



**GRAFEN TAKVİYELİ ORTA ENTROPİLİ
ALAŞIMLARIN BOR KAPLANABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nazmiye Nur KÜÇÜKELÇİ

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Ersan MERTGENÇ

İkinci Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Rıza KARA

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM

DALI

Ocak 2024

Bu tez çalışması 22.FEN.BİL.26 numaralı proje ile AKÜ-BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GRAFEN TAKVİYELİ ORTA ENTROPİLİ ALAŞIMLARIN BOR
KAPLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Nazmiye Nur KÜÇÜKELÇİ

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Ersan MERTGENÇ

İkinci Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Rıza KARA

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Ocak 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Nazmiye Nur KÜÇÜKELÇİ tarafından hazırlanan “Nano Partiküllü Grafen Takviyeli Orta Entropili Alaşımların Borla Kaplanabilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 23 / 01 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ersan MERTGENÇ

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Rıza KARA

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi İsmail YILDIZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar MYO

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ersan MERTGENÇ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon MYO

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rıza KARA
Üniversite adı, Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Melih ÖZÇATAL
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇOLAK
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

23 / 01 / 2024

Nazmiye Nur KÜÇÜKELÇİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GRAFEN TAKVİYELİ ORTA ENTROPİLİ ALAŞIMLARIN BOR KAPLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Nazmiye Nur KÜÇÜKELÇİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ersan MERTGENÇ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Rıza KARA

Bu araştırmada, iki farklı üretim yöntemi kullanılarak, farklı oranlarda nano partikül yapılı grafen ilavesi yapılarak Fe/Co alaşımları üretilmiştir. Elde edilen alaşımların bor kaplanabilirliği ve partikül takviyesinin kaplama tabakası kalınlığına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada takviye elemanı olarak da nano boyutta (3nm) grafen tercih edilmiştir. Takviye oranı değişken durum olarak düşünülmüştür. Takviyesiz, % 2 ve % 4 grafen takviyeli alaşımların üretiminde hem döküm yöntemi hem de toz metalürjisi yöntemi kullanılarak numuneler üretilmiştir. Üretimi yapılan alaşımlar kutu borlama yöntemi ile 800 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile borla kaplanmıştır. Çalışma da üretilen numunelerin karakterizasyon işlemleri tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X ışını (EDS), X-ışını difraktometresi (XRD) ve Vickers mikro sertlik yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.

Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların XRD analiz sonuçlarında CoFe, CoFe₂O₄ ve Fe₃O₄ fazlarına ait pikler tespit edilirken, toz metalürji ile üretilen alaşımlarda ise CoFe, CoFe₂O₄, Fe₃O₄, FeO ve C fazlarına ait pikler belirlenmiştir. Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların sertlikleri 264 HV_{0,05} ile 314 HV_{0,05} arasında değişirken, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen alaşımların sertlik değerleri ise 258 HV_{0,05} ile 270 HV_{0,05} aralığındadır. Borür tabaka kalınlığı döküm yöntemi ile üretilen alaşımlarda 22 µm ile 30 µm arasında, toz metalürjisi ile üretilen alaşımlarda ise 23 µm ile 34 µm arasında

değişmektedir. Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların XRD analizlerinde FeB, Fe₂B, CoB ve Co₂B fazlarına ait pikler gözlemlenmiştir. Toz metalurji yöntemi ile üretilen alaşımların XRD analiz sonuçlarında ise FeB, Fe₂B ve CoB fazlarına ait pikler tespit edilmiştir. Bor kaplama işlem sonrasında numunelerin yüzey sertliklerinin belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Döküm yöntemi ile üretilerek bor kaplanan alaşımların yüzey sertlikleri 1918 HV_{0,05} ile 2020 HV_{0,05} aralığında iken toz metalurji ile üretilerek borlanan alaşımlardaki yüzey sertliklerinin ise 2042 HV_{0,05} ile 2124 HV_{0,05} arasında değiştiği tespit edilmiştir.

2024, x + 44

Anahtar Kelimeler: Alaşım, Kutu Borlama, Grafen, Ergitme döküm, Toz Metalurjisi

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF BORON COATABILITY OF GRAPHENE REINFORCED MEDIUM ENTROPY ALLOYS

Nazmiye Nur KÜÇÜKELÇİ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Nanoscience and Nanotechnology

Supervisor: Asst. Dr. Ersan MERTGENÇ

Co-Supervisor: Asst. Dr. Rıza KARA

In this study, Fe/Co alloys were produced by adding nanoparticle structured graphene at different rates using two different production methods. The boron coatability of the obtained alloys and the effect of particle reinforcement on the coating layer thickness were investigated. Nano-sized (3nm) graphene was preferred as the reinforcement element in the study. The reinforcement rate is considered as a variable state. Samples were produced using both the casting method and the powder metallurgy method in the production of unreinforced, 2% and 4% graphene reinforced alloys. The produced alloys were coated with boron using the box boronizing method at 800 °C for 2 hours. Characterization of the samples produced in the study was carried out by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive X-ray (EDS), X-ray diffractometer (XRD) and Vickers microhardness methods.

While peaks belonging to CoFe, CoFe₂O₄ and Fe₃O₄ phases were detected in the XRD analysis results of the alloys produced by the casting method, peaks belonging to the CoFe, CoFe₂O₄, Fe₃O₄, FeO and C phases were determined in the alloys produced by powder metallurgy. While the hardness of the alloys produced by the casting method varies between 264 HV_{0,05} and 314 HV_{0,05}, the hardness values of the alloys produced by the powder metallurgy method are between 258 HV_{0,05} and 270 HV_{0,05}. Boride layer thickness varies between 22 µm and 30 µm in alloys produced by casting method, and

between 23 μm and 34 μm in alloys produced by powder metallurgy. Peaks belonging to FeB, Fe₂B, CoB and Co₂B phases were observed in the XRD analyzes of the alloys produced by the casting method. In the XRD analysis results of the alloys produced by the powder metallurgy method, peaks belonging to the FeB, Fe₂B and CoB phases were detected. It was observed that the surface hardness of the samples increased significantly after the boron coating process. It has been determined that the surface hardness of alloys produced by casting and boron coated is between 1918 HV_{0,05} and 2020 HV_{0,05}, while the surface hardness of alloys produced by powder metallurgy and boronized varies between 2042 HV_{0,05} and 2124 HV_{0,05}.

2024, x + 44

Keywords: Alloy, Pack Boriding, Graphene, Melting Casting, Powder Metallurgy

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezim için danışmalık görevini üstlenen, emeğini ve bilgi birikimini benden sakınmayan sevgili hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ersan MERTGENÇ'e ve diğer Danışmanım olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Rıza KARA'ya teşekkür ederim. Tez yazım aşamasında tüm sorularıma cevap veren ve manevi desteği ile yanımda olan sevgili kuzenim Gizem OĞUZ'a teşekkür ederim. Son olarak bu araştırma boyunca ve aynı zamanda tüm hayatım boyunca yanımda hep var olan sevgili anneme, babama ve kardeşim Burak'a çok teşekkür ederim.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne 22.FEN.BİL.26 numaralı proje desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Nazmiye Nur KÜÇÜKELÇİ
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	III
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTAMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Alaşımlar, Özellikleri ve Üretim Yöntemleri	3
2.1.1 Yüksek Entropili Alaşımlar.....	4
2.1.2 Düşük Entropili Alaşımlar	6
2.1.3 Orta Entropili Alaşımlar.....	6
2.1.4 Demir Esaslı Alaşımlar	8
2.1.5 Kobalt Alaşımları	9
2.1.6 Grafen.....	10
2.2 Yüzey İşlemleri ve Kaplamalar	12
2.2.1 Metallerin Kaplanması	12
2.2.1.1 Elektrolitik Kaplama (Elektro Kaplama).....	12
2.2.1.2 Galvanizleme	14
2.2.1.3 Metal Püskürtme (Thermal Spraying)	14
2.2.1.4 Katodik Koruma	14
2.2.1.5 Isıya Duyarlı Kaplama.....	15
2.2.2 Termokimyasal Kaplamalar	15
2.2.2.1 Borlama	15
2.2.2.1.1 Kutu Borlama.....	16
2.2.2.2 KARBÜRLEME	18
2.2.2.3 Karbonitrürleme.....	19
2.2.2.4 Nitrürleme.....	19
3. MATERYAL ve METOT	21

3.1 Alaşımlarda Kullanılan Tozlar ve Karışım Oranları.....	21
3.2 Numunelerin Hazırlanması ve Üretim Yöntemleri.....	22
3.3 Ergitme Sistemi ve Kalıp Tasarımı.....	23
3.4 Kutu Borlama Yöntemi.....	24
3.5 Numunelerinin Hazırlanması	24
4. DENEYSEL BULGULAR.....	26
4.1 Alaşımların Karakterizasyonu	26
4.2 Kaplamaların Karakterizasyonu.....	31
4.3 Sertlik Analizi	35
5. SONUÇLAR.....	37
6. KAYNAKLAR.....	39

SİMGELER VE KISALTAMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	Alüminyum
Co	Kobalt
Fe	Demir
B	Bor
Mg	Magnezyum
Cu	Bakır
Ni	Nikel
G	Grafen
Mo	Molibden
C	Karbon

Kısaltmalar

DM	Döküm Metodu
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HEA (YEA)	Yüksek Entropili Alaşım
LEA (DEA)	Düşük Entropili Alaşım
MEA (OEA)	Orta Entropili Alaşım
SiC	Silicon Carbide
TIG	Tungsten Inert Gas
T/M	Toz Metalurjisi
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Üçlü bir alaşım sisteminde ΔS_{mix} gösterimi	5
Şekil 2.2 Karışımlarına göre entropili alaşımlar	5
Şekil 2.3 C45 çeliğine uygulanan kutu borlamaya sıcaklık ve zamanın etkisi	8
Şekil 2.4 Grafen, karbon atomlarının altıgen ve 2 boyutlu karbon allotropu.....	11
Şekil 2.5 Bakır Kaplama İçin Elektrokaplama Düzenegi.....	13
Şekil 2.6 Kutu borlama yönteminin şematik görüntüsü.....	17
Şekil 2.6 Nitrürlenme prosesi.....	20
Şekil 3.1 Çalışmanın akış şeması	21
Şekil 3.2 Hassas terazi.....	22
Şekil 3.3 Ergitme döküm işleminde a) Bakır kalıp b) Üretim sistemi resmi	23
Şekil 3.4 Üretilen numuneler a) Toz metalurjisi b) TIG ergitme yatay, c) TIG ergitme dikey	24
Şekil 4.1 Döküm yöntemiyle üretilmiş a) Takviyesiz, b) % 2 grafen takviyeli, c) % 4 grafen takviyeli alaşımların SEM resimleri d) EDS analizi (% ağırlıkça)	26
Şekil 4.2 Döküm yöntemi ile üretilmiş takviyesiz, %2 ve %4 oranlarında grafen takviyeli FeCo alaşımına ait XRD analizi.	27
Şekil 4.3 Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş a) Takviyesiz, b) % 2 grafen takviyeli c) % 4 grafen takviyeli alaşımların SEM resimleri d) EDS analizi (% ağırlıkça).....	28
Şekil 4.4 Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş takviyesiz, % 2 ve % 4 oranlarında grafen takviyeli FeCo alaşımına ait XRD analizi.	29
Şekil 4.5 Alaşımların mikrosertlik grafiği.....	30
Şekil 4.6 Döküm yöntemiyle üretilerek borlanmış a) Takviyesiz, b) % 2 grafen takviyeli c) % 4 grafen takviyeli alaşımların SEM görüntüleri.....	31
Şekil 4.7 Toz metalurjisi yöntemiyle üretilerek borlanmış a) Takviyesiz b) % 2 grafen takviyeli c) % 4 grafen takviyeli alaşımların SEM görüntüleri.....	32
Şekil 4.8 Borür tabaka kalınlıkları	33
Şekil 4.9 Döküm yöntemiyle üretilerek borlanmış alaşımların XRD analizleri.	34
Şekil 4.10 Toz metalurjisi yöntemiyle üretilerek borlanmış alaşımların XRD analizi ..	34
Şekil 4.11 Borlanmış alaşımların sertlik değerleri.	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Mühendislik malzemelerinin karışım entropisine göre sınıflandırılması.....	7
Çizelge 2.2 Kobalt alaşımlarının örnekleri ve kullanım alanları.....	9
Çizelge 2.3 Grafen ait özellikler.....	12
Çizelge 2.4 Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı madde özellikleri.....	18
Çizelge 3.1 Üretilen alaşımların karışım oranları ve numune kodları.	22



1. GİRİŞ

Yüksek entropili alaşımlar (YEA'lar) en az beş temel elementten oluşur. Bu tür alaşımlar son zamanlarda yüksek performanslı yapısal malzemelerin geliştirilmesinde büyük ilgi görmüştür. Orta entropili alaşımlar (OEA), CoCrNi gibi üç eş atomlu elementten oluşan alaşımlar olarak tanımlanır. OEA'ların üstün mekanik özelliklere, yüksek termodinamik kararlılığa sahip olduğu ve ayrıca kriyojenik sıcaklıklarda mükemmel kırılma dayanıklılığına sahip oldukları ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Son zamanlarda, YEA'lardaki beş veya daha fazla elemente kıyasla yalnızca üç element içeren CoCrNi orta entropi alaşımlarının (OEA), mukavemet, süneklik ve tokluk açısından yüksek entropi alaşımlardan daha üstün değerler sergilediği rapor edilmektedir (Cao vd. 2018).

Bor elementi, periyodik tablonun 3A grubunda yer alan 'B' simgesi ile gösterilen, atom numarası 5 ve atom ağırlığı 10,81 olan geçiş elementi olarak bilinir ve yerini alır. Bor atomunun yarıçapı 0,098 nanometre (nm) ve ergime sıcaklığı 2092 santigrat derece olarak kabul edilir. Bor elementinin yoğunluğu $2,33 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, değerlik elektron sayısı "3" ve iyon yarıçapı 0,023 nm'dir. Bor elementi doğada boratlar halinde bulunmaktadır ve serbest halde bulunmamaktadır. Farklı ametal ve metal elementlerle yaptığı bileşiklerde üstün özellikler sergilemesinden dolayı birçok endüstri kolunda yoğun bir şekilde talep görmesini sağlamaktadır. Saf bor elektriksel iletkenlik özellikleri sergilerken, borun oluşturduğu bileşiklerinin bu özellikleri oldukça düşüktür. En az elmas kadar sertlik gösteren bor bileşikleri, optik özellikler açısından da elmasa benzemektedir (Topuz 2016).

Borlama tanım olarak demir ve alaşımlarına, demir dışı alaşımlara ve metallere, intermetaliklere uygulanabilen bir termokimyasal yüzey modifikasyon tekniği olarak tanımlanmaktadır. Borlama işleminin diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre bazı avantajları vardır. Örneğin bor tabakası düşük sürtünme ile yüksek sertlik katsayısına sahip olduğundan ötürü farklı aşınma mekanizmalarına karşı daha dirençlidir (Gençer vd. 2011).

Metaller yalnız başına kullanıldıkları gibi endüstriyel olarak bazı ihtiyaçları karşılamak

adına alaşım yapılarak da kullanılabilirler. Alaşım ise iki veya daha fazla sayıda metalin bir araya getirilmesiyle ya da biri metal olan diğeri metal olmayan malzemelerin bir arada eritilmesi ile oluşan yeni malzemeye denir. Alaşımlar oluştukları malzemelerin özelliklerini taşıyabildikleri gibi bu malzemelerin özelliklerini hiç taşıyamayabilirler de (Karaöz 2008).

