



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.03.2025
Kabul Tarihi : 22.04.2025

Received Date : 20.03.2025
Accepted Date : 22.04.2025

Ni₅₅Si₄₀M₅ (M=Co, Fe, Al) ALAŞIMLARININ ARK ERGİTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLMESİ VE YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ni₅₅Si₄₀M₅ (M=Co, Fe, Al) ALLOYS OBTAINED BY ARC MELTING METHOD

Ömer KARATUTLU^{1*} (ORCID: 0000-0003-2391-2443)
Abdullah ŞİŞMAN² (ORCID: 0000-0001-9898-2556)
Musa GÖĞEBAKAN³ (ORCID: 0000-0001-5104-2874)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Afşin Meslek Yüksek Okulu, Kahramanmaraş, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

³ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ömer KARATUTLU, okaratutlu@ksu.edu.tr

ÖZET

Nikel esaslı alaşımlar, atmosferin aşındırıcı etkilerine karşı yüksek direnç göstermeleri, yeterli mekanik mukavemet sağlamaları ve yüksek sıcaklıklarda yapısal değişime uğramamaları gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak, nikelin yoğunluğunun nispeten yüksek olması ($d_{Ni} = 8,9 \text{ g/cm}^3$), bu alaşımların kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir. Buna karşılık, düşük yoğunluklu silisyum ($d_{Si} = 2,33 \text{ g/cm}^3$), iyi mekanik özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bu nedenle, Ni-Si alaşımlarının özelliklerinin incelenmesi ve endüstriyel uygulamalardaki potansiyelinin araştırılması önem arz etmektedir. Ayrıca, Ni-Si alaşımlarının mikro yapı, mekanik, elektriksel ve termal özellikleri üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, Ni₅₅Si₄₀M₅ (M = Co, Fe, Al) alaşımları ark ergitme yöntemiyle üretilmiş ve yapısal, mekanik ve termal özellikleri XRD, SEM, Mikro Vickers ve DTA analizleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, en yüksek sertlik değeri Ni₅₅Si₄₀Co₅ alaşımı için $H_v = 1470 \text{ MPa}$ olarak tespit edilmiştir. Ni₅₅Si₄₀Fe₅ alaşımında lamelli yapıların oluşumu gözlemlenirken, Ni₅₅Si₄₀Al₅ alaşımında ise AlSi fazı boyunca mikro çatlakların meydana geldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alaşım, faz, sertlik, mukavemet

ABSTRACT

Nickel-based alloys offer significant advantages such as high resistance to atmospheric corrosion, sufficient mechanical strength, and stability at elevated temperatures without undergoing structural changes. However, the relatively high density of nickel ($d_{Ni} = 8.9 \text{ g/cm}^3$) imposes certain limitations on its application. On the other hand, silicon has a considerably lower density ($d_{Si} = 2.33 \text{ g/cm}^3$) while also exhibiting favorable mechanical properties, making it a promising alloying element. Therefore, investigating the properties of Ni-Si alloys and assessing their industrial applicability is of great importance. Additionally, there is a limited amount of information in the existing literature regarding the microstructural, mechanical, electrical, and thermal properties of Ni-Si alloys. In this study, Ni₅₅Si₄₀M₅ (M = Co, Fe, Al) alloys were produced using the arc melting method, and their mechanical, structural, and thermal properties were characterized through XRD, SEM, micro Vickers hardness testing and DTA. Among the produced alloys, Ni₅₅Si₄₀Co₅ exhibited the highest hardness value, with a microhardness of $H_v = 1470 \text{ MPa}$. Furthermore, lamellar structures were observed in the Ni₅₅Si₄₀Fe₅ alloy, while microcracks were detected along the AlSi phase in the Ni₅₅Si₄₀Al₅ alloy.

Keywords: Alloy, phase, hardness, strength

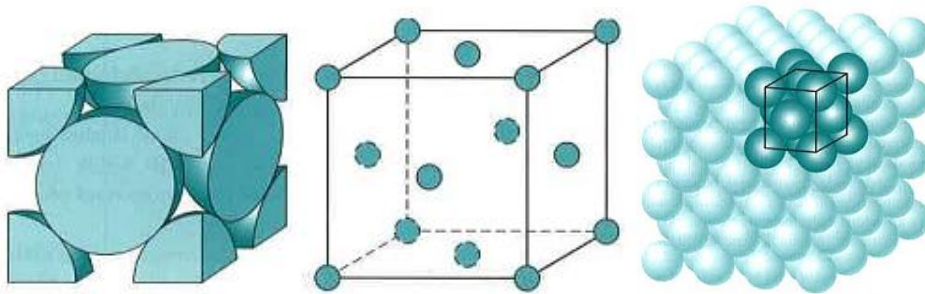
ToCite: KARATUTLU, Ö., ŞİŞMAN, A., & GÖĞEBAKAN, M., (2025). Ni₅₅Si₄₀M₅ (M=Co, Fe, Al) ALAŞIMLARININ ARK ERGİTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLMESİ VE YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1049-1063.

GİRİŞ

Metal ve alaşımlarındaki atomlar, bir düzen içinde dizilmekte olup, metallerin yoğunlukları seramik ve polimerlere kıyasla daha yüksek değerlere sahiptir. Mekanik özellikler açısından, metallerin nispeten yüksek rijitlik ve dayanım seviyelerinin yanı sıra, süneklikleri (kırılmadan önce yüksek oranda şekil değiştirebilme kapasiteleri) ve kırılmaya karşı dirençleri de oldukça yüksektir. Bu üstün özellikler, metallerin yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Metaller, belirli bir atoma bağlı olmayan ve yapının içerisinde serbestçe hareket edebilen çok sayıda elektrona sahiptir. Bu serbest elektronlar, metallerin elektriksel iletkenlik, ısı iletkenlik ve parlaklık gibi karakteristik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, serbest elektronların hareketliliği, metallerin dövülebilirlik ve şekillendirilebilirlik gibi mekanik özelliklerine de katkı sağlamaktadır. Örneğin, metallerin elektrik ve ısı iletkenlikleri oldukça yüksektir ve görünür ışık altında mat bir görünüm sergilerler. Parlatılmış bir metal yüzeyi ise ayna benzeri bir yansıtıcılık özelliğine sahiptir. Ayrıca, bazı metallere ait (Fe, Co ve Ni) manyetiklik özellikleri, malzeme bilimi ve mühendisliği açısından dikkat çekici bulunmaktadır.

Nikel esaslı alaşımlar, yüksek mekanik dayanım, yüzey düzgünlüğü ve yüksek sıcaklıklarda bile üstün darbe dayanımı gibi öne çıkan özelliklere sahiptir. Silisyum ise yüksek korozyon ve oksidasyon direnci sayesinde, nikel ile bir araya getirildiğinde yeni ve keşfedilmeyi bekleyen özellikler sergileyen alaşımlar oluşturabilmektedir. Fe-Ni-Si alaşımlarında gözlemlenen östenit fazın, şekil hafızası etkisi oluşturduğu belirlenmiştir. Bu durum, Fe-Ni-Si sistemine ait denge faz diyagramının daha iyi anlaşılmasını; demir ve çelik malzemelerin yapısal özelliklerinin geliştirilmesi ve manyetik özelliklerin iyileştirilmesi açısından önemli kılmaktadır. Ancak, Fe, Ni ve Si faz diyagramları ile ilgili literatürdeki veriler yeteri kadar olmayıp, bu konuda yapılan farklı çalışmaların sonuçlarının daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllardaki malzeme bilimi alanındaki ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, uygulamaya yönelik daha gelişmiş malzemelerin geliştirilmesi ve malzeme üretiminin çevresel etkilerinin azaltılması gibi teknolojik zorluklar devam etmektedir (Zhang, 2009).

Ni-Si (Nikel-Silisyum) alaşımları, sahip oldukları üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve korozyon direnci, iyi termal kararlılık ve belirli fazlarda üstün sertlik özellikleri göstermeleri bakımından dikkat çekicidir. Ni_3Si gibi intermetalik fazların varlığı, bu alaşımların yüksek sıcaklık uygulamalarında boyutsal kararlılık ve mekanik dayanım açısından tercih edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, Ni-Si alaşımları; türbin kanatları, ısı değiştiricileri, otomotiv motor parçaları, elektronik bileşenler ve özellikle mikroelektronik sanayisinde ince film malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bu alaşımların bazı varyantları, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı nedeniyle kaplama teknolojilerinde de değerlendirilmektedir. Ni-Si alaşımlarının bu çok yönlü kullanımı, onların üstün yapısal performansı ile kimyasal stabilitelerinin birleşimi sayesinde mümkün olmaktadır (Zhao vd., 2017). Katı malzemelerin birçok özelliği, kristal yapıları ile doğrudan ilişkilidir ve bu yapılar, atomların, iyonların veya moleküllerin üç boyutlu düzenlenme biçimlerini ifade eder. Metallerde gözlemlenen nispeten basit kristal yapılar, bazı seramik ve polimerlerde oldukça karmaşık formlara ulaşabilmektedir. Yüzey merkezli kristal yapıya sahip malzemelere ait katı küre birim hücreler Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kristal Kafes Yapıları

Kristal yapılardaki atomsal diziliş ve düzen, bir grup atomdan oluşan küçük bir birimin düzenli olarak tekrarlanmasıyla meydana gelir. Bu bağlamda, kristal yapıları tanımlamak ve incelemek için, yapının tekrarlayan en küçük yapı taşı olan birim hücreler kullanılır. Birim hücreler, kristal yapıların anlaşılabilirliğini ve analizini kolaylaştıran temel unsurlardır. Metallerin büyük bir çoğunluğu, yüzey merkezli kübik (FCC), hacim merkezli kübik (BCC) ve sıkı paketlenmiş hekzagonal (HCP) olmak üzere üç temel kristal yapıda bulunur. Öte yandan, korozyon; metallerin oksitlenme veya diğer kimyasal tepkimeler sonucunda aşınmasına verilen addır. Bazı metaller, korozyona

karşı yüksek direnç gösterirken mekanik kuvvetlere karşı daha zayıf olabilir. Buna karşın, bazı metaller ise mekanik dayanımı yüksek olmasına rağmen korozyon direnci açısından yetersiz kalabilir. Bu nedenle, malzeme seçiminde hem mekanik özellikler hem de çevresel faktörlere karşı direnç dikkate alınmalıdır.

