

Mekanik Alaşımlanmış AlCuCrFeNi Yüksek Entropili Alaşımının Fiziksel Buhar Biriktirme Tekniği ile Kaplanabilirliğinin İncelenmesi

Yunus Emre ŞİMŞEK^{1*} , Kadir Mert DÖLEKER¹ , Mehmet KURU¹ , Sefa Emre SÜN BÜL^{2,3} , Kürşat İÇİN² 

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Samsun, Türkiye

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Trabzon, Türkiye

³Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gaziantep, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 02.06.2022

Kabul: 11.07.2022

Anahtar Kelimeler:

Yüksek entropili alaşım
Fiziksel buhar biriktirme
Mekanik alaşımlama
AlCuCrFeNi

ÖZET

Yüksek entropili alaşımlar sahip oldukları üstün özellikleri sayesinde süper alaşımlara alternatif olarak önerilmektedir. Yüksek entropili alaşımlar araştırılmaya devam ettikçe ortaya çıkan özgün ve üstün özellikleri sayesinde geniş alanlarda kullanılabilir olmasıyla birlikte önemi gittikçe artmaktadır. Bu çalışmada mekanik alaşımlama tekniği ile AlCuCrFeNi tozları sentezlenmiştir. Sentezlenen tozlarda YMK (Yüzey Merkezli Kübik), HMK (Hacim Merkezli Kübik) ve B2 fazları tespit edilmiştir. Tozlar peletlendikten sonra fiziksel buhar biriktirme (FBB) tekniği ile Monel 400 altlık malzeme üzerine biriktirilmiştir. Üretilen kaplamanın mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Üretim sonrası homojene yakın bir ince film tabakası üretilmiştir.

Investigation of Coatability of Mechanically Alloyed AlCuCrFeNi High Entropy Alloy by Physical Vapor Deposition Technique

ARTICLE INFO

Received: 02.06.2022

Accepted: 11.07.2022

Keywords:

High entropy alloy
Physical vapor deposition
Mechanical alloying
AlCuCrFeNi

ABSTRACT

High entropy alloys have been proposed as an alternative to superalloys due to having unique properties. As high entropy alloys continue to be researched, their importance is increasing with their unique and superior properties that can be used in wide areas. In this study, AlCuCrFeNi powders were synthesized by mechanical alloying technique. FCC (Face Centered Cubic), BCC (Body Centered Cubic) and B2 phases were detected in the synthesized powders. After the powders were pelleted, they were deposited on the Monel 400 substrate by the physical vapor deposition (PVD) technique. In this research, the microstructural properties of the produced coating were investigated. After production, an almost homogeneous thin film layer was produced.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek entropili alaşımlar (YEA) terimi ilk defa 2004 yılında Taylan'lı araştırmacı Yeh ve ekibi tarafından incelenmiş ve ismi konulmuştur. Geleneksel alaşımların aksine YEA'lar oluşturulurken ve üretilirken eş veya birbirine yakın düzeyde kullanılarak oluşturulurlar [1,2]. Yüksek entropili alaşımları önemli kılan ve alaşımlara etki eden 4 ana etken bulunmaktadır. Bunlar; Yüksek Entropi etkisi, Yavaş difüzyon etkisi, Kafes Distorsiyonu ve Kokteyl etkileridir. Kısaca bahsetmek gerekirse yüksek entropi etkisi alaşım içerisindeki katı çözelti fazlarının serbest enerjisini azalttığı ve yüksek sıcaklıklarda bunların oluşumunu kolaylaştırdığı bilinmektedir. Yavaş difüzyon etkisi ise alaşım içerisindeki her kafes bölgesindeki her atomun komşu atomu farklıdır. Bu sebepten her atomun bir

*Sorumlu yazar, e-posta: emresimsek2013@gmail.com

To cite this article: Y.E. Şimşek, K.M. Döleker, M. Kuru, S.E. Sünbül, K. İçin, Investigation of Coatability of Mechanically Alloyed AlCuCrFeNi High Entropy Alloy by Physical Vapor Deposition Technique, Manufacturing Technologies and Applications, 3(2), 1-8, 2022. <https://doi.org/10.52795/mateca.1124722>, This paper is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

yandaki boşluğa atlamasında komşu atomu değişecektir. Buda kafes içerisinde farklı yerel enerji seviyelerine yol açar. Bu sebepten dolayı YEA’larda difüzyon yavaştır. Kafes Distorsiyonu ise kafes içerisinde bulunan atomların her birinin farklı atom çapına sahip olmasından dolayı kafes bozunmasına yol açar. Örnek olarak büyük atomlar komşularını uzaklaştırır ve küçük atomların çevrelerinde daha büyük ve fazladan boşluklar oluşur. Buda YEA kafesinin toplam serbest enerjisini yükseltir. Son olarak Kokteyl etkisi ise, geleneksel alaşımlarda olduğu gibi bir alaşımın özellikleri onu oluşturan elementlerin özelliklerine bağlıdır. Örnek olarak Al gibi hafif bir element alaşımın yoğunluğunu azaltır fakat CoCrCuFeNi alaşımına Al ilavesi sistemin sertliğini arttırır. Bu nedenle YEA’lar yalnızca elementlerin özgül etkilerinden değil birbirleri arasındaki bağların etkilerinden de oldukça etkilenmektedir [3].

