



## Co Katkılı Al-30Si-5Fe Alaşımlarının Mikroyapılarının ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

### *Investigation of Microstructures and Mechanical Properties of Co-Doped Al-30Si-5Fe Alloys*

M. Fatih Kılıçaslan<sup>1</sup>, Seyit Çağlar<sup>2\*</sup>, Cengiz Temiz<sup>3</sup>, Orhan Uzun<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Kastamonu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği, Kastamonu, Türkiye

<sup>2</sup>Bülent Ecevit Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Zonguldak, Türkiye

<sup>3</sup>Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Zonguldak, Türkiye

<sup>4</sup>Bartın Üniversitesi Rektörü, Bartın, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada geleneksel döküm Al-30Si-5Fe-XCo (X = 0, 1, 3 ve 5) alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerine kobalt katkısının etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, Al-30Si-5Fe-XCo (X = 0, 1, 3 ve 5 ağırlık %) kompozisyonundaki alaşımları, Al (%99.99 saflıkta), Si (%99.999 saflıkta), Fe (%99.999 saflıkta) ve Co (%99.999 saflıkta) elementleri kullanılarak hazırlanmıştır. Master alaşımlar induksiyon eritme ocağında üretilmişlerdir. Bütün üretim süreçleri Ar atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapıları X-ışını difraktometresi (XRD), optik mikroskopu (OM) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Mikrosertlik ölçümleri Vickers uçlu bir mikrosertlik test cihazı ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; Al-Si-Fe alaşımlarına yapılan yeterli miktardaki Co katkısı Fe-içeren intermetaliklerin morfolojilerini uzun çubuk/iğne benzeri yapıdan kısa çubuk benzeri yapıya dönüştürmekte ve onların mikroyapı içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlamaktadır. Geleneksel döküm Al-Si alaşımlarına yapılan Co katkısı arttıkça hem birincil Si fazlarının hem de Fe-içeren intermetaliklerin ortalama tane boyutlarının azalmasına neden olmaktadır. XRD analizlerine göre, master alaşımların mikroyapılarında birincil silisyum,  $\alpha$ -Al ve  $\delta$ -Al<sub>4</sub>FeSi<sub>2</sub> intermetalik fazları belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yapılan %1 kobalt katkısı sertlik değerinin azalmasına neden olurken %3 ve 5 kobalt katkısı sertlik değerlerinin artışına neden olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Al-Si alaşımları, Fe-içeren intermetalik bileşikler, Geleneksel döküm, Mikroyapı

### Abstract

In this study, effects of cobalt addition on the microstructure and mechanical properties of conventional cast Al-30Si-5Fe-XCo (X = 0, 1, 3 and 5) alloys were investigated. In this context, elemental Al (99.9% purity), Si (99.999% purity), Fe (99.999% purity) and Co (99.999% purity) were used to prepare the alloys in composition of Al-30Si-5Fe-XCo (X = 0, 1, 3 and 5 wt.%). The master alloys were produced in an induction heating melter. All production processes were performed in Ar atmosphere. The microstructures of samples were investigated using X-ray diffractometry (XRD), optical microscope (OM) and scanning electron microscopy (SEM). A Vickers microhardness tester was used for microhardness measurements. The results showed that sufficient amount of Co addition alters morphology of Fe-bearing intermetallic compounds (IMCs) from long rod/needle-like to short rod-like, and leads to a more homogenous distribution of them in the microstructure. As the Co contribution to conventional cast Al-Si alloys increases, both the primary Si phases and the Fe-containing intermetallics decrease in average grain. According to X-ray analyzes, the intermetallic phases of primary silicon,  $\alpha$ -Al and  $\delta$ -Al<sub>4</sub>FeSi<sub>2</sub> appear clearly in the microstructures of the master alloys. While 1% of cobalt additive decreased the hardness, 3% and 5% of cobalt additive increased the hardness.