Örneğin, %95 demir ve %1,5 karbondan meydana gelen bir çeliğin korozyondan etkilenme oranı 1 olarak kabul edilirse, çeliğe %1 oranında krom ilavesi, bu oranı 0.7 ye düşürmektedir. Çeliğe eklenen krom miktarı arttıkça, malzemenin korozyona karşı dayanımı da artış göstermektedir. Paslanmaz çeliklerde ise kroma ek olarak nikel de bulunmakta olup, bu tür çeliklerin bileşiminde genellikle %18 krom ve %10 nikel yer almaktadır. Elementler, alaşımlar oluşturularak kullanım alanları genişletilmektedir. Örneğin, çinko metali doğrudan kullanıldığında sınırlı bir kullanım alanına sahipken, ikili ve üçlü alaşımlar halinde daha fazla endüstriyel uygulamada kullanılabilmektedir. Pirinç, %63 bakır ve %37 çinko içeren bir ikili alaşımdır ve kolay işlenebilir olması nedeniyle tel, silindirik yapılar ve dekoratif eşya yapımında kullanılmaktadır. Diğer yandan, %60 bakır, %38 çinko ve %2 demir içeren delta alaşımı, üçlü bir alaşım olup, esnek yapısı ve yüksek kopma dayanımıyla dikkat çekmektedir (Zhang, 2009).

Al-Si-Ni döküm alaşımlarına farklı konsantrasyonlarda (0, 0.01, 0.05 ve 0.1 ağırlık %) Ni eklenmesinin X-ışını kırınımı (XRD) ve Vickers sertliği (HV) testleri kullanılarak, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelenmiştir. Sinterleme işleminden sonra %0,1 ağırlıkça Ni içeren numunenin en yüksek sertlik değerine ulaştığını, buna karşılık sinterleme öncesinde nikel içermeyen numunenin en düşük sertlik değerini gösterdiğini ortaya koymuştur. Sertlikte gözlenen bu artış, yüksek sıcaklık koşullarında nikel atomlarının alüminyum kafes yapısına difüzyonunun artmasıyla ilişkilendirilmiştir (Alsowidy vd., 2024). Cu-2.0%Ni-0.5%Si alaşımlarının termomekanik işlem sonrası mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemektedir. Mg ilavesinin disk şeklindeki Ni_2Si parçacıklarının oluşum hızını artırdığı ve daha yüksek mukavemet ile stres gevşeme direnci sağladığı bulunmuştur (Monzen vd., 2005).

CuNiCoSi alaşımının $CuNi_2Si$ alaşımına kıyasla sertlik, iletkenlik, mekanik mukavemet, aşınma direnci ve korozyon direnci açısından üstün olduğunu göstermektedir (Karakurt vd., 2024).

%0,1 kütle Mg içeren ve içermeyen termo-mekanik işlenmiş Cu-2,0 kütle % Ni-0,5 kütle % Si alaşımlarının mikro yapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Mg ilavesi, disk şeklindeki Ni_2Si parçacıklarının oluşum hızını artırırken, mukavemet ve gerilim gevşemesine karşı direnci de artmıştır. Isıl işlem görmüş alaşımı, termo-mekanik işlenmiş alaşıma göre %0,2 daha yüksek dayanım gerilimi ve nihai çekme gerilimi değerleri ile daha düşük bir kopma uzama göstermiştir (Watanable vd., 2006).

Cu-Ni-Si alaşımı üzerine yapılan çalışmada Ni-Si intermetaliklerinin morfolojisi, miktarı ve boyutları, ısı ve termal-mekanik işlemlerle kontrol edilerek, bu parametrelerin elektriksel bozulma davranışı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiş ve bozulmanın ilk olarak Cu-Ni-Si alaşımlarında tane sınırlarındaki Ni_3Si fazında ve Cu matrisinin iç kısmındaki $\delta-Ni_2Si$ 'da meydana geldiğini gösterdiğini ifade edilmiştir (Xie vd., 2020).

Cu-6Ni-1.5Si alaşımında farklı morfolojilere sahip Ni_2Si intermetalik bileşenlerin mikroyapı ve yorulma özellikleri incelenmiştir. Normal yaşlandırma ile oluşturulan disk şeklindeki sürekli çökelti (CP) aşırı yaşlandırma ile elde edilen lif şeklindeki kesikli çökelti (DP) ve soğuk haddeleme (DPR) ile üretilen uzamış DP'ler değerlendirilmiştir. CP numunesi yüksek çekme dayanımına sahip olmasına rağmen, CP ve DP arasında yorulma dayanımında belirgin bir fark yoktur. Tüm örnekler arasında en yüksek çekme ve yorulma dayanımına DPR numunesi sahiptir. DPR'nin yorulma çatlağı başlatma direnci de önemli ölçüde artmıştır. DPR'nin çatlak büyüme direnci CP numunesine benzer bulunmuştur. Çekme ve yorulma dayanımındaki eğilimler her numunenin mikroyapısına dayanarak tartışılmıştır (Smith vd., 2025). Sıcak deformasyon sonrasında, Cu-Ni-Co-Si alaşımı numunelerinde, matris içerisinde dislokasyonları ve tane sınırlarını sabitleyerek tane boyutunun incelmeye katkıda bulunan ve böylece alaşımın mekanik mukavemetini artıran nanoölçekli $\delta-(Ni, Co)_2Si$ çökeltileri oluşmaktadır (Zhao vd., 2017).

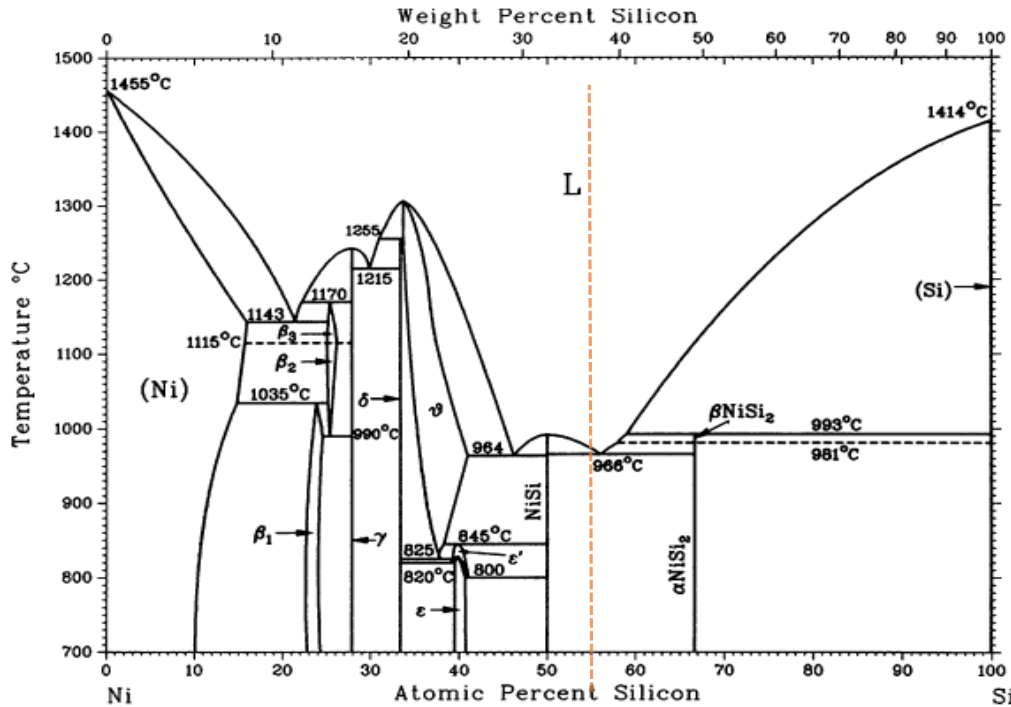
Ni-Si-Co alaşımı, yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon direnci ve mekanik özellikleri ile dikkat çeker. Nikelin sıcaklık dayanımını, silisyumun aşınma direnci ve kobaltın oksidasyon direnciyle birleştiren bu alaşım, özellikle zorlu endüstriyel koşullarda üstün performans sergiler. Yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı, alaşımın motor parçaları, gaz türbinleri ve uçak motorları gibi yüksek ısı ortamlarda kullanılmasını sağlar. Oksidasyon direnci sayesinde, korozif ortamlarla temas eden yüzeylerde uzun süreli dayanıklılık gösterir. Ayrıca, silisyumun katkısı, alaşıma yüksek aşınma direnci kazandırarak, ağır yüklü makinelerde ve aşındırıcı ortamlarda kullanımını mümkün kılar. Kobalt, alaşımın mekanik dayanımını artırarak sertlik ve yapısal stabilite sağlar, bu da onu yapısal malzeme olarak

ideal kılar. Elektromanyetik özellikler ve düşük genleşme katsayısı da, Ni-Si-Co alaşımını, elektriksel ve manyetik uygulamalarda, aynı zamanda ısı genleşmeye duyarlı parçalarda tercih edilen bir malzeme yapar (Huang vd., 2020).