Mekanik alaşımlama yöntemi tozların topaklanması veya kaynaklanması ve sonrasında kırılmasının bir süreç halinde devam ettiği bir yöntemdir. Cihazın krozeyle ilettiği mekanik enerji ile partikül boyutu azalırken kimyasal reaksiyonlar ve yapısal değişiklikler gözlemlenir. Mekanik alaşımlamadaki dönme hareketi ile tozlar stabil hallerinden uzaklaşarak bağları kırılır. Bu yöntemin avantajları ise; amorf fazların oluşturulması, oksitlerde daha çok olan ikincil fazların ince dağılımlı üretilmesi, nano boyutlara yakın tozların elde edilmesi gibi birçok avantaj sıralanabilmektedir. Bu yöntem ile bilinen klasik Hume-Routery kuralları ile gerçekleşmeyecek elementlerin bir araya gelip alaşımlanması ve homojen bir alaşım eldesi mümkün olduğu için yöntem ön plana çıkmaktadır [4, 5]. Alaşımlama sürecinde tozlar alaşımlanırken soğuk kaynak etkisi ile kırılma olayı bir döngü şeklinde devam eder. Bilyaların kroze içerisinde tozlara çarpması sonucu toz partikülleri deformasyona uğrayarak şekil değişikliğine maruz kalmaktadırlar. Topaklanma ve kırılma olayı partikül boyutunun azalarak sabitleşmesine kadar devam etmektedir[5, 6]. Proses esnasında bilyaların tozları bir nevi dövmesi sonucu ortaya çıkan sıcaklık artışında difüzyonu olayın içine alarak yeni fazların ortaya çıkabilmesine neden olabilmektedir. Prosesin son aşamasında ise bu kaynak ve kırılma olayı arasındaki denge sağlanınca homojen bir yapı elde edilir [4, 6].

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) methodu, tozların veya alaşımın kaynağının vakum altında buharlaştırılması ve kaplama oluşturulmak istenilen altlık üzerine biriktirilmesine dayanan bir yöntemdir [5]. PVD tekniğinin gelişmesi ile; daha yoğun kaplama yapısı, düşük sıcaklıklarda bile iyi bir kaplama yapısı elde edilmesi, kaplanacak malzemenin yüzeye iyi şekilde difüzyon etkisi ile yerleşmesi bu tekniğin yaygınlaşmasında rol oynamıştır [6]. Fiziksel buhar biriktirme yönteminin en yaygın olarak kullanıldığı yöntem termal buharlaşma yöntemidir. Bu yöntem farklı farklı değişik alanlarda çeşitli malzemelerin yüzeylerine ince film kaplama yapabilmektedir. Bu yöntem ile kaplanacak malzeme yüzeyinde malzeme kalınlığı angstrom veya mikron mertebesinde kalmaktadır. Termal buharlaştırma yöntemi katı bir malzemeyi vakum ortamında ısıtarak, bir buhar basıncı oluşturmayı amaçlar. Vakum altında bu buhar basıncı düşük olsa bile oda içerisinde buhar bulutu oluşturmak için yeterlidir. Buharlaşmış malzeme oda içerisinde uçarak, eğer ki altlık malzemeye gidecek bir referans yol yok ise, oda içerisindeki heryere yapışarak ince film kaplamayı oluşturmaya başlar. FBB ile yoğun ve homojen kaplama üretimleri yapıldığından YEA’ların kaplama olarak geleneksel alaşımlar üzerine biriktirilmesi üzerine çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Ustinov ve arkadaşları indüksiyon ergitme ile üretilmiş CrFeCoNiCux alaşımını elektron ışını destekli FBB ile AISI 302 altlık üzerine 40 ile 100 µm kalınlıklarda biriktirmişlerdir [7]. Liao ve arkadaşları döküm tekniği ile üretilmiş FeCoCrNiAl_{0.1} alaşımını AISI 304 altlık üzerine 1.5 µm kalınlıkta FBB tekniği ile başarılı şekilde biriktirmişlerdir [8]. Nadutov ve arkadaşları elektrik ark fırını ile üretilmiş AlFeCoNiCuCr alaşımını katot ark destekli FBB ile paslanmaz çelik altlık üzerine ~34–38 µm kalınlıkta biriktirmişlerdir [9]. Nagy ve arkadaşları CoCrFeNi alaşımını bir Si süperalaşım altlık üzerine ortalama 0.916µm kalınlığında iyon ışını püskürtmeli FBB yardımı ile başarılı şekilde biriktirmişlerdir [10]. Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş

AlCuCrFeNi alaşımı FBB tekniği ile Monel 400 üzerine biriktirilmiştir. Alaşımın üretim ve kaplama sonrası mikroyapıları incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Tozların Üretimi (Production of Powders)

Üretilecek toz AlCuCrFeNi alaşımının elde edilmesi için eşmolar şekilde %20'şer olarak atomik oranda tartılarak kroze içerisine yerleştirilmiştir.