**Keywords:** Al-Si alloys, Fe-bearing intermetallics, Traditional casting, Microstructure

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [caglar.s@yandex.com](mailto:caglar.s@yandex.com)

M. Fatih Kılıçaslan [orcid.org/0000-0001-8507-3900](https://orcid.org/0000-0001-8507-3900)

Seyit Çağlar [orcid.org/0000-0002-0701-3029](https://orcid.org/0000-0002-0701-3029)

Cengiz Temiz [orcid.org/0000-0002-9265-7485](https://orcid.org/0000-0002-9265-7485)

Orhan Uzun [orcid.org/0000-0001-7586-9075](https://orcid.org/0000-0001-7586-9075)

## 1. Giriş

Ötektiküstü Al-Si alaşımları, Si parçacıkları fiziksel ve kimyasal olarak Al matrisinden ayrılabilir olduğundan metal matrisli kompozit olarak düşünülebilir. Al-Si alaşımları, sahip oldukları yüksek dayanım/ağırlık oranı, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek aşınma ve korozyon direnci gibi üstün özelliklerden dolayı otomotiv endüstrisi, savunma ve havacılık sanayii gibi ileri teknoloji ürünlerinin sıkça ihtiyaç duyulduğu alanlarda yoğun olarak kullanılmaktadır (Srivastava vd. 2004, Wang vd. 2009).

Ötektiküstü Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri için birincil ve ötektik silisyum parçacıklarının boyutu ve dağılımı çok önemlidir. Çatlaklar daima birincil silisyumların gevrek kırılmasıyla veya silisyum parçacıklarının matristen ayrılması ile başlar daha sonra gerilim esnasında matris ve tane sınırları boyunca ilerler. Kaba birincil silisyum parçacıklarının inceltilmesi, birincil Si parçacıklarının erken kırılarak çatlak başlatma olasılığını azaltarak mekanik özellikleri geliştirir (Hong vd. 2005).

Al-Si alaşımları mekanik özellikleri, hafiflik olmaları ve işlenebilirliklerinden dolayı çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Si bir ametaldir ve sadece belli bir kristalografik yönde büyür. Al-Si alaşımlarında gevrek iğnemi yapılar oluşturur. Bu alaşımların mekanik özellikleri yapıdaki Si'un morfolojisinin iğnemsiden lifli yapıya dönüştürülmesi ile geliştirilir. Ötektik yapılarda Si sert ve gevrek, Al matris ise görece yumuşaktır. Modifikasyonun tanımında yer alan iğnemi yapıdan lifli yapıya geçiş iki yolla olabilir. Birincisi bu çalışmada da uygulanan, belli elementleri eriyik metale katarak yapılan kimyasal modifikasyondur. İkincisi, çok hızlı soğutma ile yapılan hızlı katılaştırma modifikasyonudur (Knuutinen vd. 2001).

Kang ve arkadaşları Al-50Si-10Mg, Al-50Si-10Cu ve Al-50Si-10Co alaşım sistemlerinde, sertlik ve aşınma direnci en yüksek olan alaşımların Co katkılı Al-50Si-10Co alaşımı olduğunu tespit etmişlerdir (Kang vd. 2007). Kobaltın alüminyum alaşımlarında, mekanik özellikler açısından çok zararlı olarak görülen demir içerikli  $\beta$ -AlFeSi fazını, daha az zararlı  $\alpha$ -AlFeSi fazına dönüştürdüğü de literatürden teyit edilebilir (Mulazimoğlu vd. 1996). Literatürde, demir içerikli fazların olumsuz etkilerini nötrlemek üzere alüminyum alaşımlarına yapılan kobalt katkısının diğer nötrleyici elementlere göre daha fazla olması gerektiği öne sürülmektedir. Örneğin; bu tür alaşımlarda nötrleyici element olarak Cr düşünüldüğünde, Fe/Cr oranı yaklaşık olarak 3'e eşit iken, Co söz konusu olduğunda Fe/Co oranı

yaklaşık olarak 1'dir. Yani ne kadar demir katılırsa o kadar da kobaltın katılması önerilmektedir (Seifeddine 2007). Bununla birlikte literatürde Al-Si-Co alaşımları üzerine yapılmış çok az sayıda araştırmaya ulaşılabilmektedir (Kang vd. 2007).