Bu çalışmada özellikle daha az element kompozisyonuna sahip yüksek özellikli orta entropili alaşımların iki farklı yöntem ile üretilebilirliğı, aynı zamanda element kompozisyonuna nano partikül grafen takviyesinin etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda üretilen numunelerin bor kaplanabilirliğine grafen takviye oranının etkisi araştırılmıştır.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Alaşımlar, Özellikleri ve Üretim Yöntemleri

Mühendislik malzemelerinin önemli bir kısmını manyetik malzemeler oluşturur. Bunlar; seramikler, metalik alaşımlar intermetaliklerdir. Ticari manyetik malzemeler arasındaki en yüksek doygunluğa sahip kabul edilen FeCo intermetalik bileşiği esaslı alaşımlardır. Çok gevrek bir malzeme olduğu için FeCo alaşımlarının üretilmeleri oldukça zordur. Sıcak deformasyon uygulaması ile şekil alabilmeleri için yaklaşık 900 °C üzerinde işlem görmesi gerekir. FeCo alaşımlarının soğuk haddeleme ile şekillendirilebilirlikleri oldukça zordur. Çünkü soğuk şekillendirme sırasında deformasyon sertleşmesi göstermesi nedeniyle sertliklerindeki aşırı artış neticesinde gevrek özellikler sergilemesini sağlamakta ve buda çatlak oluşumunun artışı tetiklemektedir. Aynı zamanda küçük boyutlu ve karmaşık yapıları olan FeCo parçaların üretiminde döküm yöntemi uygun bir üretim yöntemi olarak kabul edilmez. Toz metalurjisi (T/M) yöntemlerinden olan toz enjeksiyon kalıplama yöntemi özellikle karmaşık geometrilili yapıya sahip ve ölçü hassasiyeti yüksek malzemelerin üretiminde ön plana çıkmaktadır. Yöntem toz metalurji yöntemi olmasına rağmen toz metalurjisindeki geleneksel sinterleme ve presleme ile üretilen malzemelere kıyasla toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen malzemelerin yoğunluklarının yüksek olmasından dolayı daha iyi mekanik özellikler sergilemektedirler.

Toz enjeksiyon kalıplama yöntemi talaşlı imalat ve döküm yöntemlerine nazaran da daha ekonomiktir. Çünkü bu yöntemle üretimde ince tanesi yapısı, yüksek yüzey hassasiyetine ve homojen kimyasal kompozisyona sahip malzemelerin üretilmesi imkânı sunmakta, buda karmaşık şekilli parçaların istenilen ölçülerde ve son geometrisine sahip üretimi sağlamaktadır. Günümüzde de toz enjeksiyon kalıplama yöntemiyle farklı alaşımlardan parça üretimine yönelik çalışmalar yapılmakta ve başarılı sonuçlara ulaşılmaktadır (Özgün ve Gülsoy 2020).

2.1.1 Yüksek Entropili Alaşımlar

Entropi kelime anlamıyla; fizikte bir sistemin mekanik işe çevrilemeyecek olan ısı enerjisini ifade etmektedir. Sistemdeki düzensizlik ve rastgelelik olarak tanımlanır. Yüksek entropili alaşımların (YEA), mikro yapıları ile ayarlanabilir özellikleri dikkat çeken önemli özelliklerindendir. Bunlar en az 5 elementin eşit ya da eşite yakın oranlarda katı eriyik durumunda oluşturduğu alaşımlar olarak tanımlanmaktadır. Fazla sayıda elementin birbirine eşit denecek yakın oranlarda alaşım içinde bulunmasıyla birlikte alaşım yüksek entropiye sahip olmuş olur. Bu sebeple intermetalik fazların oluşumunu zorlaştırarak bunun yerine basit, hacim merkezli kübik (HMK), yüzey merkezli kübik (YMK) ya da her ikisinin de birlikte olduğu katı eriyiklerin oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Ekşi 2006, Erdoğan vd. 2019).

İntermetalik faz oluşumunu zorlaştırmanın sağlayacağı faydayı açıklayacak olursak; intermetalik faz: iki ana bileşen arasındaki (saf metaller) ara bileşimde oluşan bir fazdır. Bu oluşan fazların sahip oldukları kristal yapılar birincil bileşene göre farklılık göstermektedir. Bu ara fazlardan bazıları intermetalik bileşik olarak da adlandırılan sabit bileşime sahiptirler. FeCO intermetalik alaşımı, yumuşak manyetik alaşım grubuna girmektedir. Yumuşak manyetik alaşımlar bir elektrik akımı tarafından üretilen akıyı arttırmak için kullanılır.

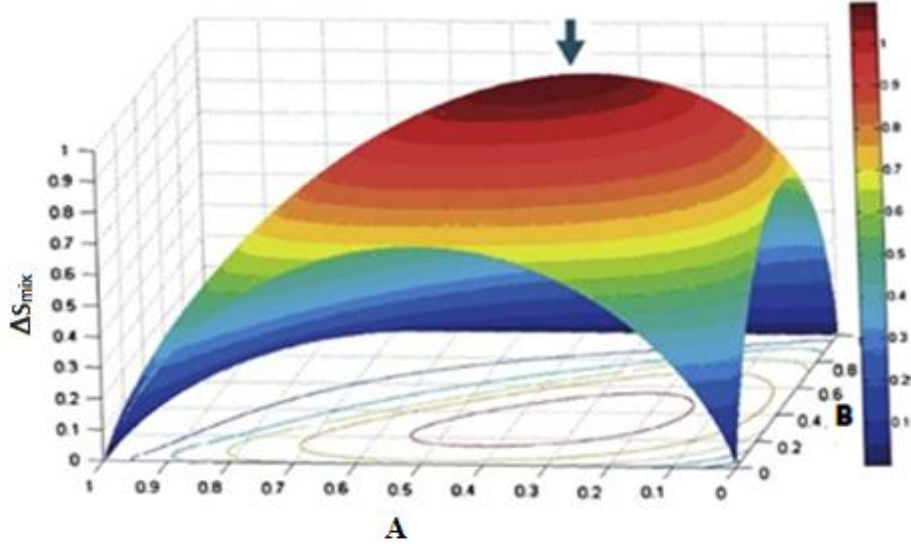
YEA'lar kendini oluşturan elamanlara kıyasla çok daha üstün özelliklere sahiptirler, çünkü çoklu temel alaşım elamanına sahiptirler. Bu malzemelerin sahip oldukları yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek korozyon direnci, yüksek aşınma direnci, yüksek dayanım ve sertlik ile yapı karlılıklarının da yüksek olması en önemli özelliklerindendir. Yüksek entropili alaşımların üretim aşamasında farklı üretim yöntemleri kullanılabilir. Bunlardan bazıları katı döküm ve toz metalürjisidir. Süreç genel olarak 3 grupta incelenir. Bunlar toz metalürjik yöntem, ergitme döküm ve biriktirme teknikleri olarak listelenebilir (Erdoğan 2019). Entropili alaşımların sınıflandırılması için önemli olan entropi karışım hesabı denklemi eşitlik 1'e göre hesaplanmaktadır.

$$\Delta S_{mix} = R \ln N \quad (2.1)$$

R: Gaz sabiti (8.31 J/K mol)

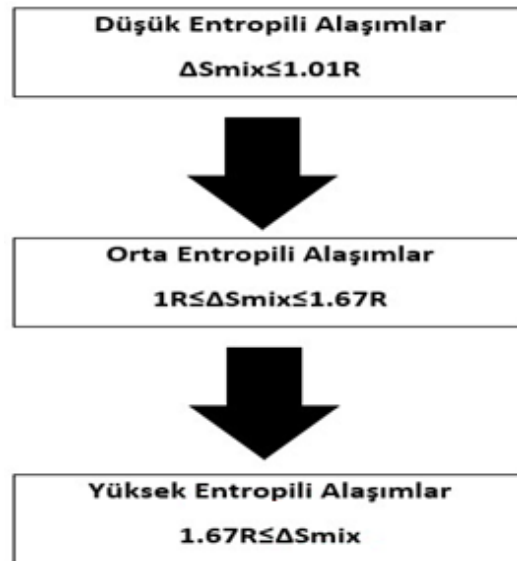
N: Bileşen sayısı, ile tespit edilmektedir.

Yüksek entropili alaşımlar için ΔS_{mix} değeri 1.6 R'den büyük olmalıdır. R gaz sabitidir ve saf metaller için bu değer 2R olmalıdır.



Şekil 2.1 Üçlü bir alaşım sisteminde ΔS_{mix} gösterimi (Zhang vd. 2008).

Karışım entropilerine yani ΔS_{mix} oranına bağlı olarak entropili alaşımlar Şekil 2.2’de sınıflandırılmıştır.



Şekil 2.2 Karışımlarına göre entropili alaşımlar (Karaca 2018).

Malzeme biliminin kurallarını kullanarak tasarım yapmak ve yeni malzemeler araştırmak, bulmak yüksek entropili alaşım (YEA) geliştirmek için en basit yoldur. Bu yol atomik bağı, ergime noktası, valans elektronu, kristal yapı, elektronegativite, yoğunluk, farklı atomlar arası etkileşim, elastik modül, termodinamik, kinetik, mikroyapı ve özellik ilişkileri gibi element özelliklerin yüksek entropili alaşımların etkisini daha iyi anlamayı gerektirir. Birçok Yüksek entropili alaşım araştırmacısı istenen özelliklerde yüksek entropili alaşımları geliştirmek için bu tarz ilkeleri kullanırlar (Kurtulmuş 2018).

2.1.2 Düşük Entropili Alaşımlar

Alaşımları yüksek entropili alaşım (HEA), orta entropili alaşım (MEA) ve düşük entropili alaşım (LEA) olarak ayırmak mümkündür. R bir gaz sabitidir. 1.0 R den daha küçük alaşımlar düşük entropili alaşım olarak kabul edilir (Moon vd. 2020).

NiCo, NiCr, NiCoCr düşük entropili, CoCrNi orta entropili ve CoCrFeNi yüksek entropili alaşımlarındaki difüzyonlar ile literatürde var olan raporlanmış veriler arasındaki kapsamlı karşılaştırma, düşük entropili alaşımlardaki Co, Cr ve Fe difüzyonlarının diğer iki alaşım türündekilerden daha büyük olduğunu göstermektedir. Co-Cr-Fe-Ni yüksek entropili alaşımlardaki difüzyon, mutlak sıcaklık kullanıldığında durgun bir yapıya sahip olmayabilir (Chen vd. 2022).

2.1.3 Orta Entropili Alaşımlar

Orta entropili alaşımlar yüksek entropili alaşımlar gibi yeni ortaya çıkan bir sınıftır. Bu sınıf geleneksel alaşımlardan daha üstündür. Orta entropili alaşımlar genellikle maksimum konfigürasyon entropisine ulaşmak için türlerin rastgele dağıtıldığı tek fazlı katı bir çözümdür. Bu katı çözüm yalnızca nominal olarak rastgeledir. Diğer taraftan oluşum entalpisi baskın olabilir. Genel olarak serbest enerjide bulunurlar. Bileşim ve mikro yapı arasındaki korelasyonu oldukça belirsizdir (Wang vd. 2022).

Orta entropili alaşımlar azaltılmış konfigürasyon entropileri sayesinde mükemmel mikro yapılara ve özelliklere sahiptir. Yüksek entropili alaşımlara oranla daha iyi özelliklere

sahip oldukları kanıtlanmıştır. Orta entropili alaşımlar 1R ve 1.5R arasında kabul edilebilir. ($1 R < \Delta S_{mix} < 1,5 R$) Eşit atomlu olmayan orta entropili alaşımların tasarımında farklı alaşım bileşimlerine bağlı olarak farklı fazlar elde edilebilir (Zhou vd. 2018).

Yüksek entropili alaşımlar gibi karışım entropileri birbirine yakındır. Orta entropili alaşımlar, karışım entropisi olarak da nitelendirilen ve ΔS_{mix} ile gösterilen, kendilerine özgü bir konfigürasyonel entropisine sahiptirler. Geleneksel alaşımların genelde düşük entropi değerleri vardır. Hastelloy, monel, inconel gibi süper alaşımlar ise orta entropili alaşımlara örnektir (Çakır 2023). Bazı mühendislik malzemeleri karışım entropisine göre sınıflandırılmıştır bu sınıflandırma çizelgesi aşağıda gösterilmiştir.

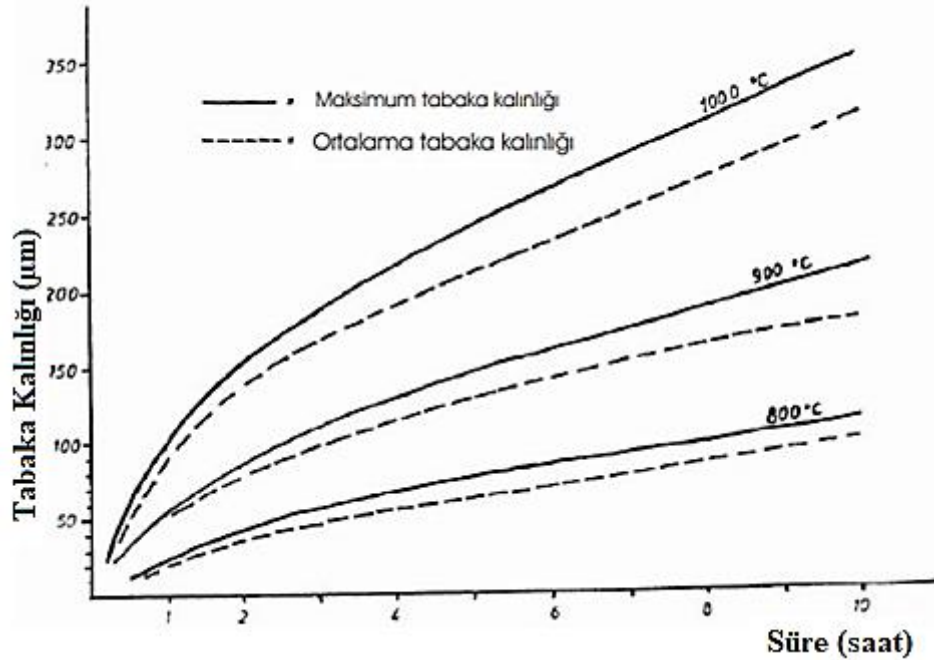
Çizelge 2.1 Mühendislik malzemelerinin karışım entropisine göre sınıflandırılması (Şahin 2021).

Sistem	Alaşımlar	Ergiyik halde ΔS_{krs}
Düşük alaşımlı çelik	4340	0,22R
Paslanmaz çelik	304	0,96R
	316	1,15R
Yüksek hız takım çeliği	M2	0,73R
Mg alaşımı	AZ91D	0,35R
Cu alaşımı	7-3 pirinç	0,61R
Al alaşımı	2024	0,29R
	7075	0,43R
Ni bazlı süperalaşım	İnconel 718	1,31R
	Hastelloy X	1,37R
	Stellite 6	1,13R

Çalışma da üretim esnasında Demir (Fe) ve Kobalt (Co) kullanılacak olup takviye elemanı olarak da nano yapılı halde bulunacak olan toz grafen ilave edilecektir.

