

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**EŞMOLAR CoCrFeNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN %2-3
Al-Ti-Mo ELEMENTLERİNİN MEKANİK VE METALOGRAFİK ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İlhan DİLEK

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TUNCELİ – 2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EŞMOLAR CoCrFeNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN %2-3
Al-Ti-Mo ELEMENTLERİNİN MEKANİK VE METALOGRAFİK ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İlhan DİLEK
(220077110)

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TUNCELİ – 2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EŞMOLAR CoCrFeNi YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN %2-3
Al-Ti-Mo ELEMENTLERİNİN MEKANİK VE METALOGRAFİK ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

İlhan DİLEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez / / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

İmza:.....

İmza:.....

Doç. Dr. Yahya TAŞGIN
(Munzur Üniversitesi)

Pof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ
(Fırat Üniversitesi)

Doç. Dr. Gökhan KAHRAMAN
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir

...../...../2024

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Yüksek Lisans Öğrencisi
İlhan DİLEK

Danışman
Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresince tecrübe ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman saygıyla hatırlayacağım değerli danışmanım Doç. Dr. Yahya TAŞGIN'a teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışma ve araştırmalar boyunca, tecrübe ve birikimlerini benden esirgemeyen değerli üniversite personellerine teşekkür ederim.

İlhan DİLEK

Tunceli - 2024



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	I
TEŞEKKÜR	II
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLOLAR LİSTESİ	VII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Yüksek Entropili Alaşımlar Kavramı	4
1.2. Yüksek Entropili Alaşımlara Etki Eden Dört Faktör	7
1.2.1. Yüksek entropi etkisi	7
1.2.2. Yavaş difüzyon etkisi	8
1.2.3. Latis distorsiyonu etkisi	9
1.2.4. Karışım etkisi	11
1.3. Yüksek Entropili Alaşımların Genel Özellikleri	13
1.3.1. Elektriksel özellikleri	13
1.3.2. Manyetiksel özellikler	14
1.3.3. Isıl özellikler	14
1.3.4. Difüzyon bariyerlerinin özellikleri	15
1.3.5. Sertlik özellikleri ve sertliği etkileyen faktörler	16
1.4. Yüksek Entropili Alaşımların Tasarlanması	17
1.5. Yüksek Entropili Alaşımların Üretim Yöntemleri	18
1.5.1. Sıvı Hal Üretim Yöntemleri	18
1.5.2. Ark ergitme	19
1.5.3. Vakum indüksiyon ergitme	21
1.5.4. Bridgman katılaştırma döküm	22
1.5.5. Lazer eritme ve lazer kaplama	22
1.6. Katı Hal Üretim Yöntemleri	23
1.6.1. Toz metalürjisi	23
1.6.2. Gaz hal üretim yöntemleri (fiziksel buhar biriktirme)	24
1.6.3. Magnetron püskürtme biriktirme	24
1.6.4. Darbeli lazer biriktirme	25
1.6.5. Atomik katman birikimi	25
1.7. Yüksek Entropili Alaşımların Uygulama Alanları	26
1.8. Daha Önce Yapılan Çalışmalar	27
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE METOT	30
2.1. Alaşımların Bileşimi	30
2.2. Alaşımların Üretimi	31
2.2.1. Mekanik Alaşımlama	31
2.2.2. Vakum Ark Ergitme Sistemi	33
2.3. Kesme İşlemi	34
2.4. Bakalite Alma	34
2.5. Alaşımların Parlatılması ve zımparalanması	35
2.6. Alaşımların Dağlanması	36
2.7. Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	36
2.8. X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri	37

2.9. Sertlik Analizleri.....	38
2.10. Aşınma Testi.....	39
3.BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
3.1. SEM—MEPİNG-- EDS Analizleri.....	40
3.1.1. N1 Nolu $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{25}$ Numunesine ait SEM-EDS-MEPİNG Analizleri.....	40
3.1.2. N2 Nolu %2 Al alaşımlı $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{23}\text{Al}_2$ Numunesine ait SEM-EDS MEPİNG Analizleri	42
3.1.3. N3 Nolu %3 Al alaşımlı $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{22}\text{Al}_3$ Numunesine ait SEM-EDS MEPİNG Analizleri	44
3.1.4. N4 Nolu %2 Ti Alaşımlı $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{23}\text{Ti}_2$ Numunesine ait SEM-EDS MEPİNG Analizleri	46
3.1.5. N5 Nolu %3 Ti Alaşımlı $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{22}\text{Ti}_3$ Numunesine ait SEM-EDS MEPİNG Analizleri	48
3.1.6. N6 Nolu %2 Mo Alaşımlı $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_2$ Numunesine ait SEM EDS-MEPİNG Analizleri	50
3.1.7. N7 Nolu %3 Mo Alaşımlı $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{22}\text{Mo}_3$ Numunesine ait SEM EDS MEPİNG Analizleri	52
3.2. Kristal Yapı Analizleri-XRD Grafikleri	54
3.3. Aşınma Test Sonuçları.....	59
2.4. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları	60
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	62
5. KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Malzemelerin zamana göre değişimi.....	2
Şekil 1.2. Tek bir elemente ait (a), geleneksel alaşım (b), YEA (c), kafes düzenlerinin şematik gösterimleri	3
Şekil 1.3. İki bileşenli sistemlerde karışım entropisinin değişimi.....	5
Şekil 1.4. Karışım entropisinin eşmolar bileşen sayısına bağlı değişimi	6
Şekil 1.5. Konfigürasyon entropisine bağlı olarak entropi alaşımları.....	6
Şekil 1.6. (a) HMK ve (b) YMK kristal kafes yapıları 5 temel elementli	10
Şekil 1.7. Kafeste ki distorsiyon etkisi ile Bragg kırınımını gösteren şema	11
Şekil 1.8. Al _x CoCrCuNiFe yüksek entropi alaşım sisteminde Al içeriğiyle birlikte değişen sertlik değerleri ve kafes parametreleri	12
Şekil 1.9. Bazı geleneksel ve yüksek entropili alaşımların sertlik değerleri	12
Şekil 1.10. 300-400 K sıcaklık değerinde, tüm alaşımların elektriksel direnci.....	13
Şekil 1.11. Sıcaklık değerine göre ısı iletkenlik eğrileri	14
Şekil 1.12. Cu / NbSiTaTiZr / Si tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak tabaka direnci.....	15
Şekil 1.13. YEA ile Geleneksel olarak kullanılan alaşımların sertlik değerlerinin karşılaştırılması.	16
Şekil 1.14. Yüksek entropili alaşımların üretim yöntemleri ana şeması	18
Şekil 1.15. Vakumlu ark eritme ve döküm yöntemi kullanılarak üretilen Al _{0,5} CoCrCuFeNi alaşımının mikroyapısı	19
Şekil 1.16. Vakum ark eritme ünitesinin şeması.....	20
Şekil 1.17. Ark eritme ve döküm ekipmanının gösterimi	20
Şekil 1.18. Vakum indüksiyonlu eritme işleminin şematik diyagram	21
Şekil 1.19. Vakum indüksiyonlu ergitme fırınının temel elemanlar	21
Şekil 1.20. Bridgman katılaşma ekipmanının gösterimi	22
Şekil 1.21. (a) Şematik diyagram ve (b) lazer kaplama işleminin çalışması.....	23
Şekil 1.22. Kıvılcım plazma sinterleme (SPS) kurulumunun şematiği	24
Şekil 1.23. Püskürtme birikiminin işlenmesini gösteren bir şematik	25
Şekil 1.24. Darbeli lazer biriktirme işleminin şematik gösterimi	25
Şekil 1.25. ALD sürecinin şematik görünüm	26
Şekil 2.1. Toz alaşımlama mikseri	31
Şekil 2.2. Toz press makinası.....	32
Şekil 2.3. Presleme sonrası oluşan numuneler	32
Şekil 2.4. Kullanılan ark ergitme sistemi	33
Şekil 2.5. Ark ergitme sonucu oluşan numuneler	34
Şekil 2.6. Otomatik kesme cihazı.....	35
Şekil 2.7. Bakalite cihazı.....	35
Şekil 2.8. Zımparalama cihazı.....	36
Şekil 2.9. SEM elektron mikroskobu	37
Şekil 2.10. XRD cihazı.....	38
Şekil 2.11. Mikrosertlik ölçüm cihazı	38
Şekil 2.11. Aşınma test düzeneği	39
Şekil 3.1. N1 numunesi için farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri (500x, 1000x, 2500x, 5000x	40
Şekil 3.2. N1 numunesine ait meping analizi ve element görüntüleri.....	41
Şekil 3.3. N1 numunesine ait EDS noktasal spectrum değerleri.....	41

Şekil 3.4. N2 nolu %2 Al alaşımlı numunesi için farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri (500x, 1000x, 2500x, 5000x)	40
Şekil 3.5. N2 nolu %2 Al alaşımlı numuneye ait meping analizi ve element görüntüleri ..	42
Şekil 3.6. N2 nolu %2 Al alaşımlı numuneye ait EDS noktasal spectrum değerleri	43
Şekil 3.7. N3 nolu %3 Al alaşımlı numune için farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri(100x, 1000x, 2500x, 5000x).....	43
Şekil 3.8. N3 nolu %3 Al alaşımlı numuneye ait meping analizi ve element görüntüleri ..	44
Şekil 3.9. N3 nolu %3 Al alaşımlı numuneye ait EDS noktasal spectrum değerleri	45
Şekil 3.10. N4 nolu %2 Ti alaşımlı numune için farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri (500x, 1000x, 2500x, 5000x)	45
Şekil 3.11. N4 nolu %2 Ti alaşımlı numuneye ait meping analizi ve element görüntüleri .	46
Şekil 3.12. N4 nolu %2 Ti alaşımlı numuneye ait EDS noktasal spectrum değerleri.....	47
Şekil 3.13. N5 nolu %3Ti alaşımlı numune için farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri (500x, 1000x, 2500x, 5000x)	47
Şekil 3.14. N5 nolu %3Ti alaşımlı numuneye ait Meping analizi ve element görüntüleri .	47
Şekil 3.15. N5 nolu %3Ti alaşımlı numuneye ait EDS noktasal spectrum değerleri	48
Şekil 3.16. N6nolu %2Mo alaşımlı numune için farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri (500x, 1000x, 2500x, 5000x)	49
Şekil 3.17. N6 nolu %2Mo alaşımlı numuneye ait Meping analizi ve element görüntüleri(500x, 1000x, 2500x, 5000x)	49
Şekil 3.18. N6 nolu %2Mo alaşımlı numuneye ait EDS noktasal spectrum değerleri.....	50
Şekil 3.19. N7 nolu %3Mo alaşımlı için farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri (500x, 1000x, 2500x, 5000x)	52
Şekil 3.20. N7 nolu %2Mo alaşımlı numuneye ait meping analizi ve element görüntüleri	53
Şekil 3.21. N7 nolu %2Mo alaşımlı numuneye ait EDS noktasal spectrum değerleri	53
Şekil 3.22. N1,N2 ve N3 Numunelerine ait XRD grafiği ve faz görünüşleri.....	55
Şekil 3.23. N1,N4 ve N5 Numunelerine ait XRD grafiği ve faz görünüşleri.....	56
Şekil 3.24. N1,N6 ve N7 Numunelerine ait XRD grafiği ve faz görünüşleri.....	57
Şekil 3.25. N1,N2,N3,N4,N5,N6,N7 Numunelerine ait XRD grafiği ve faz görünüşleri...58	
Şekil 3.26. Numunelerinin aşınma kütle kaybı miktarları	60
Şekil 3.27. Mikrosertlik ölçüm değerleri grafiği	61

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1.1. Tipik geleneksel alaşımlar için eriyik halde verilen konfigürasyon entropi değerleri	7
Tablo 2.1. Kullanılan elementlerin alaşımlardaki ağırlıkça ve yüzdece oranları.....	30
Tablo 3.1. Aşınma testi sonuçları.....	59
Tablo 3.2. Mikrosertlik ölçüm değerleri grafiği.....	61



KISALTMALAR LİSTESİ

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
Fe	: Demir
Ti	: Titanyum
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Co	: Kobalt
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
Al	: Alüminyum
YEA	: Yüksek Entropili Alaşım

ÖZET

Yüksek entropili alaşımlar son zamanlarda yapılan çalışmalar ile birlikte çok bileşenli yapıları ve karışım entropisi sayesinde diğer alaşımlara karşı daha baskın hale gelmişlerdir. Yüksek entropili alaşımlar yüksek korozyon direnci, aşınmaya karşı dirençleri, kimyasal kararlılık, yüksek sıcaklık mukavemetleri yüksek sertlikleri, manyetik özellikleri gibi kimyasal ve mekanik özelliklerinden dolayı uygulamalarda diğer malzeme türlerine kıyasla üstünlük sağlamaktadırlar.

Bu çalışmada katı haldeki Cr, Co, Fe, Ni, Ti, Al, Mo metal tozları toz metarüljisi yöntemi kullanılarak biraya getirilmiş ve CrCoFeNi alaşımına vakumlu art ergitme yöntemiyle %2 ve %3 oranlarında Al-Ti-Mo elementleri ayrı ayrı eklenerek 7 adet numune elde edilmiştir. Alaşımların yapısı ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler ölçülmüştür. Her numune için SEM, XRD, EDS analizleri yapılmış ve mikro özellikler üzerine etkiler incelenmiştir. Mekanik özelliklerin incelenmesi için aşınma ve mikro sertlik ölçümleri yapılmış ve yapısal farklılıklar kıyaslanmıştır. Eşmolar CoCrFeNi yüksek entropi alaşımına değişen oranlarda Al, Mo, Ti eklenerek daha kararlı bir mikroyapı oluşturulması, aşınma, korozyon, sertlik ve benzeri özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışma yüksek entropili alaşımlara değişen oranlarda Al, Ti, Mo elementleri ilavesinin alaşımın kimyasal ve mekanik yapısı üzerinde yarattığı değişimler vasıtasıyla yeni nesil malzemeler ortaya çıkması ve yüksek entropili alaşımların kullanım alanlarının genişletilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: CrCoFeNi alaşımı 1, yüksek entropili alaşım 2, mikroyapı 3, aşınma 4, mikro sertlik 5

ABSTRACT

Investigation of The Mechanical and Metallographical Effects of 2-3% Al-Ti-Mo Elements Added to The Equimolar CoCrFeNi High Entropy Alloy

With recent studies, high-entropy alloys have become more dominant over other alloys thanks to their multi-component structure and mixing entropy. High entropy alloys provide superiority in applications compared to other material types due to their chemical and mechanical properties such as high corrosion resistance, wear resistance, chemical stability, high temperature resistance and high hardness, and magnetic properties.

In this study, solid Cr, Co, Fe, Ni, Ti, Al, Mo metal powders were brought together using the powder metallurgy method and 7 samples were prepared by adding 2% and 3% Al-Ti-Mo elements separately to the CrCoFeNi alloy by vacuum post-melting method. The changes in the structure and mechanical properties of the alloys were measured. SEM, XRD, EDS analyzes were performed for each sample and the effects on micro properties were examined. To examine the mechanical properties, wear and microhardness measurements were made and structural differences were compared. By adding varying amounts of Al, Mo, Ti to the equimolar CoCrFeNi high entropy alloy, it is aimed to create a more stable microstructure and to improve wear, corrosion, hardness and similar properties. This study aims to create new generation materials and expand the usage areas of high-entropy alloys through the changes created by the addition of Al, Ti, Mo elements in varying amounts to high-entropy alloys on the chemical and mechanical structure of the alloy.

Key Words: CrCoFeNi alloy 1, high alloy entropy 2, microstructure 3, abrasion 4, SEM microhardness 5

1.GİRİŞ

Alaşımlar, iki veya daha fazla metal veya metal olmayan elementin bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Alaşımlar, bileşenlerinin özelliklerini birleştirerek daha yüksek mukavemet, daha iyi korozyon direnci ve daha yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikler elde etmek için kullanılırlar. Eğer iki element içeriyorsa bu ikili alaşım sistemi, üç alaşım içeriyorsa üçlü alaşım sistemi şeklinde adlandırılabilir. Doğada genel olarak ve 14000 adet üçlü, 990 adet ikili sistem ve 45 metal bulunmaktadır. Ticari elementlerin birçoğunun çok sayıda element içermesi ve kimyasal bileşenlerinin çeşitli oranlarda değiştirilmesi her bir ikili sistemden 100 adet farklı alaşım meydana getirebilir. Bu şekilde bir yaklaşım mevcuttaki elementlerin sonsuz sayıda bir alaşım dizisi oluşturacağını göstermektedir. Alaşım sistemleri denge veya faz diyagramlarına, alaşımlar ise yapılarına göre sınıflandırılabilir (Savaşkan, 2009).