Bu çalışmada, yüksek miktarda silisyum içeren, son derece ince mikroyapılı, üstün fiziksel ve mekaniksel özelliklere sahip Al-Si-Fe alaşımlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. İnce ve homojen bir mikroyapı elde etmek amacıyla Al-30Si-5Fe alaşımına ağırlık %1, 3 ve 5 oranlarda Co katkısının etkisi incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, Al-30Si-5Fe alaşımına ağırlık %1, 3 ve 5 oranlarda Co katkısı yapılmıştır. Söz konusu alaşımlar yukarıda bahsedilen kompozisyonlarda master alaşım olarak elde edilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapı analizleri optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) teknikleri ile mekanik karakterizasyonları ise Vickers mikrosertlik testleri ile gerçekleştirilmiştir.

## 2. Gereç ve Yöntem

Bu makalede incelenen alaşımların üretilmesinde kullanılan elementler şunlardır; Al (%99,999), Si (%99,999), Fe (%99,999), Co (%99,999). Kullanılan elementlerin saflıkları her elemente ait simgeden sonra parantez içerisinde verilmektedir. Master alaşımlar bir indüksiyon fırını yardımı ile Al-30Si-5Fe-XCo (X= 0, 1, 3 ve 5) bileşimlerinde üretilmiştir. Master alaşımların üretilmesinde İndüksiyon fırını kullanılmıştır. Master alaşımlar Ar gazı altında üretilmiştir.

Çizelge 1'de üretilen master alaşımlar ve bunlar için kullanılan kodlamalar verilmektedir. Üretilen numunelerin kodlanmasında, master alaşımlar için İngilizcede geleneksel döküm manasına gelen Traditional Cast (TC) terimini oluşturan kelimelerin baş harfleri ile kodlanmıştır.

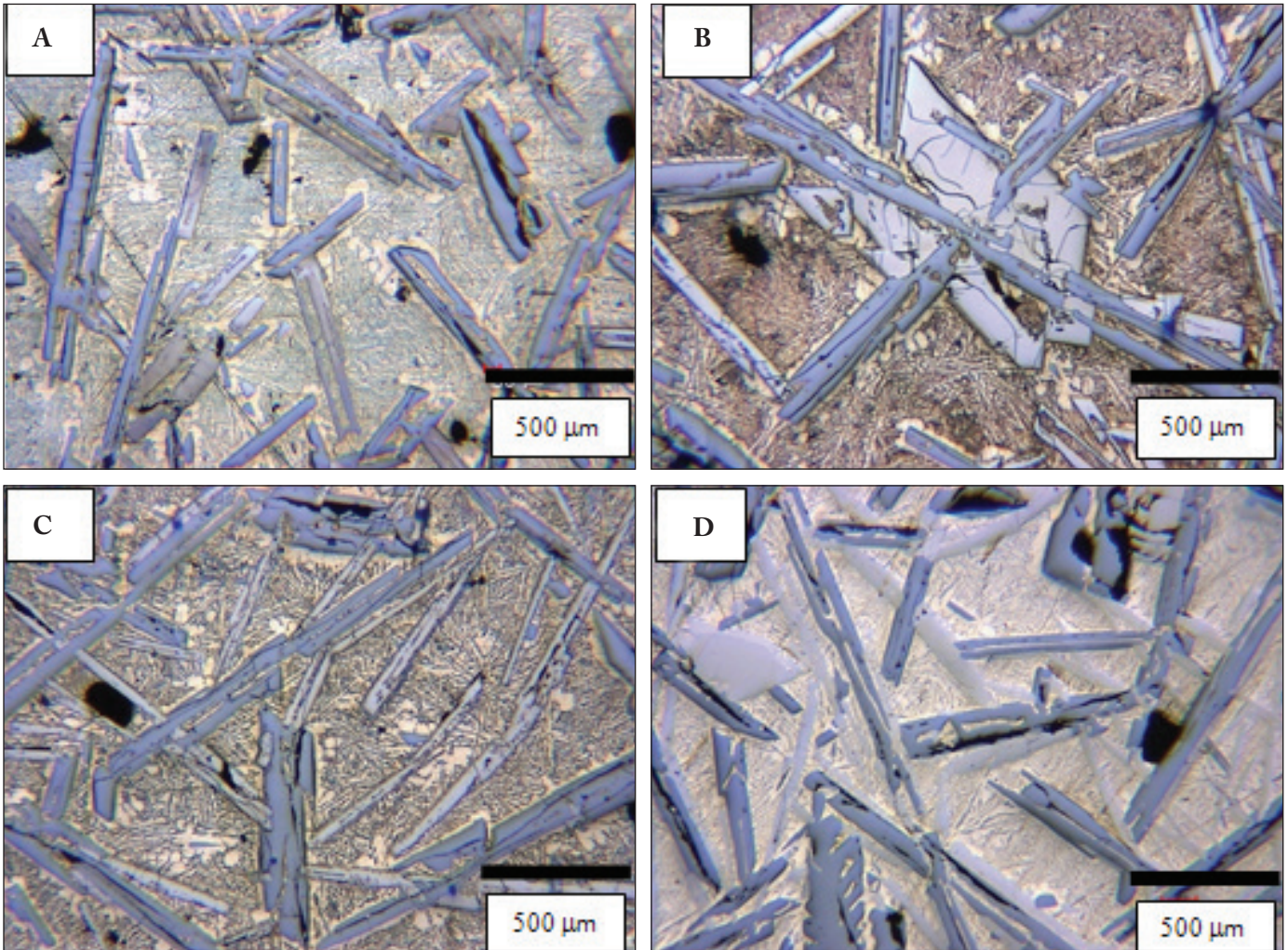
**Çizelge 1.** Çalışma kapsamında üretilen alaşımlar ve bunlara ait kodlamalar.