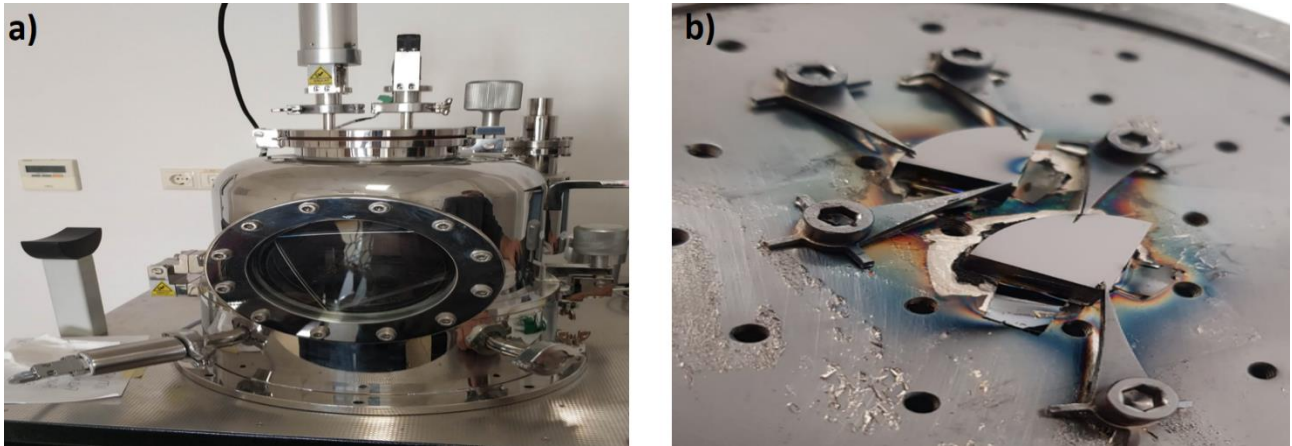
Tablo 1. Kullanılan tozların %molar miktarları (% molar amounts of powders used)

	Al(%)	Cu(%)	Cr(%)	Fe(%)	Ni(%)
AlCuCrFeNi alaşımının %molar miktarı	20	20	20	20	20

Tozlar yukarıda Tablo 1'de verilen molar orana göre hassas terazide tartılıp paslanmaz çelik kroze içerisinde yerleştirildikten sonra kroze içerisinde ağırlıkça %2 oranında etanol çözeltisi eklenmiştir. Etanol, bilyaların tozları öğütmesi ile birlikte oluşacak sıcaklığın etkisiyle tozların oksitlenmesini ve soğuk kaynak etkisini azaltmak için eklenmiştir. Tozların hazırlanması işlemi bitirildikten sonra toz bilya oranı 1:10 olacak şekilde 20g toz karışımı, etanol ve 200g paslanmaz çelik bilya kroze içerisine yerleştirilmiştir. Tozlar 400 rpm hızında 30 dakika öğütme-30 dakika soğutma şeklinde 24 saat boyunca yani 24 çevrimde mekanik olarak alaşımlanmıştır. Üretilen tozlar haznedan çıkarıldıktan sonra etüvde 100 °C' de 10 saat süreyle kurutulmuştur.

2.2. Alaşımlanan Tozun FBB ile Kaplanması (Coating of Alloyed Powder with FBB)

PVD kaplama cihazının içerisindeki potaya üretilen 20 g tozun 4 gramı mekanik olarak preslendikten sonra yerleştirilmiştir. PVD kaplama işlemi için Şekil 1a'da gösterilen Vaksis markasının Handy PVD termal kaplama cihazı kullanılmıştır. Kaplama öncesi VK-1608 programı yardımıyla vakum altına alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 30 dakika sürmüştür. Altlık numune üzerine biriktirilen kaplamanın son hali ise Şekil 1b'de gösterilmiştir. Kaplama işleminin parametreleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. PVD Handy Kaplama Cihazı ve kaplama sonrası makro görüntüsü (PVD Handy Coating Device and macro image after coating)

Tablo 2. PVD kaplama parametreleri (PVD coating parameters)