Alaşımlar, farklı oranlarda bileşenler içerebilir ve bu nedenle farklı özelliklere sahip olabilirler. Örneğin, çelik, demir ve karbonun birleştirilmesiyle oluşturulan bir alaşımdır ve yüksek mukavemet, düşük maliyet ve geniş kullanım alanı gibi özellikleri vardır. Bir diğer örnek ise alüminyum ve magnezyumun birleştirilmesiyle oluşturulan alaşımdır ve hafiflik, yüksek mukavemet ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir. Alaşımlar, inşaat, otomotiv, havacılık, elektronik ve daha birçok endüstride kullanılır. Alaşımlar, farklı oranlarda bileşenler içerebilir ve bu nedenle farklı özelliklere sahip olabilirler. Ancak, genel olarak alaşımların özellikleri bileşenlerinin özelliklerinin birleştirilmesiyle daha yüksek bir performans sağlamayı amaçlar.

Yeni özellikteki malzemelerin üretilme ihtiyacı geleneksel anlamdaki alaşım tasarımına yeni bir bakış açısı getirerek yüksek entropili alaşımların üretilmesine olanak sağlamıştır. Yüksek entropili alaşımların keşfedilmesiyle beraber üstün özelliklere sahip yeni malzemeler ortaya çıkmıştır. Yüksek entropili alaşımlar hakkında ülkemizde yapılan çalışmalar diğer ülkelerle kıyaslandığında henüz yetersiz seviyededir. YEA'lar ayrıca kompozit üretiminde üstün özelliklere sahip takviye malzemesi ve matris malzemesi olarak kullanılmaktadır (Pickering ve ark. ,2016).

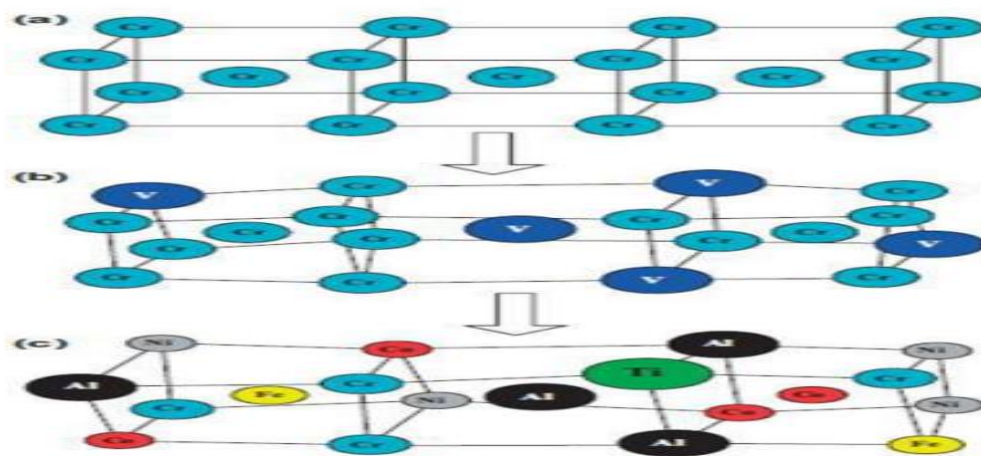
Yüksek Entropi Alaşımları (YEA) beş ya da daha fazla ana elementin eşit veya eşite yakın oranlarda katı eriyik şeklinde oluşturdukları her biri %5 ile %35 arasında bir konsantrasyona sahip alaşımlardır. İlk defa yeni nesil bir malzeme türü olarak 2004 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Yavaş difüzyon, kafes etkisi, kokteyl etkisi, yüksek entropi gibi

etkiler kararlı bir yapı oluşturmakta ve yüksek entropi alaşımlara mükemmel korozyon, yüksek sertlik, oksidiyon direnci, süper paramanyetizma, yüksek aşınma direnci, mükemmel yapısal ve termal kararlılık gibi özellikler kazandırarak diğer alaşımlara oranla avantajlı hale getirir (Şarlar, 2019). Aşağıda şekil 1.1’de malzemelerin zamana göre değişimi gösterilmektedir.

Şekil 1.1. Malzemelerin zamana göre değişimi (B.S. Murty, 2014)

Küçük miktarlarda minör elementler içeren YEA'lar genellikle beş ya da daha fazla sayıda eşit veya eşite yakın oranlarda elementten oluşmaktadır. Yüksek karışım entropisine sahip olduklarından yüksek entropili alaşımlar intermetaliklerle kıyaslandığında yüksek sıcaklıklarda bile daha kararlı yapıya sahiptirler. Sahip oldukları bu özellikler nedeniyle hızlı bir şekilde üretilebilirler, analiz edilebilir ve sentezlenebilirler, Yüksek entropili alaşımlar yeni nesil bir malzeme olup taşıdığı üstün özellikler nedeniyle mühendislik uygulamaları

Yüksek entropili alaşımların mekanik özelliklerinin yanı sıra manyetik özellikleri, biyouyumluluk, korozyon direnci gibi özellikleri alaşımlara yeni özellikler kazandırmada birçok olasılık sunmaktadır. Ayrıca yüksek entropili alaşımlar geleneksel malzemelerde kararlı, aktif yüksek entropili kaplamalar oluşturmada sıkça kullanılabilmektedirler (Ferrari ve Körmann, 2020). Aşağıda Şekil 1.2 de kafes yapıları gösterilmiştir.



3

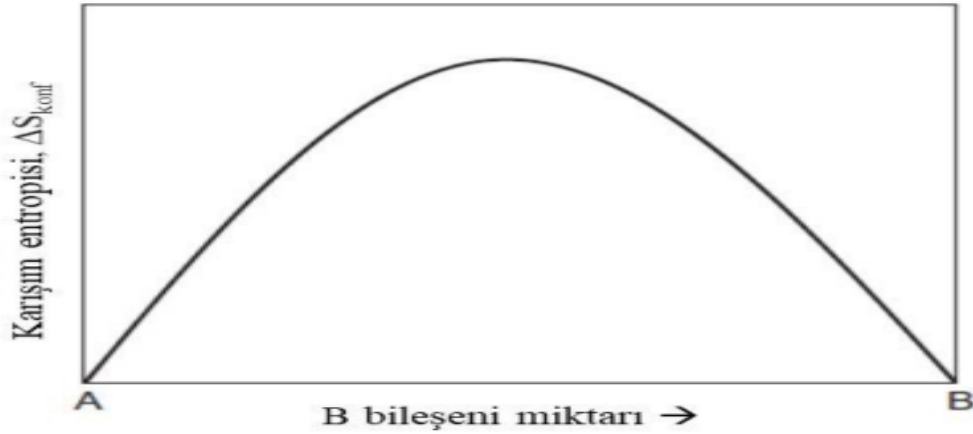
1.1. Yüksek Entropili Alaşımlar Kavramı

Bir ikili alaşım sisteminin yapısı ele alındığında çözücü ve çözünen kuralları Hume-Rotary kuralları referans alınarak ele alınır. Elementlerin son yörüngedeki elektron sayıları, atomik boyut farkları, kristal yapıları, elektronegatiflikleri bu kuralları oluşturmaktadır. Tüm bu etkenler birbirinden farklı elementler arasındaki bağlantıyı etkiler ve karışım entalpisini ya pozitif (ayırışma ve kümelenmeye neden olan itici etkileşim), ya negatif (düzenlenmeye ve metaller arası bileşiklerin meydana getiren etkileşim) ya da sıfıra (düzensiz katı çözeltilerin meydana gelmesi) yakın duruma getirir. Cantor yaptığı çalışmalarda geleneksel alaşım oluşturma metotlarından farklı olarak eş atomlu çok bileşenli veya eş atomlu alaşımlar oluşturma yöntemlerini tercih etmiştir (Cantor, 2014).

Yapılan çalışmada ikili bir konfigürasyonel entropisinin ($\Delta S_{conf} = -R(XA \ln XA + XB \ln XB)$) olarak yani, elementler eş atomlu oranlarda olduğunda maksimum olduğu bilinen termodinamik gerçeğe işaret ederek bu alaşımları “YEA” olarak tanımlamıştır (J-W Yeh ark. , 2004).

Genel olarak ikili ve üçlü sistemlerde bilinen bu katı çözeltilerin özellikle 4 ve daha fazla bileşenlerin yer aldığı faz diyagramlarında oluşturulup oluşturulamayacağı detaylı şekilde bilinmemektedir. Cantor ve arkadaşları yüksek entropili alaşımların eşit ya da eşite yakın atomik oranlarda çok bileşenli kompozisyonlar şeklinde oluşturulabileceğini öne sürerek maksimum entropi değerinin elde edilebileceğini ve bileşen sayındaki artışın bunu sağlayabileceği düşüncesiyle yüksek entropili alaşımların keşfedilmesinin temelini atmışlardır (Zhang, ve ark. , 2010).

İkili alaşımlarda alaşımlama elementleri birbirlerine ne kadar eşmolar oranda karıştırılırsa alaşımın karışım entropisi o oranda artar. Eğer elementler eşmolar şekilde karıştırılırsa karışım entropisi maksimum seviyeye çıkar. Şekil 1.3’de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 1.3. İki bileşenli sistemlerde karışım entropisinin değişimi (Murty,2014)

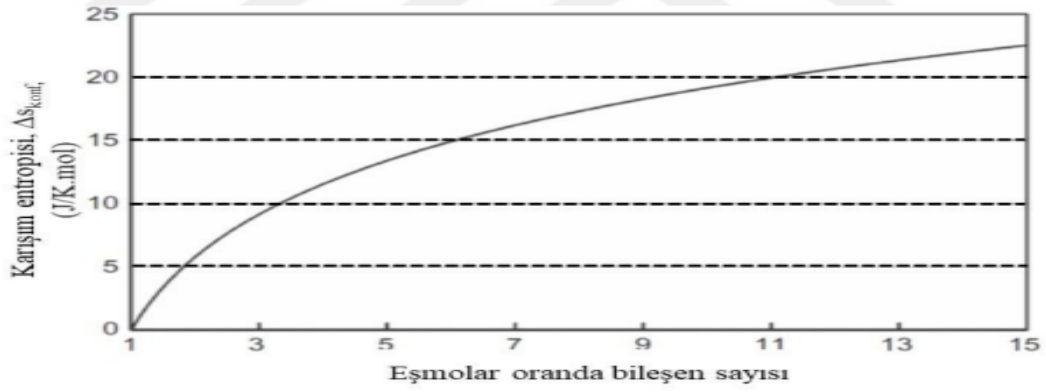
Şartlar uygun koşulda olduğunda termodinamik bir sistemde, sistem Gibbs serbest enerjisini (G) düşürmeye eğilimlidir. Denge anında G serbest enerjisi en düşük değerini alır. Aşağıdaki denklemde bu ilişki açıklanmıştır.

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix} \quad (1.1)$$

Burada ΔG gibbs serbest enerjisini, ΔS karışım entropisini, ΔH karışım entalpisini ve T ise mutlak sıcaklığı ifade etmektedir. Denklem incelendiğinde yüksek entropiye sahip düzensiz fazlar ile düşük entropiye sahip düzenli fazlar ile karşılaştırıldığında yüksek entropiye sahip düzensiz fazların daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu duruma bağlı olarak düzenli fazların yüksek sıcaklıklarda baskılanması kolaylaşmaktadır. Mole bağlı düzenleme entropisi aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir (Murty ve Yeh. ,2014).

$$\Delta S_{mix} = R \ln(n) \quad (1.2)$$

R bu denklemde gaz sabitini temsil etmektedir ve değer olarak 8,314 J/K moldür. n ise alaşım bileşen sayısını ifade etmektedir. Yüksek entropili bir alaşımda n=5 olarak alınırsa eşitlik 1,61 R değerini almaktadır. Miracle ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kullanılan bu yöntemde yüksek entropili alaşımlarda $\Delta \geq 1.5$ ifadesi esas alınmıştır. Aşağıda Şekil1.4’de bileşen sayısı ve karışım entropisin değişim grafiği verilmiştir (Yeh 2006).



Şekil 1.4. Karışım entropisinin eşmolar bileşen sayısına bağlı değişimi (Yeh 2006)

Bir alaşım sisteminde Boltzman eşitliği kullanılarak karışım (konfigürasyonel) entropisi hesaplanmaktadır.

$$\Delta S_{konf} = k \cdot \ln \cdot w \quad (1.3)$$

Bu eşitlikte, k Boltzmann sabiti, w ise sistemdeki enerjinin elementler arasında karıştırılma ya da paylaşılma yollarının sayısıdır. $1.5R$ konfigürasyon entropisi değeri alaşımlar için ayırım noktasıdır. ΔS_{konf} değerine göre alaşımların sınıflandırılması aşağıda Şekil 1.5 ve Tablo 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Konfigürasyon entropisine bağlı olarak entropi alaşımları

Tablo 1.1.Tipik geleneksel alaşımlar için eriyik halde verilen konfigürasyon entropi değerleri (J.-W. J. J. Yeh, 2013)

Sistem	Alaşımlar	ΔS_{conf} eriyik halde
Düşük alaşımlı çelik	4340	0.22R
Paslanmaz çelik	304	0.96R
	316	1.15R
Yüksek hız takım çeliği	M2	0.73R
Al alaşımı	2024	0.24R
Cu alaşımı	7-3 pirinç	0.61R
Ni bazlı süper alaşım	İnconel 718	1.31R
	Hastelloy X	1.37R

1.2 Yüksek Entropili Alaşımlarına Etki Eden 4 Faktör

Yüksek entropili alaşımlar eşmolar konsantrasyonları nedeniyle geleneksel alaşımlardan farklıdır. Eh ve ark. Yaptıkları çalışmalarda bu etkileri dört ana başlıkta özetlemiştir. Bunlar, kafes distorsiyonu, yüksek entropi, kokteyl etkisi ve yavaş difüzyondur. Bu dört faktör

Kısacası yüksek entropi mikro yapıyı basitleştirerek HMK ve YMK katı eriyikleri meydana getirmekte ve büyük bir etkiyi oluşturmaktadır. Nanokristal yapıların oluşumu yavaş difüzyon etkisi ile gerçekleşmektedir. Kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler üzerinde kafes distorsiyonu etkilidir. Kokteyl etkisi ise farklı elementlerin meydana getirdiği etkileşim ile kompozit yapının oluşmasında rol alır (Miracle ve Senkov, 2017).

1.2.1.Yüksek entropi etkisi

Alaşımların katı halde üç olası fazı vardır. Katı çözeltiler, elementel fazlar ve intermetalik bileşikler bu olası fazlardır. Faz diyagramları incelendiğinde tek bir metalik elemente dayalı saf bileşenlerin elemental fazlar olduğu görülmektedir. Süper latise sahip stokiometrik oranlardaki bileşiklerin ise intermetalik bileşikler olduğu görülmektedir. Katı çözeltiler ise düzenli ve düzensiz katı çözeltiler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu çözeltiler YMK, HMK, HSP yapılarında olabilir. Ara faz ve intermetalik faz yapıda bulunan çözeltiler düzenli katı çözeltilerdir. Faz diyagramlarında farklı stokiometrik bileşikler etrafındaki geniş aralıklarda görüldüğü gibi intermetalik bileşiklere dayanan kristal yapıları katı çözeltilerdir. Latis içerisinde bazı durumlarda kurucu elementler farklı bölgelerde bulunan

yerleri işgal etmektedir. Bu gibi durumlarda düzenlilik dereceleri tamamen düzenli olan yapılar ile kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmektedir. Bu yapılara kısmen düzenli çözeltiler denmektedir. Bu fazlar intermetalik yapıya sahiptirler fakat kurucu elementler arasında önemli derecede çözünürlükleri nedeniyle katı çözeltiler olarak kabul edilmektedir (Michael ve Yeh, 2016).