2.1.4 Demir Esaslı Alaşımlar

Demir esaslı alaşımlarının borlanması esnasında kaplama, genellikle demir borürlerin oluşumu ve büyümesi durumu ile olmaktadır. Demirin termokimyasal şekilde borürlenmesi esnasında, kolonsal halde küme oluşturan borür kristallerinin FeB/Fe₂B ve Fe₂B/FeB faz geçiş bölgesinde dişe benzer morfolojiler oluşur. Oluşan kolonsal borür kristalleri, borun difüzyonuna bağlı şekilde, eşdeğer boylarda olmazlarsa bile sertlik gibi bazı üstün mekanik özelliklere sahip olabilirler (Ekşi 2006). Şekil 2.3’de C 45 çeliğine uygulanan kutu borlama işleminde zaman ve sıcaklığın etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.3 C45 çeliğine uygulanan kutu borlamaya sıcaklık ve zamanın etkisi (Uluköy vd. 2006).

Süperalaşımlar; yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere genelde 8A grubu elementlerden geliştirilmiş olan alaşım türleridir. Süperalaşımlar yüksek sıcaklıklarda çalışan ve yüksek performans göstermesi gereken süper turbo yükleyicilerin ve uçak türbin motorlarının üretiminde kullanılmak için geliştirilmişlerdir. Bu alaşımlar genellikle kobalt, demir, nikel ve kromun farklı kombinasyonlarda bir araya getirilmesiyle üretilmektedir (Bahadır 2010). Süperalaşımların en önemli özellikleri 650 °C nin üzerindeki sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları (sürünme özellikleri) ve ısı korozyonu ve erozyon dirençlerinin yüksek olmasıdır (Çay vd. 2005).

2.1.5 Kobalt Alaşımları

Kobalt alaşımları, kobalt elementinin diğer metal veya metallerle birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Kobalt, doğal olarak bulunan bir metaldir ve dayanıklı, sert, mıknatıslanabilen ve yüksek sıcaklıklarda kararlı olan özelliklere sahiptir. Bu nedenle, kobalt, diğer metallerle alaşımlar oluşturarak çeşitli uygulamalarda kullanılır.

Kobalt alaşımları, birçok endüstri sektöründe kullanılan malzemelerdir. Özellikle tıp, havacılık, enerji, otomotiv ve savunma gibi alanlarda önemli rol oynar (Çay ve Ozan 2005). Bazı kobalt alaşımlarının örnekleri ve kullanım alanları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Kobalt alaşımlarının örnekleri ve kullanım alanları (Çay ve Ozan 2005).

Alaşım	Kullanım Alanları
Stellite	Kobalt, krom ve tungsten gibi metallerle yapılan stellite alaşımı aşınmaya dayanıklı ve yüksek sıcaklıkta kararlı bir malzemedir. Bu alaşım kesici takımlar, motor valfleri, rulmanlar, kaplinler gibi aşırı koşullara maruz kalan parçalar için kullanılır.
Haynes alaşımları	İçerisinde kobalt, nikel, molibden ve diğer metaller bulunan haynes alaşımları yüksek sıcaklık direnci ve korozyona dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir. Bu alaşımlar havacılık, enerji ve kimya endüstrisinde kullanılır.
MP35N	Kobalt, nikel, krom ve molibden içeren MP35N alaşımı tıbbi implantlar gibi biyomedikal uygulamalarda kullanılır. Yüksek mukavemet, korozyona dayanıklılık ve biyouyumluluk özelliklerine sahiptir.
Elgiloy	Kobalt, krom, nikel ve titanyum içeren elgiloy alaşımı, ortopedik implantlar, tel yaylar, diş telleri gibi alanlarda yay ve elastik parça olarak kullanılır. Yüksek elastik özellikleri ve biyouyumluluğu ile bilinir.
Kovar	Kobalt, nikel, molibden içeren kovar alaşımı elektronik ve telekomünikasyon endüstrisinde kullanılır. Termal genleşmeye karşı düşük bir katsayıya sahiptir bu nedenle elektronik bileşenlerin termal uyumluluğunu sağlamak için kullanılır.

Çizelgede belirtilen alaşımlar sadece bazı örneklerdir ve kobalt başka metallerle de farklı alaşımlar oluşturabilir. Kobalt alaşımları, özellikle aşınma direnci, yüksek sıcaklık, performansı, mıknatıslanabilirlik ve korozyon direnci gibi özelliklerin gerektirdiği uygulamalarda tercih edilir.

Kobalt esaslı süper alaşımlar sahip oldukları üstün mekanik özellikleri, korozyon ve oksidasyon dirençlerini kriyojenik sıcaklıklardan 1000 °C'ye varan sıcaklıklara kadar korumaları sebebiyle havacılık endüstrisi, nükleer reaktörler ve biyomedikal uygulamalar gibi yüksek dayanımın gerekli olduğu birçok ileri mühendislik uygulamalarında kullanılabilen süper alaşımların bir türüdür. Bu alaşımların tasarımları katı çözelti ve karbür güçlendirme kombinasyonları kullanılarak yüksek sıcaklıklarda mukavemet sağlamaları amacıyla dizayn edilmiştir (Girişken vd. 2022).

Kobalt bazlı süperalaşımlar, ana element maddesi olarak kobalt içerirler ve içerisinde %50 - %60 oranında kobalt vardır. Dayanım (mukavemet) ve yüksek sıcaklık durumlarında ise yüksek oksidasyon dayanımı sağlamak için %20 - %30 oranında krom, tokluk için %20 oranına kadar nikel (Ni), katı eriyik dayanımı için ise %5 - %10 oranında tungsten ve düşük miktarlarda molibden bulunmaktadır (Duran 2019).

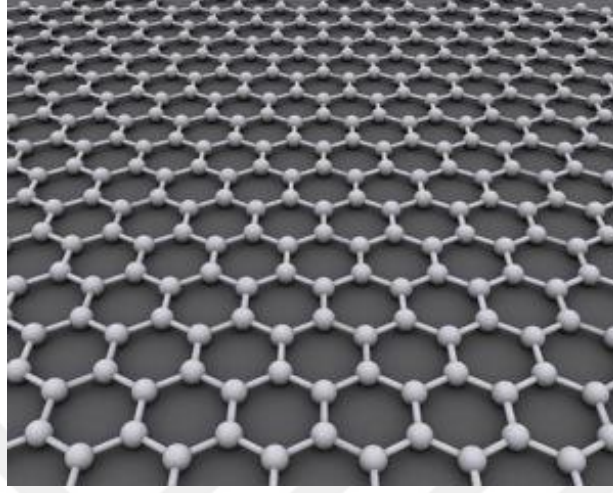
Kobalt katı-eriyik alaşımları üç gruba ayrılır:

- 1) 650 °C den 1150 °C kadar sıcaklıklarda kullanılan Haynes 188, UMCö-50 ve S-816 alaşımları,
- 2) Yaklaşık 650°C'de kullanılan bağlayıcı (fastener) alaşımlar MP-35N ve MP-159,
- 3) Aşınma dirençli Stellite6B (Çay vd. 2005).

2.1.6 Grafen

Grafen, karbon nanotüp, fulleren ve elmas gibi elementel karbonun allotroplarından biri olan grafitin iki boyutlu olan düzlemsel hali olarak kabul edilir. Karbon atomlarının altıgen şeklinde dizilmiş iki boyutlu hali, grafene birçok önem arzeden özellik sağlamaktadır. Bu önemli özelliklerden bazıları yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, sağlamlık, esneklik, kimyasal olarak düşük reaktiflik, oda sıcaklığında ferromanyetiklik

ve yüksek transparanlık gibi özellikler olarak sıralanabilir ve buna ait görünüm Şekil 2.4’de verilmiştir (Dörtoğul 2018).



Şekil 2.4 Grafen, karbon atomlarının altıgen ve 2 boyutlu karbon allotropu (Dörtoğul, 2018).

Grafen birden fazla üretim yöntemiyle üretilabilmektedir. Bunlardan bazıları şöyledir: Grafitin tabakalarının mikromekaniksel olarak ayrılması yani eksfoliasyondur. Diğer; kimyasal buhar biriktirme yöntemi ve bir diğeri ise grafen oksitin indirgenmesi olarak tanımlanabilir (Bedeloğlu vd. 2016).

2004 yılında ilk kez üretilmiş olan grafen bilindik en hafif ve en ince malzeme olmasına rağmen, çelikten çok daha kuvvetli aynı zamanda elmaştan daha sağlam bir yapıdadır. İki boyutlu halde bulunan grafen katmanları üst üste gelecek şekilde dizildiği zaman grafiti oluşturmaktadır. Grafenin kendine özgü olan termal, elektronik ve mekanik özellikleri, kompozit malzemelerin imal edilmesinde de önemli bir yere sahiptir. Grafen takviyesinin diğer kompozit malzemelere göre fazlasıyla az miktarda olması ve grafenin sahip olduğu bu farklı özellikler grafenin tercih edilme sebeplerinden birkaçı olmuştur. Grafenin, son zamanlardaki kullanım alanlarına bakıldığında, yüksek yağlayıcılık sebebiyle sürtünmeyi ve aşınmayı azalttığından dolayı tercih edilen bir malzeme olduğu görülmektedir (Kelez 2021).

Grafen şu anda laboratuvar ortamında ve bazı endüstriyel uygulamalarda araştırılmaktadır. Ancak büyük ölçekli üretim ve ticari kullanım için geliştirme ve

optimize etme çalışmaları devam etmektedir. Grafen, gelecekte birçok alanda devrim niteliğinde uygulamalara sahip olabilecek çok özel bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Çizelge 2.3’de grafene ait özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.3 Grafen ait özellikler (Kelez 2021).

Özellikler	Grafen
Kristal Kafes Yapısı	Hekzagonal
Gerçek Yoğunluk	2,25 g/cm ³
Tabaka Sayısı	Tek
Boyut	İki
Hibrit Şekli	sp ²
Safılık Derecesi	%99
Kalınlık	~1-2 nm
Termal İletkenlik	4840-5300 W/mK
Elastisite Modülü	~1 TPa

2.2 Yüzey İşlemleri ve Kaplamalar

2.2.1 Metallerin Kaplanması

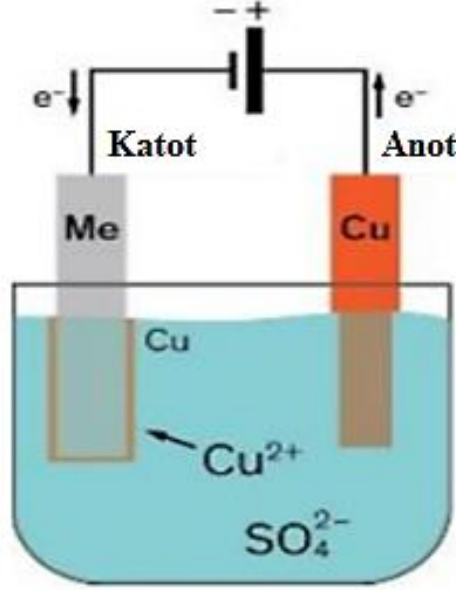
Metallerin kaplanması işlemi, bir metal yüzeyinin başka bir metal tabakasıyla kaplanması veya kaplama malzemeleri kullanılarak koruyucu bir tabaka oluşturulması anlamına gelir. Bu işlem metallerin oksidasyona, aşınmaya, korozyona ve diğer zararlı etkilere karşı korunmasını sağlar. Metallerin kaplanması çeşitli avantajlar sağlamakla beraber dayanıklılığı artırır, estetik bir görünüm kazandırır ve metalin özelliklerini iyileştirir.

Metallerin kaplanması için yaygın olarak kullanılan yöntemler şunlardır:

2.2.1.1 Elektrolitik Kaplama (Elektro Kaplama)

Bu yöntemde, kaplanacak metaller iyon formunda olan bir kaplama çözeltisine batırılır ve elektrik akımı kullanılarak metal yüzey üzerine bir kaplama tabakası oluştururlar.

Örnek olarak, altın, gümüş, nikel, bakır, krom gibi metaller elektrolitik kaplama ile kaplanabilir. Şekil 2.5’de bakır kaplama için elektrokaplama düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Bakır Kaplama İçin Elektrokaplama Düzeneği (İnt. Kyn. 1).

Bakır kaplama için elektrokaplama düzeneği yukarıdaki şekilde gösterilmiştir. Üzerine metal kaplanacak cisim güç kaynağının negatif olan kutbuna, kaplanacak malzeme ise güç kaynağının pozitif olan kutbuna bağlanır. Pozitif kutba bağlı elektroda anot denir negatif kutba bağlı elektroda ise katot adı verilir. Her iki elektrot da metal iyonlarını içeren bir çözeltiye batırılır. Yukarıdaki örnekte çözelti olarak bakır sülfat kullanılmıştır. Buradaki bakır sülfat çözeltisi pozitif yüklü olan bakır ve negatif yüklü olan sülfat iyonlarını içerir. Çözelti hem kaplama iyonlarını barındırır hem de iletken şekilde olduğu için devrenin tamamlanmasını sağlar. Güç kaynağı açıldığında ise çözeltideki pozitif yüklü bakır iyonları katottan elektron alarak nötr hale geçer ve elektrot yüzeyine kaplanmış olur. Pozitif yüklü iyonların katotta elektron alarak nötr hale geçme durumuna indirgenme denir. Anotta nötr halde bulunan bakır atomları ise elektron vererek pozitif yüklü iyonlar haline geçer ve bulunan çözeltiye karışırlar. Nötr durumdaki bakır atomlarının anotta elektron vererek pozitif yüklü iyonlar haline geçme durumuna oksitlenme denir. Anot, çözeltiye sürekli halde bakır iyonu sağladığından dolayı çözeltideki bakır iyonlarının konsantrasyonu azalmaz. Anot olarak bakır yerine kimyasal özellik açısından kararlı olan karbon, paslanmaz çelik veya platin elektrot da kullanılabilir. Bu durumda çözeltinin sürekli olarak yenilenmesi gerekir (Baydır 2020).

Bakırın oksitlenme ve indirgenme reaksiyonları aşağıda verilmiştir:



2.2.1.2 Galvanizleme

Çeliğin demir yüzeyinin çinko kaplaması ile korunması işlemidir. Çinko, çeliğin korozyona karşı dayanıklılığını artırır ve paslanma sürecini yavaşlatır. Galvanizlenecek malzemeler en az % 98 oranında çinko içeren ticari saflıkta sıvı çinko çözeltisine daldırılır. Sıcaklığı yaklaşık 454 °C de tutulmalıdır. Galvanizlenecek ürünlerin banyo sıcaklığına ulaşması için banyo içinde uygun sürede kalması gerekmektedir. Malzemeler galvaniz banyosundan yavaş yavaş geri çekilmeli ve yüzeydeki çinko fazlalıkları silkelenerek veya merkezkaç kuvvetinin etkisiyle uzaklaştırılmalıdır. Galvaniz kaplı yüzeydeki kimyasal reaksiyon durumu malzeme çinko banyosundan çıkarıldıktan sonra da devam eder. Kimyasal reaksiyonları bitirmek için gerekli olan şey ürünler galvanizden çıkar çıkmaz havada ya da suda soğutulması işlemidir (İnt. Kyn. 2).

2.2.1.3 Metal Püskürtme (Thermal Spraying)

Bu yöntemde eriyik haldeki metal kaplama malzemeleri ısı ve basınç kullanılarak yüzeye püskürtülür. Bu şekilde demir, alüminyum, nikel, bakır gibi metallerin kaplanması sağlanabilir.

2.2.1.4 Katodik Koruma

Metal yüzeylerin zararlı etkilerden korunması için bir elektrik akımı kullanılarak anot olarak seçilen bir metalin kaplama malzemesi üzerine aktarılmasıdır. Bu yöntem genellikle boruların korozyona karşı korunması için kullanılır.