Amper (A)	Kaplama hızı (A°/s)	Vakum değeri (Torr)
82	23	1.8×10^{-6}

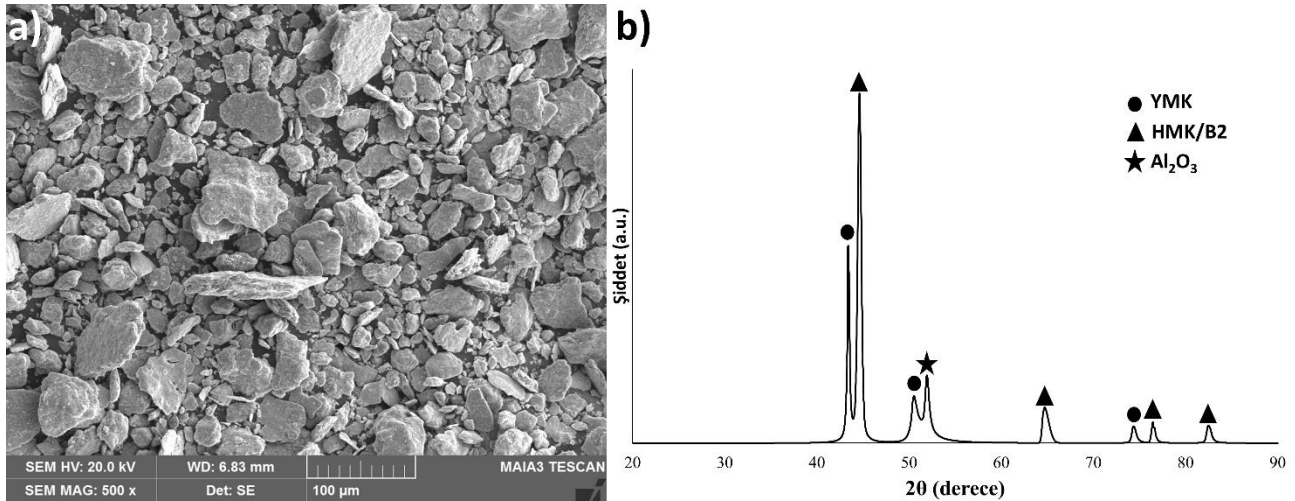
2.3. Karakterizasyon (Characterization)

Tozların üretim sonrası faz analizleri XRD (Rigaku, $\text{CuK}\alpha$, DMAX 2200, Japonya) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tarama hızı $2^\circ/\text{dk}$ olarak 10 ve 90° aralıklarda XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen tozların ve kaplamanın mikroyapısal incelemelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) (JEOL JSM-7001F, Japonya) kullanılmıştır. Elementel haritalama ve nokta analizlerinde X-ray spektrometre (Oxford Instruments, X-max 80 AZtec) kullanılmıştır. PVD ile üretilmiş numune kesit görüntüsü için metalografik olarak hazırlanmıştır. Numuneler soğuk bakalit yardımı ile bakalitlendikten sonra 1200 mesh zımparaya kadar zımpara işlemi uygulanmıştır. Devamında ise elmas solüsyon ile 1 mikronluk çuha yardımıyla parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Mekanik Alaşımlama Sonrası Tozların Karakterizasyonu (Characterization of Powders After Mechanical Alloying)

Şekil 2'de mekanik alaşımlanmış AlCuCrFeNi tozlarının SEM görüntüsü ve tozlara ait XRD desenleri verilmiştir. Üretilen tozların boyutları farklılık göstermektedir. Çok ince tozlar ve kalın uzun köşeli morfolojiye sahip tozların karışık şekilde olduğu alınan SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Mekanik alaşımlama sırasında deformasyon etkisi ile gevrekleşen yapının daha sonra tekrardan kırılmasından dolayı homojen bir toz morfolojisine sahip olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca işlem esnasında tozların ufalanarak, devamında ise topaklanarak da birikmiş parçacıklardan da meydana geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 2b'de verilen XRD paterninde 3 farklı fazdan meydana gelen bir alaşım üretildiği görülmektedir. Alaşımda YMK yapıya sahip Cu'ca zengin fazların yanı sıra HMK yapıya sahip Fe-Cr zengin fazlar ve B2 yapıya sahip Ni-Al zengin fazlardan oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Mekanik alaşımlanmış AlCuCrFeNi alaşımlarının; a) SEM görüntüsü ve b) XRD paterni (Mechanically alloyed AlCuCrFeNi alloy; a) SEM image and b) XRD pattern)