		Numune Kodu	Alaşım
<b>Master Alaşımlar</b>	Ağırlık %30 Si içeren numuneler	TC30	Al-30Si-5Fe
		TC30-1	Al-30Si-5Fe-1Co
		TC30-3	Al-30Si-5Fe-3Co
		TC30-5	Al-30Si-5Fe-5Co

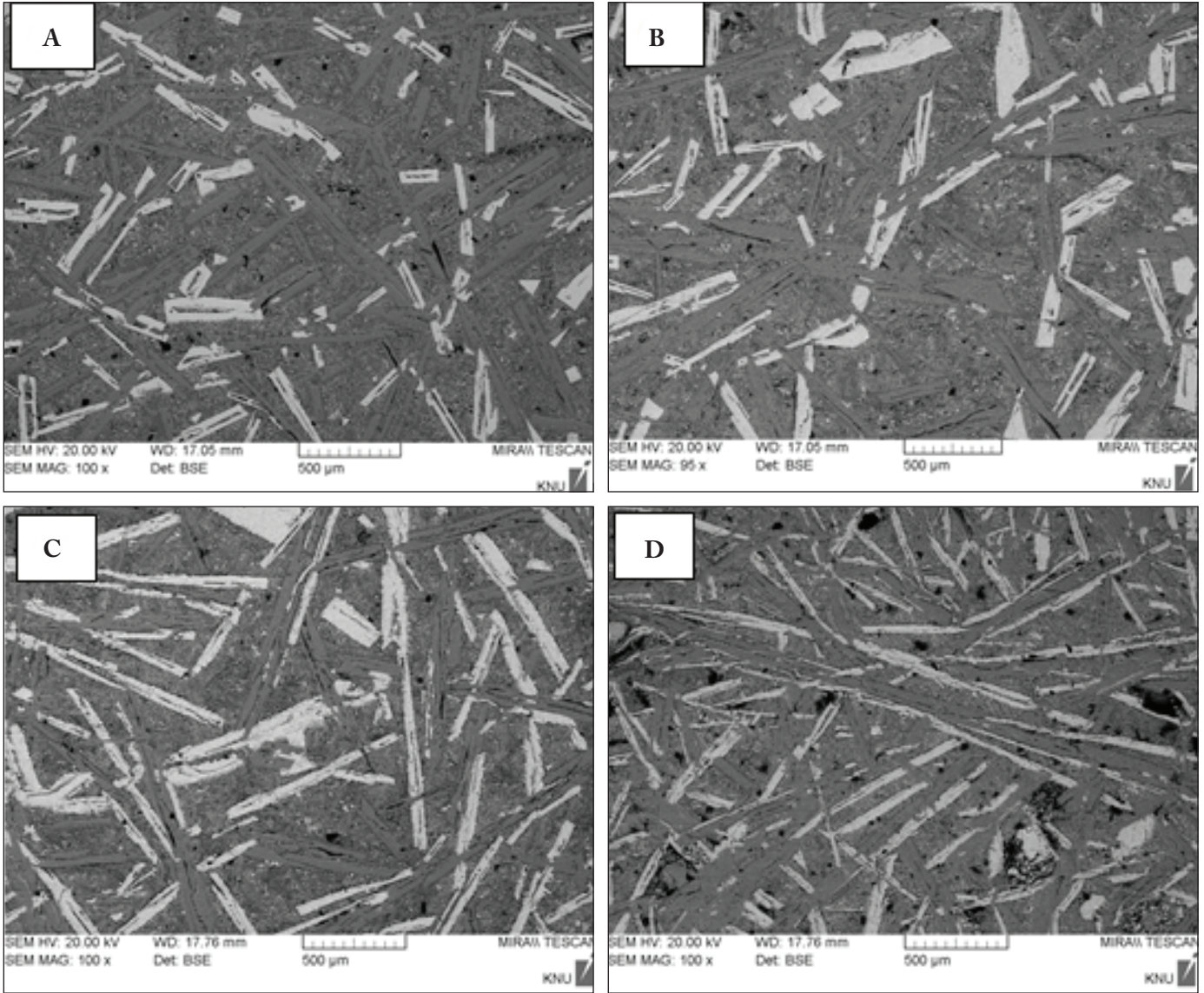
### 3. Sonuçlar

Şekil 1 ve 2'de ağırlıkça %30 silisyum içeren master alaşımların mikroyapılarını gösteren sırasıyla OM ve SEM fotoğrafları verilmektedir. Optik fotoğraflarda (Şekil 1A-D) silisyum fazları (koyu gri renkte çubuk şeklinde görülenler) ve ötektik yapı daha net görülebilirken, SEM fotoğraflarında (Şekil 2A-D) ise intermetalik fazlar (açık gri renkli çubuk benzeri fazlar) daha net incelenebilmektedir. Buna göre, Al-30Si-5Fe master alaşımının mikroyapıları birincil Si, demir ihtiva eden intermetalik bileşikler,  $\alpha$ -Al ve ötektik fazlarından oluşmaktadır. Si fazlarının morfolojileri uzun çubuk-benzeri, büyük yıldız-benzeri, plaka/pul benzeri ve diğer geliş güzel şekilli yapıda iken, demir içerikli intermetalikler genellikle iğnemsî yapıdadırlar.