2.2.1.5 Isıya Duyarlı Kaplama

Bu kaplama yöntemi (Thermal barrier coating) yüksek sıcaklıklara dayanım sağlayan seramik kaplama malzemelerinin metal yüzeylere uygulanmasıdır. Bu şekilde, metal yüzeylerin oksidasyona, termal şoklara ve erozyona karşı korunması sağlanır.

Metallerin kaplanması, koruyucu bir tabaka oluşturarak metallerin ömrünü uzatabilir ve kullanım alanlarını genişletebilir. Ayrıca kaplama işlemi estetik ve dekoratif amaçlarla da yapılabilir. Kaplama yöntemi kullanılacak kaplama malzemesi, prosedür ve koşullar kaplanacak malzemenin ve uygulama amacının özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

2.2.2 Termokimyasal Kaplamalar

Termokimyasal kaplamalarda çeliğin yüzey bileşimi değiştirilerek ısıtılma işlemi uygulanır. Bu uygulama ile yumuşak çekirdeğe sahip, sert yüzeyli bir yapı oluşur. Bu şekilde yapılan termokimyasal kaplama yöntemleri ile kimyasal değişikliğe uğramış yüzey morfolojisi eldesi mümkündür. Bu işlemler öncesi ya da sonrası, malzemenin beklenen talebe göre ısıtılma işlemi uygulanması da yapılabilmektedir. Borlama, Karbürleme ve Karbonitrürleme, Nitrürleme ve Nitrokarbürleme termokimyasal yüzey işlemlerindendir (Çakır 2023).

2.2.2.1 Borlama

Borlama ya da bor emdirme de denilen işlem; demir, demir dışı metaller, sermet metallere ve alaşımlara uygulanabilen termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Borlama işlemi iyi temizlenmiş malzemenin 700 °C- 1000 °C aralığında, 1 saat ile 12 saat aralığında sürede, borlu bir katı toz olan borlama bileşiği, macun, sıvı veya gaz ile temas halinde ısıtılması durumunu içerir. Termokimyasal borlama yöntemlerini sıralayacak olursak; sıvı borlama, gaz borlama, çok bileşenli borlama, akışkan yataklı fırınlarda borlama, pasta borlama, plazma borlama, plazma pasta borlama ve katı (kutu) borlama olarak sıralayabiliriz (Uluköy 2006).

2.2.2.1.1 Kutu Borlama

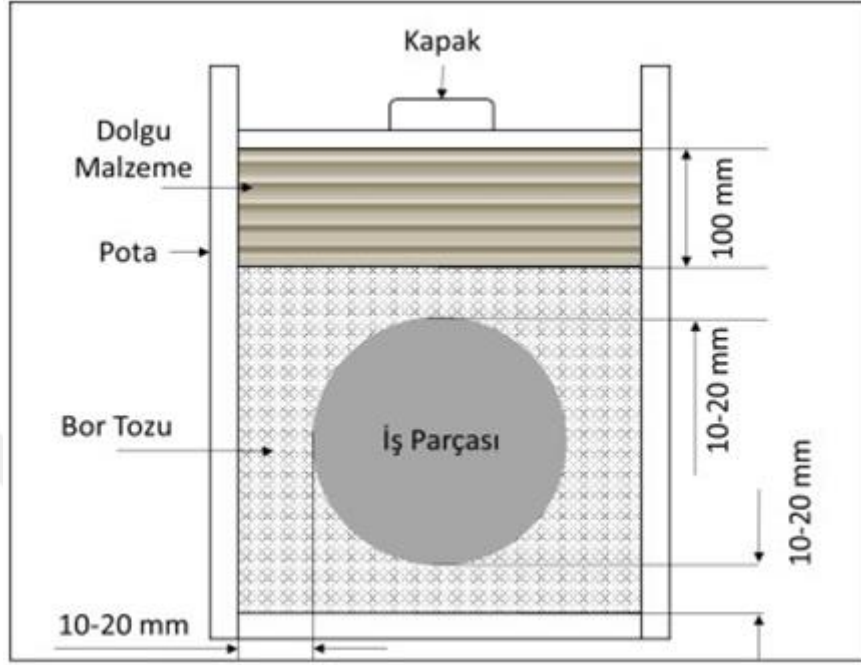
Kutu borlama işlemi de termokimyasal kaplama yöntemlerindendir. Bu yöntemde malzeme bor sağlayıcı toz haznesinin içine yerleştirilir. Belirli bir sıcaklık ve sürede bekletmeye tabi tutulur. Difüzyonun etkisi ile malzeme yüzeyinde malzemenin kimyasal bileşimine de bağlı olarak sert bir yüzey elde edilmiş olur. Genellikle borlama işlemleri uygulanırken paslanmaz çelik, alaşımsız çelik ya da alümina kutu potalar kullanılmaktadır (Uluköy 2006).

Kutu borlama yöntemi, malzemenin borlayıcı ortamda bor atomlarının iş parçasının yüzeyinde yüksek sıcaklığın etkisiyle malzemeyi difüzyona uğratma işlemine verilen isimdir. Borlama işlemine tabi tutulan malzemenin yüzey kimyasal özelliklerinde değişimler olmaktadır (Mertgenç vd. 2021). Borlanacak olan malzeme potaya konulan bor sağlayıcı toz içerisine, çevresini 10 mm ile 20 mm arasında toz olacak şekilde bırakılmaktadır. Pota içerisindeki tozun üst kısmı da hava ile olan teması kesebilmek için SiC gibi dolgu malzemesi ile kapatılır. Bu işlemin tercih edilmesinin en önemli nedenleri ise, ekonomik olmasının yanında, kolay temizlenebilirliği, sementasyona benzemesinden dolayı işlemin kolay olmasından kaynaklanmaktadır ve birçok sektörde kullanım alanı bulmaktadır. Kullanılan potaların niteliği ile beraber proses sırasında homojen ısı dağılımının sağlanması da oldukça önemlidir. Şekil 2.6 da kutu borlama işlemi gösterilmektedir (Şahin 2022).

Bu yöntemi güvenli olması, uygulanmasının kolay olması, bor sağlayıcı toz ortamının içeriğinin değiştirilebilir olması, kaplamada kullanılan ekipmanların basit ve sayısının az olması gibi nedenler ekonomik açıdan ön plana çıkarmaktadır ve diğer borlama yöntemlerine nazaran en fazla uygulanan yöntemdir.

Kutu borlama yöntemi ile kaplama yapılmasından sonra, malzemenin temizlenmesi oldukça kolaydır ve diğer kaplama yöntemlerine kıyasla daha pürüzsüz yüzey eldesi söz konusudur. Sıcaklık ve sürenin etkisi ile borlanacak yüzeyler farklı yüzey kalınlıklarında bor tabakası ile kaplanmış olur. Kutu borlama için kullanılacak bor sağlayıcı toz sınırlı

olmayıp, birçok farklı toz bileşimi, aktivatörler ve seyrelticiler kullanılabilir (Çakır 2023).



Şekil 2.6 Kutu borlama yönteminin şematik görüntüsü (Şahin 2022).

Bu yöntemi güvenli olması, uygulanmasının kolay olması, bor sağlayıcı toz ortamının içeriğinin değiştirilebilir olması, kaplamada kullanılan ekipmanların basit ve sayısının az olması gibi nedenler ekonomik açıdan ön plana çıkarmaktadır ve diğer borlama yöntemlerine nazaran en fazla uygulanan yöntemdir.

Kutu borlama yöntemi ile kaplama yapılmasından sonra, malzemenin temizlenmesi oldukça kolaydır ve diğer kaplama yöntemlerine kıyasla daha pürüzsüz yüzey eldesi söz konusudur. Sıcaklık ve sürenin etkisi ile borlanacak yüzeyler farklı yüzey kalınlıklarında bor tabakası ile kaplanmış olur. Kutu borlama için kullanılacak bor sağlayıcı toz sınırlı olmayıp, birçok farklı toz bileşimi, aktivatörler ve seyrelticiler kullanılabilir (Çakır 2023).

Borlama işleminin diğer farklı geleneksel yüzey kaplama tekniklerine göre en büyük avantajı bu işlem sırasında çok sert borür bileşiklerinin (1450 HV - 5000 HV)

oluşmasıdır. Borür tabakasının yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayılarına sahip olması adezyon ve tribooksidasyon gibi birçok aşınma mekanizmasına karşı çok daha dirençli bir malzeme elde edilmektedir. Bu duruma ek olarak borürlerin kararlı kimyasal yapıları sayesinde yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncini arttırmakta ve erimiş metallerle karşı da malzemeyi daha dirençli hale sokmaktadır (Gençer vd. 2011).

Kutu borlamada kullanılan pota, borlama esnasında bor sağlayıcıların kaybolmaması adına kurşun elementi ile kaplanıp tüm malzemeler eklendikten sonra kapak kısmı demir cürufu ya da beton ile kapatılmalıdır. Potanın hacmi yüksek iç gerilme ve çatlaklara sebep olmaması adına fırının hacminin %60'ını geçmemelidir (Çakır 2023)

Çizelge 2.4'de kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.4 Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı madde özellikleri (Şen 1997).

İsim	Formül	Kütle (g/mol)	Teorik bor miktarı (%)	Ergime sıcaklığı (°C)
Amorf bor	B	10,82	95-97	2050
Ferro bor	-	-	17-19	-
Bor karbür	B ₄ C	55,29	77,28	2450

2.2.2.2 Karbürleme

Karbürleme diğer adıyla sementasyon denilen işlem genellikle az alaşımlı ve az karbonlu çeliklere uygulanır. Bu işlemdeki amaç ise malzeme yüzeylerinde aşınmaya dayanıklı sert bir yüzey oluşturmaktır. Difüzyon ile çeliğin östenitik durumdaki sıcaklıkta sabit kalınarak, karbonun malzeme içerisine girmesi sağlanılmaktadır. Bu işlem 875 °C ile 950 °C sıcaklıklarında uygulanmaktadır. Karbürleme işlemini takiben çeliğe su verilerek, menevişleme işlemi uygulanır. Menevişleme işlemi ise genellikle 150 °C ile 300 °C sıcaklığı aralığında gerçekleştirilmektedir. (Ekşi 2006).

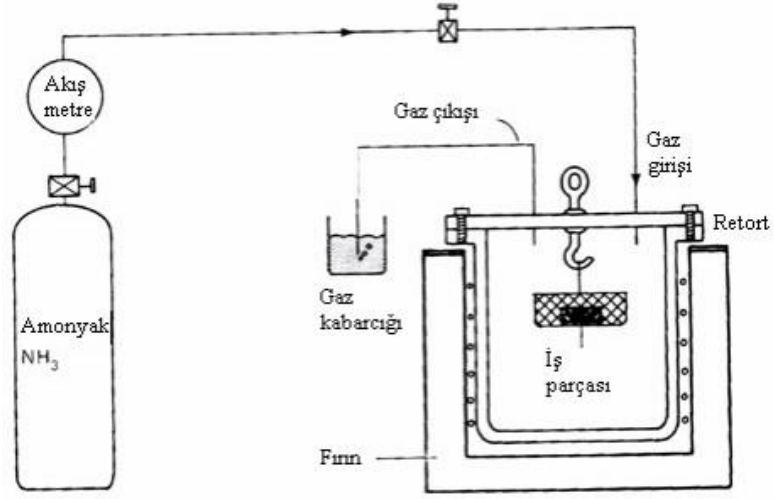
2.2.2.3 Karbonitrürleme

Karbonitrürleme işlemi de karbon ve azot kullanılarak yapılan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlem çelik östenitik haldeyken uygulanır. Östenit bileşimin değişmesi noktasında karbürleme işlemi ile benzerlik göstermektedir. Martezit oluşumu için su verme yapılmaktadır ve böylelikle yüksek yüzey sertliği elde edilir. Bununla beraber yüzey sertleştirilmesinde nitrür oluşumunun da etkisi vardır (Ekşi 2006).

Nitrokarbürleme işlemi olarak özellikle düşük alaşımlı çeliklere uygulanmaktadır. Proses 450 °C - 590 °C sıcaklık aralığında, eş zamanlı olarak karbon ile azot atomlarının yayılımı ile gerçekleştirilen termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Nitrürleme ve nitrokarbürleme işlemleri çekirdek özelliklerini değiştirmezken, yüzeyin sertliğini arttırarak, özellikle aşınma direnci ile yorulma özelliklerini iyileştirmektedir. Aynı zamanda bu işlem korozyona karşı direnci talep edilen malzemeler de de uygulanmaktadır. Nitrokarbürlemeyi diğer uygulamalardan ayıran en önemli özellikler ise işlem güvenliğinin yüksek olması, boyutsal kararlılığın yüksek olması, işlemin düşük sıcaklıklarda ve kısa sürelerde uygulanabilmesidir (Yılmaz vd. 2022).

2.2.2.4 Nitrürleme

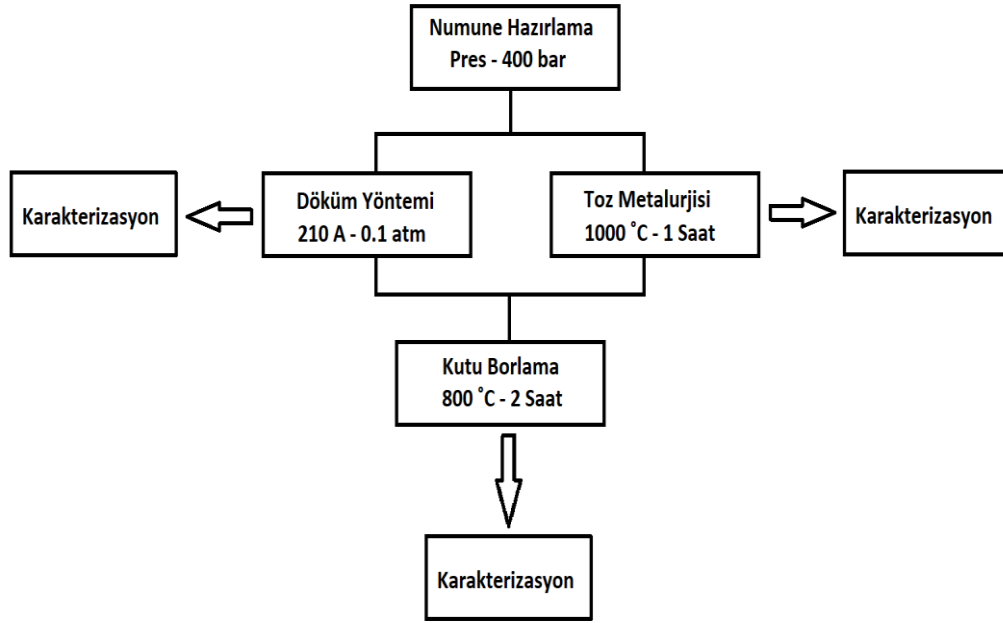
Nitrürleme işleminde azotun malzeme yüzeyine difüze ettirilmesi ile yapılmaktadır. Azotun difüze ettirilmesi yüksek sıcaklıklarda östenit katı çözeltisinde hızlı olmaktadır fakat buna rağmen nitrür yüzeyde kırılğan bir tabakanın oluşmasına, dış cidarda yığılmasına neden olmaktadır. Östenit ferrit dönüşmesinden dolayı hacimde meydana gelen değişim, bu tabakanın pul pul dökülmesine yol açmaktadır. Bundan dolayı da ferritik yapıya yayındırılan azot için daha düşük sıcaklıklar kullanılmaktadır. Uygulanan işlem ile nitrürlerin azot içeren bölgede çökmesi ile oldukça ince ve kırılğan yapıya sahip bir tabaka oluşur. Bu tabaka ise martensit sertliğinde daha yüksektir ki buda çökme ile alaşım nitrürlerinin etkisinden kaynaklanmaktadır (Ekşi 2006). Nitrürleme işleminin şematik olarak gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Nitrüleme prosesi (Ekşi 2006).