Karışım entalpisi (ΔH_{mix}) YEA'larda değerlerine bağlı olarak üç farklı duruma sebep olabilmektedir. Bunlardan birincisi eğer karışım entalpi değeri çok negatif olursa oluşacak ikili bileşik intermetalik faz oluşturma meylinde olması iken bu değer sifira yaklaştığında katı çözeltili oluşumu gözlenmektedir. Bu değer fazla pozitif bir değer aldığımda ise bileşik oluşturma özelliği zayıflar ve faz ayrışması ihtimali artmaktadır [11]. Tablo 3'te görüldüğü üzere AlCuCrFeNi alaşımında oluşacak baskın faz NiAl fazıdır. Bunun sebebi bu iki elementin karışım entalpisi diğerlerine göre çok daha negatif olmasından kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak Cu elementi ise alaşımda bulunan diğer elementler ile alaşım yapma isteği çok düşük gözükmemektedir. Al hariç diğer elementlerle karışım entalpi pozitif değerdedir. Al'nin ise diğer elementlerle olan karışım entalpisinin daha negatif olmasından kaynaklı Cu ile Cu-Al fazı oluşumu gözlenmemektedir. Bu sebepten dolayı alaşımlama esnasında Cu elementi diğer elementlerden ayrıştığı görülmüştür.

Bunların dışında Cu-Fe-Ni-Cr nin atomik çapları ile birbirine çok yakın değerlere sahipken Al'nin daha büyük olmasından dolayı YMK kafesinde çözünürlüğü sınırlı kalmasından dolayıda B2 ve HMK fazlarının ayrışmaya meyil ettiği anlaşılmaktadır. XRD analizine göre (Şekil 2b) tozlarda oksitlenmeden kaynaklı Al₂O₃ meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu durum tozların mekanik alaşımlanması esnasında ısınması ve koruyucu gaz atmosferi olmadan çalışmasından kaynaklanmıştır. Erdogan ve arkadaşları [12] yapmış oldukları çalışmada benzer kompozisyonda üretimi mekanik alaşımlama tekniği kullanarak yapmışlardır. Elde edilen sinterlenmiş pelet malzemelere ait tozlarda 3 farklı fazın basit kübik yapının yani HMK1, HMK2 ve YMK fazlarından meydana geldiğini belirtmişlerdir. HMK1 fazı FeCr bakımında zengin faz iken, HMK2 fazı ise B2 yapısı yani NiAl bakımından zengin faz olduğu ve YMK fazın bakırca zengin katı çözelti fazdan oluşması mevcut çalışmamızla uyumlu olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan elementlerin alaşımlanırken karışım entalpi değerleri (kJ/mol) (Mixture enthalpy values of the elements used in the study when alloying)

	Al	Cu	Cr	Fe	Ni
Al	Al	-1	-10	-11	-22
Cu	-1	Cu	12	13	4
Cr	-10	12	Cr	-1	-7
Fe	-11	13	-1	Fe	-2
Ni	-22	4	-7	-2	Ni

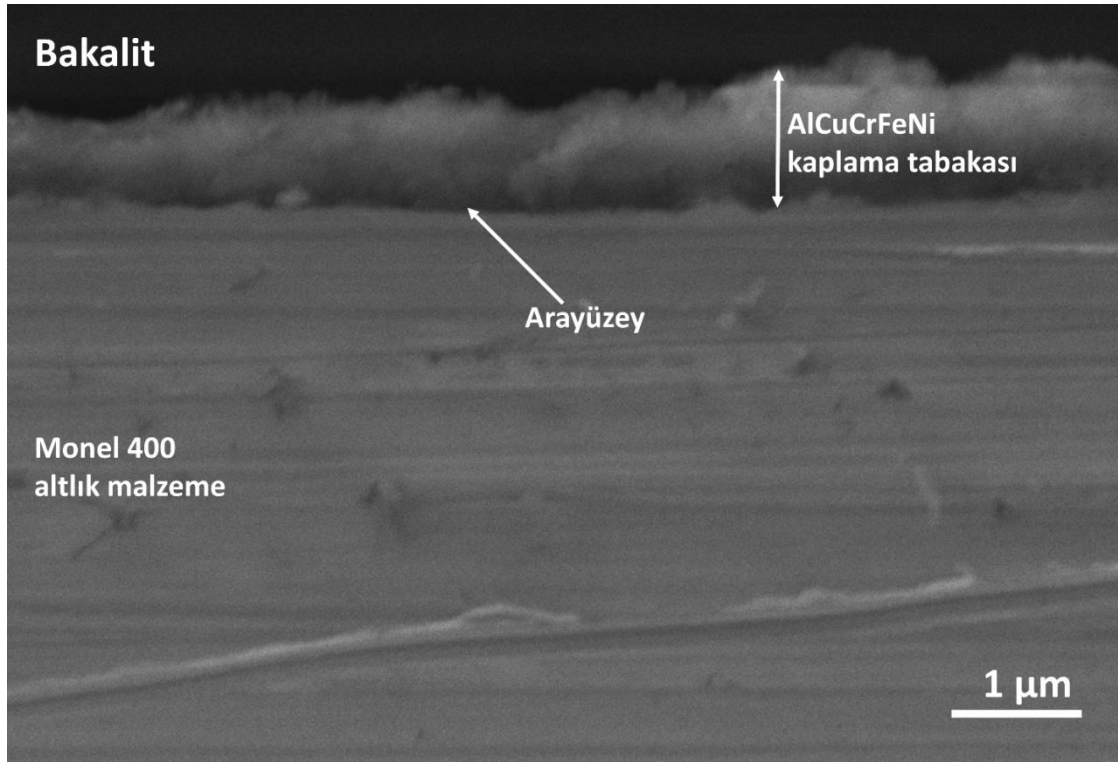
Tablo 4'te gösterilen hesaplamalara göre VEC değeri 7.6 bulunmuş olup AlCuCrFeNi'nin YMK ve HMK fazlarından oluşacağını göstermektedir. Bu fazlar içerisinde intermetalik fazlarında olacağı öngörülmüştür. Tablo 4'ten yola çıkıldığında oluşacak intermetalik fazın NiAl olacağı anlaşılmıştır. Valans elektron konsantrasyon (VEC) değerinin 6.87 ile 8 arasında olması durumunda YMK ve HMK fazlarının bir arada bulunacağı literatürde belirtilmiştir. Aynı şekilde karışım entropi (ΔS_{mix}) değerinin 11 ile 19.5 arasında olması ve atomik çap farkının (δ) ise 8.5 dan küçük olması durumunda da basit kübik yapıların oluşacağı belirtilmiştir [3]. Ω parametresinin ise 1' den büyük olması durumunda katı çözelti faz oluşumu desteklediği, küçük olması halinde ise segregasyon ve intermetalik faz ayrışmalarının gözlemlendiği rapor edilmiştir [13].