Ni-Si-Fe alaşımı, nikel, silisyum ve demir elementlerinin kombinasyonundan oluşan bir alaşımdır ve özellikle yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve mıknatıslanma özellikleri ile dikkat çeker. Nikelin katkısı, alaşıma yüksek sıcaklık dayanımı sağlarken, silisyum, alaşımın oksidasyon direncini artırır ve aşınma direncini güçlendirir. Demir ise, mıknatıslanma özelliklerini iyileştirir ve bu özellik sayesinde elektrik motorları ve manyetik uygulamalar için tercih edilen bir malzeme yapar. Ayrıca, yüksek mekanik dayanım ve sertlik sunarak, alaşımın endüstriyel makineler, otomotiv parçaları ve enerji santralleri gibi zorlu ortamlarda güvenle kullanılmasını sağlar. Ni-Si-Fe alaşımı, yüksek performans gerektiren elektronik bileşenler ve kaplama teknolojileri gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır. Bu alaşımın üstünlükleri, onu dayanıklı ve uzun ömürlü bir malzeme haline getirir (Chen vd., 2013).

Ni-Si-Al alaşımı, nikel, silisyum ve alüminyum elementlerinin birleşiminden oluşan bir alaşımdır ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda üstün performans sergiler. Bu alaşım, yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik dayanım, aşınma direnci ve düşük yoğunluk gibi önemli özelliklere sahiptir. Alüminyum, alaşıma hafiflik kazandırarak, özellikle uçak ve otomotiv sanayisi gibi hafif malzeme gereksinimlerine sahip sektörlerde kullanımını yaygınlaştırır. Silisyum, oksidasyon direncini artırarak alaşımın korozyon ortamlar ve yüksek sıcaklık koşullarında dayanıklılığını sağlar. Nikel ise, alaşımın termal stabilitesini güçlendirir ve mekanik dayanımını artırır. Bu kombinasyon, Ni-Si-Al alaşımını, yüksek performanslı malzemeler ve uzun ömürlü uygulamalar için ideal bir seçenek haline getirir (Zhou vd., 2019).

Şekil 2’de gösterilen Nikel-Silisyum faz diyagramı incelendiğinde, nikelin %55 olduğu nokta, silisyumun %45 – ötektik noktasında, alaşımın erime sıcaklığının 964 °C olduğu Şekil 2’de görülmektedir (Barış vd., 2019). Nikelin alaşım içerisindeki oranı arttıkça, alaşımın erime noktası 1455 °C’ye kadar yükselmektedir. Alüminyumun da erime noktası 658 °C olduğundan ve bu sıcaklıklarda buharlaşabileceğinden, nikel-alüminyum alaşımı elde etmek zorlaşmaktadır. Ancak, nikelin %55 oranında bulunduğu bir alaşım, erime noktası daha düşük olan (964 °C) bir NiSi alaşımı oluşturacağından, üretimi daha kolay ve dolayısıyla endüstriyel değeri daha yüksek olacaktır. Bu avantajlar göz önünde bulundurularak $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ - $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ - $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ oranı tercih edilmiştir.



Şekil 2. Nikel Silisyum Faz Diyagramı

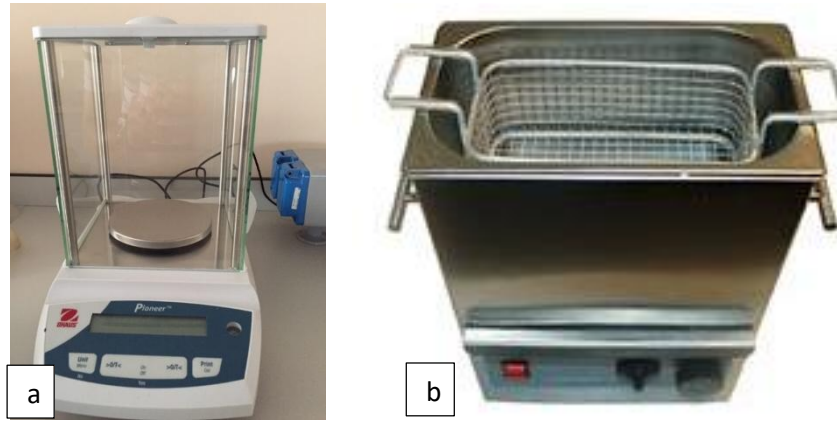
Ni-Si ikili alaşımına ait yapısal ve mekaniksel özelliklerinin incelenmesi sonucunda, ötektik hücrelerin yapısı nikel-silisyum oranına bağlı olarak değişmektedir. Sertliğin en yüksek olduğu noktanın ise ötektik noktaya en yakın kompozisyon olan $Ni_{70}Si_{30}$ alaşımında elde edildiği saptanmıştır. Buna ek olarak, silisyum oranının artmasıyla sertlik değerinin belirgin şekilde düştüğü görülmüştür (Gögebakan, 2015).

MATERYAL VE METOD

Nikelin yoğunluğunun çok düşük olmaması ($d_{Ni} = 8,9 \text{ gr/cm}^3$), kullanım alanlarında bazı sınırlamalara neden olmaktadır. Buna karşılık, silisyumun düşük yoğunluğu ($d_{Si} = 2,33 \text{ gr/cm}^3$) ve oldukça iyi mekanik özellikleri onu tercih edilebilir hale getirmektedir. Bu durum dikkate alınarak, literatürde araştırılmamış, $Ni_{55}Si_{40}M_5$ ($M = \text{Kobalt, Demir ve Aliminyum}$) kompozisyonu hazırlanmıştır. Ark ergitme yöntemi ile üretilen $Ni_{55}Si_{40}M_5$ ($M = \text{Co, Fe, Al}$) alaşımlarının yapısal, mekanik ve ısısal özellikleri incelenmiştir.

Alaşımların Hazırlanması

Alaşımların üniform bir yapıda üretilmesi amacıyla ark ergitme yöntemi tercih edilmiştir. Üretim için kullanılacak elementel toz ve külçeler, en az %99,9 saflıkta olacak şekilde Aldrich ve Merck firmalarından alınmıştır. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$, $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ ve $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ kompozisyonlarına sahip alaşımlar, hassas terazi (Şekil 3.a) kullanılarak 15 gram olarak ölçülüp hazırlanmıştır.



Şekil 3. a. Hassas Terazi b. Ultrasonik Banyo Cihazı

Hazırlanan alaşım elemanlarının, atmosferik koşullardan ve kirlenme etkilerinden arındırması amacıyla ultrasonik banyo (Şekil 3.b) ile temizlenmiş ve ardından saf alkol ile durulanmıştır. Temizlik işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler vakit kaybedilmeden ark ergitme cihazına yerleştirilmiştir. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ alaşımının element oranları Tablo 1’de, $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ alaşımının element oranları Çizelge 4.2’de ve $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ alaşımının element oranları Çizelge 4.3’te atomik ve kütlece ağırlıkları ile birlikte gösterilmiştir.

Tablo 1. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ Alaşım Elementleri Oranı

Alaşım elemanı		Atomik Küt.	Atomik Ağ. (%at)	Kütlece Ağ. (%wt)
İsim	Sembol			
Nikel	Ni	58,6934	55,0000	69,4787
Silisyum	Si	28,0855	40,0000	24,1792
Kobalt	Co	58,9332	5,0000	6,3421

Tablo 2. $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ Alaşım Elementleri Oranı

Element		Atomik Kütle	Atomik Ağırlık (%at)	Kütlece Ağırlık (%wt)
İsim	Sembol			
Nikel	Ni	58,6934	55,0000	69,7104
Silisyum	Si	28,0855	40,0000	3,6390
Demir	Fe	55,845	5,0000	6,0298

Tablo 3. $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ Alaşım Elementleri Oranı

Element		Atomik Kütle	Atomik Ağırlık (%at)	Kütlece Ağırlık (%wt)
İsim	Sembol			
Nikel	Ni	58,6934	55,0000	71,9528
Silisyum	Si	28,0855	40,0000	25,0402
Alüminyum	Al	26,981538	5,0000	3,0070

Alaşımların Üretilmesi

Alaşımlar, Edmund Bühler markasına ait Kompakt Ark Ergitme cihazı kullanılarak üretilmiştir. Cihaz, her bir yüklemede yaklaşık 20 gram metal üretme kapasitesine sahiptir ve 3500 °C'ye kadar ertitme işlemi gerçekleştirebilmektedir. 230 V-50/60 Hz ile çalışan cihazın boyutları 43x65x75 cm olup, güçlü bir ark eritme jeneratörü ile donatılmıştır. Su soğutmalı bakır pota plakası ve demonte oluk şeklindeki kalıplar kullanılarak ertitme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi sırasında, serbestçe hareket ettirilebilen su soğutmalı tungsten elektrot kullanılmıştır (Şekil 4).