3. MATERİYAL ve METOT

Bu bölümde, çalışmada altlık malzeme olarak kullanılan grafen takviyeli Fe,Co ve grafen (G) takviyeli düşük entropili alaşımlarının üretimi ve kaplayıcı Bor (B) malzemenin kompozisyonu, kaplama işlemi öncesi ve sonrası yapılan karakterizasyon işlemlerinde kullanılan deneyler ve analizler hakkında bilgiler verilmiştir. Tezin grafiksel akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Çalışmanın akış şeması

3.1 Alaşımlarda Kullanılan Tozlar ve Karışım Oranları

Altlık malzeme olarak üretilen grafen takviyeli FeCo düşük entropili alaşımlar kullanılan demir (%99,99 saflıkta), kobalt (%99,99 saflıkta) ve grafen tozları (%99,9+ saflıkta) Nanografi marka kullanılmıştır. Demir ve kobaltın tane boyutları -325 mesh iken grafen tozları ise 3 nm (nanometre) boyutundadır.

Düşük entropili FeCoG_x alaşımında kullanılan Fe, Co ve Grafen(G) tozlarına ait karışım oranları, ağırlıkları ve numune kodları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Üretilen alşımların karışım oranları ve numune kodları.

Numune Kodu	Üretim Yöntemi	Takviye Oranı (%)	Fe (g)	Co (g)	Grafen (g)	Toplam Ağırlık (g)
DM-0	Döküm Metodu	0	3,00	3,00	-	6,00
DM-2	Döküm Metodu	2	2,94	2,94	0,12	6,00
DM-4	Döküm Metodu	4	2,88	2,88	0,24	6,00
TM-0	Toz Metalurjisi	0	3,00	3,00	-	6,00
TM-2	Toz Metalurjisi	2	2,94	2,94	0,12	6,00
TM-4	Toz Metalurjisi	4	2,88	2,88	0,24	6,00

3.2 Numunelerin Hazırlanması ve Üretim Yöntemleri

Bileşimleri belirlenerek tartılan tozların karışımlarının karıştırılmasında torna makinası kullanılmıştır ve 120 devir/dakika hızında 12 saat boyunca karıştırılmıştır. Tozların tartılmasında 0.001 gr hassasiyetinde olan Seles marka JTA model terazi (Şekil 3.2) kullanılmıştır. Karıştırılarak homojen hale getirilen tozlar Ø20 mm çapındaki kalıpta, 400 bar basınçta, 10 ton kapasiteli tek eksenli preste basılarak ergitilmek için silindirik pelet haline getirilmiştir.



Şekil 3.2 Hassas terazi.

3.3 Ergitme Sistemi ve Kalıp Tasarımı

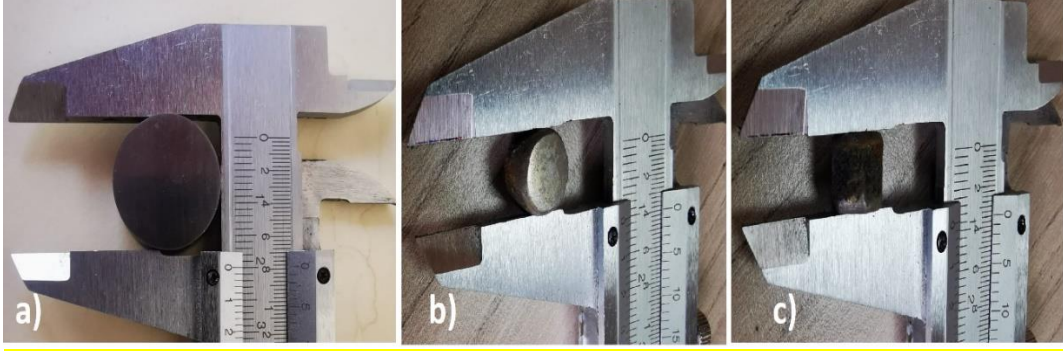
Ergitme kalıbı %99,90 saflığa sahip bakırdan tasarlanmış ve ters vakum sistemi kullanılarak numuneler 5 mm çapında çubuk şeklinde üretilmiştir. 2 adet bakır kalıp sistemi kullanılmış olup ilki master alaşımın ergitilmesi ikincisi ise nihai numunelerin üretilmesi için kullanılmıştır. Her iki kalıp sisteminde de koruyucu gaz olarak argon gazı kullanılmış olup, koruyucu gaz makineden gelirken aynı zamanda da sistemde koruyucu gazın üst kısımdan hazneye dolabilmesi için bakır kalıp etrafında çelik kılıf kullanılmış, kalıba gelen koruyucu gaz eriyik katılaşınca kadar verilmeye devam etmiştir. Master alaşımın oluşturulması için kullanılan ilk kalıp Ø20 çapında altı kapalı şekilde tasarlanmıştır. Ergitme 4 defa tekrar edilmiş olup, her ergitme için alaşım ters çevrilerek ergitme işlemi yapılmıştır. Nihai alaşımın üretimindeki kalıpta ise ters vakum sistemi kullanılarak ergitme esnasında alaşım sıvı faza ulaştığında daha önce hava biriktirici haznede vakum pompası ile biriktirilen hava çekilerek nihai alaşım üretilmiştir. Hava biriktirici haznenin giriş ve çıkışında musluk vasıtasıyla hava biriktirilmekte olup, bağlı 0.1 atm hassasiyete sahip manometre ile de basınç kontrolü sağlanmaktadır. Master alaşım için kullanılan kalıp resmi Şekil 3.3 (a)'da, alaşım üretimi sistemi ait resim ise Şekil 3.3 (b)'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Ergitme döküm işleminde a) Bakır kalıp b) Üretim sistemi resmi

Toz metalurjisi yöntemi ile preste pelet şeklinde formlandırılan alaşımlar tungsten elektrod yardımıyla 210A'de TIG eritme yöntemi kullanılarak Welder TIG 400 DC pulse model kaynak makinasında vasıtasıyla dökümleri yapılmıştır. Alaşıma nihai şekil

vermede -0,1 atm vakum uygulandı. Vakum sistemi atelye imkanlarında hazırlanmış olup vakum pompası olarak Watsco marka WVP-5 model vakum pompası kullanılmıştır. Üretim öncesi hazırlanan alaşım resmi Şekil 3.4 (a)'da, nihai üretilmiş alaşım resimleri ise Şekil 3.4 (b) ve Şekil 3.4 (c)'de verilmiştir.



Şekil 3.4 Üretilen numuneler a) Toz metalurjisi b) TIG ergitme yatay, c) TIG ergitme dikey

3.4 Kutu Borlama Yöntemi

TIG ergitme yöntemi kullanılarak çubuk döküm yapılan takviyesiz, % 2 ve % 4 takviyeli alaşımlar, kutu borlama işlemi ile 800 °C sıcaklıkta 2 saat sürede kaplamaya tabi tutulmuştur. Kaplayıcı toz olarak ticari Ekabor II (%90 SiC, %5 B₄C ve %5 KBF₄) tozu kullanılmıştır. Paslanmaz çelik kutu içerisine yaklaşık 20 mm yüksekliğinde kaplayıcı toz konulmuş ve üzerine üretilen alaşım konularak üzeri yaklaşık 20 mm yüksekliğinde tozla kapatılmıştır. Bu toz üzerine de atmosfer havasının girişini engelleyebilmek için yaklaşık 10 mm yüksekliğinde de deoksidan özelliğine sahip SiC tozu eklenilerek, paslanmaz çelik pota kapağı sıkı bir şekilde kapatılarak fırına yerleştirilmiştir. Kaplama işlemleri için Protherm marka ve 1200 °C sıcaklığa kadar ısıtma kapasitesine sahip kamara tipi fırın kullanılmıştır. Kaplama işlem süresi tamamlandıktan sonra paslanmaz çelik pota fırın dışına alınarak oda sıcaklığında soğuması sağlanmıştır.

3.5 Numunelerinin Hazırlanması

Üretilen alaşımlar 10 mm boyunda kesilerek soğuk kalıba alınmıştır. Kalıplanan alaşımlar 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 grid sulu zımpara ile zımparalanmıştır. Kaplama öncesi karakterizasyonları yapılacak alaşımlar 1 µm boyutunda alümina pasta ile

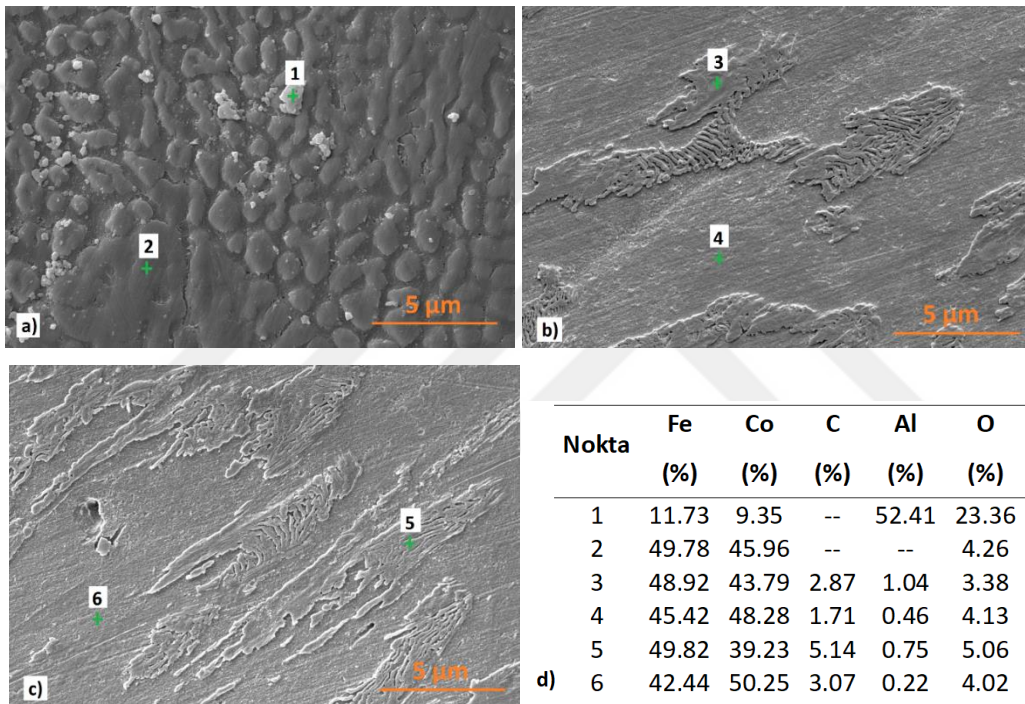
parlatılarak dağlanmıştır. Kutu borlama ile kaplanacak alaşımlar ise kalıptan çıkarılarak borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlanan alaşımlar yan yüzeylerinden hassas kesme cihazı ile kesilerek soğuk kalıba alınmış ve yeniden 120 grid ile 1200 grid aralığında sulu zımpara ile zımparalanmış, 1  m alümina pasta ile parlatılarak dağlanmıştır. Zımparalama işlemleri Metkon marka, Gripon 2V model zımpara cihazı ile ortalama 180 devir/dakika hızında gerçekleştirilmiş olup dağlama için % 3'lk nital dağlayıcı kullanılmıştır.

Metalografik incelemelerde kaplanmamış alaşımların matrisi, kaplanmış alaşımlarda ise tabaka yapısı incelemelerinde ve elementel analiz için Nova Nanosem 650 marka Sem görüntüleme cihazı kullanılmıştır. Alaşımların sertlik ölçümleri kaplanmamış alaşımların yüzeyinden, kutu borlama ile kaplanmış alaşımların ise tabakadan matrise doğru 50 gr yük altında 15 sn bekleme süresinde (Vickers) Shimadzu HVM-2L model mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Alaşımların X-ışını difraksiyon analizi (XRD), kaplanmamış alaşımların yüzeyinden, borlama işlemi ile de yüzeyde oluşan kaplama tabakasının karakterizasyonu için yapılmıştır. Numunelerin X-ışınları difraksiyon analizleri CuK α (α = 1.5406  A) radyasyonu kullanılan Shimadzu XRD-6000 marka X-ışınları difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR

4.1 Alaşımların Karakterizasyonu

Döküm yöntemi ile üretilen, alaşımların SEM mikroyapı resimleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Fe/Co alaşımlarının Şekil 4.1 (a)’da takviyesiz, Şekil 4.1 (b)’de % 2 grafen takviyeli, Şekil 4.1 (c)’de %4 grafen takviyeli SEM mikroyapı görüntüleri ile beraber Şekil 4.1 (d)’de noktasal EDS elementel analizleri ile beraber verilmiştir.

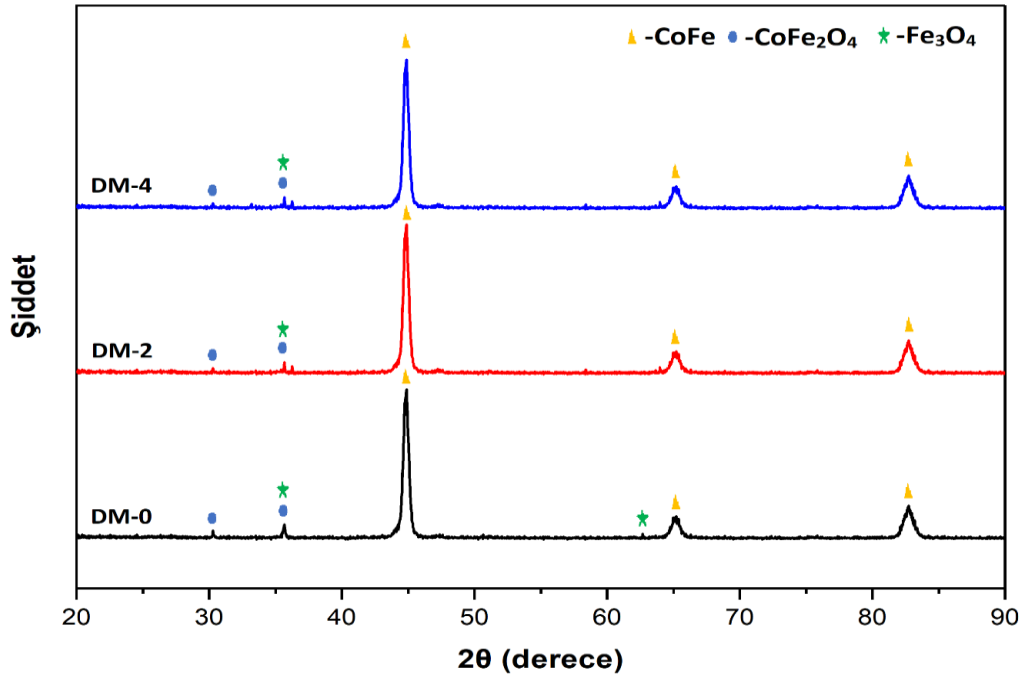


Şekil 4.1 Döküm yöntemiyle üretilmiş a) Takviyesiz, b) % 2 grafen takviyeli, c) % 4 grafen takviyeli alaşımların SEM resimleri d) EDS analizi (% ağırlıkça)

Döküm yöntemi ile üretilen takviyesiz ve grafen takviyeli FeCo alaşımına ait SEM mikroyapı resimleri, noktasal EDX analizleri ile beraber incelendiğinde, mikroyapıların çoklu faz yapısına sahip olduğu görülmektedir. Alaşıma grafen takviyesi ile (Şekil 4.1 (b) ve Şekil 4.1 (c)) matrisin mikroyapısı dentritik yapı oluşturmakta ve takviye oranının artışı ile de dentritik yapı hacimsel olarak artış eğilimindedir. Matriste dentritik yapı oluşum eğiliminin olması, alaşımda yer alan malzemelerin farklı ergime sıcaklıklarının bulunması ve sistemin dengesiz katılaşmasından kaynaklanmaktadır. (Li vd. 2022).