Tablo 4. Alaşım tasarımının teorik hesaplamalarında elde edilen veriler (Data from theoretical calculations of alloy design)

Alaşım Sistemi	δ	ΔH_{mix}	VEC	ΔS_{mix}	Ω	T _m (K)	Baskın ikili faz
AlCuCrFeNi	2.91	-25	7.6	13.37	856.74	1602	NiAl

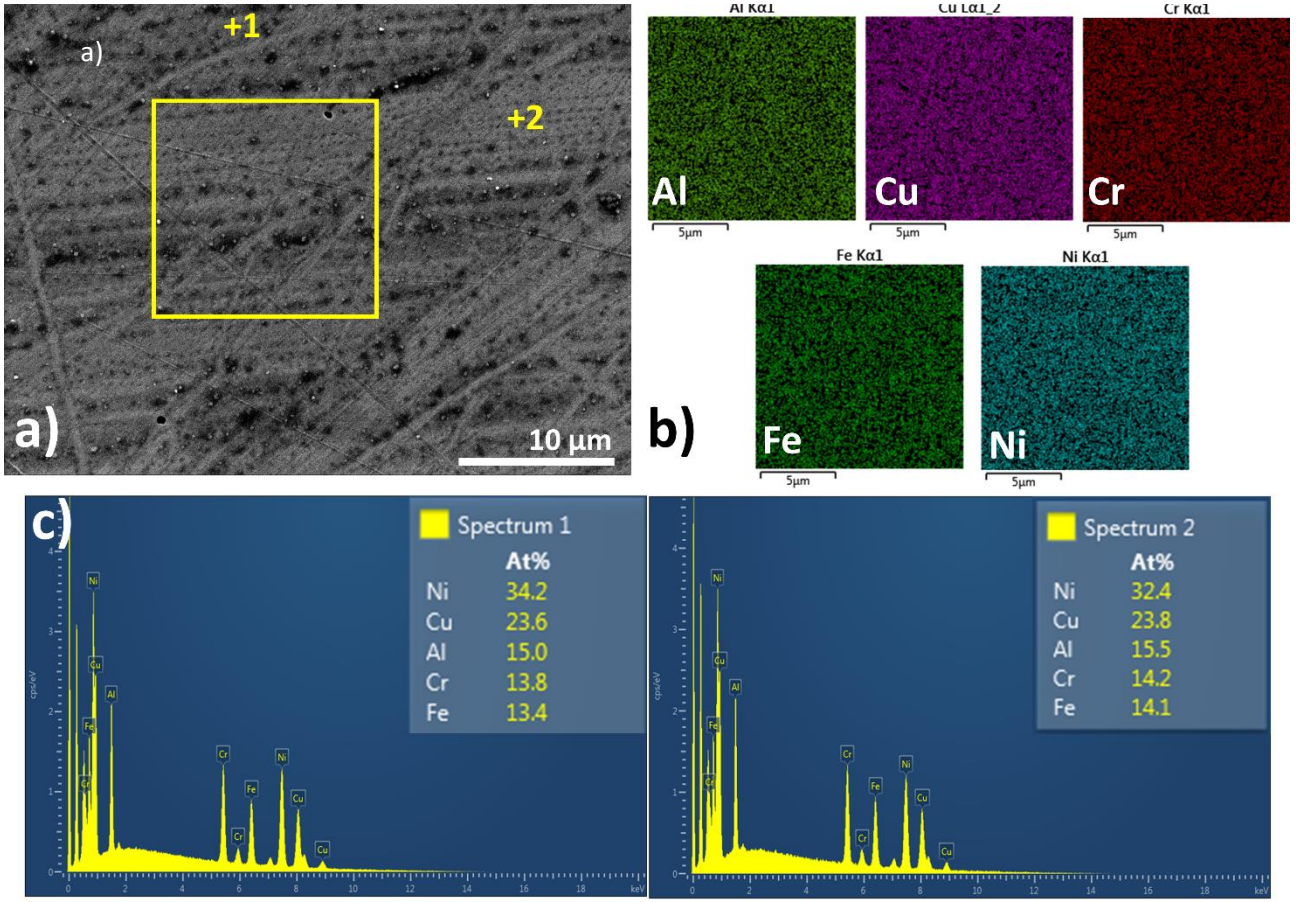
3.2. FBB ile Kaplanmış YEA'nın Mikroyapısal Karakterizasyonu (Microstructural Characterization of FBB Coated YEA)