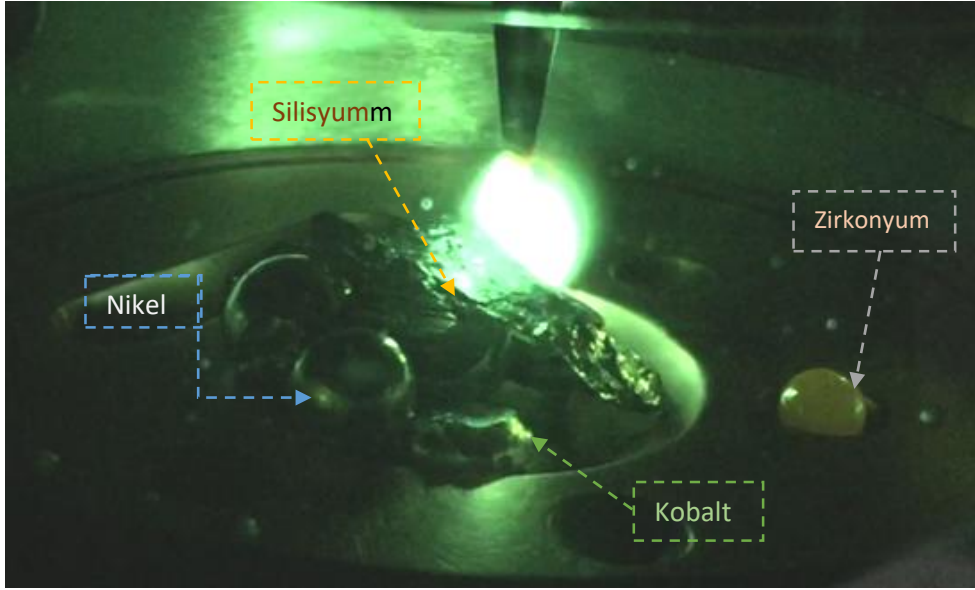


Şekil 4. Ark Ergitme Cihazı

Argon gazının koruyucu gaz olarak kullanıldığı üretim sürecinde; cihazın ilk çalıştırılmasında ertitme haznesindeki hava tahliye edilerek vakum oluşturulmuş, ardından argon gazı ortama salınmıştır. Bu sayede elektrik arkının kolayca oluşması ve devam etmesi sağlanmış, ayrıca yüksek sıcaklıklarda alaşımın oksitlenmesi önlenmiştir. Cihaz, aşırı ısınma durumunda otomatik olarak koruma moduna geçmekte ve çalışma sıcaklığına dönene kadar güvenli şekilde beklemektedir. Göz koruması için iki farklı cam katmanı da cihazda yer almaktadır.

Temizlik işlemi tamamlanan alaşım elemanları, bakır pota içerisine yerleştirilmiştir. Ark oluşturulmadan önce cihaz içerisindeki hava boşaltılmış ve vakum ortamı oluşturulduktan sonra argon gazı salınmıştır. Bu işlem, kaliteli bir ark atmosferi sağlayarak malzemenin oksitlenmesini önlemiştir.

Ergitme fırınlarında, özellikle metal üretimi sırasında, oksijen, azot ve sülfür gibi zararlı safsızlıkların giderilmesi amacıyla bir dizi indirgen (deoksidasyon) ajanı kullanılır. Bu metaller, oksijenle çok yüksek afinitesi olan elementlerdir ve ergimiş metal banyosuna eklenerek istenmeyen elementlerin bağlanmasını sağlamaktadır. Alüminyum (Al), en yaygın kullanılan deoksidasyon ajanıdır. Alüminyum, oksijenle hızla reaksiyona girerek Al_2O_3 (alüminyum oksit) oluşturur, bu oksit cürufa geçer ve metalin saflığını artırır. Zirkonyum (Zr) da benzer şekilde, ergimiş metaldeki oksijeni bağlayarak ZrO_2 oluşturur ve cürufa geçer. Silisyum (Si), özellikle karbonlu çelik üretiminde kullanılır, çünkü karbonu oksitleyerek çelikten uzaklaştırabilir. Mangan (Mn) ise, sadece oksitlenme değil, aynı zamanda sülfürle birleşerek MnS (manganez sülfür) oluşturur, bu da kükürt giderimi sağlar. Kalsiyum (Ca), özellikle metaldeki inklüzyonları temizlemek için kullanılır, çünkü kalsiyum oksit (CaO) oluşturur ve bu oksitler cürufa geçerek saf metalin kalitesini artırır. Diğer yandan, titan (Ti) ve niyobyum (Nb) gibi metaller, özellikle yüksek alaşımlarda oksijen ve azotla tepkimeye girerek TiO_2 ve TiN gibi bileşikler oluşturur, böylece metalin mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu indirgen metallerin kullanımı, metalin saflığının artırılmasına, istenmeyen bileşiklerin uzaklaştırılmasına ve nihai ürünün fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olur. Oksidasyon reaksiyonları sayesinde, bu metaller ertitme sırasında çevresel safsızlıkların giderilmesinde kritik rol oynar (Sokolov vd. 2014). Zirkonyum bilyenin ertitme sıcaklığına ulaşmasının ardından tungsten elektrot, alaşım elemanları üzerine getirilmiş ve ertitme işlemi başlatılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Ark Ergitme İşlemi

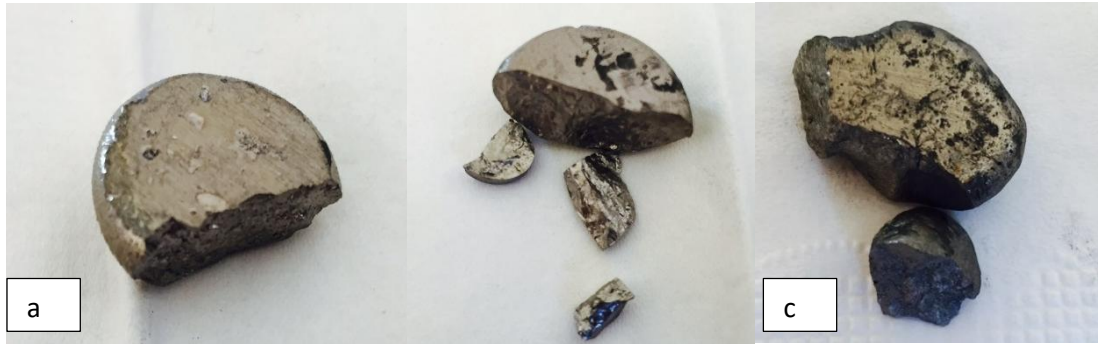
Yaklaşık 45 saniye içerisinde alaşımı oluşturan metaller ergitilmiştir. Daha sonra ergitme fırın kapağını açmadan alaşımı soğutmak üzere 10 dakika kadar beklenmiştir. Alaşım ters çevrilmiş ve homojen bir üretim sağlanmak amacıyla tekrar aynı işlemler uygulanarak ergitilmiştir. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$, $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ ve $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ için ergitme işlemi beşer kez tekrarlanmıştır. Üretim tamamlandıktan sonra alaşımın oda sıcaklığına getirilmesi süreci de pota içerisinde bekletilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).

Metallerde soğutma hızı, katılaşma sırasında oluşan fazların türünü, dağılımını ve morfolojisini belirleyen temel bir etkidir. Yavaş soğutma durumunda sistem, termodinamik dengeye ulaşarak iri taneli ve dengeli faz yapıları geliştirir. Buna karşın hızlı soğutma, atomların düzenli kristal örgüye yerleşmesine izin vermez ve bu durum ince taneli yapılar, metastabil fazlar (örneğin martensit) ya da amorf fazların oluşumuna neden olur. Bu yapısal değişiklikler, özellikle sertlik ve süneklik gibi mekanik özellikler üzerinde önemli rol oynar. Örneğin Fe-C alaşım sisteminde hızlı soğutma, martensit oluşumunu teşvik ederek sertliği artırırken, yavaş soğutma sünek perlitik yapılarla sonuçlanır (Callister vd., 2016).

Alaşımın incelenmesine geçilmeden önce, yapılacak analizler için uygun büyüklükte ve miktarda numuneler alınmıştır (Şekil 7). Numuneler, inceleme türüne göre parlatma işlemi yapılmıştır. XRD ve DTA analizlerinde kullanmak üzere numunelerden elde edilen parçalar basit mekanik öğütme yöntemiyle toz haline getirilmiştir.