Şekil 4.1 (d)'de ise döküm yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen takviyesiz ve grafen takviyeli FeCo alaşımının farklı bölgelerinden alınan SEM görüntülerinde yer alan ve elementel dağılıma ait EDS analizleri yer almakta olup, 1. noktada yer alan beyaz tanecikler alaşım içerisinde olmayıp, parlatma esnasında gelen, alümina parçacıkları olduğu öngörülmektedir ve EDS analizi de bunu desteklemektedir. EDS analizine göre Fe ve Co oranları, alaşıma eklendiği şekilde birbirine yakındır. Karbon oranı grafen takviyesi ile artış göstermektedir. EDS analizine göre oluşan dentritik bölgeler karbonca zengindir. Ergitme işlemi her ne kadar koruyucu gaz (argon) atmosferinde yapılsada, vakum sistemi olmadığı için yapıda düşük miktarlarda da oksijen yer almaktadır. Oksijen miktarlarının karbonca zengin dentritik bölgeler de artış göstermesi, karbonun ergime esnasında, ergime sıcaklığını arttırmasından kaynaklanmaktadır. Alaşımda, artan ergime sıcaklığı ile soğuma/katılaşma zamanı da arttığı için oksijenin sisteme girmesi hızlanmakta ve oksijenin demir ve kobalta bağlı fazları oluşmaktadır. XRD analiz sonuçları da (Şekil 4.2) bunu göstermektedir.

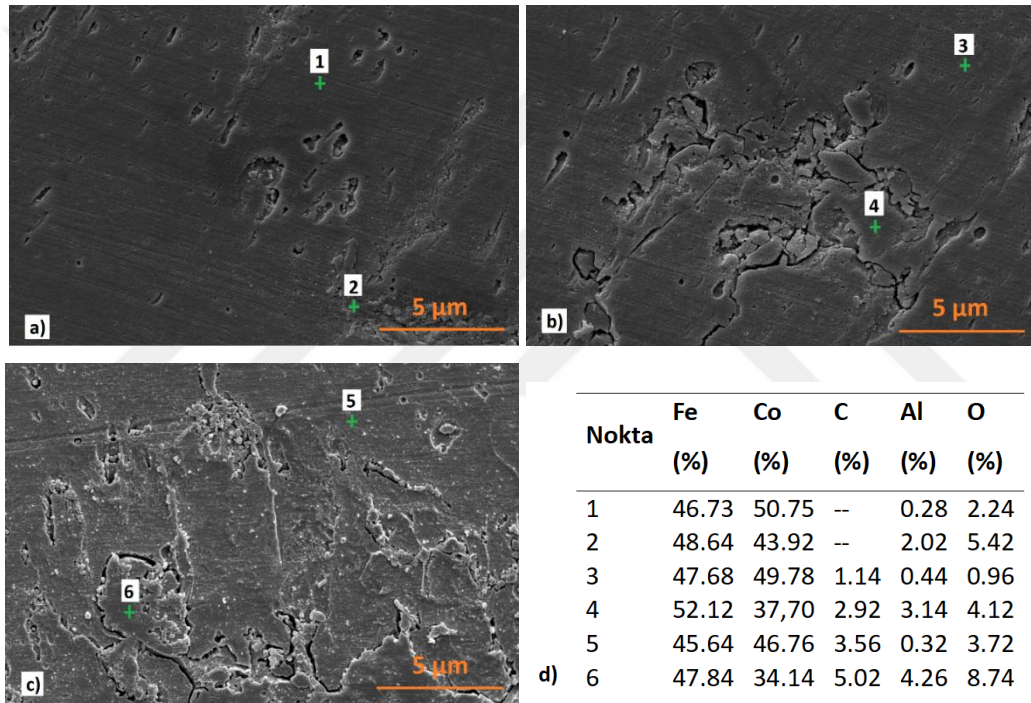
Şekil 4.2'de döküm yöntemi ile üretilmiş takviyesiz, % 2 ve % 4 oranlarında grafen takviyeli FeCo alaşımına ait XRD analizi yer almaktadır.



Şekil 4.2 Döküm yöntemi ile üretilmiş takviyesiz, %2 ve %4 oranlarında grafen takviyeli FeCo alaşımına ait XRD analizi.

Şekil 4.2 incelendiğinde tek fazlı çözelti kristal yapısına sahip, yüzey merkezli kübik (YMK) CoFe (PDF: 01-071-5029) alaşımları ana piklerde yer almaktadır. İkincil piklerde ise Fe ve Co'ya bağlı CoFe_2O_4 (PDF: 01.074.6403) ve Fe_3O_4 (PDF: 00-026-1136) oksit fazlarına ait pikler bulunmaktadır (Allaadini vd. 2015).

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen, alaşımların SEM mikroyapı resimleri Şekil 4.3'de verilmiştir. Fe/Co alaşımlarının Şekil 4.3 (a)'da takviyesiz, Şekil 4.3 (b)'de % 2 grafen takviyeli, Şekil 4.3 (c)'de % 4 grafen takviyeli SEM mikroyapı görüntüleri ile beraber Şekil 4.3 (d)'de noktasal EDS elementel analizleri ile beraber verilmiştir.

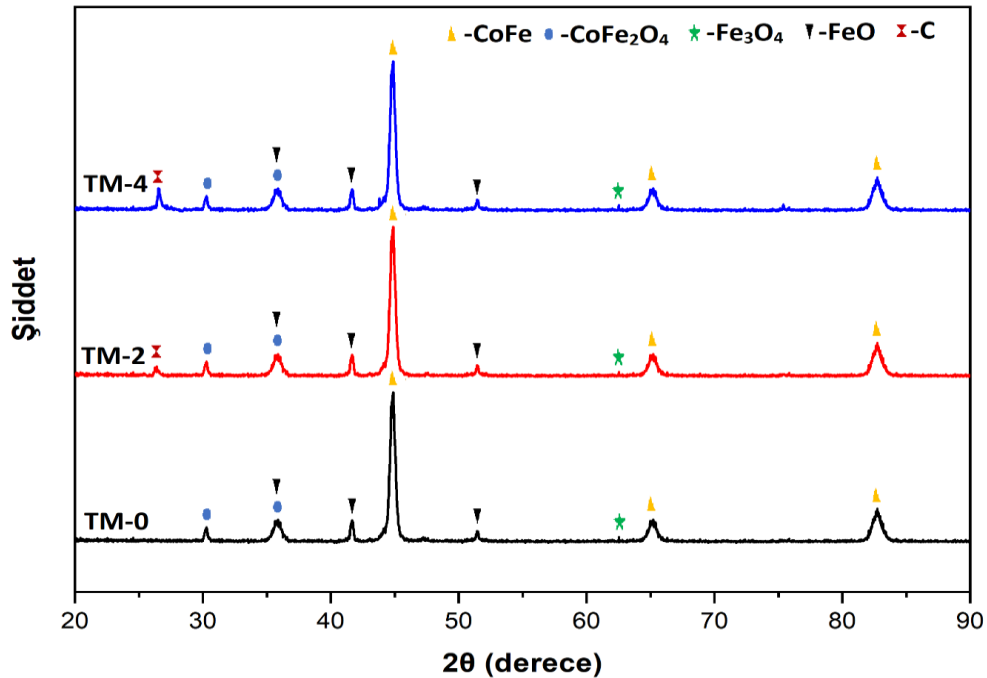


Şekil 4.3 Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş a) Takviyesiz, b) % 2 grafen takviyeli c) % 4 grafen takviyeli alaşımların SEM resimleri d) EDS analizi (% ağırlıkça)

Şekil 4.3 incelendiğinde, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen takviyesiz, % 2 ve % 4 grafen takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri incelendiğinde matris tek fazlı yapıya sahiptir. Artan grafen takviye oranı ile beraber çatlaklar ve inklizyonlar da artmaktadır. Oluşan çatlaklar, kıl çatlaklar şeklinde olup, alaşımda bulunan Fe, Co ve grafenin farklı ısıl özelliklere sahip olması ile ara yüzeylerde zayıf bağlanmaların oluşundan kaynaklanmaktadır (Emamian vd. 2011).

Şekil 4.3 (d)'de ise toz metalurjisi yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen takviyesiz ve grafen takviyeli FeCo alaşımlarının farklı bölgelerinden alınan SEM görüntülerinde yer alan ve elementel dağılıma ait EDS analizleri yer almakta olup, bütün numunelerde var olan oksijenin büyük bir kısmı üretim ve sinterleme esnasında alaşıma nüfuz etmiştir. Oksijenin bir kısmı ile alüminyumun ise parlatma esnasında parlatıcı alüminadan kaynaklı olduğu öngörülmektedir. Toz metalurjisinin en büyük dezavantajlarından birisi malzemede oluşan oksit tabakasının uzaklaştırılmasıdır. Oksit tabakaların kararlı yapılarından dolayı bozunmaları oldukça güçtür. Bundan dolayı hem üretim esnasında hem de sinterlemede her ne kadar koruyucu gaz kullanılsada, sıcaklığın yeterli yüksekliğe ulaşamaması durumunda, oksitler kısmen de olsa yapıdan uzaklaştırılamamaktadır (Fang vd. 2017). Diğer taraftan Fe, Co ve C oranları yaklaşık olarak alaşıma eklenen miktarlardadır. Alaşımda Fe/Co ve bunlara bağlı fazların mevcut olduğu XRD analizinde de (Şekil 4.4) görülebilmektedir.

Şekil 4.4'de toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş takviyesiz, % 2 ve % 4 oranlarında grafen takviyeli FeCo alaşımına ait XRD analizi yer almaktadır.



Şekil 4.4 Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş takviyesiz, % 2 ve % 4 oranlarında grafen takviyeli FeCo alaşımına ait XRD analizi.

Şekil 4.4 incelendiğinde tek fazlı çözelti kristal yapısına sahip, yüzey merkezli kübik (YMK) CoFe (PDF: 01-071-5029) alaşımları ana piklerde yer almaktadır. Diğer piklerde ise Fe ve Co'a bağlı CoFe_2O_4 (PDF: 01.074.6403), Fe_3O_4 (PDF: 00-026-1136) ve FeO (PDF: 00-006-0615) oksit fazlarına ait pikler bulunmaktadır (Gill vd. 2019). Grafen takviye miktarının artışı ile oksit faz miktarları hacimce artış göstermektedir. Yine takviye miktarının artışı ile C (PDF: 00-056-0159) piki de belirginleşmekte ve takviye miktarı artışı ile de bu pik hacimce artış göstermektedir. Bu sonuç EDS analizi (Şekil 4.3 (d)) ile de uyumludur. C pikinin döküm yöntemi ile yapılan üretimler de yer almazken, toz metalurjisi ile yapılan üretimlerde bulunması sinterleme sıcaklığı ya da süresinin yetersiz olabileceğine atfedilebilir. Oksit fazlarına ait piklerinde toz metalurjisi yöntemi ile yapılan üretimlerde artış sergilemesinin de koruyucu gaz ortamının ya da sıcaklığın yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır (Tan vd. 2021).

Şekil 4.5'de alaşımların 50 gr yük altında 15 saniye bekleme süresinde parlatılmış yüzeylerinden ölçülen mikrosertlik değerleri verilmiştir.



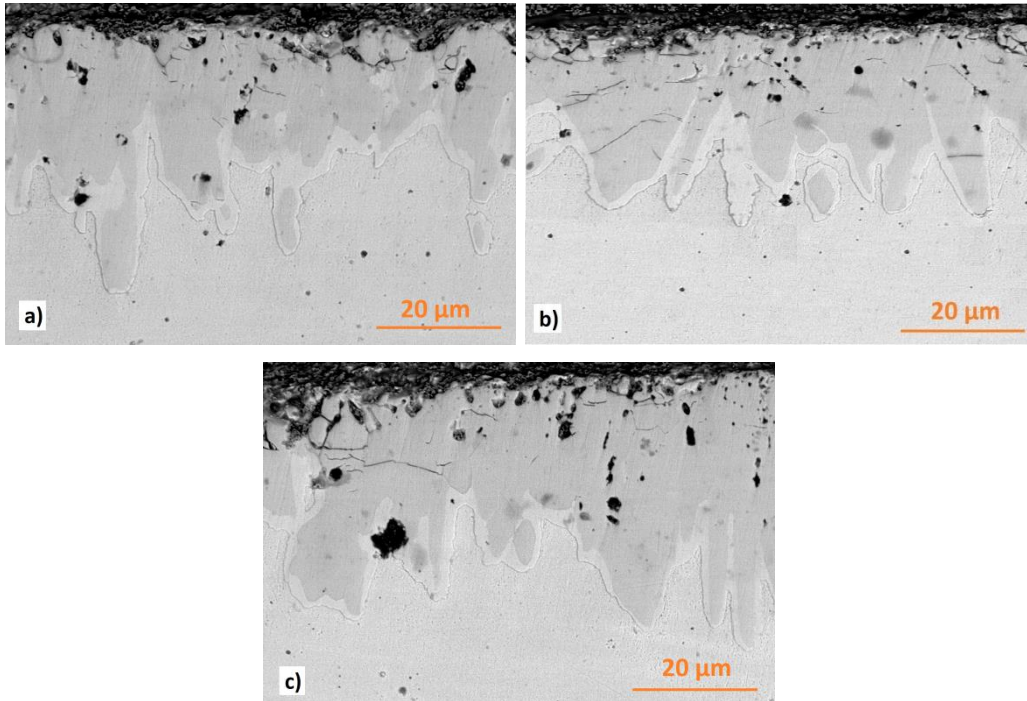
Şekil 4.5 Alaşımların mikrosertlik grafiği.