Şekil 3'de PVD kaplamalar arasından termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak elde edilmiş AlCuCrFeNi kaplamanın 14 kx büyütmede alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Termal olarak ısıtılıp buharlaştırılan mekanik alaşımlanmış pelet altlık yüzeyinde yaklaşık 1 µm civarında kalınlığa ulaştığı görülmektedir. Oluşan kaplama tabakasının kalınlığının tam homojen olmadığı görülmektedir. Altlık ile oluşan kaplama tabakası arayüzeyinde ise herhangi ayrılma veya çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Alınan görüntü SEM'in SE modunda alınmasından dolayı kontrast detayları çok belli olmamaktadır. Kaplama kalınlığının çok ince olmasından dolayı yapılan elementel haritalama analizlerinde ise renk detayları çok belirgin olmadığından eklenmemiştir.



Şekil 3. AlCuCrFeNi kaplama ve CuNi altlık malzemeye ait SEM mikroyapı görüntüsü (SEM microstructure image of AlCuCrFeNi coating and CuNi backing material)

Şekil 4'te ise elementel ve nokta analizlerinin alındığı bölgeler gösterilmektedir. Üst yüzeyden alınan SEM görüntüsü (Şekil 4a) altlık malzemenin topografik görüntü detayını vermektedir. Görülen çizik benzeri hafif oyuklu izler, kaplama öncesi metalografik numune hazırlama aşamasından kalmıştır. Şekil 4b'de üst yüzeyden alınan elementel haritalama görüntüsü bulunmaktadır. Elementel haritalamada dağılımın homojen olduğu net şekilde görülmektedir. Tozlardan alınan XRD analizinde 3 farklı fazın varlığı kaplama sonrası kontrast detayı vermemiştir. Cu ve Ni renklerinin biraz daha koyu tonda olduğu görülmektedir. Bununda kaplama kalınlığının ince olmasından dolayı altlık malzemeden gelen spektrumlarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Altlık malzememizin ise CuNi alaşımı olan Monel 400 olmasından dolayı ve bu alaşımın %67 Ni %32 Cu içermesinden dolayı nokta analizindeki oranlar eşmolar olarak gözükmemektedir [14]. Şekil 4c'de kaplama üst yüzeyinden alınan 2 adet spektrum verilmiştir. Her iki spektrumda da Ni ve Cu miktarları yüksek Al-Cr-Fe miktarlarının ise hemen hemen eşit ve düşük miktarda olduğu görülmektedir. Bununda benzer şekilde ince kaplama tabakasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Özellikle Al, Cr ve Fe miktarlarının eş molar yakın olması kaplamanın üretilen alaşıma ait olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 4. AICuCrFeNi kaplamaya ait a) üst yüzey SEM görüntüsü, b) Elementel haritalama görüntüsü ve c) EDX nokta analiz sonucu (AICuCrFeNi coating; a) top surface SEM image, b) Elemental mapping image, and c) EDX point analysis result)