Her iki tür mikroyapı görüntülerinden de görülebileceği üzere yavaş soğuma hızlarında Al-30Si-5Fe alaşımına yapılan kobalt katkısı, alaşımın mikroyapısının genel görünüşünü çok da fazla etkilememektedir. Yine de, kobaltın Al-30Si-Fe demir master alaşımlarının mikroyapı özellikleri üzerindeki etkileri silisyum fazları ve Fe-içeren intermetalik fazlar üzerinden bir değerlendirmeye tabi tutulabilir. Katkısız numune de birincil Si fazlarının boyutları ~0,5 ile 1,5 mm arasında değişirken, %1 kobalt katkısı yapıldığında 0,5 – 3,5 mm, kobalt katkısı %3 olduğunda 0,5 – 2 mm ve son olarak %5 kobalt katkısı yapıldığında ise 0,5 – 1,5 mm aralığında değişmektedir. Yani, %1 kobalt katkısı silisyum fazlarının boyutlarını arttırırken daha yüksek oranlarda yapılan kobalt katkıları kademeli olarak silisyum fazlarının boyutlarını azaltmaktadır (Şekil 1A-D). Kobaltın Fe-içeren intermetalikler üzerindeki etkilerine bakıldığında ise kobalt



Şekil 1. TC30, TC30-1, TC30-3 ve TC30-5 numunelerinin mikroyapılarının farklı miktarlarda eklenen Co ile genel değişimini gösteren optik fotoğraflar.