Katı çözeltiler oluşumunu artırdığı ve mikroyapıyı daha kolay şekilde oluşturduğu için yüksek entropi etkisi en önemli etkidir. Malzeme bilgisinde geleneksel yaklaşımlara göre bu çeşit alaşımlarda çok sayıda bileşik ya da segrasyon şeklinde fazların oluşması, elementler arasında birçok farklı etkileşim olması gibi olayların gerçekleşmesi beklenmektedir. Fakat yüksek entropi etkisi tüm bu fazların oluşmasını önlemektedir. Termodinamiğin ikinci kanununu ele aldığımızda belli basınç ve sıcaklıkta Gibbs serbest enerjisinin en düşük olduğu durumda termodinamik olarak dengeye varan faz kararlı olarak kalmaktadır.

Çoklu ana element katı çözeltilerini açıklamada yüksek entropi etkisi esas alınmaktadır. Yüksek entropi etkisi katı çözeltiler fazlarını stabilize eder. İntermetaliklerle de konfigürasyonel entropiye genellikle daha düşüktür. Stokiyometrik intermetalik bileşiklerde konfigürasyon entropisi sıfır olarak değerlendirilmektedir. Termodinamik dengede Gibbs serbest enerjisi sıcaklık ve basınç en düşük değerdedir. Yüksek entropili alaşımlarda birbirleri arasında daha güçlü bağlanma enerjisine sahip ögeler olduğundan katı çözeltiler fazlarının meydana gelmesinde ve intermetalik faz oluşumunu engellemede yüksek entropi etkisi dikkate alınır (Altunay Karabaş, 2018).

1.2.2. Yavaş difüzyon etkisi

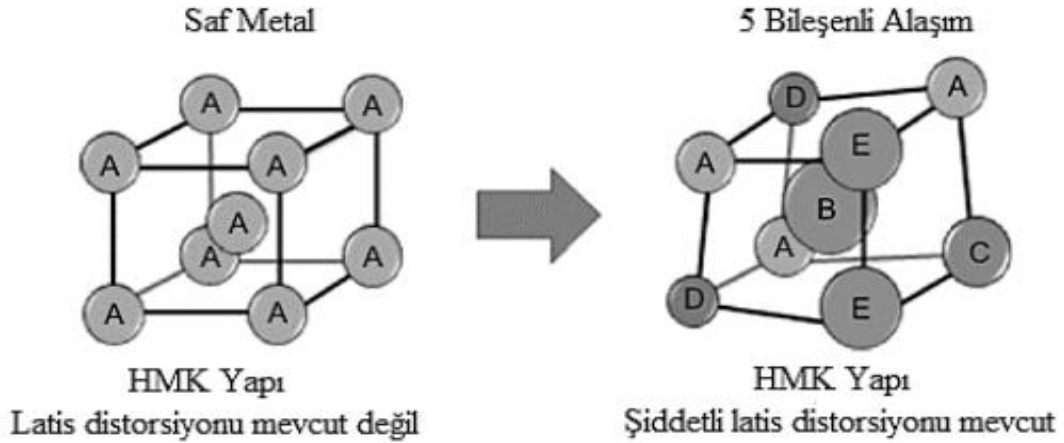
Yüksek entropi alaşımları diğer alaşım ve saf metallerle kıyasladığımızda difüzyon katsayılarının düşük olduğu görülmektedir. Kafes çarpımları bu etkiyi gerçekleştirmektedir. Yüksek entropili alaşımlarda nano boyuttaki çökeltilerin oluşması ve difüzyona etki etmesi sonucu difüzyon hızı yavaşlar. YEA'lar faz oluşumu sırasında yavaş difüzyon etkisine sahip olduklarında bariyer kaplamaları olarak da görev almaktadırlar. Yüksek entropili alaşımlarda difüzyon hızı alaşımdaki element sayısı ile bağlantılıdır. Element sayısı arttıkça difüzyon hızı yavaşlar. Tsai ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bunu ispatlamışlardır (Tsai ve ark. , 2013).

Genel anlamda difüzyon sıcaklığa bağlı değişimler vasıtası atomların yer

değiştirmesidir. Difüzyon hızı en yüksek saf metaller olup yüksek entropili alaşımlarda ise difüzyon hızı yavaştır. YEA 'lardaki bu yavaş difüzyon hızının yanı sıra faz dönüşüm hızı da diğer geleneksel alaşımlarla kıyaslandığında daha yavaştır. Bütün kafes noktalarındaki atomların komşularının farklılıkları yüksek entropili alaşımlarda farklı elementlerin kullanılmasından kaynaklanır. Önceki veya sonraki komşu atomların bu nedenle boşluklara ilerleyebilmeleri farklıdır. Yapıdaki atom farklılıkları her kafes noktasını farklı bağladığından farklı bölgesel enerjilere yol açar. Düşük enerjili bölgeye ilerleyen atom ilerlediği bölgede takılı kalmakta ve bu bölgeden ilerleme şansı oldukça azalmaktadır. Eğer bu nokta yüksek enerjiye sahipse atom rahatlıkla ilerler. Tüm bu nedenler yüksek entropili alaşımlarda difüzyon mekanizmasını yavaşlatır. Yüksek entropili alaşımda yer alan elementlerin difüzyon katsayılarının farklı olmasından dolayı bazı düşük aktiviteye sahip olan elementler boşluklara yavaş ilerler. Faz dönüşümünün gerçekleşmesi için alaşımda yer alan bütün elementlerin koordineli bir şekilde difüzyonu gereklidir. Bu tip elementlerin difüzyon kat sayısı farklılıkları da yüksek entropili alaşımlarda yavaş difüzyon etkisine neden olur (Erdoğan ve Zeytin,2019).

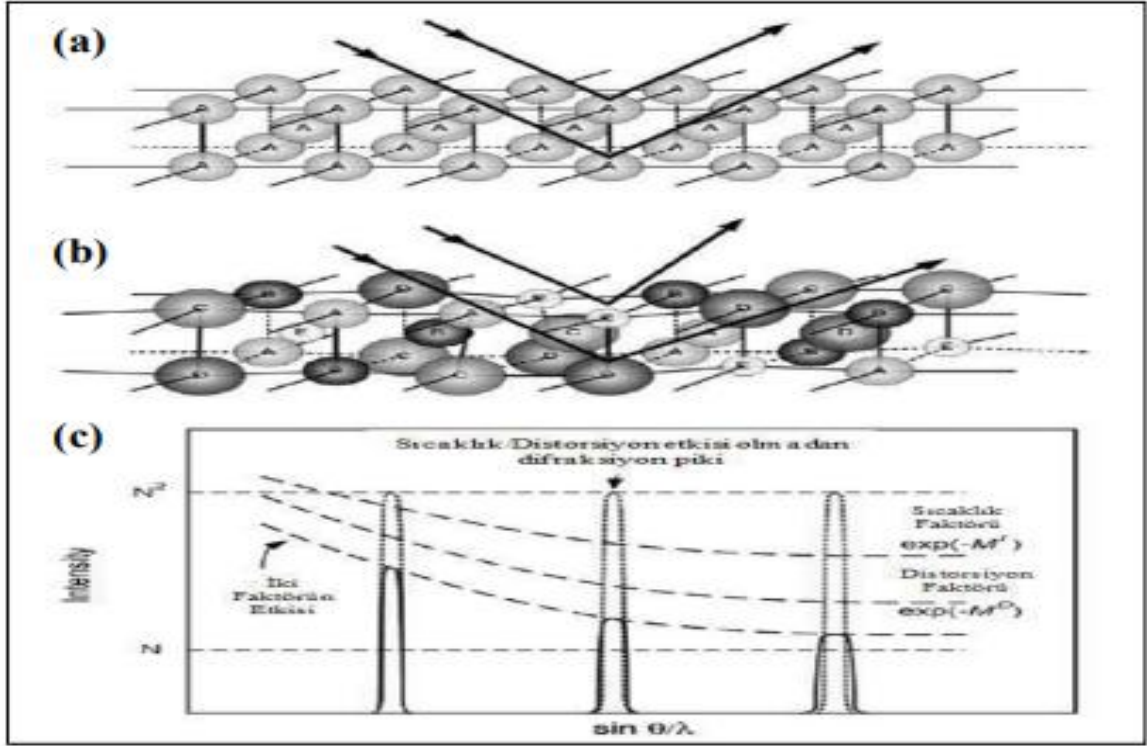
1.2.3. Latis distorsiyonu etkisi

Yüksek entropili alaşımlarda yapıyı oluşturan elementler birden fazla olduğu için kafes yapıdaki noktalarda yer alan atomu çok sayıda diğer atomlar çevrelemiştir. Kafesteki oluşan bu farklılıklar latis gerilmelerini ortaya çıkarmaktadır. Yüksek entropili alaşımların yapılarında bulunan atom topluluklarının yarattığı kafeslerde atomlar birbirleriyle simetrik olarak bağlamamakta ve buda kafes yapılarında şiddetli bir değişim meydana getirmektedir. Yüksek entropili alaşımların meydana gelen bu kafes yapısındaki şiddetli bozulmalar latis distorsiyonu olarak adlandırılır(Miracle ve Senkov, 20149). Bu durum aşağıdaki şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6. (a) HMK ve (b) YMK kristal kafes yapıları 5 temel elementli (Yeh, 2006)

Tek elementli katı çözeltiler ve yüksek entropili alaşımlar karşılaştırıldığında XRD piklerinin yüksek entropili alaşımlarda oldukça düşük olduğu görülmektedir. Distorsiyon etkileri, XRD'lerin yapı modifikasyonlarından dolayı sayısal anlamda, termal etkinlerle aynı model olarak formülize yapılmaktadır. Böylelikle kafeste meydana gelen örgü yapısı X ışını kırınımı yöntemi ile tespit edilir. Kafes yapısında oluşan bu distorsiyonlar ayrı olarak X-ışını Difraktometresi (XRD) şiddetini azaltmaya neden olur. X-ışını difraktometresinde oluşan bu değişimler aşağıdaki Şekil 1.7'de gösterilmiştir (Zhang ve ark. , 2013).



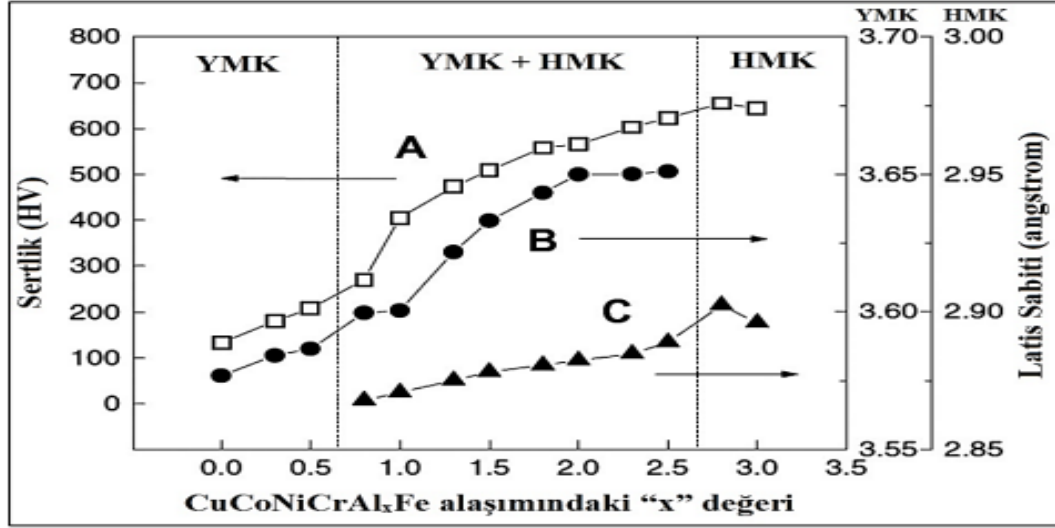
Şekil 1.7.Kafeste ki distorsiyon etkisi ile Bragg kırınımını gösteren şema. a) aynı atomlara sahip saf metal kafes yapısı, b) farklı boyutlardaki elementlerin oluşturduğu alaşımanın distorsiyona uğramış kafes yapısı, c) Distorsiyon ve sıcaklığın XRD şiddeti üzerindeki etkileri (Zhang, ve ark. , 2013)

Şiddetli latis distorsiyon etkisi HMK kristal yapısına sahip yüksek entropili alaşımlara yüksek mukavemet kazandırır fakat kırılabilirlik özeliğine de neden olabilir. HMK yapılar ve YMK yapılar karşılaştırıldığında YMK yapılarda mukavemetin daha düşük olduğu akademik çalışmalarla tespit edilmiştir (Yeh ve ark. , 2004).

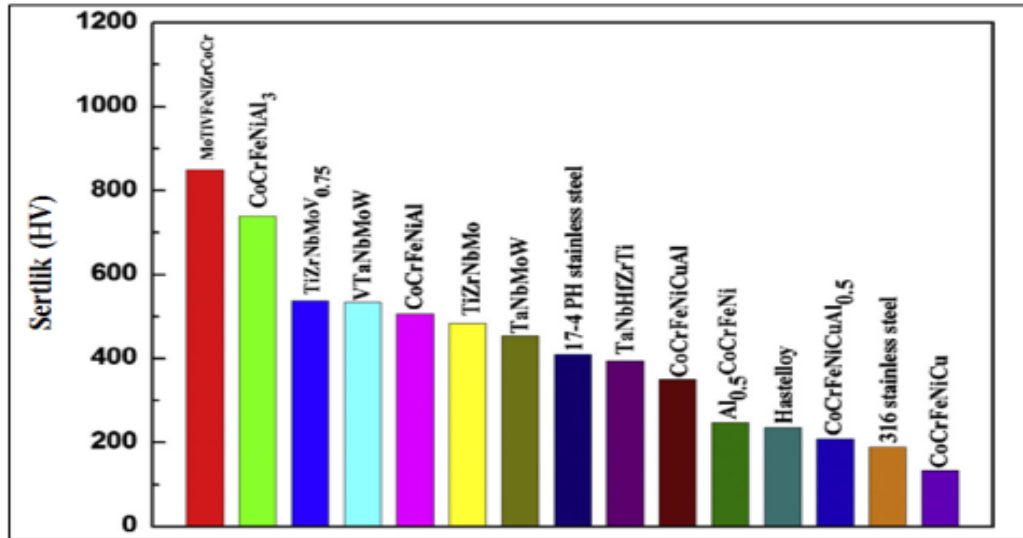
1.2.4.Karışım etkisi

Yüksek entropili alaşımları en az 5 veya daha fazla elementin bir araya gelmesiyle oluştuğu için geleneksel alaşımlarda tek bir elemente bağlı olarak elde edilemeyen özellikler bu karışım etkisiyle elde edilebilir. Bu elementlerin bir araya gelmesiyle yapısal özelliklerde farklılıklar oluşur ve karışım etkisi meydana gelir. Bu karışım etkisi sonucu oluşan özellikler kullanılan elementlerin oranları ve alaşımlara hangi özelliklerin kazandırılması hususunda rol oynar. Daha önce yapılan bir araştırmada $Al_xCoCrCuNiFe$ yüksek entropili alaşımında Al elementinin içeriğin değişimi ile beraber alaşımda değişen sertlik, kafes yapısı ve latis

sabitindeki değişimler irdelenmiştir. Yapılan gözlemde sertlik değerlerinin artışı ve Al elementinin ilavesi öncesinde YMK yapıda olan yüksek entropili alaşımın, Al oranı arttıkça YMK+HMK yapıya belli bir orandan sonra ise sadece HMK yapıya geçtiği görülmüştür (Yeh ve ark. , 2004). Aşağıda Şekil 1.8’de ve Şekil 1.9 ‘da bu durum gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Al_xCoCrCuNiFe yüksek entropili alaşım sisteminde Al içeriğiyle birlikte değişen sertlik değerleri ve kafes parametreleri; A) YEA'nın sertlik değişimi B) YMK kafes yapısının parametresi C) HMK kafes yapısının parametre değerleri (Yeh ve ark. , 2004)



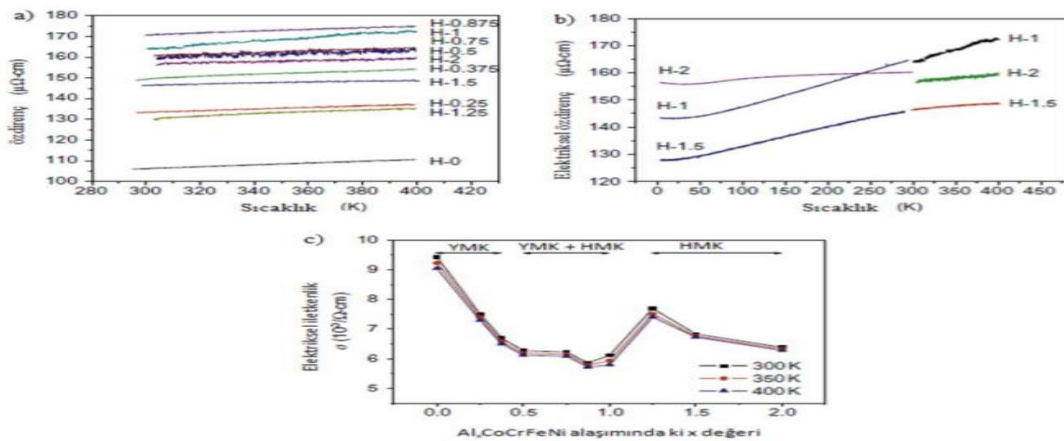
Şekil 1.9. Bazı geleneksel ve yüksek entropili alaşımların sertlik değerleri

1.3. Yüksek Entropili Alaşımların Genel Özellikleri

Geleneksel alaşımların mekanik ve yapısal özellikleri ana elementle bağlı olarak değişmektedir. Düşük miktarlarda kullanılan alaşım elementlerinin oranlarına bağlı olarak alaşımların özellikleri değişmektedir. Bu durum yüksek entropili alaşımlarda ise başka şekillerde olabilmektedir.