Gabbitas ve arkadaşları TiAl alaşımını mekanik alaşımlama kullanarak ürettikten sonra presleyerek PVD hedefi olarak kullanarak başarılı şekilde üretimini sağlamışlardır [15]. 12 saat öğütme süresi ile alaşımlanıp, sıcak izostatik presleme sonrası PVD tekniği ile hedef alaşımın başarılı şekilde üretildiği görülmüştür. Mevcut çalışmamızda öğütme süremiz 20 saat olarak yapılması hedef alaşım üretimi için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak tozların preslenme ve sinterlenmesine gerek kalmadan ince film alaşım üretimi başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada Monel 400 altlık malzeme üzerine FBB-Termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak AICuCrFeNi yüksek entropili alaşımı kaplanmıştır. Üretilen kaplamanın mikroyapısal karakterizasyon sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. AICuCrFeNi içerikli yüksek entropili alaşım mekanik alaşımlama tekniği kullanarak başarılı şekilde sentezlenmiş ve yapılan faz analiz incelemesinde baskın olarak HMK/B2 fazları ve YMK fazlardan meydana geldiği tespit edilmiştir.
2. Deneysel çalışmada tek parametre kullanılarak ile PVD Termal buharlaştırma yöntemiyle Monel 400 alaşımı üzerine mekanik alaşımlanarak üretilmiş yüksek entropili AICuCrFeNi alaşımı biriktirilmiştir. Altlık malzemeden gelen spektrum verileride göz önüne alındığında eşmolere yakın olarak başarılı şekilde alaşımın biriktirildiği tespit edilmiştir.
3. Üretim sonrası kaplama kalınlığının yaklaşık 1µm civarlarında altlık üzerine biriktiği tespit edilmiştir. Kaplama arayüzeyinde herhangi bir ayrılma ve uyumsuzluğun meydana gelmediği görülmüştür.

İleriki çalışmalarda PVD parametrelerinin optimizasyonu, oluşan kaplamanın sertliği ve ısıl işlemler sonrası altlıkla olan etkileşimine odaklanılacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang, Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes, *Advanced Engineering Materials*, 6: 299–303, 2004.
2. Y.F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu, Y. Yang, High-entropy alloy: challenges and prospects, *Materials Today*, 19: 349–362, 2016.
3. M.-H. Tsai, J.-W. Yeh, High-entropy alloys: a critical review, *Materials Research Letters*, 2: 107–123, 2014.
4. K. Harsha, *Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films*, Wiley, 2005.
5. A. Inspektor, P.A. Salvador, Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review, *Surface and Coatings Technology*, 257: 138–153, 2014.
6. W.D. Sproul, Physical vapor deposition tool coatings, *Surface and Coatings Technology*, 81: 1–7, 1996.
7. A.I. Ustinov, S.A. Demchenkov, T.V. Melnychenko, V.S. Skorodzievskii, S.S. Polishchuk, Effect of structure of high entropy CrFeCoNiCu alloys produced by EB PVD on their strength and dissipative properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 887, 161408, 2021.
8. L. Liao, R. Gao, Z.H. Yang, S.T. Wu, Q. Wan, A study on the wear and corrosion resistance of high-entropy alloy treated with laser shock peening and PVD coating, *Surface and Coatings Technology*, 437: 128281, 2022.
9. V.M. Nadutov, A.V. Proshak, S.Y. Makarenko, V.Y. Panarin, M.Y. SvavilNyj, Creation and Mössbauer studies of high-entropy physical vapor deposition by cathode arc evaporation (PVD CAE) coating AlFeCoNiCuCr, *Materwiss Werksttech*, 47: 272–277, 2016.
10. P. Nagy, N. Rohbeck, G. Roussely, P. Sortais, J.L. Lábár, J. Gubicza, J. Michler, L. Pethö, Processing and characterization of a multibeam sputtered nanocrystalline CoCrFeNi high-entropy alloy film, *Surface and Coatings Technology*, 386, 125465, 2020.
11. Y.F. Ye, Q. Wang, J. Lu, C.T. Liu, Y. Yang, High-entropy alloy: challenges and prospects, *Materials Today*, 19: 349–362, 2016.
12. A. Erdogan, S.E. Sunbul, K. İcin, K.M. Doleker, Microstructure, wear and oxidation behavior of AlCrFeNiX (X = Cu, Si, Co) high entropy alloys produced by powder metallurgy, *Vacuum*, 187, 110143, 2021.
13. X. Yang, Y. Zhang, Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys, *Materials Chemistry and Physics*, 132: 233–238, 2012.
14. Y. Küçük, K.M. Döleker, M.S. Gök, S. Dal, Y. Altınay, A. Erdoğan, Microstructure, hardness and high temperature wear characteristics of boronized Monel 400, *Surface and Coatings Technology*, 436, 128277, 2022.
15. B. Gabbitas, P. Cao, S. Raynova, D.L. Zhang, Fabrication of TiAl Target by Mechanical Alloying and Applications in Physical Vapour Deposition Coating, *Materials Science Forum*, 534–536: 805–808, 2007.