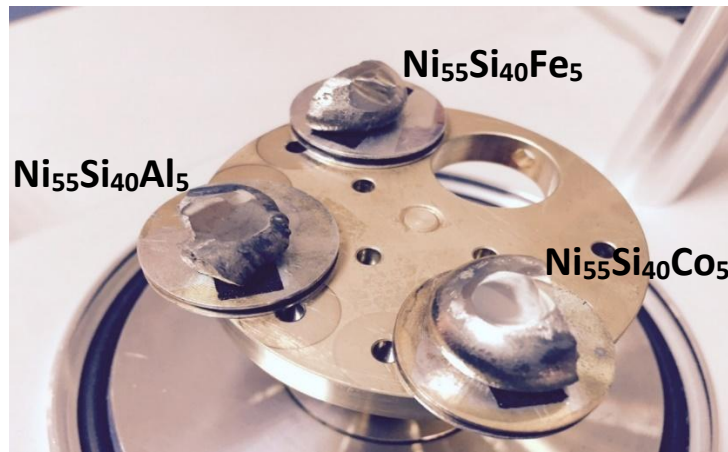
Şekil 6. Üretimi Tamamlanan Alaşım



Şekil 7. a. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Co}_5$ b. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Fe}_5$ c. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Al}_5$

BULGULAR VE TARTIŞMA

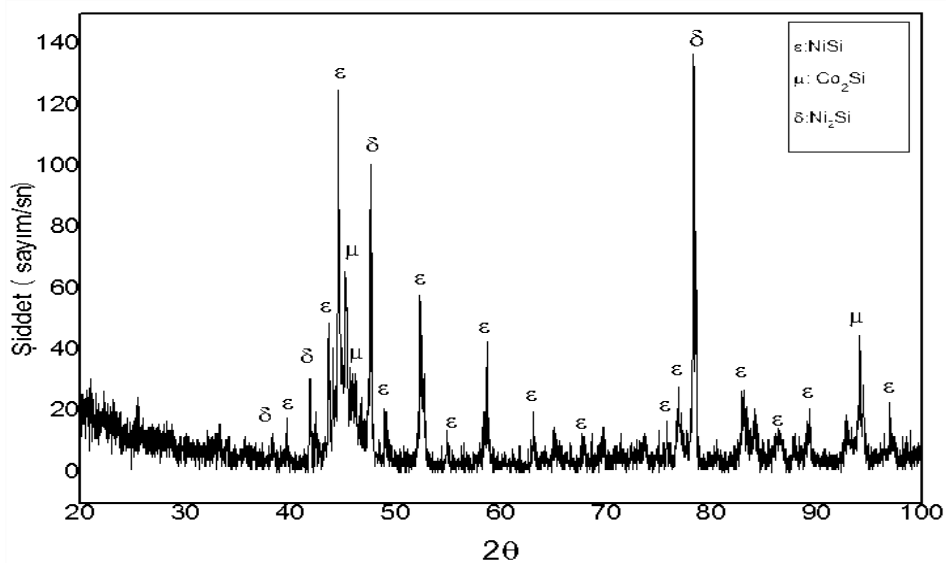
Alaşımların analizinde X-ışını Kırınımı (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Diferansiyel termal analiz (DTA) ve Sertlik Analizi (Mikro Vickers) cihazları kullanılmıştır.



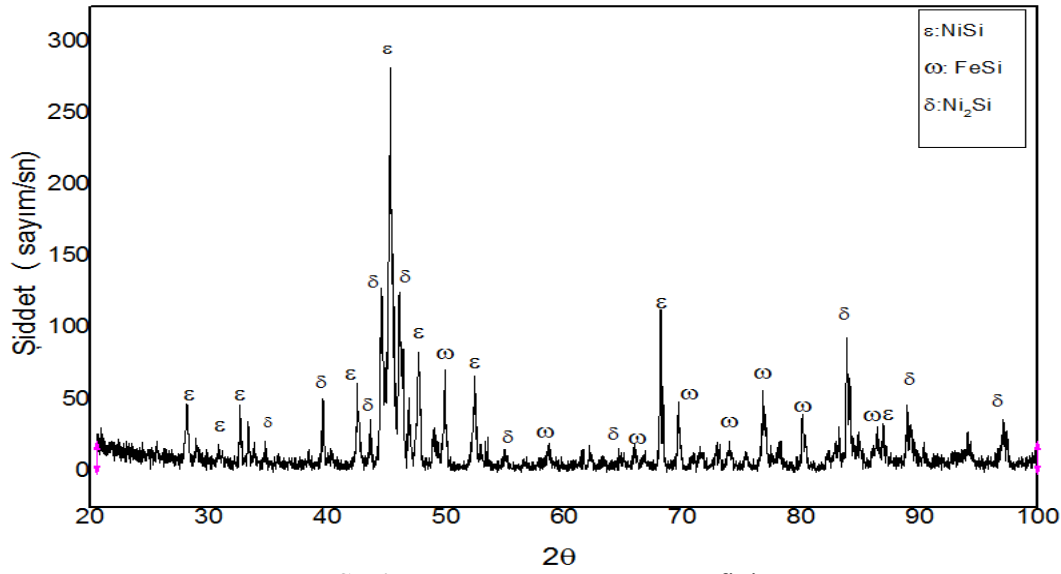
Şekil 8. SEM ile Yüzey Görüntüsü Alınacak Numuneler

X- Işını Kırınımı (XRD) Analizi

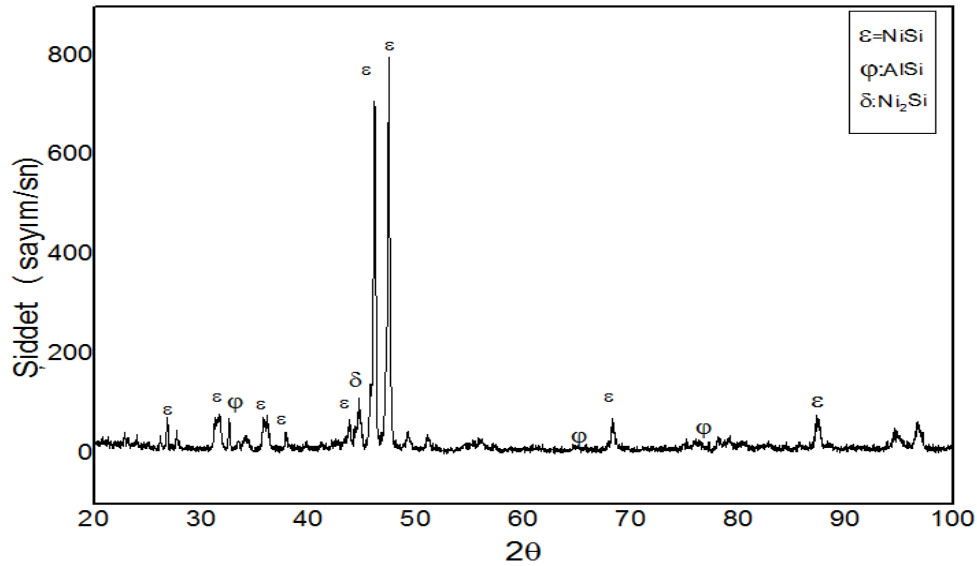
Alaşımlara ait XRD grafikleri Şekil 9-11'de sunulmuştur. Ni-Si fazlarına ait piklerin yoğunluğu ve şiddeti, alaşımdaki yüksek oranlarını doğrulamaktadır. Buna ek olarak, Co_2Si pikinin düşük şiddeti, kobaltın alaşımdaki düşük yüzdesinden kaynaklanmaktadır. Park (2006) tarafından yapılan NiSi alaşımı çalışmasında da NiSi ve Ni_2Si fazlarını XRD analizinde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 9. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Co}_5$ -XRD Grafiği