1.3.1. Elektriksel özellikleri

Chou yüksek entropili alaşımlarda elektrik dirençlerini ilk olarak incelemişlerdir. Sıcaklık ve alüminyum oranlarının ilişkisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Yüksek entropili alaşımların elektrik öz direnç seviyeleri mutlak sıfır konumunda geleneksel alaşımlar ile kıyaslandığında genel anlamda daha yüksek olduğu görülmektedir. Pozitif bir küçük eğim ve 298-400 K sıcaklık derecelerinin doğrusal fonksiyonu olan alaşımların hepsinin elektriksel dirençleri birbirleri ile ilişkilidir. Tek fazlı yapılardaki alüminyum oranlarının seyrek görüldüğü yerlerde elektriksel iletkenlik değeri azalmaktadır. Hacim Merkezli Kübik ve Yüzey Merkezli Kübik kafes sistemleri gibi kristal yapılarda ise elektron saçılımları artmaktadır. YMK fazları HMK fazlarından daha düşük elektriksel iletkenliğe sahiptir (Chou, ve ark. ,2009). Şekil.1.10'da bazı yüksek entropili alaşımlar için değerler gösterilmektedir.



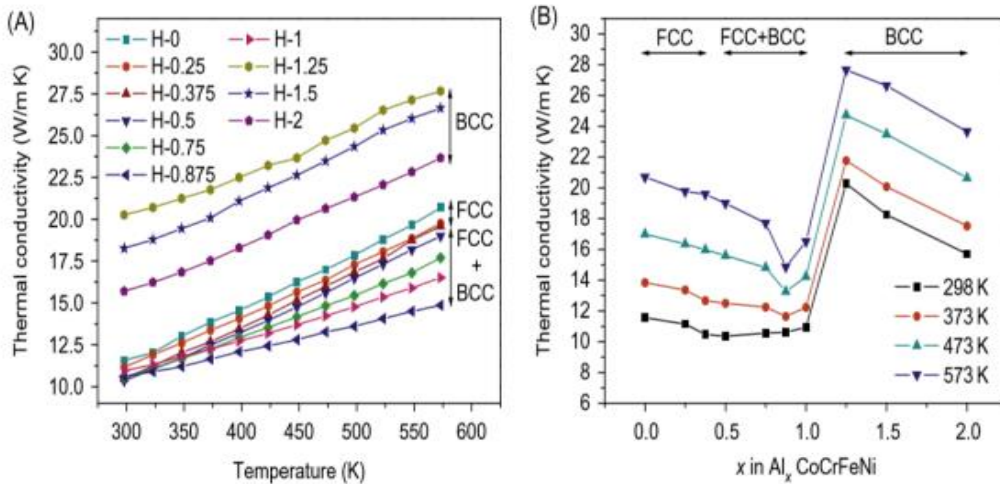
Şekil 1.10. a) 300-400 K sıcaklık değerinde, tüm alaşımların elektriksel direnci, b) x oranları; 1-1,5-2 olan alaşımların 4-400 K sıcaklığında ki elektriksel dirençleri, c) Al_xCoCrFeNi alaşımlarındaki x değerlerine bağlı olarak 300- 350-400 K' de ki elektriksel iletkenlik (Chou, ve ark. , 2009)

1.3.2. Manyetiksel özellikler

Demir, nikel, kobalt gibi ferromanyetik özellik gösteren elementler alaşıma uygun oranlarda eklenerek manyetiksel özellik kazandırılır. Lucas ve ark FeNi, CoCrFeNi, CoCrFeNiPd, CoCrNiFePd2, Al₂CoCrFeNi ve AlCoCrCuFeNi gibi alaşımlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda Fe–FeNi yaptıkları bileşiklerde CoCrFeNi YEA’nın manyetiklik özeliğinin az olduğu ve yüksek sıcaklık olan bölgelerde manyetiklik özeliğinin daha da düştüğü görülmüştür (Lucas ve ark. , 2013).

1.3.3. Isıl özellikler

Aşağıda yüksek entropili alaşımların ısı iletkenliklerinin alüminyum ve sıcaklık fonksiyonlarına bağlı değişim gösterilmektedir. Yüksek entropili alaşımlar ve saf metaller kıyaslandığında ısı iletkenliklerinin saf metallere oranla sıcaklık derecelerinin arttığı görülmektedir. Kafes bozulmaları ve termal genleşmelerin azalması mevcuttaki alaşımlarda fonon kontrasyon sıcaklık değerini düşürmektedir. Şekil 1.11 de 'de x'in bir fonksiyon değeri olarak ısı iletkenlikleri belirtilmektedir. Isıl iletkenlikler tek faz bölgelerinde düşmektedir. Bundan başka Yüzey Merkezli Kübik ve Hacim Merkezli Kübik yapı karşılaştırıldığında HMK yapının daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu görülmektedir. HMK+YMK yapılarda ise ısı iletkenlik değişen sıcaklık aralıklarında en düşük seviyededir (Chou ve ark., 2009,). Şekil 1.11'de bu duruma örnekler ifade edilmektedir.

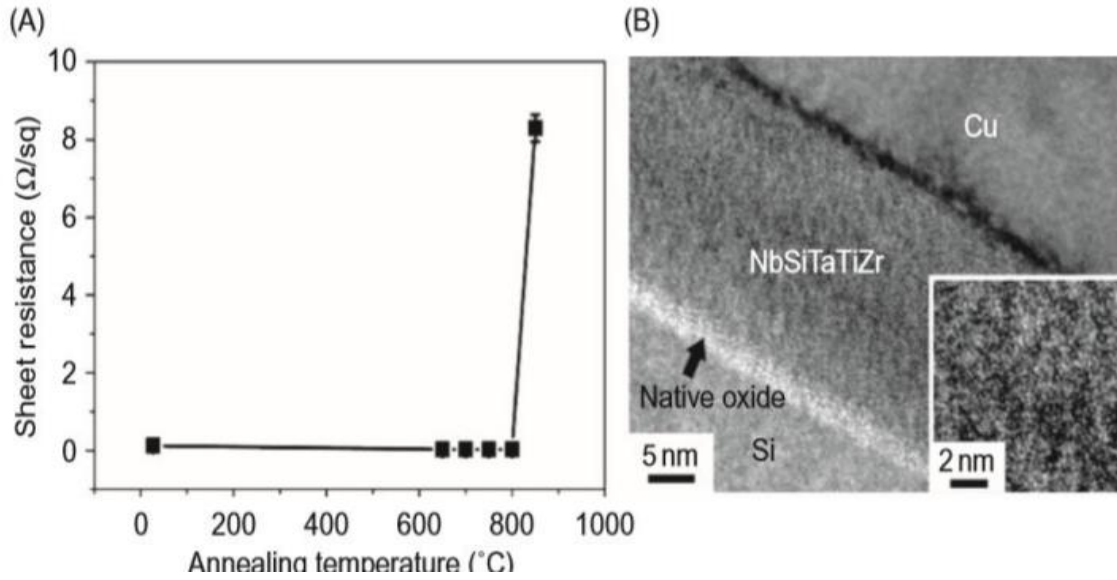


Şekil 1.11.(A) sıcaklık değerine göre ısı iletkenlik eğrileri, (B) Al_xCoCrFeNi alaşımlarındaki x değerlerine göre ısı iletkenlik eğrileri

1.3.4. Difüzyon bariyerlerinin özellikleri

Performansı yüksek difüzyon malzemelerinde zamanla parçaların küçülmesi ve mikro elektronik aletlerde yaygınlaşması üretimi zorlaştırmaktadır. Bakır silisyuma ilave edildiğinde çeşitli reaksiyonlar yaratır. Bu durum arıza ve cihaz bozulmalarına yol açmaktadır. Cu ve Si arasındaki metalik bariyerlerin 550-650o C’de başarısız olmaları beklenirken bu durum seramik malzemelerde 700- 800o C’de başarısız olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bu durum yüksek entropili alaşımlar için yaşanır. YEA’lar için iki şekilde difüzyon bariyeri öngörülmektedir(Tsai ve ark. , 2008).

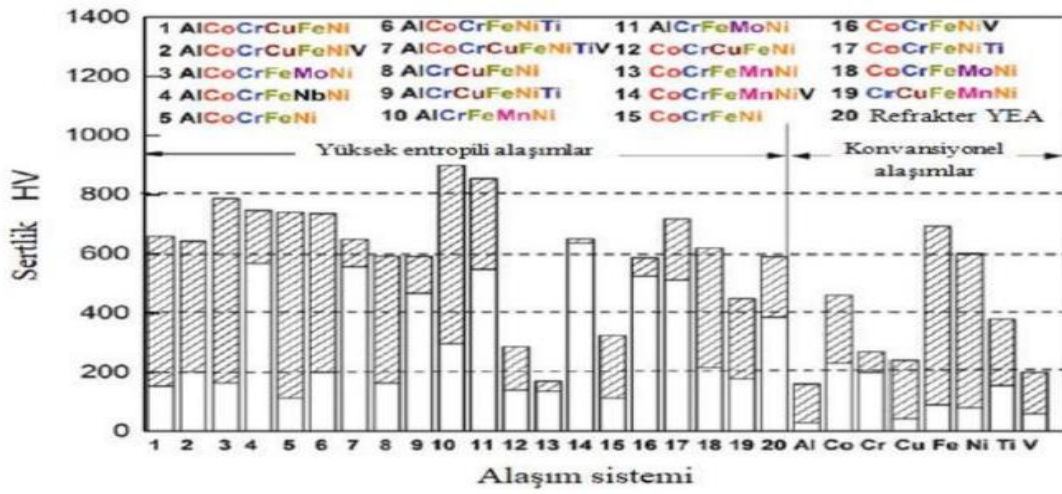
Bu bariyerler AlMoNbSiTaTiVZr YEA bariyeri ve NbSiTaTiZr r YEA bariyeridir. İçerisinde Cu ve Si ihtiva eden yüksek entropili alaşımlara eklenen ve 100 nm kalınlığı olan AlMoNbSiTaTiVZr bariyerinde Bakır ve Silisyum 700°C VE 30 dakika kadar karışmaz. Şekil 1.12’de gösterildiği gibi Bakır ve Silisyum arasında reaksiyon ve interdifüzyonu engelleyen NbSiTaTiZr bariyeri 800°C ila 30 dakika arsında olup 20 nm’lik bir bariyerdir. Şekil 1.12’ de bu durum gösterilmektedir.



Şekil 1.12.(A) Cu / NbSiTaTiZr / Si tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak tabaka direnci, (B) 800 o C tavlama sonrası Cu / NbSiTaTiZr / Si test yapısının TEM görüntüsü (Tsai ve ark. , 2008)

1.3.5. Sertlik özellikleri ve sertliği etkileyen faktörler

Sertlik değeri genellikle metallerde mekaniksel karakteristiğın belirlenmesinde çok önemli bir özelliktir. Sertlik değeri ölçmede en sık kullanılan ölçme metotlar Vickers, Rockwell, Brinell yöntemleridir. Yüksek entropili alaşımlar genelde 140-900 HV arasında sertlik değerlerine sahiptirler. Şekil 1.13’de geleneksel olarak isimlendirilen alaşımlar ile YEA’ların sertlik değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır (Gao ve ark, 2016). Şekil 1.13’de taranmış bölgeler sertlik değerlerinin aralıklarını ifade etmektedir.



Şekil.1.13.YEA ile Geleneksel olarak kullanılan alaşımların sertlik değerlerinin karşılaştırılması (Gao ve ark, 2016).

Tavlama işlemleri; Tavlama işlemi yüksek entropili alaşımların sertlik değerleri üzerinde etkilidir. Bu etkiler iki ana başlık altında toplanabilir. Güçlü ve zayıf yaşlanma sertleşmeleri olarak adlandırılmaktadırlar. Geleneksel tip alaşımlarda yüksek sıcaklık durumunda yaşlanma sertleşmelerine daha az rastlanmaktadır. Çökelti oluşumlarına bağlı kalınarak yaşlanma davranışları farklılık göstermektedir. Tavlama esnasında çökeltilerin olmaması yüksek entropili alaşımların sertlikleri üzerinde az bir etkiye sahip olmaktadır.

Yapı Etkileri; YMK VE HMK fazların sertlikleri üzerine etki eden birçok faktör vardır. Hacim merkezli kübik fazlarda sıkı paket kayma düzlemleri bulunmamaktadır. Yüzey merkezli kübik fazlarda bu yapı bulunduğu için kayma gerilmeleri hacim merkezli kübik yapılara oranla daha azdır. Yüzey merkezli kübik yapıların sertlik değeri hacim merkezli kübik yapılara kıyasla daha küçüktür.

Alaşım etkileri; Geçiş elementleri yüksek entropili alaşımlarda oldukça önemli

etkiye sahiptirler. Yüksek entropili alaşımlar fazlarını stabilize ederek kendi kristal yapılarını oluştururlar. Cr-Mo-V-Ti elementleri kullanılarak HMK kristal yapı, Co-Cu-Ni elementleri seçilerek ise YMK kristal yapı meydana getirilir. Zhang ve Wang yaptıkları bir çalışmada $AlCo_xCrFeNiTi_{0,5}$ alaşımlarında $x=1$ değerinin üzerinde Co elementinin oranlarının artması ile yüzey merkezli kübik fazlarının ortaya çıkışını göstermiştir.

Yorulma, akma dayanımı, çekme ve uzama dayanımı, sertlik ve elastiklik modülü gibi özellikler bir metal ya da alaşımın mekanik özelliklerini oluşturur. Çeşitli uygulamalar geliştirerek bu özellikler bütüncül bir yaklaşım içerisinde esas alınır. Yüksek sıcaklık gerektiren malzeme seçimlerinde ise sıcak korozyon dayanımı, oksidasyon ve sürünme dayanımı değerleri dikkate alınır. Sonuçta yüksek entropili alaşımların mekanik özelliklerinin geleneksel alaşımlara oranla daha iyi bir performansa sahip olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür (Murty ve ark. , 2014).

1.4. Yüksek Entropili Alaşımların Tasarlanması

Yeh ve arkadaşları yüksek entropili alaşımlar t bulunduğundan beridir birçok çalışmaya konu olmuşlardır. YEA'ında artan element sayılarıyla birlikte tek fazlı katı eriyikler oluşturmak mümkündür. Çok fazla olabilecek element kombinasyonu ile çok sayıda yüksek entropili alaşım üretmek mümkündür fakat her üretilen alaşımın faydalı olabileceği söylenemez. Element sayısı artıkça meydana gelen faz diyagramının belirlenmesi de güçleşir. Bundan dolayı yüksek entropili alaşımların tasarımında yardımcı bazı yöntemler kullanılır.

