.1179/174328406X100734.
- [14] U. Sen and S. Sen, “Characterization of Tungsten boride coating realized on AISI D2 steel Ugur,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 554, pp. 213–217, 2007, doi: 10.4028/0-87849-439-1.213.
- [15] D. J. Kotecki and J. S. Ogborn, “Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys,” *Weld. J. (Miami, Fla)*, vol. 74, no. 8, pp. 269–278, 1995.
- [16] S. D. R. İ, “Cavcar, M.M., Sert Dolgu Alaşımları Ürün Seçimi ve Uygulama, Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş., 1-31.”
- [17] E. Kocaman, “Fe-Cr-Ti-B Esaslı İn-Situ Kompozit Sert Yüzey Alaşımlama Elektrotlarının Geliştirilmesi,” 2020.
- [18] “www.kjellberg.de/en/provesses-manual-metal-arc-welding.html.”, Erişim Tarihi: 12.06.2021
- [19] “www.kjellberg.de/en/processes-tig-welding.html.”, Erişim Tarihi: 12.06.2021
- [20] İ. B. Eryürek, “Gazaltı Ark Kaynağı,” 2007.
- [21] “www.kjellberg.de/en/processes-gas-shielded-metal-arc-welding.html.”, Erişim Tarihi: 12.06.2021
- [22] D. J. Kotecki, J. S. Ogborn, S. D. R. İ, and ASM International, “Cavcar, M.M., Sert Dolgu Alaşımları Ürün Seçimi ve Uygulama, Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş., 1-31,” 2019.
- [23] D. Liu, R. Liu, Y. Wei, Y. Ma, and K. Zhu, “Microstructure and wear properties of Fe-15Cr-2.5Ti-2C-xB wt.% hardfacing alloys,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 271, pp. 253–259, 2013, doi: 10.1016/j.apsusc.2013.01.169.
- [24] Z. E. Erkmen, *Metalurjistler İçin Faz Diyagramları*. 2007.
- [25] Y. Hayashi and T. Sugeno, “Nature of boron in α -iron,” *Acta Metall.*, vol. 18, no. 6, pp. 693–697, 1970, doi: 10.1016/0001-6160(70)90099-4.
- [26] Gökhan BAŞMAN, “AISI 316 L TİPİ PASLANMAZ ÇELİĞİN TERMOKİMYASAL DİFÜZYON YÖNTEMİ İLE BORLANMASINDA, BORLAMA BANYOSU BİLEŞENLERİNİN BORÜR TABAKASI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ,” *İstanbul Tek. Üniversitesi*, 2010.

- [27] Yasin Yılmaz, “Fe-Nb-B Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi,” *Sak. Üniversitesi*, 2009.
- [28] Mehmet TABUR, “BOR KARBÜR KAPLANMIŞ AISI 8620 VE HARDOX 400 ÇELİKLERİNİN ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ,” pp. 1–192, 2008.
- [29] Mehmet TABUR and Mahmut İZCİLER, “Farklı Şartlarda Borlanan Hardox 400 Çeliğinin Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi Some Mechanical Properties Examination of Hardox 400 Steel Boronized Under Different Conditions,” vol. 9, no. 3, pp. 15–22, 2019.
- [30] S. H. Oh, J. S. Kim, C. S. Park, and B. J. Lee, “Second nearest-neighbor modified embedded-atom method interatomic potentials for the Mo-M (M = Al, Co, Cr, Fe, Ni, Ti) binary alloy systems,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 194, p. 110473, 2021, doi: 10.1016/j.commatsci.2021.110473.
- [31] V. B. Rajkumar and K. C. Hari Kumar, “Thermodynamic modeling of the Fe-Mo system coupled with experiments and ab initio calculations,” *J. Alloys Compd.*, vol. 611, no. 14, pp. 303–312, 2014, doi: 10.1016/j.jallcom.2014.05.030.
- [32] V. A. Baheti and R. Raju, “Interdiffusion study of the topologically closed packed μ phase and the phase boundary compositions in the Fe–Mo system,” *Intermetallics*, vol. 113, no. July, p. 106586, 2019, doi: 10.1016/j.intermet.2019.106586.
- [33] V. T. Witusiewicz, A. A. Bondar, U. Hecht, O. Stryzhyboroda, S. V. Utkin, and V. Z. Kublii, “Thermodynamic re-modelling of the ternary B–Fe–Mo system based on novel experimental data,” *J. Alloys Compd.*, vol. 854, p. 157173, 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.157173.
- [34] S. V. Utkin, A. A. Bondar, V. Z. Kublii, L. M. Kapitanchuk, and I. B. Tikhonova, “Solidus Surface of the Mo–Fe–B System,” *Powder Metall. Met. Ceram.*, vol. 59, no. 1–2, pp. 89–105, 2020, doi: 10.1007/s11106-020-00141-w.
- [35] E. Abakay, S. Sen, and U. Sen, “Properties of the surface alloyed AISI 1020 steel with Fe(15-x15) MoxB5 alloy,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 125, no. 2, pp. 584–586, 2014, doi: 10.12693/APhysPolA.125.584.
- [36] E. Abakay, S. Sen, and U. Sen, “Wear properties of the surface alloyed AISI 1020 steel with vanadium and boron by TIG Welding Technique,” in *Acta Physica Polonica A*, Feb. 2014, vol. 125, no. 2, pp. 251–253, doi: 10.12693/APhysPolA.125.251.
- [37] B. Kılınç, E. Kocaman, M. Durmaz, E. Abakay, U. Şen, and Ş. Şen, “The Effect of Molybdenum Addition on the Microstructure and Wear Behaviours of Fe-Mo-B Based Alloyed Steel,” no. January 2019, 2018.