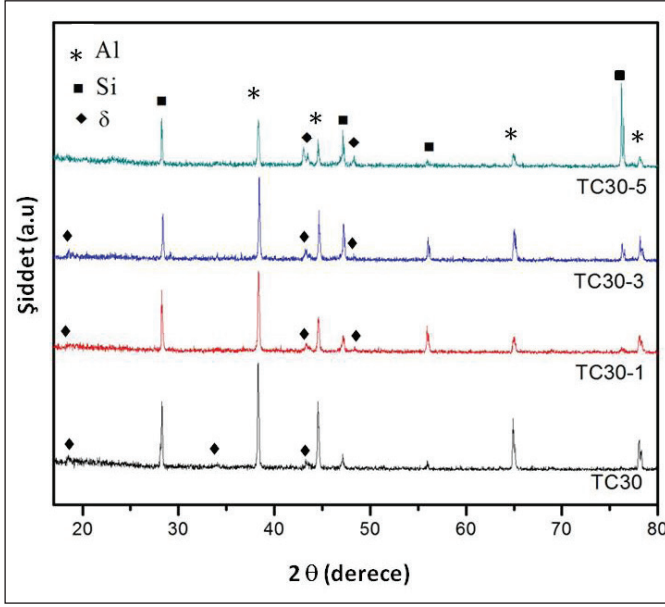
**Şekil 2.** TC30, TC30-1, TC30-3 ve TC30-5 numunelerinin mikroyapılarının farklı miktarlarda eklenen Co ile genel değişimini gösteren SEM fotoğrafları.

katkısının genelde intermetaliklerin boyutlarının artmasına sebep olduğu görülmektedir. TC30-5 numunesindeki (%5 kobalt katkı) intermetaliklerin boyutları TC30-1 (%1 kobalt katkı) ve TC30-3 (%3 kobalt katkı) numunelerindekilere nispeten daha küçük oldukları gözlenirse de, kobalt katkısız (TC30) numunelerdekilere göre hala daha büyüktürler (Şekil 2A-D).

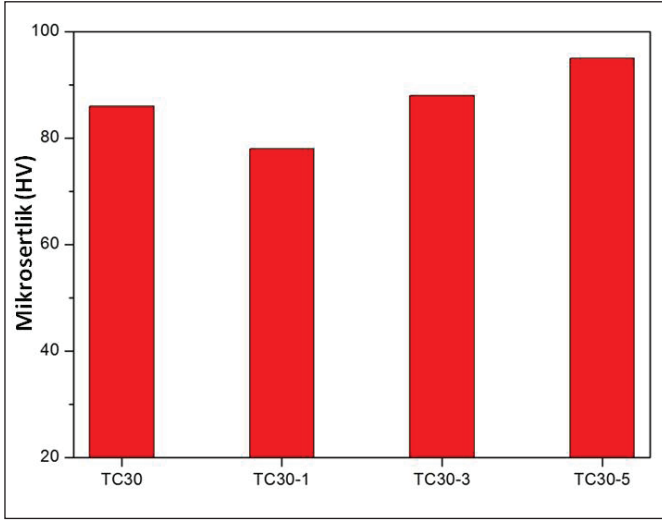
Şekil 3'de verilen XRD analizlerine göre, ağırlıkça %30 silisyum içeren numunesinde tespit edilen iğnensi/sivri uçlu intermetalikler, daha önceki çalışmalarımızda karakterize ettiğimiz, ağırlıkça daha az silisyum içeren numunelerdekine benzer bir şekilde genellikle  $\delta\text{-Al}_4\text{FeSi}_2$  fazlarıdır.

Bu sebeple, kobalt katkı numunelerdeki Fe-içeren intermetalik fazların  $\delta\text{-Al}_4(\text{FeCo})\text{Si}_2$  fazı oldukları düşünülmektedir.

Şekil 4'te %30 silisyum içeren master alaşımların sertlik değerlerinin eklenen kobalt miktarına göre değişimi verilmektedir. Şekilden görülebileceği üzere, yapılan %1 kobalt katkısı sertlik değerinin azalmasına neden olurken %3 ve 5 kobalt katkıları sertlik değerlerinin artışına neden olmuştur. Yapılan kobalt katkıları sebebiyle sertlik değerlerinde meydana gelen bu değişim, numunelerdeki birincil Si fazlarının boyutlarında meydana gelen değişimle büyük bir korelasyona sahiptir. Yani, mikroyapı içerisinde birincil Si fazlarının boyutları artarken sertlik



Şekil 3. TC30, TC30-1, TC30-3 ve TC30-5 numunelerinden alınan X-ışınları desenleri.