Şekil 10. Ni₅₅Si₄₀Fe₅ -XRD Grafiği



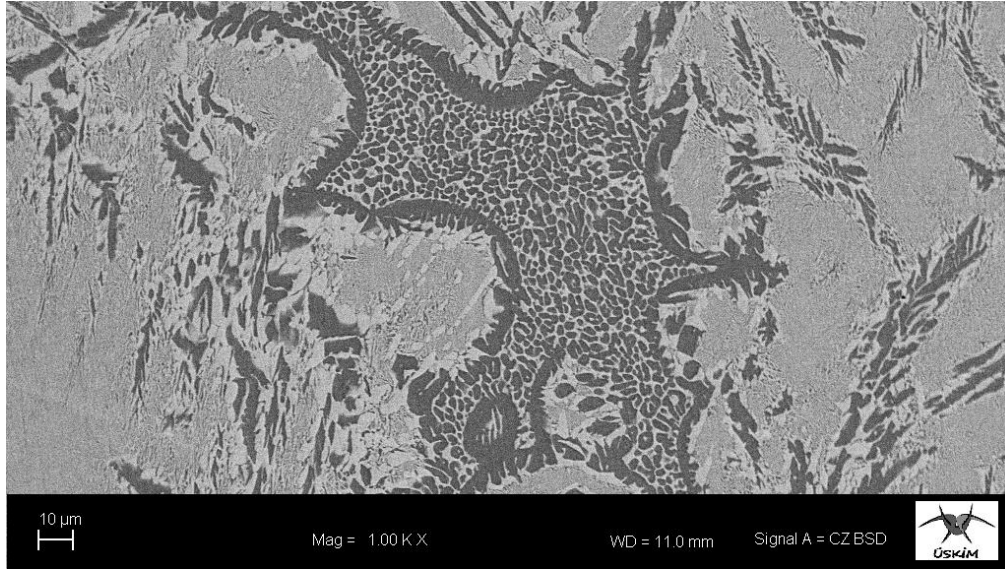
Şekil 11. Ni₅₅Si₄₀Al₅ - XRD Grafiği

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

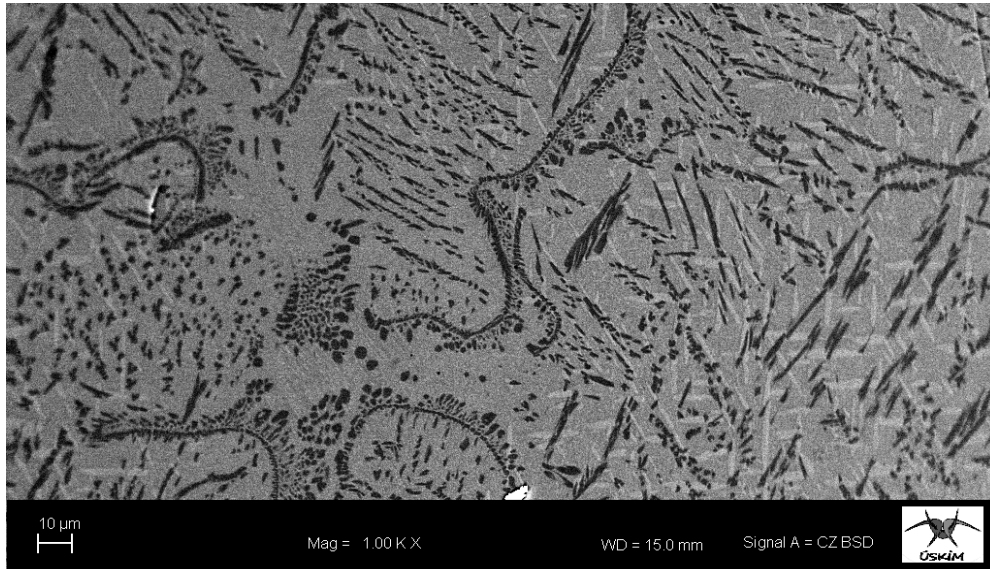
Ni₅₅Si₄₀Co₅, Ni₅₅Si₄₀Fe₅ ve Ni₅₅Si₄₀Al₅ alaşımlarına ait SEM görüntüleri Şekil 12-14'te gösterilmektedir. Açık renkli bölgeler nikelce zengin fazları, koyu renkli bölgeler ise silisyumca zengin fazları temsil etmektedir. Atom numarasının küçük olması, görüntünün daha koyu görünmesine neden olurken, büyük atom numaraları açık renkli bölgeler olarak görünmektedir. Ni-Si ve Co-Si alaşımlarına yönelik yapılan araştırmalarda benzer bir iç yapı tespit edilmiştir. Koyu tonlu bölgelerin silisyumca zengin faz yapıları olduğu belirlenmiştir (Çadırlı, 2010).

Şekil 13'te yer alan Ni₅₅Si₄₀Fe₅ alaşımına ait SEM görüntüsünde, iki ana fazın yanı sıra daha açık renkte bir faz gözlemlenmiştir. Bu fazın Ni₂Si fazı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Ni₅₅Si₄₀Co₅ alaşımındaki Ni₂Si fazından farklı olarak, bu fazın çubuk şeklinde yapılar oluşturduğu belirlenmiştir.

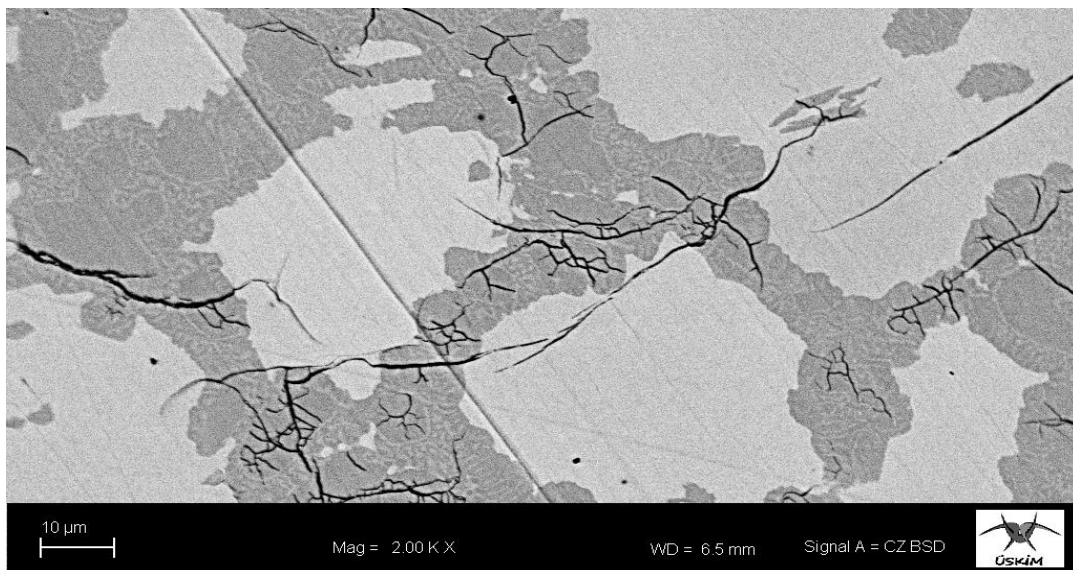
Alaşım içerisinde iki büyük faz bulunmaktadır. Mikro çatlakların, üçüncü bir faz içerisinde ilerlediği açıkça gözlemlenmiştir. Miranda (2015) tarafından yapılan Al-Si ve nikel alaşımlarına yönelik çalışmada da benzer bir çatlak oluşumu rapor edilmiştir. Nikelin yumuşak ve plastik şekil değiştirme kabiliyeti sergilediği, Al₃Ni fazının ise sert ve kırılgan intermetalik bir faz olduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle Al₃Ni fazında çatlak oluşumu yaygın olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 12. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Co}_5$ Alaşımına ait SEM Görüntüsü



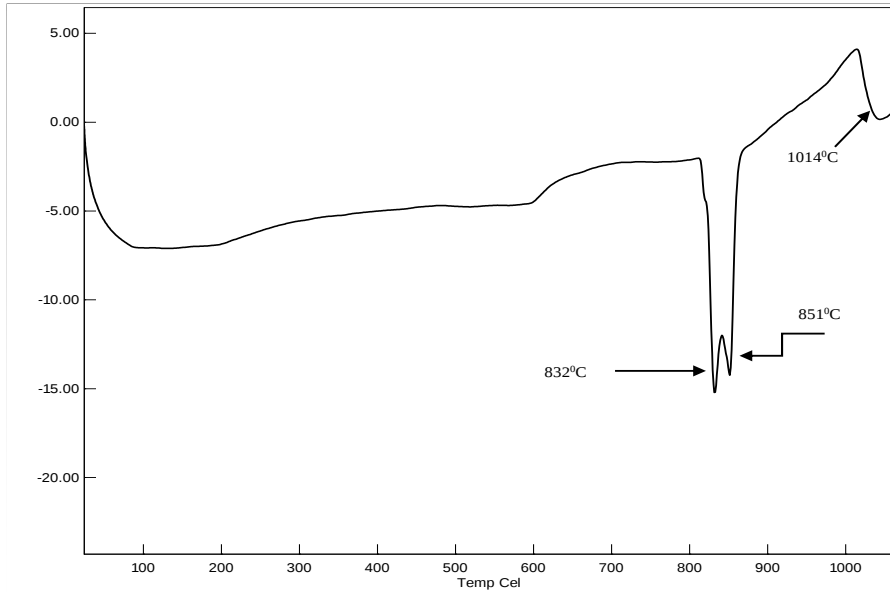
Şekil 13. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Fe}_5$ Alaşımına ait SEM Görüntüsü



Şekil 14. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Al}_5$ Alaşımına ait SEM Görüntüsü

Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

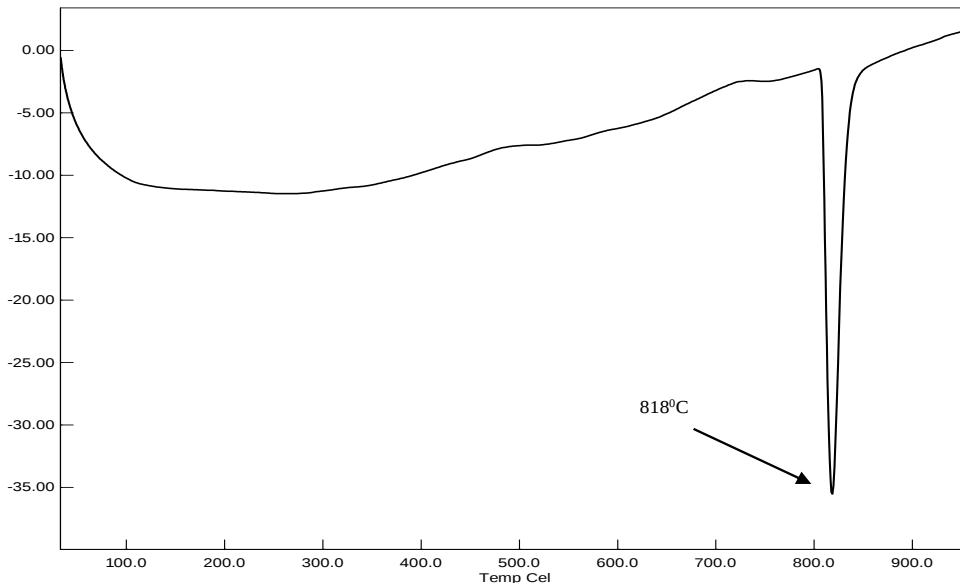
Alaşımı oluşturan atomlar arasındaki etkileşimler ve olası fazlar, ikili faz diyagramları (Şekil 2) kullanılarak incelenmiştir. Bu diyagramlar, sıcaklık ve bileşim oranlarına göre faz geçiş sıcaklıklarının tespit edilmesine yardımcı olmakta ve faz dönüşümlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. DTA analizlerinde gözlemlenen endotermik piklerin sıcaklıklarının, faz diyagramlarında belirtilen faz geçiş sıcaklıklarıyla örtüşmesi durumunda, bu sıcaklıklarda belirli bir fazın erimeye veya dönüşüme uğramaya başladığı sonucuna ulaşılabilir. 851 °C'de gözlemlenen endotermik pik ile Ni_3Si_2 fazı Ni_2Si ve NiSi fazlarına dönüşmekte olduğu söylenebilir. Benzer şekilde, Şekil 15'te sunulan $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Co}_5$ alaşımına ait DTA analizinde de 851 °C'de endotermik bir pik tespit edilmiştir. Bu sıcaklıktaki Ni_3Si_2 fazının, Ni_2Si ve NiSi fazlarına dönüşümünün gerçekleştiğini doğrulamaktadır (Göğebakan, 2015).



Şekil 15. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Co}_5$ - DTA Grafiği

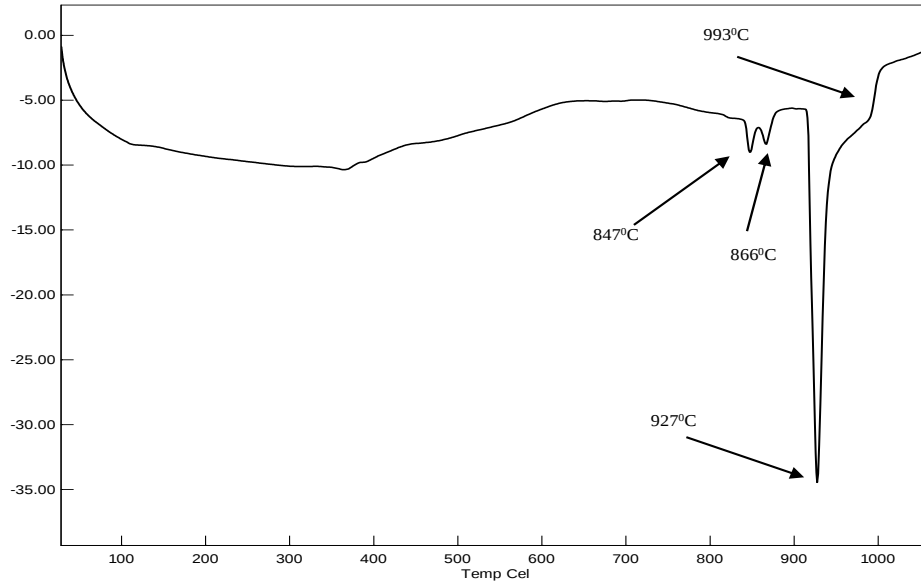
Dutra'nın (2005) yaptığı çalışmada, Ni-Si alaşımlarında 1035, 1042, 1120 ve 1153 °C'de endotermik pikler gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmada, cihazın sınırlamaları nedeniyle 1000 °C'nin üzerine çıkılamamış ve bu nedenle Dutra (2005) tarafından bildirilen olası NiSi fazları gözlemlenememiştir. Mevcut cihazlarla yapılan 50-1000 °C aralığındaki DTA analizlerinde ise Şekil 15'de gösterilen endotermik pikler elde edilmiştir.

Şekil 16'daki $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Fe}_5$ alaşımına ait DTA grafiğinde, 818 °C'deki endotermik pik, Şekil 2'deki Ni-Si ikili faz diyagramındaki aynı sıcaklıkta gözlemlenen faz dönüşümüne karşılık gelmektedir.



Şekil 16. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Fe}_5$ - DTA Grafiği

Şekil 17'deki $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Al}_5$ alaşımına ait DTA analizinde ise 847 °C ve 993 °C'deki piklerin, faz dönüşüm sıcaklıklarına denk geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 17. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Al}_5$ -DTA Grafiği

Sertlik Analizi (Mikro Vickers)

Vickers sertlik testi, metalurji ve malzeme biliminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve metalik malzemelerin sertliğini ölçmek için yüksek hassasiyet sağlar. Tabor (2000), Vickers sertlik testinin metal sertliği üzerine kapsamlı bir inceleme sunduğu çalışmada, bu testin özellikle mikro yapı analizi ve ince yapıli malzemelerde doğruluk sağlamak için tercih edildiğini belirtmektedir. Ayrıca, ASTM International (2015) tarafından yayımlanan standarda göre, Vickers sertlik testi, metalik malzemelerin sertlik ölçümü için dünya çapında kabul edilen bir yöntem olup, endüstriyel uygulamalarda standartlaştırılmış test prosedürleri sunmaktadır. Bu metodoloji, çelik ve diğer alaşımların sertlik değerlerinin ölçülmesi ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesi için geniş çapta kullanılmaktadır (Tabor, 2000).

Sertlik ölçümü için numuneler, kimyasal dübel içerisine gömülerek sabitlenmiş ve bu sayede ölçümlerin hassasiyeti artırılmıştır. Gömme işleminden sonra elde edilen numuneler Şekil 18.a'da gösterilmektedir.

Numuneler üzerinde zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından, Shimadzu markasına ait MicroVickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Oda sıcaklığında 980 mN yük altında, Hv 0.1 parametresiyle beş ayrı ölçüm yapılmıştır. Elde edilen değerlerin ortalaması Çizelge 5.4'te verilmiştir.

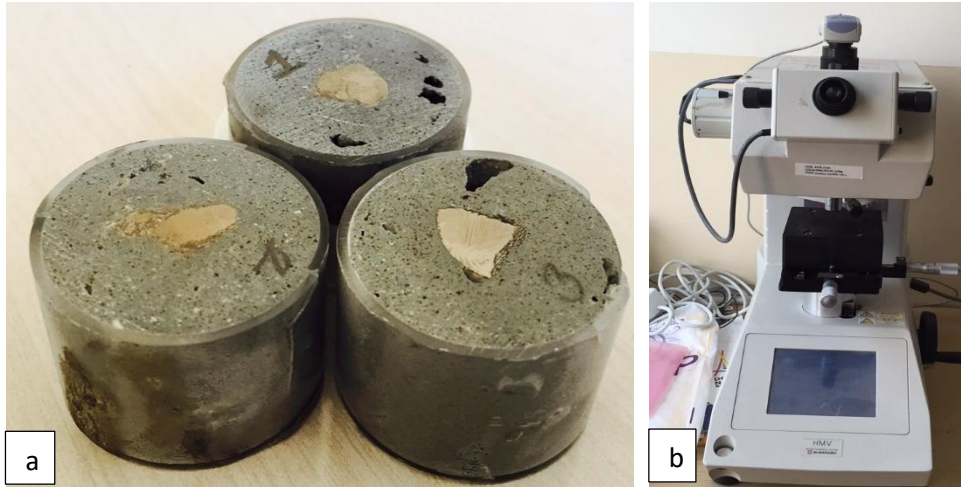
Tablo 4. Sertlik Değerleri

Alaşım	$\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Co}_5$	$\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Fe}_5$	$\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Al}_5$
Mikrosertlik (HV) (MPa)	1470±44	1297±39	1282±38

Göğebakan'ın Ni-Si alaşımları üzerine yaptığı çalışmada, $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{45}$ alaşımı için sertlik değeri Hv=902 MPa olarak rapor edilmiştir. Ancak, bu çalışmada %5 Al ilavesi ile sertliğin Hv=1286 MPa'a yükseldiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, %5 Fe ilavesi sertliği Hv=1297 MPa'a, %5 Co ilavesi ise Hv=1470 MPa değerine çıkmıştır (Göğebakan, 2015). Ayrıca, saf nikelin sertlik değerinin Hv=721 MPa olduğu göz önünde bulundurulduğunda, nikelin silisyum ile bileşik oluşturmalarının sertlik üzerinde önemli bir artış sağladığı anlaşılmaktadır. Özellikle kobalt ilavesinin, sertlik değerini neredeyse iki katına çıkardığı dikkate değerdir.