Şekil 4.5'de verilen alaşımların mikrosertlik grafiği incelendiğinde döküm yöntemi kullanılarak üretilmiş takviyesiz numunede 264 HV_{0.05}, % 2 grafen takviyeli numunede 289 HV_{0.05}, % 4 grafen takviyeli numunede 314 HV_{0.05} olarak ölçülürken, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen takviyesiz numunede 270 HV_{0.05}, % 2 grafen takviyeli numunede 274 HV_{0.05}, % 4 grafen takviyeli numunede ise 258 HV_{0.05} olarak ölçülmüştür. Fe-Co

alaşımlarına ait literatür araştırmalarında sertlik değerleri 235 HV ile 314 HV arasında değerlendirildiği kaydedilmiştir (Albaaji vd. 2017, Kumar vd. 2014). Döküm yöntemi ile üretilen numunelerde takviye oranı artışı ile mikrosertlik değerleri de artmaktadır. Diğer taraftan toz metalurjisi yöntemi ile üretilen numunelerde ise sertlik değerleri birbirlerine yakın olmasına rağmen takviye oranına bağlı kararlı bir değişim olmamıştır. Toz metalurji ile üretilen numunelerin SEM resimlerinde de (Şekil 4.3) görülebileceği gibi grafen takviyesi yapılan numunelerde çatlaklar mevcuttur ve dağılımları düzensizdir. Bundan dolayı sertlik değerlerinin kararlı olmamasının sertlik ölçülen noktada oluşan faz farklılıkları ile porozite ve çökelmelerden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

4.2 Kaplamaların Karakterizasyonu

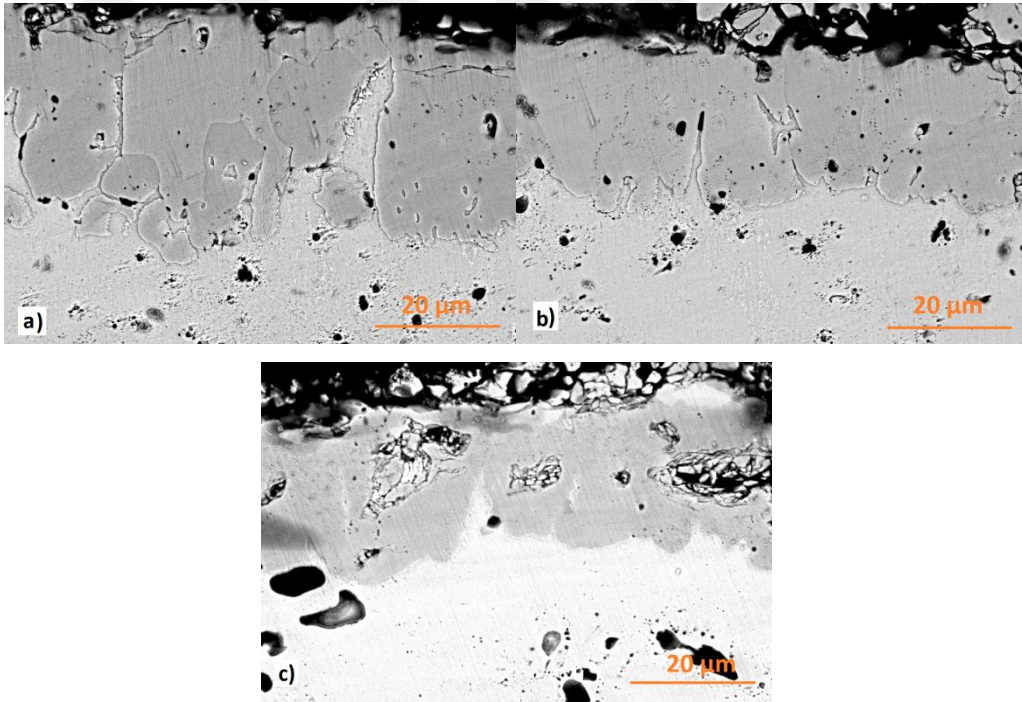
Döküm yöntemi ile üretilerek, 800 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile kutu borlama yöntemi ile kaplanan alaşımların SEM mikroyapı resimleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Kaplanan alaşımlardan takviyesiz olan numuneye ait mikroyapı görüntüsü 4.6 (a)'da, % 2 grafen takviyeli numuneye ait olan mikroyapı görüntüsü Şekil 4.6 (b)'de ve % 4 grafen takviyeli numuneye ait olan mikroyapı görüntüsü ise Şekil 4.6 (c)'de verilmiştir.



Şekil 4.6 Döküm yöntemiyle üretilerek borlanmış a) Takviyesiz, b) % 2 grafen takviyeli c) % 4 grafen takviyeli alaşımların SEM görüntüleri.

Döküm yöntemi ile üretilerek 800 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanarak kaplanmasında, ortalama borür tabaka kalınlıkları takviyesiz numunede (Şekil 4.6 (a)) 30 μm , % 2 grafen takviyeli numunede (Şekil 4.6 (b)) 22 μm ve % 4 grafen takviyeli numunede (Şekil 4.6 (c)) 24 μm olarak ölçülmüştür.

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilerek, 800 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile kutu borlama yöntemi ile kaplanan alaşımların SEM mikroyapı resimleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Kaplanan alaşımlardan takviyesiz olan numuneye ait mikroyapı görüntüsü Şekil 4.7 (a)’da, % 2 grafen takviyeli numuneye ait olan mikroyapı görüntüsü Şekil 4.7 (b)’de ve % 4 grafen takviyeli numuneye ait olan mikroyapı görüntüsü ise Şekil 4.7 (c)’de verilmiştir.

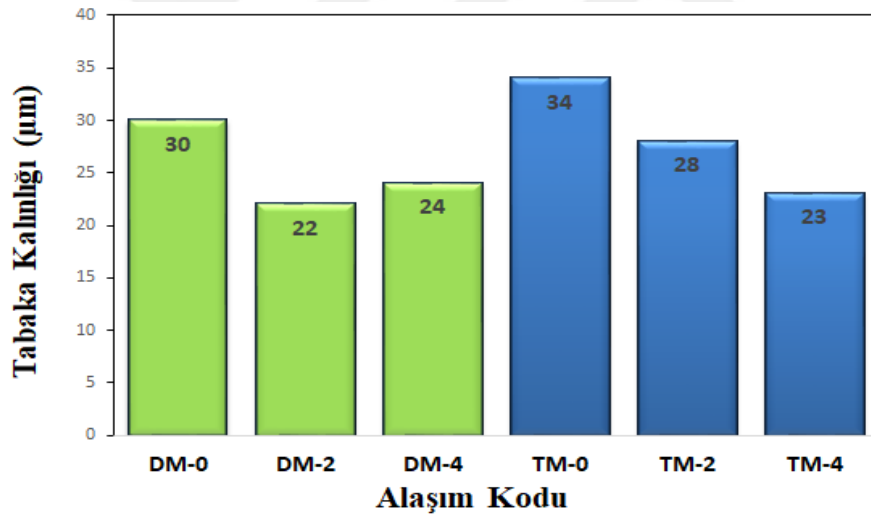


Şekil 4.7 Toz metalurjisi yöntemiyle üretilerek borlanmış a) Takviyesiz b) % 2 grafen takviyeli c) % 4 grafen takviyeli alaşımların SEM görüntüleri.

Döküm yöntemi ile üretilerek 800 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanarak kaplanmasında, ortalama borür tabaka kalınlıkları takviyesiz numunede (Şekil 4.7 (a)) 34 μm , % 2 grafen takviyeli numunede (Şekil 4.7 (b)) 28 μm ve % 4 grafen takviyeli numunede (Şekil 4.7 (c)) 23 μm olarak ölçülmüştür.

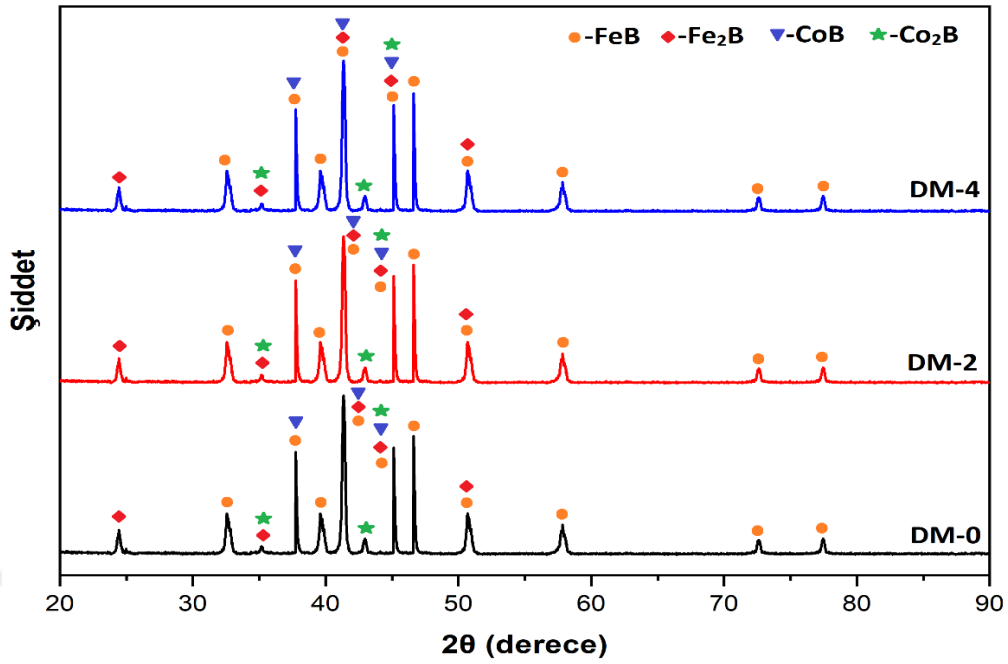
Döküm yöntemi (Şekil 4.6) ve toz metalurji yöntemi (Şekil 4.7) ile üretilerek, 800 °C sıcaklık ve 2 saat sürede borlanan alaşımların mikroyapı görüntüleri beraber değerlendirildiğinde, geçiş bölgesi oluşmamış ve borür tabakaları kolonsol şekilde olup testere dişi görünümündedir. Döküm yöntemi ile üretilen numunelerde kısmen var gibi görünsede, geçiş bölgesi olarak değerlendirilebilecek kadar yeterli değildir. Alaşım elemanı miktarı arttıkça borür tabaka kalınlıkları azalmaktadır. Bu durum alaşımdaki eleman miktarının artışının difüzyonu zorlaştırmasından kaynaklanmaktadır (Mertgenç ve Kayalı 2023, Gao vd. 2022). Yine alaşım elemanı miktarı ve oranı arttıkça borür tabakasındaki çatlak miktarları artarak, boyları uzama eğiliminde olup, borür tabakasında kırılmalar oluşmaktadır. Bu da sistemde bulunan farklı özellikteki alaşım elemanlarının sahip oldukları farklı ısıl genleşme özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Cengiz 2021).

Şekil 4.8’de hem döküm ergitme hem de toz metalurji yöntemleri kullanılarak üretilen ve borlanan alaşımların borür tabaka kalınlıklarına ait grafik beraber verilmiştir.



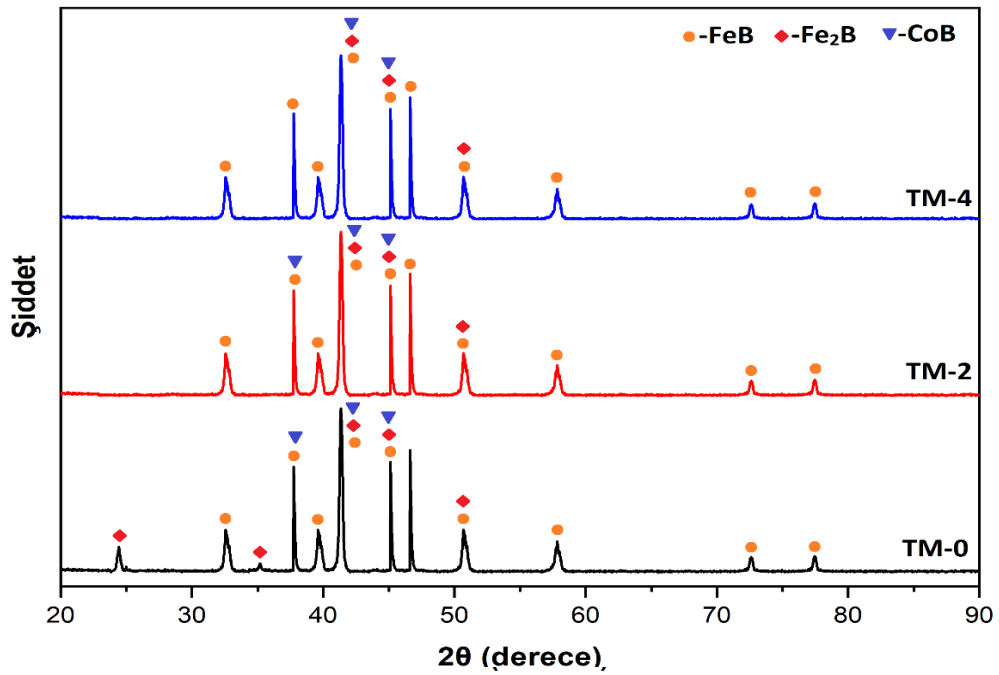
Şekil 4.8 Borür tabaka kalınlıkları

Takviyesiz ve farklı oranlarda grafen takviyesi içeren alaşımlardan, döküm yöntemi kullanılarak üretilerek 800 °C sıcaklık 2 saat süre ile borlananlara ait XRD analizi Şekil 4.9’da, toz metalurji yöntemi kullanılarak üretilerek borlananlara ait XRD analizi ise Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.9 Döküm yöntemiyle üretilerek borlanmış alaşımların XRD analizleri.

Döküm yöntemi ile üretilerek, 800 °C sıcaklık 2 saat süre ile borlanan alaşımların XRD analizlerine ait grafik incelendiğinde (Şekil 4.9); hem takviyesiz hem de grafen takviyeli alaşımların FeB (PDF: 03-065-2599), Fe₂B (PDF: 01-072-1301), CoB (PDF: 03-065-2596) ve Co₂B (PDF: 03-065-2962) fazlarına ait pikler mevcuttur.



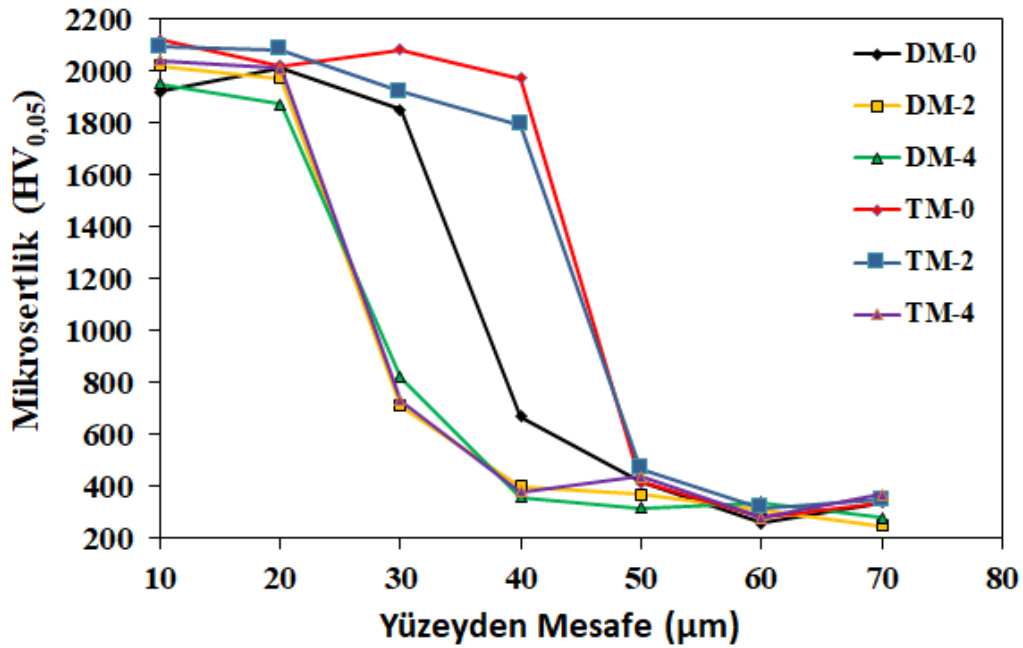
Şekil 4.10 Toz metalurjisi yöntemiyle üretilerek borlanmış alaşımların XRD analizleri.