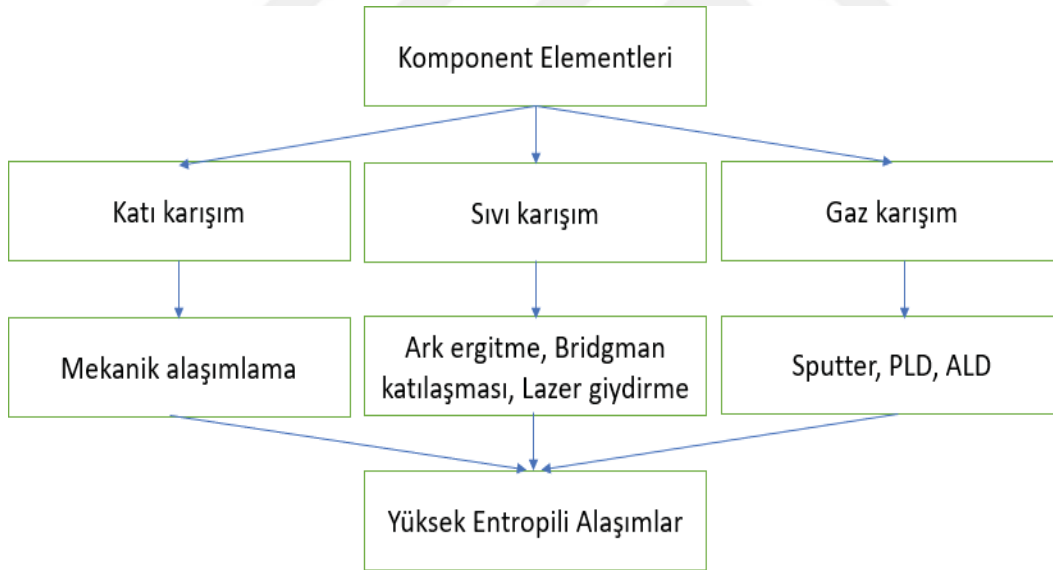
Yüksek entropili alaşımları meydana getirirken hangi tür ve fazların oluşacağını bulmak için belirli bilgilere sahip olunmalıdır. Bu bilgiler deneysel olarak elde edilmiş çalışmalar sonucunda bulunmuştur. Yüksek entropili alaşımlarda faz yapısını anlamak için karışım entalpisi ($\Delta H_{krş}$), karışım entropisi ($\Delta S_{krş}$), “ Ω ” parametresi, atomsal boyut farkı ve valans elektron konsantrasyonu (VEC) gibi fizikokimyasal parametreler kullanılır (Tian ve ark. , 2015).

Bir alaşımdaki element sayısını fazla olması faz diyagramının oluşturmakta zorluk çıkartabileceği ve çok sayıda yüksek entropili alaşımı bileşimi sebebiyle alaşımların denem yanılma metoduyla araştırmak imkânsızdır. Bu nedenle teorik modelleme yöntemleri ortaya çıkmıştır. YEA'rın faz yapısını incelemek için (DFT) hesaplamaları ve ab initio moleküler dinamikler (AIMD) simülasyonları gibi hesaplama yöntemleri mevcuttur. Alternatif olarak

faz diyagramlarının hesaplanması (CALPHAD) için metotlar kullanılmaktadır (Yeh, 2006).

1.5. Yüksek Entropili Alaşımların Üretim Yöntemleri

Klasik üretim yöntemleri geleneksel malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Yüksek entropili alaşımları üretiminde ise istenilen özelliklere ulaşmak için çeşitli üretim teknikleri uygulanmaktadır. Bu üretin teknikleri 3 ana başlıkta toplanmakta katı hal sentezi, sıvı hal sentezi ve gaz hali sentezi adını almaktadır. Katı hal sentezi temelde mekanik alaşımlamayı referans alır. Elektrik dirençli ergitme, ark ergitme, lazer ergitme, endüktif ergitme sıvı hal sentezini oluşturmaktadır. Üçüncü metot gaz sentezidir. Bu yöntem buhar fazı biriktirme, lazer biriktirme, moleküler ışın epitaksi ve atomik katman biriktirme yöntemlerini kapsar. Aşağıdaki şekilde üretim yöntemlerinin özet hali verilmiştir (K. Li. , 2021). Şekil 1.14’de alaşımların üretim şeması gösterilmektedir.



Şekil 1.14. Yüksek entropili alaşımların üretim yöntemleri ana şeması

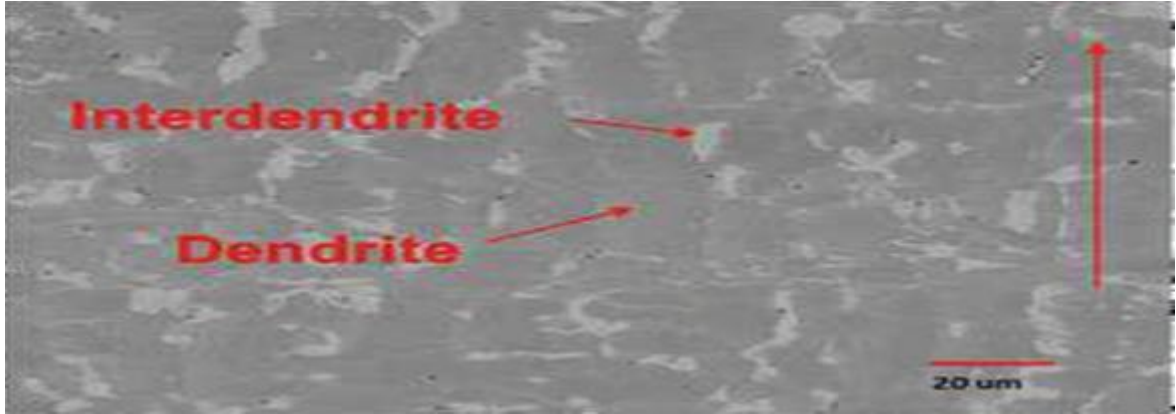
1.5.1.Sıvı Hal Üretim Yöntemleri

Sıvı hal üretimi Bridgman katılaştırma döküm yöntemlerini, ark ergitme, indüksiyonla ergitme, metal püskürtme lazerle kaplamayı kapsamaktadır. Bu yöntemler içerisinde ark ergitme, yüksek entropi alaşımlarının elde edilmesinde en kullanıla edilen metottur (Özkan ve Karaoğlanlı, 2020).

1.5.2.Ark ergitme

Geçmişten günümüze üretilen yüksek entropili alaşımların büyük çoğunluğu vakum ergitme veya vakum indüksiyon ergitme yöntemleri kullanılarak üretilmişlerdir. Yüksek entropili alaşımları meydana getiren elementler genellikle yaklaşık 3000 C yakın sıcaklıklarda erimekte-dirler. Ark ergitme işleminde bu sıcaklık değerine ulaşıldığından yüksek entropili alaşım elde etmek için bu yöntem kullanılmaktadır (Murty ve ark. , 2014).

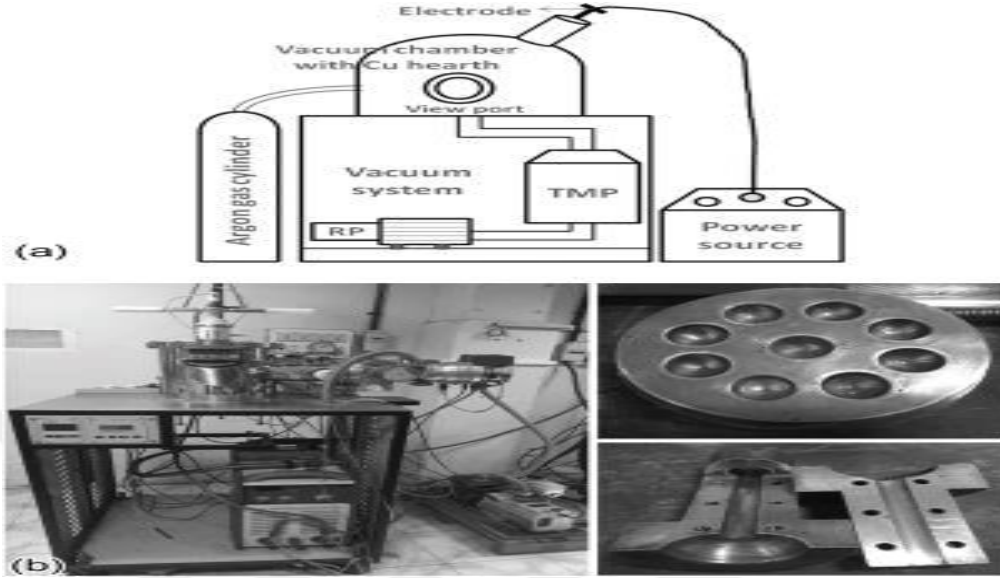
Elektrik gücü kullanılarak kontrol edilebilen ark ergitme fırınının torç sıcaklığı 3000 C olup birçoğu sıvı halde yüksek erime sıcaklığına sahip elementler bu fırınlarda karıştırılmaktadır. Özellikle düşük erime noktası ve kolaylıkla buharlaşan Mg, Zn ve Mn gibi elementler için ark ergitme yöntemi tercih edilmez. Bu tür elementler için indüksiyonlu ve dirençli ısıtma gibi yöntemler tercih edilir. Bu yöntemin bir başka dezavantajı ise düşük katılaşma sırasında heterojen yapıların oluşmasıdır (Kanayo ve ark. , 2016). Şekil 1.15’de yüksek entropili alaşım vakum ark yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Aşağıda interdendritik ve dentritik yapıların oluşumu belirtilmiştir.



Şekil 1.15. Vakumlu ark eritme ve döküm yöntemi kullanılarak üretilen $A_{10}CoCrCuFeNi$ alaşımının mikroyapısı

Ark ergitme ünitesi aşağıda belirtilen şekilde metallerin döküm ve ergitme işlemi için kullanılmaktadır. Bakır ocakta su soğutmalı bir potaya öncelikle ergitilecek metaller konmaktadır. Tungsten elektrot tükenmeyen güç kaynağı olarak kullanılmakta ve potadaki metaller ve ergitme için yerleştirilen elektrot arasında bir elektrik arkı meydana gelmektedir. Difüzyon ve döner pompalar kullanılarak 7-10 mbar ölçeğinde bir vakum oluşturulur ve argon gazı sisteme verilir. Argon gazı sistemi temizlemek için kullanılır. Ayrıca günümüzde

işlemlerin çok kısa sürede vakum değerlerini sağlayabilmesi için difüzyon pompası yerine turbomoleküler pompa sıkça tercih edilmektedir (Srivatsan ve Gupta, 2020). Şekil 1.16'da bu proses gösterilmiştir.



Şekil 1.16.(a) Vakum arklı eritme ünitesinin şeması ve (b) bakır pota ve iki tip bakır kalıp içeren ark eritme ve emme döküm ekipmanının fotoğrafı (Srivatsan ve Gupta, 2020)

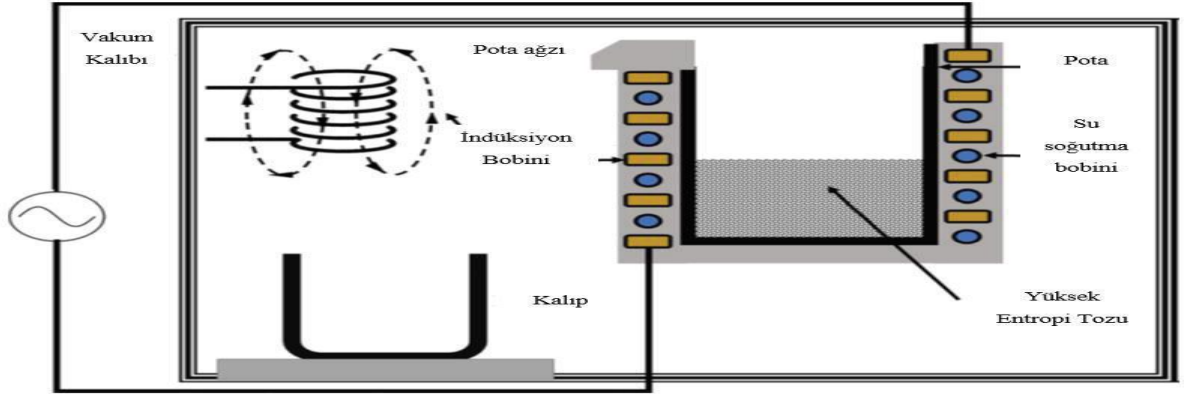
Birkaç kez tekrar edilen ergitme ve katılaştırma prosesi alaşımlarda kimyasal homojenliği sağlamak için yapılır. Katılaşmış külçelere tablet şeklini alarak şekilde görülen bakır potanın dibine düşer. Bu metotla silindirik külçeler meydana gelmektedir. Basma ve çekme deneyleri için uygun normlarda üretilen bu silindirik külçeler yüksek soğutma hızıyla üretildiklerinden gelişmiş yüksek entropili alaşımların üretilmesine olanak sağlamaktadırlar (Gao ve ark. , 2016).



Şekil 1.17.Ark eritme ve döküm ekipmanının gösterimi

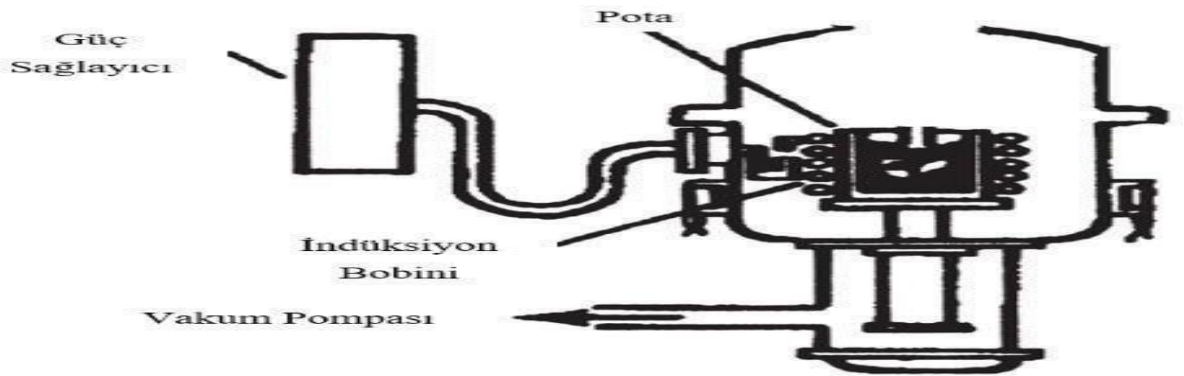
1.5.3. Vakum indüksiyon ergitme

Bir alaşımin inert bir atmosferde ya da vakum altında elektromanyetik indüksiyon kullanılarak eritilmesi içeren ergitme döküm işlemine vakum indüksiyonla ergitme denmektedir (Simbarashe ve ark. , 2020).



Şekil 1.18. Vakum indüksiyonlu eritme işleminin şematik diyagramı (Simbarashe ve ark. , 2020)

Vakum indüksiyonlu eritme işleminde fırının ısıtması bobinin sağladığı elektrik akımı ile gerçekleşmektedir. Bu sisteme bağlı bir eritme potası da bulunmaktadır. Refrakter içerisinde bulunan yükte bir akımı indükleyen manyetik akımın bobinde geçişi ile sağlanmaktadır. Pota içerisindeki malzemeler yeterli ısıtmayı gerçekleştirdikten sonra sıvı haldeki malzemeler manyetik alanlar sayesinde karışmaktadır. Yükün ısınma işlemi şarj şekli, indüksiyon bobin frekansı, eritme durumu ve boyutuna göre farklılık göstermektedir. Yeni sistemlerde uygun koşullar elde edebilmek için ayarlanabilen frekansalar kullanılmaktadır (ASM Handbook, Volume 15, 2008).