- [38] X. H. Wang, F. Han, X. M. Liu, S. Y. Qu, and Z. D. Zou, "Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 489, no. 1–2, pp. 193–200, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.12.020.
- [39] J. Jin, J. Sun, and G. Wang, "Effect of Mo content on microstructure and Wear resistance of Mo-Fe-B claddings," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 81, no. February, pp. 233–241, 2019, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2019.02.028.
- [40] A. A. Sorour, R. R. Chromik, and M. Brochu, "Tribology of a Fe-Cr-B-Based Alloy Coating Fabricated by a Controlled Short-Circuit MIG Welding Process," *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 2, no. 4, pp. 223–233, 2013, doi: 10.1007/s13632-013-0081-9.
- [41] E. KOCAMAN, B. KILINÇ, Ş. ŞEN, and U. ŞEN, "Krom içeriğinin Fe(18-x)Cr_xB₂ (X=3,4,5) sert dolgu elektrotunda mikroyapı, aşınma ve korozyon davranışı üzerindeki etkisi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, vol. 1, pp. 177–190, 2020, doi: 10.17341/gazimmfd.689230.
- [42] J. H. Kim, K. H. Ko, S. D. Noh, G. G. Kim, and S. J. Kim, "The effect of boron on the abrasive wear behavior of austenitic Fe-based hardfacing alloys," *Wear*, vol. 267, no. 9–10, pp. 1415–1419, 2009, doi: 10.1016/j.wear.2009.03.017.
- [43] J. Niu *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of B modified Ti-Fe alloy manufactured by casting, forging and laser melting deposition," *Compos. Part B Eng.*, vol. 216, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108854.
- [44] B. Du, "FABRICATION OF IN SITU Fe-Ti-B COMPOSITE COATING BY LASER CLADDING," vol. 20, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1142/S0218625X13500340.
- [45] X. Ou Yang, F. Yin, J. Hu, M. Zhao, and Y. Liu, "Experimental investigation and thermodynamic calculation of the B-Fe-Mo ternary system," *Calphad Comput. Coupling Phase Diagrams Thermochem.*, vol. 59, no. October, pp. 189–198, 2017, doi: 10.1016/j.calphad.2017.10.007.
- [46] A.F. Guillermet, "The Fe-Mo (Iron-Molybdenum) system, Bull. Alloy Phase Diagrams. 3," pp. 359–367, 1982, doi: 10.1007/BF02869315.
- [47] I. S. Cho, K. D. Savelyev, and V. M. Golod, "Development of thermophysical calculator for stainless steel casting alloys by using CALPHAD approach," *China Foundry*, vol. 14, no. 5, pp. 353–358, 2017, doi: 10.1007/s41230-017-7144-5.
- [48] X. Ouyang, G. Chen, F. Yin, Y. Liu, and M. Zhao, "Effect of Molybdenum on the Microstructures of As-Cast Fe-B Alloys and Their Corrosion Resistance in Molten Zinc," *Corrosion*, vol. 73, no. 8, pp. 942–952, Apr. 2017, doi: 10.5006/2280.