Literatürdeki araştırmalar, Nikel-Silisyum alaşımlarında silisyum oranının %30'a kadar artırılmasının sertlik değerlerinde belirgin bir artış sağladığını ortaya koymaktadır (Karaköse, 2012). Göğebakan ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen araştırmada, en yüksek sertlik değerine $\text{Ni}_{70}\text{Si}_{30}$ alaşımında ulaşılmıştır. Ancak, silisyum oranının %30'un üzerine çıkması durumunda sertlik değerlerinde düşüş gözlemlendiği bildirilmiştir (Göğebakan, 2015). Bu çalışmada elde edilen alaşımlarda silisyum oranının %40 seviyesinde olduğu dikkate

alındığında, silisyum oranının azaltılmasıyla daha yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesinin mümkün olabileceği öngörülmektedir.



Şekil 18.a. Sertlik Analizi için Hazırlanan Numuneler b. Microvickers Sertlik Cihazı

SONUÇLAR

Alaşımlardaki yapıların birbirinden oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir. Ni_2Si fazına ait yapı, diğer diğer yapılardan farklı olarak yalnızca $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Fe}_5$ alaşımında çubuk şeklinde görülmüştür. Silisyum oranı %20'den fazla olduğunda ortaya çıkan dendritik yapılar, bu çalışmada üretilen alaşımlarda da gözlenmiştir. SEM ve XRD sonuçları, ikinci faz içerisinde bulunan %5 oranındaki kobalt, demir ve alüminyumun, nikel yerine silisyum ile daha kolay faz oluşturduğunu göstermektedir.

Her üç alaşımların Diferansiyel Termal Analizlerinde (DTA), $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Co}_5$ alaşımında, 851 °C'de gözlemlenen endotermik pik, Ni_2Si ve NiSi fazının oluştuğu sıcaklığa karşılık gelmektedir. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Fe}_5$ alaşımına ait DTA analizinde ise 818 °C'deki pik, Ni-Si ikili faz diyagramındaki faz dönüşüm sıcaklıklarına karşılık gelen bir nokta olarak belirlenmiştir. $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Al}_5$ alaşımı analiz edildiğinde, 847 °C ve 993 °C'deki piklerin, yine Ni-Si faz diyagramındaki faz dönüşüm sıcaklıklarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Çadırılı (2012) tarafından üretilen Ni-xSi (x = 5, 10, 15, 20) alaşımlarındaki yüksek sertlik değerlerinin, yapıdaki intermetalik fazlardan kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu çalışmada da gözlemlenen yüksek sertlik değerlerine, Ni_2Si intermetalik fazının sebep olduğu ifade edilebilir.

Üç alaşımların mikro sertlikleri incelendiğinde, en yüksek mikro sertlik değeri $\text{Hv}=1470$ MPa ile kobalt içeren $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Co}_5$ alaşımında, en düşük mikro sertlik değeri ise $\text{Hv}=1282$ MPa ile alüminyum içeren $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{40}\text{Al}_5$ alaşımında elde edilmiştir. Gögebakan ve ark. (2015) $\text{Ni}_{55}\text{Si}_{45}$ alaşımına ait sertlik değerini $\text{Hv}=902$ MPa olarak bildirilmiştir. Bu çalışmada ise Ni-Si oranları benzer olmasına rağmen, %5 oranında kobalt ilavesinin sertlik değerini 1470 MPa'a çıkarması, önemli bir bulgu olarak değerlendirilmektedir.

Ek olarak, nikelin saf haldeki sertlik değerinin $\text{Hv}=721$ MPa olduğu düşünüldüğünde, nikelin silisyumla alaşım oluşturmalarının sertliğini büyük ölçüde artırdığını ve kobalt ilavesinin sertlik üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

Alsowidy, S., Al-Asry, B., Alnehia, A., (2024). Influence of Nickel Percentage on Lattice Structure and Mechanical Strength in Al-Si Alloy, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 1687-8434. <https://doi.org/10.1155/2024/3165893>.

Barış, A., Tuncay Şimşek, ve Gögebakan M., (2019). Mekanik Alaşımlama ile Üretilen Nanokristal $\text{Fe}_{60}\text{Al}_{30}\text{Cu}_{10}$ (at.%) Tozların Yapısal ve Mekanik Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 7.1: 184-191.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). Wiley.

- Chen, C., & Wang, Z. (2016). Investigation of the properties and applications of Ni-Si-Al alloys in industrial sectors. *Journal of Alloys and Compounds*, 688, 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.054>.
- Chen, L., & Liu, J. (2013). Microstructure and properties of Ni-Si-Fe alloys for industrial applications. *Materials Science and Engineering: A*, 575, 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.089>.
- Chung, D. H., & Sohn, H. Y. (2005). Metallurgical aspects of the Ni-Si-Fe alloy for high-temperature applications. *Journal of Materials Science*, 40(19), 5093-5100. <https://doi.org/10.1007/s11041-005-0243-5>.
- Çadırlı, E., Herlach, D.M., Davydov, E., (2010). Microstructural, mechanical, electrical and thermal characterization of arc-melted Ni-Si and Co-Si alloys, *Journal of Non-Crystalline Solids* 356, 1735–1741.
- Gögebakan, M., Kurşun, C., Gündüz, K. O., Tarakçı, M., Gencer, Y., (2015). Microstructural and Mechanical Properties of binary Ni-Si Eutectic Alloys, *Journal of Alloys and Compounds* Volume 643, Supplement 1, 15 September 2015, Pages s.219–S225.
- Dutra, A.T., Ferrandini, P.L., Costa, C.A.R., Gonc, M.C., Caram, R., (2005). Growth and solid/solid transformation in a Ni-Si eutectic alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 399, 202–207.
- Dzyuzer, V. Y. (2019). Use of refractories in the melting tank of a high-production-capacity glass melting furnace. *Refractories and Industrial Ceramics*, 60(4), 364–368. <https://doi.org/10.1007/s11148-019-00250->
- Hall, C., Riley, A. M., & Mortimer, D. C. (2003). The influence of zircon in a model aluminosilicate glass tank forehearth refractory. *Journal of the European Ceramic Society*, 23(14), 2473–2479.
- Huang, L., Zhang, X., Li, J., & Zhao, H. (2020). Microstructure and mechanical properties of Ni-Si intermetallic coatings prepared by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 384, 125324. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125324>
- Karaköse, E., Keskin, M., (2012). Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Intermetallic Ni-xSi (x = 5, 10, 15, 0) Alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 528, 63– 69.
- Karakurt, V., Esen, I., Zığindere, O., & Ahlatci, H. (2024). Investigation of mechanical, electrical conductivity, wear and corrosion performances of traditional CuNi2Si and new high performance CuNiCoSi copper based alloys. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2425495>.
- Liu, X.J., Huai, Z., Lu, Y., Wang, C.P., (2012). Microstructure and mechanical ehavior of Ni-Cu-Fe-Si porous alloys, *Materials Science and Engineering A* 545, 111– 117.
- Miranda, G., (2015). Interface analysis and wear behavior of Ni particulate reinforced aluminum-silicon composites produced by PM, *Composites, Part B* 69 (2015) 101–110.
- Monzen, Ryoichi & Watanabe, Chihiro. (2005). Microstructure and Mechanical Properties of Cu-Ni-Si Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. s 483–484. 117–119. 10.1016/j.msea.2006.12.163.
- Park, M.S., Rajendran, S., Kang, Y.M., (2012). Si-Ni alloy-graphite composite synthesized by arc-melting and high-energy mechanical milling for use as an anode in lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* 158, s.650–653.
- Smith, J., Doe, A., & Brown, B. (2025). Microstructural and Mechanical Properties of Cu-Alloys. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 130(1), 1-15. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/130/37977>.
- Sokolov, V. A. (2014). Melting zircon in an electric-arc furnace—a method for preparing refractory materials and green semifinished products. *Refractories and Industrial Ceramics*, 55(6), 520–524. <https://doi.org/10.1007/s11148-014-9688-x>.
- Tabor, D. (2000). *The hardness of metals*. Oxford University Press.
- Watanabe, C.,Hiraide, C., Zhang Z., Monzen, R., (2006). Microstructure and Mechanical Properties of Cu-Ni-Si Alloys, *Journal of the Society of Materials Science*, 54:7, 717-723. <https://doi.org/10.2472/jsms.54.717>,
- Xie, H., Jia, L., Tao, S. *et al.* (2020). Regulation of Ni-Si intermetallics in Cu-Ni-Si alloys and its influence on electrical breakdown properties. *J Mater Sci: Mater Electron* 31, 3137–3145. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-02860-7>

Zhang, X., Yang, S., & Li, Y. (2018). Effects of cobalt addition on the microstructure and properties of Ni-Si alloy for high-temperature applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 738, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.307>.

Zhangz, W., (2009). Phase equilibria of the Fe–Ni–Si system at 850 °C, *Journal of Alloys and Compounds* Volume 481, Issues 1–2, 29 July 2009, s.509–514. Geddes, 2010).

Zhao, Y., Zhang, Y., & Liu, Y. (2017). Formation and properties of Ni–Si intermetallic compounds for high-temperature structural applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 725, 638–645. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.112>.

Zhou, M., Zhang, X., & Li, L. (2019). Microstructure and mechanical properties of Ni-Si-Al alloys for high-temperature applications. *Materials Science and Engineering: A*, 746, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.073>.

Zhu, X., Chen, Yong, H., 2025. Hot deformation behavior and dynamic recrystallization mechanism of Cu-Ni-Co-Si alloy, *Materials Today Communications*, 42, 111348.