Şekil 1.19. Vakum indüksiyonlu eritme fırınının temel elemanları

1.5.4. Bridgman katılaştırma döküm

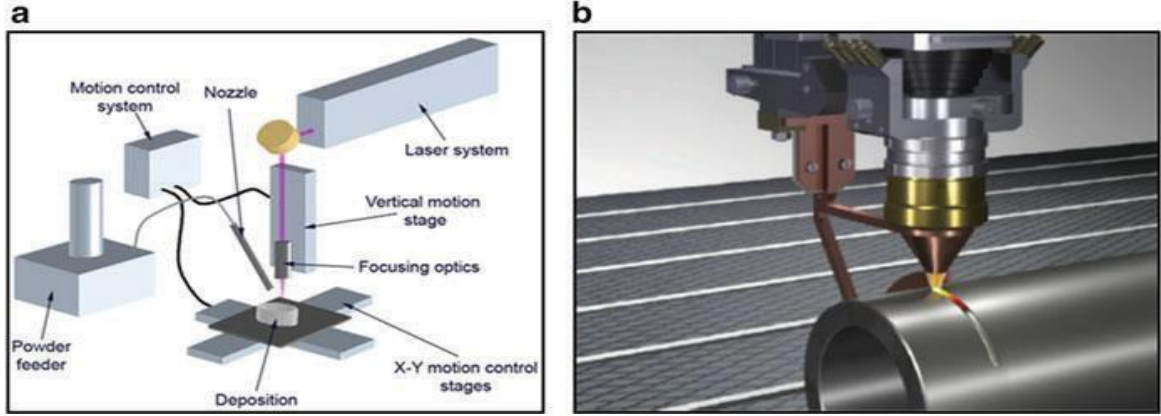
Yapılan literatür çalışmalarında Bridgman katılaştırma tekniği kullanılarak katılaşmış ürünlerin mikroyapısal kontrol ile eldesin de başarılı sonuçlar gösterdiği ispatlanmıştır. İsmi yöntemi bulan Harvard fizikçisi Percy Williams Bridgman'dan alan bu yöntemde alaşımlar öncelikle çubuk şeklinde üretilmektedir. Daha sonra bu parçalar bölünerek iç çapı 3mm ve cidar kalınlığı ~ 1 mm olan bir alümina tüpe yerleştirilir. Bu parçalar indüktüf ısıtılmaktadır. Bu ısıtma en uygun bekletme süresi ve ısıtma hızı referans alınarak yapılır. İşlemi devam ettirmek için uygulanan geri çekme hızı 5 ila 2000 $\mu\text{m/s}$ arasında değişir ve 45 K /mm'lik bir sıcaklık gradyanı ile G meydana gelir (Srivatsan ve Gupta, , 2020).Şekil 1.20'de katılaşma ekipmanı gösterilmektedir.



Şekil 1.20 Bridgman katılaşma ekipmanının gösterimi

1.5.5 Lazer eritme ve lazer kaplama

Çok küçük bir alana odaklanan konsantre bir ışın vasıtasıyla lazer kaplama yapılmaktadır. Burada temel bileşenler lazer kaynağı ve optiktir. Lazer ışını oluşturan kaynak görevi görmekte optik ise ışığın odaklanması ve yönlendirilmesinde görev almaktadır. Bundan başka sistem içerisinde toz besleyici ve manipülatörde yer almaktadır. Numuneler hareket etmekte olup optik ve lazer sabit kalmaktadır (Gao ve ark. , 2016). Şekil 1.21'de bu durum ifade edilmektedir.



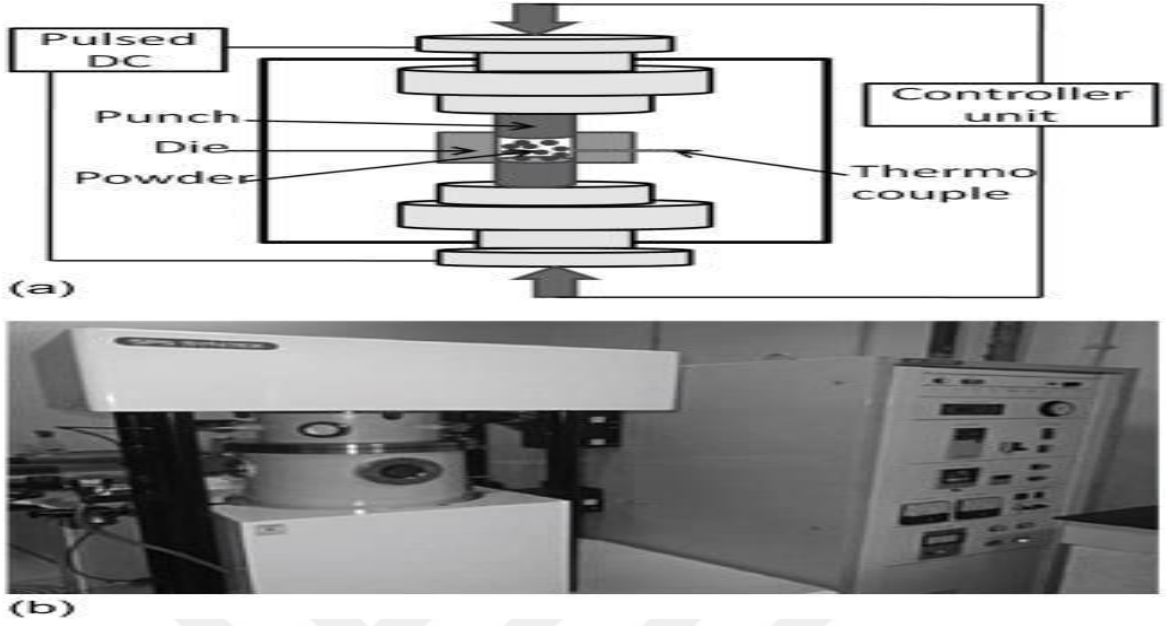
Şekil 1.21 (a) Şematik diyagram ve (b) lazer kaplama işleminin çalışması

1.6.Katı hal üretim yöntemleri

YEA'nın üretimlerinde yaklaşık %5 oranında kullanılan katı hal üretim yöntemleri metal alaşımlama kapsamına girmektedir. Bu katı hal üretim yönteminde element tozları enerji seviyeleri yüksek öğütme değirmenlerinde öğütülür. Burada temel prensip homojen dağılım sağlanması ve difüzyonla alaşımın oluşturulmasıdır.

1.6.1.Toz metalürjisi

Toz metalürjisi tekniği mekanik yöntemlerle ya da bir bilye yardımıyla öğütülerek partükül boyutlarına küçültülen toz partiküllerin alaşım meydana getirmesi şeklinde tanımlanabilir. Yüksek entropili alaşımlarda özellikle nanakristalin yüksek olduğu alaşımlarda bu yöntem sıkça tercih edilir. Alaşımlama sürecinden sonra sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Sinterleme işlemi kalıplar vasıtası ile gerçekleştirilir. Sinterleme işlemi inert bir atmosferde ve bir fırın içerisinde erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılma işleminin gerçekleştirilmesi ve metalürjik birleşmenin sağlanması işlemidir. Kullanılan sinterleme yöntemleri sıcak presleme, sıcak izostatik presleme ve spark plazma sinterlenmesidir. En çok tercih edilen spark plazma sinterlenmesidir. Bunun nedeni Oda sıcaklığında yapılabilir oluşu, gelişmiş katı çözünürlük ve homojen oluşumu temel avantajlarındandır (Zhang ve ark. , 2014).



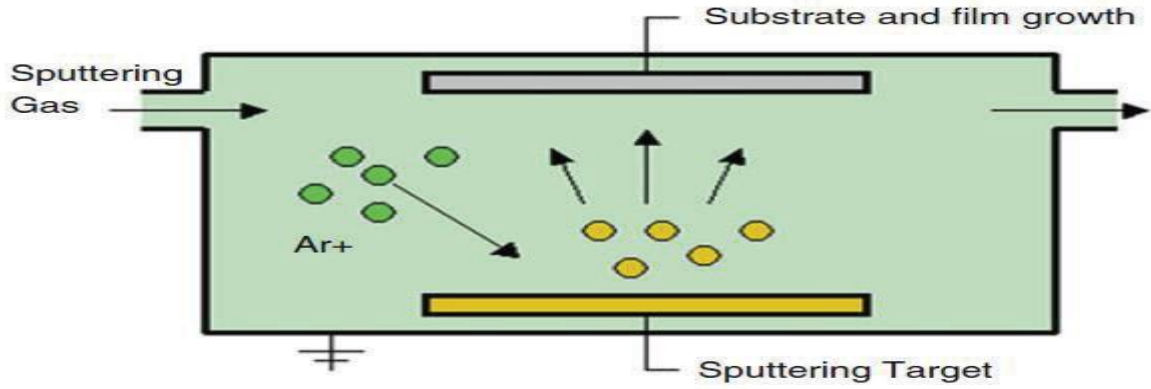
Şekil 1.22.(a)Kıvılcım plazma sinterleme (SPS) kurulumunun şematığı ve (b) IIT Kanpur'daki SPS tesisinin gösterimi

1.6.2. Gaz hal üretim yöntemleri (fiziksel buhar biriktirme)

Bu yöntem daha çok ince filmlerin elde edilmesinde kullanılır. Malzemelerin buharlaştırılmış şekillerinin bir iş parçası üzerinde yoğunlaştırılması ile sağlanır. Genel olarak üç ana başlıkta incelenmektedirler. Bunlar magnetron püskürtme biriktirme, darbeli lazer biriktirme, atomik katman biriktirmedir (Gao ve ark. , 2016).

1.6.3.Magnetron püskürtme biriktirme

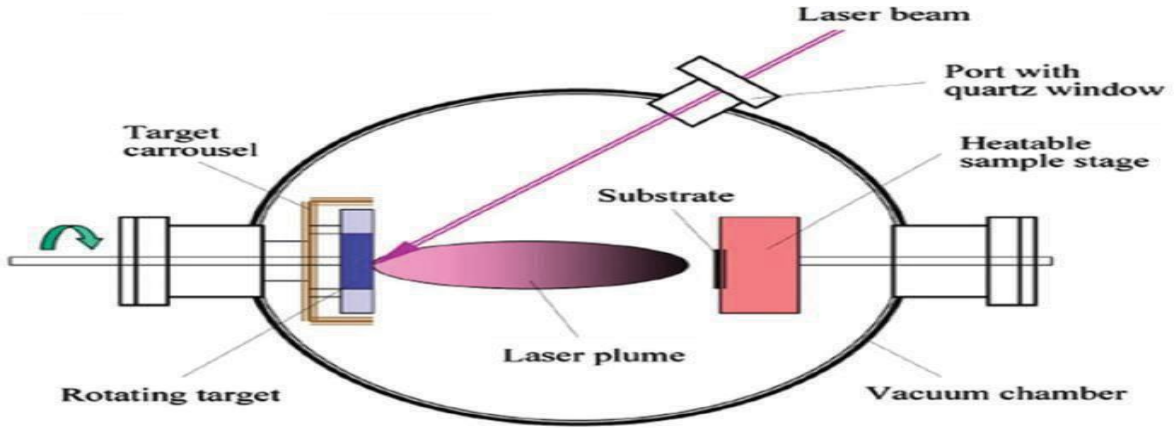
Yüksek entropili alaşımların oluşturulmasında bu yöntem en çok tercih edilenler arasındadır. Magnetron püskürtme yönteminde iyon veya atomlar püskürtme gazından gelmekte ve altık üstünde rastgele birikmesini esasını temel almaktadır. YEA filminin büyüme ve çekirdeklenme oranları iş parçası sıcaklığı, atmosfer kompozisyonu, kaynak materyalin biçimi, malzemenin ön gerilim voltajı gibi etkenlere göre şekil almaktadır (Kurtuluş,2018).Şekil 1.23 'de bu durum gösterilmektedir.



Şekil 1.23. Püskürtme birikiminin işlenmesini gösteren bir şematik

1.6.4. Darbeli lazer biriktirme

Karmaşık stokiyometriye has malzemelerin biriktirilmesinde etkin başvuru olan darbeli lazer biriktirme tekniği temelde yüksek enerjili bir lazer ışınının esas alır. Bir vakum odasında yer alan lazer ışını yüksek entropili alaşımın yüzeyinde meydana gelen aşırı ısı ile birlikte bu alaşımın elektronlarının, iyonlarının, atomlarının ince bir film olarak alt tabakada biriktirilmesidir.

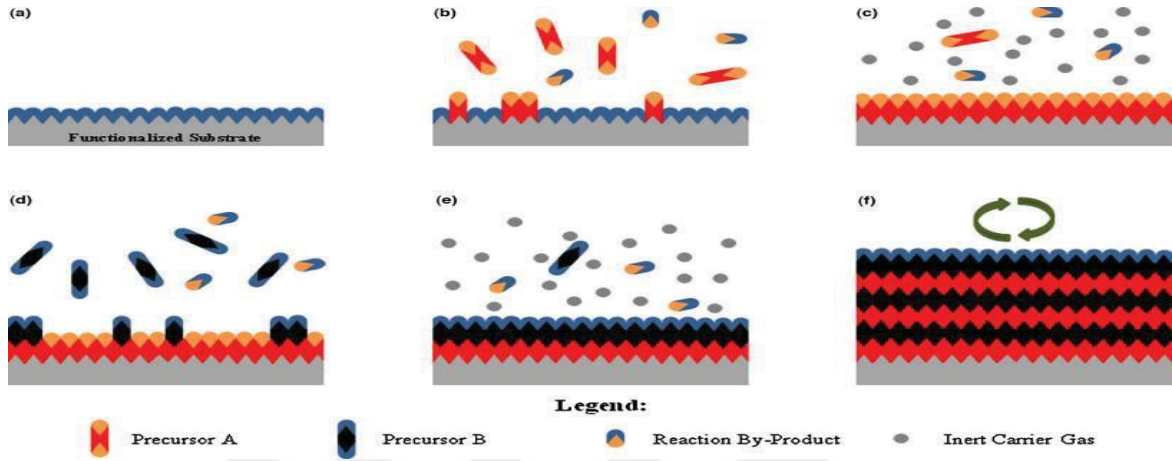


Şekil 1.24. Darbeli lazer biriktirme işleminin şematik gösterimi (Kurtuluş, 2018)

1.6.5. Atomik katman birikimi

Atomik katman tekniğinde çok ince film malzemeleri biriktirilebilmektedir. Bu yüzden bu yöntemin yarı iletken ve enerji dönüşümleri teknolojilerinde tercih edilebileceği

öngörülmektedir. Bu yöntemde başlanışta yüzey işlenmektedir. Sonra altlık ve gaz halindeki kimyasal başlatıcılar reaksiyona girerek malzeme sentezi oluşturmaktadır. Yarı reaksiyonlar olarak adlandırılan bu olaylar sırasında fazla reaksiyon sonucu oluşan yan ürünler inert gaz vasıtası ile temizlenmektedir (Richard ve ark. , 2014).



Şekil 1.25. ALD sürecinin şematik görünüm

1.7. Yüksek Entropili Alaşımların Uygulama Alanları

Mükemmel özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında çokça tercih edilen bu yeni nesil malzemelerin içerik ve özelliklerine bağlı kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Korozyon direnci, yüksek sıcaklığa karşı direnç, boyutsal kararlılık ve yüksek aşınma dayanımı gerektiren alanlarda ve uygulamalarda kullanılmaktadır.
- Denizcilik alanında ve kimyasal üretim yapan fabrikalarda yüksek korozyon direnci nedeniyle tercih edilirler
- Nükleer yapılarda, gaz türbin motorlarında, savunma sanayinde, havacılık endüstrisinde yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri nedeniyle kullanılmaktadırlar.
- Bakır ve Silisyum arasında difüzyon bariyeri ve Titanyum bazlı alaşımlarda termal bariyer olarak kullanılmaktadırlar
- Kalıp malzemelerinde mükemmel aşınma dirençlerinden dolayı kullanılmaktadırlar.
- Yüksek entropili alaşımlar alaşımlarda geçiş tabakası görevini üstlenmektedirler. Paslanmaz çeliklerde dolgu metali ve sert lehim gerektiren saf titanyum ve krom-nikel gibi çeliklerde kullanılır.

- Basınçlı kaplarda çok yüksek korozyon direnci gerektiği için korozyon direnci yüksek alaşımlarda tercih edilir.
- Ulaşım alanında, akü anot malzemelerinde hafifliklerinden dolayı tercih edilirler.