- [49] V. Raghavan, "Phase Diagrams of Ternary Iron Alloys," *ASM Int. Delhi Indian Inst. Technol.*, 1992.
- [50] J. MIETTINEN, V. V. VISURI, and T. FABRITIUS, "Thermodynamic description of ternary Fe-B-X systems. Part 8: Fe-B-Mo, with extension to quaternary Fe-B-Cr-Mo system," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 66, no. 1, pp. 281–295, 2021, doi: 10.24425/amm.2021.134786.
- [51] X. W. N. Liu, C. Chen, I. Chang, P. Zhou, "Compositional Dependence of Phase Selection in CoCrCu0.1FeMoNi-Based High-Entropy Alloys," pp. 1–12, 2018, doi: 10.3390/ma11081290.
- [52] S. A. A. Dilawary, A. Motallebzadeh, R. Akhter, E. Atar, and H. Cimenoglu, "Enhanced wear resistance of Stellite 12 by Mo addition and LSM," *Surf. Eng.*, vol. 34, no. 8, pp. 569–576, Aug. 2018, doi: 10.1080/02670844.2017.1393164.
- [53] J. Jin, J. Sun, and G. Wang, "Effect of Mo content on microstructure and Wear resistance of Mo-Fe-B claddings," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 81, pp. 233–241, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.02.028>.
- [54] Z. Chen, S. Miao, L. Kong, X. Wei, F. Zhang, and H. Yu, "Effect of Mo Concentration on the Microstructure Evolution and Properties of High Boron Cast Steel Zhiguo," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/ma13040975.
- [55] J. Gramajo, A. Gualco, and H. Svoboda, "Study of the welding procedure in nanostructured super-hard Fe- (Cr, Mo, W) - (C, B) hardfacing," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 88, no. January, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105178.
- [56] S. Balaguru and M. Gupta, "Hardfacing studies of Ni alloys: A critical review," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 10, pp. 1210–1242, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.12.026.
- [57] M. I. Hazza and M. E. El-Dahshan, "The effect of molybdenum on the corrosion behaviour of some steel alloys," *Desalination*, vol. 95, no. 2, pp. 199–209, 1994, doi: 10.1016/0011-9164(94)00014-X.
- [58] H. Y. Ha, T. H. Lee, J. H. Bae, and D. W. Chun, "Molybdenum effects on pitting corrosion resistance of FeCrMnMoNC austenitic stainless steels," *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 8, pp. 1–13, 2018, doi: 10.3390/met8080653.
- [59] A. Szewczyk-nykiel, "The influence of molibdenum on corrosion resistance of sintered austenitic stainless steels," *Influ. molibdenum Corros. Resist. sintered austenitic Stainl. steels*, vol. 2015, no. January 2015, pp. 131–142, 2015, doi: 10.4467/2353737XCT.15.344.4865.

- [60] S. Bin Shin, S. J. Song, Y. W. Shin, J. G. Kim, B. J. Park, and Y. C. Suh, "Effect of molybdenum on the corrosion of low alloy steels in synthetic seawater," *Mater. Trans.*, vol. 57, no. 12, pp. 2116–2121, 2016, doi: 10.2320/matertrans.M2016222.
- [61] C. P. Jiang, Y. Z. Xing, F. Y. Zhang, and J. M. Hao, "Microstructure and corrosion resistance of Fe/Mo composite amorphous coatings prepared by air plasma spraying," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 19, no. 7, pp. 657–662, 2012, doi: 10.1007/s12613-012-0609-z.
- [62] H. J. Grabke, E. Reese, and M. Spiegel, "The effects of chlorides, hydrogen chloride, and sulfur dioxide in the oxidation of steels below deposits," *Corros. Sci.*, vol. 37, no. 7, pp. 1023–1043, 1995, doi: 10.1016/0010-938X(95)00011-8.
- [63] K. Wang, B. Chang, J. Chen, H. Fu, Y. Lin, and Y. Lei, "Effect of molybdenum on the microstructures and properties of stainless steel coatings by laser cladding," *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 10, 2017, doi: 10.3390/app7101065.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gizem Nur KURHAN

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2018
Lise	İzmit Lisesi	2013

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2020-Halen	Asaş Alüminyum A.Ş.	Satış Uzmanı
2019-2020	Acar Teknolojik Sistemler LTD. ŞTİ.	Satış Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Fe-Mo-B Esaslı Elektrotların Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi – EFİS Uluslararası Öğrenci Sempozyumu
2. Fe-Mo-B Esaslı Elektrotların Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi – BOREN (Proje)

HOBİLER

Kitap okumak, yürüyüş yapmak, film izlemek