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilerek, 800 °C sıcaklık 2 saat süre ile borlanan alaşımların XRD analizlerine ait grafik incelendiğinde (Şekil 4.10); hem takviyesiz hem de grafen takviyeli alaşımların FeB (PDF: 03-065-2599), Fe₂B (PDF: 01-072-1301) ve CoB (PDF: 03-065-2596) fazlarına ait pikler mevcuttur.

Döküm yöntemi (Şekil 4.9) ve toz metalurji yöntemi (Şekil 4.10) ile üretilerek, 800 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanan alaşımların XRD analizleri beraber incelendiğinde; ana piklerde FeB, Fe₂B ve CoB fazları mevcuttur. Döküm yöntemi ile üretimde düşük miktarlarda Co₂B fazı da mevcutken, toz metalurji yöntemi ile üretilen alaşımlarda Co₂B fazı bulunmamaktadır. Ayrıca toz metalurji ile üretilen alaşımların borlanmasında, grafen takviyesiz alaşıma nispeten takviye oranı arttıkça Fe₂B fazı hacimce azalmaktadır. Kaplanmış alaşımların mikroyapı resimlerin de de (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7) toz metalurji ile üretilen numunelerin kaplama tabakalarının, döküm yöntemi ile üretilenlere nispeten tek fazlı yapıya dönüştüğü de görülebilmektedir ve bu da toz metalurji ile üretilen numunelerde Co₂B fazının bulunmaması ve Fe₂B fazının da hacimce azaldığını desteklemektedir. Diğer taraftan alaşımı oluşturun ve ana elementler olan kobalt ve demir birbirine oldukça yakın atom yarıçaplarına sahiptirler ($r_{Co} = 0.125$ nm, $r_{Fe} = 0.126$ nm). Bundan dolayı demir ve kobalt alaşımlarında birbirleri ile yüksek katı çözelti derecesine sahiptirler (Wang vd. 2021) ve bu sistemlerde iki elementi birbirinden ayırmak oldukça zordur.

4.3 Sertlik Analizi

Şekil 4.11’de döküm ve toz metalurji yöntemleri ile üretilerek grafen takviyesiz ve farklı oranlar da grafen takviyeli alaşımların 800 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanması ile yüzeyden alaşım matrisine doğru alınan mikrosertlik değerlerine ait grafik yer almaktadır.



Şekil 4.11 Borlanmış alaşımların sertlik değerleri.

Şekil 4.11 incelendiğinde döküm yöntemi ile üretilerek borlanan DM-0, DM-2 ve DM-4 alaşımların yüzey sertlikleri sırasıyla; 1922 HV_{0,05}, 2018 HV_{0,05} ve 1956 HV_{0,05}, toz metalurji yöntemi ile üretilerek borlanan TM-0, TM-2 ve TM-4 alaşımlarının yüzey sertlikleri ise sırasıyla 2124 HV_{0,05}, 2086 HV_{0,05} ve 2040 HV_{0,05} olarak ölçülmüştür. Daha önce farklı malzemelerin kutu borlama ile yapılan çalışmalarda yüzeylerinde elde edilen FeB fazının sertliği 2350 HV civarında (Kulka vd.2017), CoB fazının sertliği 2200 HV ile 2753 HV aralığında (Rodríguez-Castro vd. 2015, Campos-Silva vd. 2013), Fe₂B fazının sertliği 1748 HV ile 1866 HV aralığında (Kulka vd.2017), Co₂B fazının sertliği ise 1835 HV civarında (Campos-Silva vd. 2013) tespit edilmiş olup elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur. Toz metalurjisi ile üretilerek borlanan numunelerin sertliği, ortalamada yaklaşık 100 HV – 150 HV civarında daha yüksek elde edilmiştir. Bu ise toz metalurjisi ile yapılan üretilerek borlanan alaşımlarda FeB/CoB fazlarına daha düşük sertliğe sahip Fe₂B fazının hacimce miktarının daha az olması ve Co₂B fazının bulunmamasına atfedilebilir.

5. SONUÇLAR

Döküm yöntemi ve toz metalürjisi yöntemi ile takviyesiz, % 2 grafen takviyeli ve % 4 grafen takviyeli olarak üretilen alaşımların, kutu borlama yöntemi kullanılarak 800 °C sıcaklıkta 2 saat süreyle borlanması incelenmesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların mikroyapısı tek fazdan oluşmakta ve grafen takviye oranının artışı ile dentrik yapı eğilimi artmaktadır.
- Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen alaşımların mikroyapısı tek fazlı yapıya sahip olup, grafen takviye oranının artışı ile çatlak ve porozite/inklüzyonlar artmaktadır.
- Döküm yöntemi ile üretilen alaşımlarda CoFe, CoFe₂O₄ ve Fe₃O₄ fazlarına ait pikler tespit edilmiştir.
- Toz metalürji ile üretilen alaşımlarda CoFe, CoFe₂O₄, Fe₃O₄, FeO ve C fazlarına ait pikler tespit edilmiştir.
- Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların mikrosertlikleri değerleri takviyesiz alaşımda 264 HV_{0,05}, % 2 grafen takviyeli alaşımda 289 HV_{0,05}, % 4 grafen takviyeli alaşımda ise 314 HV_{0,05} olarak ölçülmüştür.
- Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen alaşımların mikrosertlikleri değerleri takviyesiz alaşımda 270 HV_{0,05}, % 2 grafen takviyeli alaşımda 274 HV_{0,05}, % 4 grafen takviyeli alaşımda ise 258 HV_{0,05} olarak ölçülmüştür.
- Her iki yöntemle de üretilerek 800 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile borlanan alaşımların bor tabakası kolonsol şekilde olup testere dişi görünümündedir.
- Döküm yöntemi ile üretilerek borlanan alaşımların, borür tabaka kalınlıkları takviyesiz alaşımda 30 µm, % 2 grafen takviyeli alaşımda 22 µm, % 4 grafen takviyeli alaşımda ise 24 µm elde edilmiştir.
- Toz metalürjisi yöntemi ile üretilerek borlanan alaşımların, borür tabaka kalınlıkları takviyesiz alaşımda 34 µm, % 2 grafen takviyeli alaşımda 28 µm, % 4 grafen takviyeli alaşımda ise 23 µm elde edilmiştir.
- Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların kaplama tabaka yüzeylerinde FeB, Fe₂B, CoB ve Co₂B fazlarına ait pikleri, toz metalürji yöntemi ile üretilen alaşımların

kaplama tabaka yüzeylerinde ise FeB, Fe₂B ve CoB fazlarına ait pikler tespit edilmiştir.

- Döküm yöntemi ile üretilen alaşımların borür tabaka sertlikleri takviyesiz alaşımda 1922 HV_{0,05}, % 2 grafen takviyeli alaşımda 2018 HV_{0,05} ve % 4 grafen takviyeli alaşımda 1956 HV_{0,05} iken, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen alaşımların borür tabaka sertlikleri takviyesiz alaşımda 2124 HV_{0,05}, % 2 grafen takviyeli alaşımda 2086 HV_{0,05} ve % 4 grafen takviyeli alaşımda 2040 HV_{0,05} olarak ölçülmüştür.
- Her iki yöntemle de üretilerek borlanan alaşımların yüzey sertlikleri 8 ila 10 kata kadar artmıştır.



6. KAYNAKLAR

- Albaaji A J, Castle E G, Reece M J, Hall J P, Evans S L, 2017, Effect of ball-milling time on mechanical and magnetic properties of carbon nanotube reinforced FeCo alloy composites, *Materials & Design*, 122, 296–306.
- Allaedini G, Tasirin S, Aminayi P, 2015, Magnetic Properties of Cobalt Ferrite Synthesized by Hydrothermal Method, *International Nano Letters* 5(4): 183–86.
- Baydır E, 2020, Elektro Kaplama (Electro-Coating), *Kbm404 Kimya Mühendisliği Laboratuvarı 2*: 1-7.
- Bedeloğlu A, Taş M., 2016, Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16: 544-554.
- Campos-Silva I, Bravo-Bárcenas D, Meneses-Amador A, Ortiz-Dominguez M., Cimenoglu H, Figueroa-López U, Andraca-Adame J, 2013, Growth Kinetics And Mechanical Properties of Boride Layers Formed at The Surface of The ASTM F-75, biomedical alloy, *Surface & Coatings Technology*, 237: 402-414.
- Cao F, Munroe P, Zhou Z, Xie Z. 2018, Medium entropy alloy CoCrNi coatings: Enhancing hardness and damage-tolerance through a nanotwinned structuring, *Surface and Coatings Technology*, 335: 257-264.
- Cengiz S, 2021, Effect of Refractory Elements on Boronizing Properties of The Cocrfeni High Entropy Alloy, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 95: 105418.
- Chen J, Xiao J, Zhang L, 2022, Interdiffusion Behaviors Between Nicrfe Alloy and Low/Medium-/High-Entropy Alloys, *Journal of Alloys and Jompounds*, 896:162711.

- Çakır O, 2023, Borlama ile Yüzeyi Sertleştirilmiş AISI 420 Martenzitik Paslanmaz Çeliğin Erozif Aşınma Davranışının İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Karabük.
- Çay V.V, Sermin O, 2005, Süperalaşımlar ve Uygulama Alanları, Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 2: 178-188.
- Dörtoğul C, 2018, Grafen Oksitin Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 33, Konya.
- Duran H, 2019, Süper Alaşım Malzemenin Yüzey İşlemleriyle Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 75, Bartın.
- Ekşi S, 2006, Karbonitrürlenmiş Dkp Sacının Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Entitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64, Sakarya.
- Emamian, A, Corbin, S.F. And Khajepour A, 2011, In-Situ Formation of TiC Using Laser Cladding, University of Waterloo, InTech, 669, Canada.
- Erdoğan A, Zeytin S, 2019, Yüksek Entropili Alaşımlar: Prensipler ve Alaşım Tasarımı, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8: 1160-1178.
- Fang Z.Z, Paramore J.D, Sun P, Chandran K.S.R, Zhang Y, Xia Y, Cao F, Koopman M, Free M. 2017, Powder Metallurgy of Titanium – Past, Present, And Future, International Materials Reviews, 63(7): 407-459.
- Fengjie L, Chen M, Wang Q, Wang F, 2022, Effect of Al₂O₃ Content on Microstructure And Oxidation Behavior Of Silicate Enamel Coatings on A Ni Based Superalloy At 1000 °C, Ceramics International, 48(17): 25445–57.

- Gao Z, Leilei W, Yanni W, Feiyue L, Xiaohong Z. 2022. Crack Defects And Formation Mechanism of Fecocni High Entropy Alloy Coating on TC4 Titanium Alloy Prepared by Laser Cladding, Journal of Alloys and Compounds, 903: 163905.
- Gençer M, Tarakçı M, Gündüz K.Ö, Cengiz S, Çalık A, 2011, Fe-8v Alaşımı ve Saf Demirin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması, International Advanced Technologies Symposium, 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey 559.
- Girişken İ, Çam G, 2022, Kobalt Esaslı Haynes 25/L-605 Süper Alaşımının Borlanması, Journal of Characterization, 2: 206-219.
- Karaca Y, 2018, Yüksek Entropili CrMnFeCoNiAl Alaşımlarına Bor İlavesinin Etkisi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir.
- Karaöz S, 2008, Malzeme Bilgisi, AYMYO Yayınları, 91, Aydın.
- Kelez S.B, 2021, Alüminyum Matrisli Farklı Oranlarda Grafen İçeren B4c Takviyesi ile Üretilen Kompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Kulka M, Makuch N, Piasecki A, 2017, Nanomechanical Characterization and Fracture Toughness of FeB and Fe₂B Iron Borides Produced by Gas Boriding of ARMCO Iron, Surface & Coatings Technology, 325: 515-532.
- Kumar, Mahesh Et Al. 2014, Influence of Coated SiC Particulates on The Mechanical and Magnetic Behaviour of Fe – Co Alloy Composites 2578–2587.
- Mertgenç E, Kayalı, Y, 2023, Diffusion kinetics and boronizing of high entropy alloy produced by TIG melting reverse suction method, Canadian Metallurgical Quarterly, 62 (2): 362-371.

- Mertgenç E, Kayalı, Y, Talaş Ş, 2021, Effect of Boronizing and Aluminizing on the Wear Resistance of Steel AISI 1010, Metal Science and Heat Treatment, 63: 388-395.
- Moon J, Minpark J, Wung Bae J, Seok Do H, Joe Lee B, Seop Kim B, 2020, A New Strategy for Designing Immiscible Medium-Entropy Alloys With Excellent, Acta Materialia, 193: 71-82.
- Özgün Ö, Gülsoy H.Ö, 2020, Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi ile Üretilen FeCo Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Türk Doğa ve Fen Dergisi Turkish Journal Of Nature And Science, 9: 6-11.
- Rodríguez-Castro G.A., Reséndiz-Calderon C.D., Jiménez-Tinoco L.F., Meneses Amador A, Gallardo-Hernández E.A., Campos-Silva I.E., 2015, Micro-Abrasive Wear Resistance of CoB/Co₂B Coatings Formed in CoCrMo Alloy, Surface & Coatings Technology, 284: 258-263.
- Şahin H, 2021, Düşük Yoğunluklu Orta ve Yüksek Entropili Alaşımların Üretimi ve Karakterizasyonu, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Şen U, 1997, Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tan Z, Engström U, Li K, Liu Y, 2021, Effect of Furnace Atmosphere on Sintering Process of Chromium Containing Steel Via Powder Metallurgy. J. Iron Steel Res. Int., 28: 889-900.
- Topuz A, 2016, Dın 1.2842 Çeliğinin Borlanması ile Oluşan Borür Tabakası Üzerine Borlama Sıcaklık ve Süresinin Etkileri, Bor Dergisi, 1: 15-19.
- Uluköy A, Can A.Ç, 2005, Çeliklerin Borlanması, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12: 189-198.

Uluköy A, Can A.Ç, 2006, Çeliklerin Borlanması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12: 189-198.

Wang L, Zhank F, Yan S, Yu G, Chen J, He J, Yin F, 2021, Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Atmosphere Plasma Sprayed AlCoCrFeNi High Entropy Alloy Coatings Under Post-Annealing, Journal of Alloys and Compounds 872: 159607.

Wang P, Nagase T, Todai M, Hai-Sun S, Nakano T, 2023, Design and Development of (Ti, Zr, Hf)-Al Based Medium Entropy Alloys and High Entropy Alloys, Materials Chemistry and Physics, 276: 125409.

Yılmaz T.Ü, Pehlivanlı B, Erkan A, Kılıçlı V, 2022, Nitrokarbürleme ve Son Oksidasyon Proseslerinin AISI 4140 Çeliğinin Mikroyapı ve Yüzey Özellikleri Üzerine Etkisi, Politeknik Dergisi, 26: 1-1.

Zheng G, Thank B, Zhao S, Yi Wang W, Chen X, Zhu L, Li J, 2022, Evading the strength-ductility trade-off at room temperature and achieving ultrahigh plasticity at 800°C in a TiAl alloy, Acta Materialia, 225: 117585.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/kimyamuh/Dosyalar/ELEKTRO%20KAPLAMA%20%28ELECTRO-COATING%29.pdf>, Erişim tarihi (02.01.2024)
- 2- <https://www.ilhamipektas.com/wp-content/uploads/2019/07/GALVAN%C4%B0Z-HATALARI-VE-%C3%87%C3%96Z%C3%9CM-%C3%96NER%C4%B0LER%C4%B0-K%C4%B0TABI2018.pdf>, Erişim tarihi (04.01.2024)