1.8. Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Kao ve arkadaşları $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ yüksek entropili alaşımını üreterek alüminyumun döküm ve homojenize hallerdeki mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Alaşımların homojenizasyon işlemleri 1100°C 'de 24 saat olarak ve ardından suda hızlı soğutma ile yapılmıştır. Döküm numunenin XRD sonuçlarında $x=0,5$ oranına kadar yapıda sadece YMK fazın olduğu görülürken, bu orandan $x=0,75$ oranına kadar HMK ve YMK fazın birlikte bulunduğu belirlenmiştir. Daha yüksek Al oranlarında ise yapıda tek faz olarak HMK kaldığı görülmüştür. Sertlik değerlerine bakıldığında YMK yapı için en yüksek sertlik değeri olan 130 HV $x=0,375$ oranında elde edilirken HMK için en yüksek sertlik değeri 538 HV $x=0,875$ oranında elde edilmiştir. Homojenize edilen numunelere bakıldığında Al'nin 0,375 oranına kadar yapıda tek YMK bulunurken bu orandan itibaren Al ve Ni açısından zengin düzenli HMK faz görülmeye başlamıştır. $x=1,25$ ve üstü Al içeriklerinde de Al ve Ni açısından fakir başka bir HMK faz daha yapıda oluşmuştur. Homojenizasyon sonrasında döküm sonrası yapıya göre HMK fazın oranındaki değişime bağlı olarak sertlik değerleri değişkenlik göstermiştir. HMK faz oranının daha yüksek olduğu numunelerde sertlikte artış görülürken HMK fazın daha düşük olduğu numunelerde sertlik düşüş göstermiştir. Sadece YMK fazın bulunduğu numunelerde en yüksek sertlik 113 HV olurken tek HMK fazın bulunduğu numunelerde en yüksek sertlik 517 HV ölçülmüştür. Sonuç olarak Al artışının kafes yapısında YMK'dan HMK faza geçişi gerçekleştirdiği görülerek Al'nin HMK kararlaştırıcı olduğu anlaşılmıştır. Artan Al oranına bağlı olarak HMK oranı artış göstermiş bu da sertlikteki artışın temelini oluşturmuştur (Kao ve ark., 2009).

Liang ve arkadaşları vakum ark eritme teknolojisi ile iyi kapsamlı özelliklere sahip $(\text{FeCoNi})_{88-x}(\text{AlTi})_{12}\text{Mox}$ yüksek entropi alaşımları tasarlanıp hazırlanmıştır. Mo içeriğinin YEA'ların mikro yapısı, mekanik özellikleri ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Sonuçlar, bu çalışmadaki tüm YEA'ların basit yüzey merkezli kübik katı çözümlü yapıları olduğunu, tüm YEA'ların $\gamma + \gamma'$ fazından oluştuğunu ve uyumlu bir ilişki içinde olduğunu göstermiştir. Çekme testi sonuçları, tüm YEA'ların

mükemmel mukavemet-süneklik kombinasyonu sergilediğini ve nihai çekme kırılma mekanizmasının bir sünek kırılma olduğunu göstermektedir. Mo1.0 HEA, sırasıyla 980 MPa, 1260 MPa ve %34,5'lik akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama ile en kapsamlı mekanik özelliklere sahiptir. Karşılıklı sürtünme ve aşınma testi sonuçları, YEA'ların mükemmel sürtünme ve aşınma özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Dört YEA ile karşılaştırıldığında, sürtünme ve aşınma özelliklerinin iyiden zayıfa doğru sırası Mo1.0 YEA, Mo1.5 YEA, Mo0.5 YEA ve Al6Ti6 YEA'dır. Tüm YEA'ların aşınma mekanizmalarında abresif ve oksidasyon aşınmaları meydana geldiği görülmüştür (Liang ve ark. ,2022).

CoCrFeNi yüksek entropili alaşımını ergitme metoduyla üreten Ma ve ark. Ark.156 HV sertlik değeri ve 240 MPa akma dayanımını olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışma neticesinde yüksek entropili alaşımlarda tane boyutunda meydana gelen nanometre aralığındaki değişimlerin metalik malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirebildiğini göstermişlerdir (Ma ve ark. ,2020).

Li ve arkadaşları Al, Mo ve Ti'nin CoCrFeNi alaşımının mikro yapının güçlendirilmesi için alaşıma Al, Ti, Mo ekleyerek alaşımın mikro yapısındaki değişimleri incelemişlerdir. Al ve Ti'nin CoCrFeNi alaşımının yığılma hatası enerjisini (SFE) azaltmada Mo'dan daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Çünkü bunlar, atomik katmanların kaymasını kolaylaştırarak elektronik yoğunlukta daha fazla deformasyona neden olabileceğini tespit etmişlerdir. Aynı zamanda, Al-, Mo- ve Ti-katkılama farklı ölçüde katı çözelti kuvvetlendirmesine ve tane sınırı kuvvetlendirmesine neden olduğunu bulmuşlardır. Mo katkısının en belirgin katı çözelti güçlendirmesine neden olduğunu, ancak tane sınırı güçlendirmesine fayda sağlamadığını; aksine, tane sınırı güçlendirmenin Al ve Ti etkisi daha fazla olduğunu göstermişlerdir (Li ve ark. ,2021).

Kalay CoCrFeNi ve CoCrFeNiTi0.5Al0.5 (molar oranda) yüksek entropi alaşımlarının yapısı ve mekanik özellikleri, optik mikroskop (OM), X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), sertlik ve sıkıştırma testleri kullanılarak incelenmiştir. CoCrFeNi alaşımının sertliğinin, Al ve Ti ilavesiyle sertlikte önemli bir artış olduğunu ortaya koymuştur (Kalay,2020).

Döküm ve indüksiyon ergitme metoduyla Zhang ve arkadaşları tarafından sentezlenen ($x = 0, 0.1, 0.2$ ve 0.3) alüminyum içeriklerine sahip olan yüksek entropili alaşımlar incelenmiştir. Özellikle de bu çalışmada mekanik özellikler için çekme ve mikro yapılar üzerinde durulmuştur. Al içeriğinin artışıyla mikroyapının dentritten lamelli ötektik

yapıya evrildiği ve HMK ve YMK fazlarından oluşan çift fazlı yapının dört numunenin hepsinde farklı miktarlarda olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca Al etkisi ile mukavemet artmıştır buda kafes bozulmasındaki yapılardan kaynaklanmaktadır (Zhang ve ark. , 2021).

Ma ve arkadaşları bu çalışmada, hafniyum eklenmesinin CoCrFeNi yüksek entropi alaşımlarının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelemiştir. CoCrFeNiHfx (molar oranda $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ ve 0.4 , x değerleri) yüksek entropili alaşımlar vakum ark eritme ile hazırlanmıştır. Mikro yapı ve faz kimlikleri, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı ve transmisyon elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Alaşımların sertliği ve basma akma dayanımı artarken, katı çözelti güçlendirmesi ve ikinci faz güçlendirmesinden kaynaklanan artan Hf içeriği ile plastik gerinim azaldığı görülmüştür. CoCrFeNiHf0.1, çekme testlerinde daha iyi bir mukavemet ve süneklik sağladığı görülmüştür. Hf içeren YEA'lardaki faz gelişiminin ve bu tür sistemlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması sağlanmıştır (Ma, 2020).

Han ve ark, Ta'nın mikroyapılar ve mekanik özellikler üzerindeki alaşımlama etkilerini araştırmak için CoCrFeNiTax (molar oranda x değeri, $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ve 0.75) yüksek entropi alaşımları hazırlanmıştır. Ta ilavesi ile CoCrFeNiTax alaşımlarının akma dayanımı ve sertliği artmış fakat süneklik azaldığı görülmüştür (Han, 2018).

Bu çalışmada Ge elementi, CoCrFeNiGex alaşımlarını oluşturmak için CoCrFeNi alaşımlarına dâhil edilmiştir. (molar oran, $x = 0, 0.1, 0.2$ ve 0.3). Ge, geleneksel alaşımların mekanik özelliklerini ve korozyon direncini iyileştirmek için kullanılır, ancak yüksek entropili alaşımlardaki uygulaması daha az tartışılmıştır. Bu alaşımların çekme testi, CoCrFeNiGe0.3 alaşımlarının katı çözelti sertleştirmesi nedeniyle biraz daha iyi mekanik özellikler sergilediğini ortaya çıkartmıştır. Ge ilavesinin oyuklaşma korozyonunu etkili bir şekilde önleyebildiğini ve korozyonu ve pasif akım yoğunluğunu azaltarak CoCrFeNi alaşımlarının korozyon direncini artırabildiğini göstermiştir (Liu Tsai, 2021).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE METOT

Bu bölümde Eşmolar CoCrFeNi Yüksek Entropili Alaşımına İlave Edilen %2-3 Al-Ti-Mo Elementlerinin Mekanik Ve Metalografik Etkilerinin İncelenmesine yönelik çalışmalara ve alaşımların üretim süreci ve bu süreçte numuneleri analizler için hazır hale getirmek için yapılan uygulamalara yer verilmiştir.

2.1. Alaşımların Bileşimi

Bu çalışmada ilk önce daha önce yapılan çalışmalar araştırılmış ve yapılacak tezde hangi elementlerin kullanılacağı ve alaşımdaki ağırlıkları belirlenmiştir. Nanografi firmasından %99.9 saflıkta Cr, Co, Fe, Ni, Ti, Al, Mo metal tozları tedarik edilmiştir. Eşmolar CrCoFeNi alaşımına %2 ve %3 oranlarında Al-Ti-Mo elementleri ayrı ayrı eklenerek alaşımların yapısı ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler ölçülmeye çalışılmıştır. Alaşımların her biri 30 gr olacak şekilde tasarlanmıştır. Aşağıda Tablo 2.1’ de bu elementlerin her birinin oluşturdukları yaklaşık 30 gr ağırlığındaki yüksek entropili alaşımlardaki ağırlık oranları verilmiştir.

Tablo 2.1.Kullanılan elementlerin alaşımlardaki ağırlıkça ve yüzdece oranları

Numune adı	Co	Cr	Fe	Ni	Al	Ti	Mo
Co₂₅Cr₂₅Fe₂₅Ni₂₅	7,841 gr (%25)	6,918gr (%25)	7,431gr (%25)	7,810 gr (%25)	-	-	-
Co₂₅Cr₂₅Fe₂₅Ni₂₃Al₂	7,931 gr (%25)	6,997gr (%25)	7,515gr (%25)	7,267gr (%23)	0,290 gr (%2)	-	-
Co₂₅Cr₂₅Fe₂₅Ni₂₂Al₃	7,976 gr (%25)	7,037gr (%25)	7,558gr (%25)	6,990 gr (%22)	0,438 gr (%3)	-	-
Co₂₅Cr₂₅Fe₂₅Ni₂₃Ti₂	7,872 gr (%25)	6,945gr (%25)	7,459gr (%25)	7,212 gr (%23)	-	0,511gr (%2)	-
Co₂₅Cr₂₅Fe₂₅Ni₂₂Ti₃	7,887gr (%25)	6,959gr (%25)	7,474gr (%25)	6,912 gr (%22)	-	0,769gr (%3)	-
Co₂₅Cr₂₅Fe₂₅Ni₂₃Mo₂	7,739 gr (%25)	6,828gr (%25)	7,334gr (%25)	7,091 gr (%23)	-	-	1,008 gr (%2)
Co₂₅Cr₂₅Fe₂₅Ni₂₅Mo₃	7,689 (%25)	6,784 (%25)	7,286 (%25)	6,739 (%22)	-	-	1,502gr (%3)

2.2. Alaşımların Üretimi

Mekanik alaşımlama yöntemi katı haldeki karışımlara uygulanabilen ve gelişen teknolojiye uyum sağlayan bir yöntemdir. Alaşımlar birçok kombinasyonda oluşabilmekte ve alaşımların üretilmesi kolay ve istenilen zaman sınırında olabilmektedir.

2.2.1. Mekanik Alaşımlama

Katı haldeki Cr, Co, Fe, Ni, Ti, Al, Mo metal tozlar mekanik alaşımlama yöntemi kullanılarak havan ve bilyeler vasıtasıyla öğütölmüş ve alaşımlar oluşturulmuştur. İnönü Üniversitesi Bilimsel ve teknolojik Araştırma Merkezindeki Laboratuvarındaki cihaz kullanılarak mekanik alaşımlama yapılmıştır. 20 dakika boyunca her bir alaşım için karıştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.1. Toz alaşımlama mikseri

Mekaniksel alaşımlamadan sonra toz halindeki numunelere soğuk pressleme işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler mikro yapı ve mekanik özellikleri sağlamak açısından önemlidir. Soğuk pressleme işlemleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve teknolojik Araştırma Merkezinde bulunan Specac marka 10 ton kapasiteli hidrolik manuel press cihazı ile yapılmıştır. Aşağı Şekil 2.1 de press görölmektedir.



Şekil 2.2. Toz press makinası

Press sonrası 12 mm çapında numuneler oluşmuştur. Şekil 2.3' de oluşan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Presleme sonrası oluşan numuneler

2.2.2.Vakum Ark Ergitme Sistemi

Tez kapsamında vakum ergitme yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem hem homojenlik açısından uygun hem de en çok kullanılan yöntemdir. İnönü Üniversitesi Bilimsel ve teknolojik Araştırma Merkezinde bulunan Edmund Buhler marka vakumlu ark ergitme sistemi kullanılarak döküm yapılmıştır. Aşağıda Şekil 2.4 'de ark ergitme sisteme gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Kullanılan ark ergitme sistemi

Bu üretim tekniğinde parçalar vakum ergitme cihazının potasına yerleştirilir Daha sonra kapatılıp vakuma alma işlemi gerçekleştirilir. Vakum odasında ergitme işleminde alaşımın oksitlenmemesi için yüksek saflıktaki argon gazı bulunmaktadır Tungsten elektrot elementlere temas eder ve böylelikle oluşan ark sayesinde ergitme işlemi meydana gelir. Ark ergitme sonucu oluşan parçalara ait görsel aşağıda gösterilmiştir. Ark ergitme sonucu oluşan numuneler Şekil 2.5 gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Ark ergitme sonucu oluşan numuneler

2.3.Kesme İşlemi

Mikro yapı ve mekanik incelemeler başlamadan numuneler Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Metkon METACUT 250 cihazı kullanılarak otomatik kesme cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Otomatik kesme cihazı

2.4.Bakalite Alma

Numuneler kesildikten sonra Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Struers marka cihaz ile bakalite alınmıştır.



Şekil 2.7. Bakalite cihazı

2.5. Alaşımların Parlatılması ve zımparalanması

Numune yüzeyinde kesme sırasında meydana gelen izler, malzeme yüzeyindeki kir ve paslar analizler esnasında ışığın kırılmasını sağlayarak düzgün görüntü oluşmasını engellemektedir. Bu yüzden parlatma ve zımparalama işlemi yapılmalıdır. Parlatma işlemi sıra ile 400,600, 800 ve 1200,1600,1800,2000 mesh zımparalar kullanılmıştır. Parlatma sırasında yüksek sıcaklığı önlemek için su kullanılarak numuneler soğutuldu. Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Metcon Forcipol 2V, marka su zımparası kullanılarak numunelerin temizleme ve parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.8. Zımparalama cihazı

2.6.Alaşımların Dağlanması

Dağlama işlemi metalografik yüzeye yüzeyi etkin bir şekilde inceleyebilmek için önceden tatbik edilen işlemdir. Bu işlem sonucunda içyapıdaki tane sınırları ve faz dağılımları inceleme yapılan mikroskoplarda görünür hale gelmektedir. Bu işlem SEM,XRD ve mikrosertilik analizlerinde daha net görüntü için yapılmaktadır. Hazırlanan numuneler $3HCl + HNO_3$ çözeltisine 6 saniye boyunca içerisine daldırılıp ve çıkarıldı. Daha sonra numune yüzeyi kurutuldu ve paketlenmeye hazır hale getirildi.

2.7.Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Taramalı Elektron Mikroskobu'nda (SEM) görüntüsü yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması, taratma sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması, bu bilgilerin sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Hitachi SU3500(Japonya) elektron mikroskobu kullanılarak analiz işlemi gerçekleştirilmiştir.

Elektron mikroskobu alaşımların mikro yapıları incelenmiş ve yüzeydeki görüntüler alınmıştır. Ayrıca SEM ile numunelerin MAP ve EDS analizleri de yapılmıştır.



Şekil 2.9. SEM elektron mikroskobu

2.8. X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristal faz için bu kırınım desenleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. XRD ölçümleri Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında Rigaku MiniFlex 600 marka XRD cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 2.10. XRD cihazı

2.9. Sertlik Analizleri

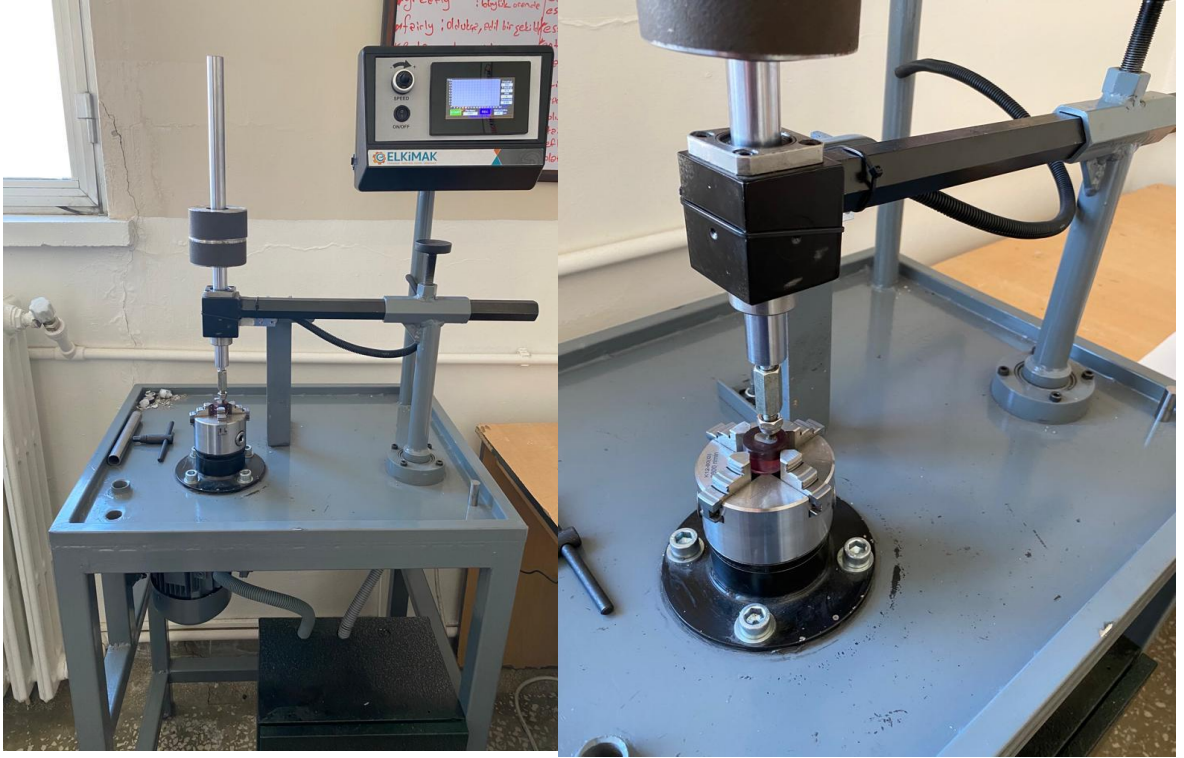
Sertlik analizi için hazırlanan alaşımlar Vickers uçlu Mitotoyo marka olan mikro sertlik cihazında, piramit şeklinde batıcı uç ile 0.3 kg yük kullanılarak 10 saniye süresince uygulanarak alaşımların yüzeyindeki mikro sertlik değişimi Vickers (HV1) cinsinden ölçülmüştür. Her numune için beş farklı bölgeden sertlik değerleri alınmıştır.



Şekil 2.11. Mikrosertlik ölçüm cihazı

2.10. Aşınma Testi

Bu çalışmada üretimi gerçekleştirilen alaşımlar Deney ball-on disk metodu kullanılarak aşınma oranları tespit edilmiştir. Deney için 500 m mesafe 40 N yük seçilmiştir. Deney sonrası aşınma kaybı oranlarının belirlenmiştir. Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Elkimak marka aşınma cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.12. Aşınma test düzeneği

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada eşmolar özelliğe sahip CrCoFeNi elementlerinden oluşan alaşımın özelliklerini geliştirmek için yaptığımız bu çalışmada; % 99 saflıkta elde ettiğimiz metal tozları toz metarülijisi yöntemi kullanılarak biraya getirilmiş ve CrCoFeNi alaşımına vakumlu art ertitme yöntemiyle %2 ve %3 oranlarında Al-Ti-Mo elementleri ayrı ayrı eklenerek 7 adet numune elde edilmiştir. Farklı bileşimde üretilen 7 farklı numune üzerinde yaptığımız SEM, EDS, XRD ve Mapping analizleri, Mikro sertlik ve Aşınma testleri sonucunda;

- Tüm numunelerde farklı büyütme ölçeklerinde (500x, 1000x, 2500x ve 5000x) alınan SEM mikroyapı görüntüleri ile tane yapılarının korunduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin bölgesel renklendirme görüntüleri neticesinde alaşım elementlerini ihtiva ettiği ancak farklı fazların oluşması nedeniyle başlangıç miktarlarına göre kütleli oranda değişimlerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Numunelerden alınan noktasal spektrum ölçümleri neticesinde alaşım elementlerinin kütleli ve hacimsel yüzdelik oranları ortalamasının, genel bileşimle benzerlik oluşturduğu görülmüştür.
- SEM görüntülerini incelediğimizde, matrisi oluşturan açık renkli bölgelerin CoCrFeNi içerikli matrisi oluşturduğu, siyah bölgelerin ise daha çok Cr elementinin çekirdek görevi üstlenerek oluşturduğu bileşik ve yapı olduğu görülmektedir. Tane sınırlarında bölgesel çökelmelerin fazla olmadığı, ilave edilen Al' la yapının biraz daha yüzeye dağıldığı buna karşılık Ti ilavesiyle yapının biraz daha incelendiği, Mo ilave ettiğimiz numunelerde ise tane yapısının belirginleştiği görülmüştür.
- Numunelerden alınan EDS analizlerini incelediğimizde, eşmolar element dağılımının bütün numunelerde görüldüğü, noktasal ve bölgesel aldığımız analizlerde fazla bir farkındalığın olmadığı görülmüştür. Element dağılımını Mapping analiziyle renklendirerek incelediğimizde, elementlerin numuneler içerisinde homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir.
- Mikro sertlik sonuçlarında ise ilave edilen Al, Ti, Mo elementlerinin sertlik değerlerinin fazla artmadığı görülmüştür.

- Yaptığımız aşınma testlerinde hem ilave edilen Al, Ti, Mo elementlerinin etkisi hem de oluşan güçlü bileşiklerden kaynaklı aşınma değerlerinde olumlu yönde düşüşler görülmüştür.
- XRD analizleri 10° - 90° aralığında ölçümler alınmış olup, ürettiğimiz numunelerde; $\text{Co}_{0.027}\text{Fe}_{0.283}\text{Ni}_{0.689}$, CrNi , $\text{Al}_{0.13}\text{Co}_{0.87}$, FeNi , $\text{Fe}_{0.8}\text{Ti}_{0.2}$, $\text{Ni}_{3.28}\text{Ti}_{0.72}$, $\text{Cr}_{0.875}\text{Ti}_{0.125}$, $\text{Mo}_{0.4}\text{Ni}_{3.6}$, $\text{Fe}_{0.875}\text{Mo}_{0.125}$ bileşiklerinin aynı veya farklı pik açılarında ve kafes parametrelerinde oluştuğu görülmüştür.

Sonuç olarak eşmolar CoCrFeNi alaşımının hem yapısal hem de mekanik açıdan geliştirilmesi için yaptığımız bu çalışma sonucunda; Ana malzememize ilave ettiğimiz % 2-3 oranındaki Al, Ti, Mo elementlerinin yapı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu, oluşan bileşiklerin güçlü bileşikler olmasından kaynaklı mekanik olarak da olumlu yönde etkilerinin oluştuğu göz önüne alındığında kullanılabileceği söylenebilir.

5. KAYNAKLAR

- Alaneme K.K, Bodunrin M.O, Oke S.R.** ,2016. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2016;5:384-93.
- Altunay Karabaş B.**, 2018. SiC takviyeli CoCrFeNi yüksek entropili kompozitin üretilmesi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3) 353-365.
- ASM Handbook**, 2008. *Casting volume 15 Handbook Committee*, p 1-8.
- Cantor, B.**, 2014. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, Btadford. , pp.16(9), 4749- 4768.
- Chen K. Li, W.** , 2021. Recent progress in high-entropy alloys for catalysts: synthesis, applications, and prospects. , *Material Today Energy*, volume 20, , 100638.
- Chou, H.P. , Chang, Y.S. , Chen, S.K. , Yeh, J.W.** , 2009, Microstructure, thermophysical and electrical properties in $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys, *Material Science Engineering*, B 163, 184-189.
- Erdogan, A. , Zeytin, S.** , 2019. Yüksek entropili alaşımlar: prensipler ve alaşım tasarımı, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (2).
- Gao M.C. , Yeh J.W. , Liaw P.K. , Zhang Y.** , 2016. High entropy alloys fundamentals and applications, Springer, United States , 524 p.
- Fashu S, Lototsky M. , David M.W. , Pickering L. , Linkov V. , Renheng S.T.T. , Fangming X., Fursikov P.V., Tarasov B.P.**, 2020. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys, *Materials and Design*, Volume 186, 15.
- Ferrari A. , Körmann F.** , 2020. Surface segregation in Cr-Mn-Fe-Co-Ni high entropy alloys, *Applied Science Surface*. Volume 533.
- Jiang H. , Han K. , Qiao D, Lu Y.** , 2018. Effects of Ta addition on the microstructures and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy, *Materials Chemistry and Physics*. Volume 210, Pages 43-4.
- Johnson R.W. , Hultqvist A. , Bent S.F.** , 2014. A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications, *Materials Today*. USA. p.17(5).
- Kalay İ.** , 2020. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi(Ti-Al) high entropy alloys *Hittite Journal of Science and Engineering*, Ankara, p.54.
- Kao Y.F, Chen T.J, Chen S.K, Yeh J.W.** , 2009. Microstructure and mechanical property of as-cast, homogenized and deformed $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys, *Journal of Alloy Compounds*, 488, 57–64.

- Kurtuluş Y. , 2018.** Yüksek entropili alaşım (YEA) tasarımı anlayışı ile AlCoCrFeMoNi esaslı alaşımların üretilmesi. *Yüksek Lisan Tezi.*, Eskişehir Osmanagazi Üniversitesi Feb Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Li X. , Li Z. ,Wu Z. ,Zhao S. ,Zhang W.Bei H. ,2021.** Strengthening in Al-, Mo- or Ti-doped CoCrFeNi high entropy alloys: A parallel comparison. *Journal of Materials Science & Technology* Pages 264-274.
- Liang C. ,Wang C.,Zhang K.,Tan H.,Liang M.,Xie Y.,Liu W.,Yang Zhoue S. ,2022.**Mechanical and tribological properties of (FeCoNi)_{88-x}(AlTi)₁₂Mox high-entropy alloys., *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* Volume 105, 105845.
- Liu H.C. , Tsai C.W. , 2021.**Effect of Ge addition on the microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of CoCrFeNi high-entropy alloys. *Intermetallics* Volume 132. 132(5):107167.
- Lucas, M.S., Belyea, D., Bauer, C., Bryant, N., Michel, E., Turgut, Z., 2013.** Thermomagnetic analysis of FeCoCr_xNi alloys: magnetic entropy of highentropy alloys. *Jornal. Appliattion. Physic.* 113, 17A923-1-17A923-4.
- Ma, H. ,Shek C.H. , 2020.** Effects of Hf on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, . 827: p. 154159.
- Miracle, D. B. and Senkov, O. N.,2017.** A critical review of high entropy alloys and related concepts, *Acta Materialia*, Volume 122: 448–511.
- Michael, C. G. , Yeh, J. W. , Zhang, Y. ,2016.** High entropy alloys: fundumental and applications, İsviçre.
- Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., 2014.**High entropy alloys, Elsevier, 1-190.
- Ozkan D. Ve Karaoglanlı A.C. , 2020.** High entropy alloys:production, properties and utilization areas, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*. Cilt: 8, No: 1,
- Pickering, E.J, Munoz-Moreno, R. , Stone, H.J, Jones, N.G. , 2016.** Precipitation in the equiatomic high-entropy alloy CrMnFeCoNi, *Science. Material.*, 113, 106-109.
- Savaşkan T., 2009.** Malzeme bilimi ve muayenesi, genişletilmiş 5. Baskı, Derya Kitapevi, Trabzon, 1-376.
- Sarraf H.T, Shabani M, Jablonski P.D, Pataky G.J, .Poursaee A.,2019.** The influence of incorporation of Mn on the pitting corrosionperformance of CrFeCoNi High Entropy Alloy at different temperatures, *Materials & Design.*, Volume 184-108170
- Srivatsan T.S. and Gupta M., 2020.** High entropy alloys innovations, advances, and applications, India.

- Svensson D.O.**, 2014. High entropy alloys: breakthrough materials for aero engine applications at department of materials and manufacturing technology Chalmers University of Technology, *Yüksek Lisans Tezi*, İsveç
- Şarlar K.**, 2019. Nadir toprak elementi içermeyen yüksek entropili alaşımın manyetik ve manyetokalorik özelliklerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., Bursa, s. 62
- Tsai, M.-H., Tsai, K.-Y., Tsai, C.-W., Lee, C., Juan, C.-C. ve Yeh, J.-W.**, 2013. Criterion for sigma phase formation in Cr-and V-containing high-entropy alloys. *Materials Research Letters*, 1(4), 207-212
- Tsai, M.H., Yeh, J.W., Gan, J.Y.**, 2008. Diffusion barrier properties of AlMoNbSiTaTiVZr high-entropy alloy layer between copper and silicon. *Thin Solid Films* p.516
- Tian, F. , Varga, L. K. , Chen, N. , Shen, J. , and Vitos, L. ,** 2015. Empirical design of single phase high-entropy alloys with high hardness, *Intermetallics (Barking)*, p.58: 1–6.
- Xiao L.L. ,Zheng Z.Q. , Guo S.W. , Huang P. ,Wang F. ,**2020. Ultra-strong nanostructured CrMnFeCoNi high entropy alloys, *Material and Design*, Volume 194.
- Yeh, J.-W. , Chang, S.-Y. , Hong, Y.-D. , Chen, S.-K. ve Lin, S.-J. ,**2007. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements. *Materials Chemistry and Physics*, 103(1), 41-46.
- Yeh, J.-W. ,** 2006.Recent progress in high-entropy alloys, *European Journal of Control* - Volume31: 633–648.
- Yeh, J.-W. , Lin, S.-J. , Chin, T.-S. , Gan, J.-Y. , Chen, S.-K. , Shun, T.-T. , Tsau, C.-H. and Chou, S.-Y. ,**2004. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe- 87 Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements. *Metallurgical and Materials Transactions*. Volume 35(8), 2533-2536
- Yeh, J.-W. , Chen, S.-K. , Lin, S.-J. , Gan, J.-Y. , Chin, T.-S. , Shun, T.-T. , Tsau, C.- H. , Chang, S.-Y. ,** 2004. Nanostructured high entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcome, *Advanced Engineering Materials*. Volume 6 (5).
- Yeh, J. W.**, 2006, Recent progress in high entropy alloys, *European Journal of Control*, 31, 6, p.633-648.
- Zhang J. , Qiu H. , Zhu H. , Xie Z. ,** 2021. Effect of Al additions on the microstructures and tensile properties of Al_xCoCr₃Fe₅Ni high entropy alloys *Materials Characterization* Volume 175.
- Zhang, K. , Fu, Z. , Zhang, J. , Shi, J. , Wang, W. , Wang, H., Wang, Y., Zhang, Q.** ,2010. Annealing on the structure and properties evolution of the CoCrFeNiCuAl high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 502(2), 295-299.

Zhang, Y., Zuo, T., Cheng, Y., Liaw, P. K., 2013. High-entropy alloys with high saturation magnetization, electrical resistivity, and malleability. *Scientific reports*, Volume 3, 1455.

Zhang Y. , Zuo T.T. , Tang Z. . Gao M.J., Dahmen K.A. , Liaw P.K. , Lu Z.P. ,2014. Microstructures and properties of high-entropy alloys, *Institute for Genomic Biology*.