Şekil 4. TC30, TC30-1, TC30-3 ve TC30-5 numunelerinin mikrosertlik değerlerinin farklı miktarlarda eklenen Co ile genel değişimi.

değeri azalmakta, azalırken ise artmaktadır. TC30-1 numunesindeki birincil Si fazlarının boyutları diğerlerine nazaran daha büyüktür (Şekil 2B), buna karşın sertlik değeri en düşük olan numune TC30-1 numunesidir (Şekil 3). TC30-3 ve TC30-5 ise kobalt miktarının artmasıyla birincil Si fazlarının boyutları azalmış (Şekil 2C, D) ve buna karşın sertlik değerleri artmıştır. Böylece, %30 silisyum içeren ingat numunelerin sertlik değerleri intermetalik fazlardan daha ziyade, birincil silisyum fazlarından etkilenmektedir.

Raghavan (2011) tarafından rapor edilen Al-Fe-Si üçlü faz diyagramına göre ağırlıkça %30' dan az olan (%20 ve 25) ve %30 silisyum içeren Al-Si-Fe alaşımlarının katılaşması esnasında faz oluşum sıraları aynıdır. Bu bakımdan, ağırlıkça daha az silisyum içeren ingat numunelerde fazların oluşum sırası ve kobaltın silisyum ve intermetalik fazlar üzerindeki etkileri %30 silisyum içeren Al-Si-Fe alaşımları ile genellikle benzerdir. Ancak, ağırlıkça %25 silisyum içeren numunelerde eklenen kobalt ile birlikte silisyum fazlarının boyutları azalırken, ağırlıkça %30 silisyum içeren numunelerde durum biraz farklıdır. Ağırlıkça %30 silisyum içeren numunelerde %1 e kadar olan kobalt katkılarında silisyum fazlarının boyutları artmakta, daha yukarı oranlardaki (%3 ve 5) kobalt katkıları için giderek azalmaktadır. Bu durum literatürde verilen "Alaşımdaki silisyum miktarı arttıkça eklenmesi gereken modifiye edici ajanın/tane incelticinin miktarının da artırılması gereklidir (Hedge vd. 2008)" bilgisi ile açıklanabilir. Yani, alaşımdaki silisyum miktarı az iken (ağırlıkça %20 ve 25) ağırlıkça %1 oranında kobalt eklenmesinden itibaren silisyum fazları incilirken, alaşımdaki silisyum miktarı fazla (ağırlıkça %30) iken ağırlıkça %3 oranında kobalt ilavesinden itibaren inceleme başlamaktadır. Daha önce belirtildiği gibi alaşım Fe-içeren intermetalik fazların modifiyesi için alaşımlarda bulunan demir içeriğiyle doğru orantılı olarak kobalt içeriğinin ayarlanması gerektiği önerilmektedir. Al-30Si-5Fe alaşımlarında ise ilk katılan faz birincil silisyum fazı olduğundan, alaşıma katılan kobaltın bir kısmının silisyumun içerisinde çözünmüş olması muhtemeldir. Böylece, Fe-içeren intermetalik fazları modifiye etmeye yetecek kadar kobalt kalmadığından Şekil 4'de gözlenen gibi etkin bir modifikasyon gerçekleşmemiştir. Yine daha önce belirtildiği gibi, Al-30Si-5Fe alaşımlarında da intermetalik fazların boyutlarında meydana gelen artışın kobaltın intermetalik fazlara difüzyonu, azalışın ise kobaltın onların iç enerjilerini düşürerek kararlılıklarını arttırması sonucu gerçekleştiği düşünülmektedir.

#### 4. Tartışma ve Öneriler

Optik fotoğraflarda Al-30Si-5Fe master alaşımının mikroyapıları birincil Si, demir ihtiva eden intermetalik bileşikler,  $\alpha$ -Al ve ötektik fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir.

Si fazlarının morfolojileri uzun çubuk-benzeri, büyük yıldız-benzeri, plaka/pul benzeri ve diğer gelişmiş şekilli yapıda iken, demir içerikli intermetalikler genellikle iğnemsî yapıda olduğu tespit edilmiştir.

Ağırlıkça %30Si ve %5Fe içeren geleneksel döküm Al-Si alaşımlarına (TC30) Yani, %1 kobalt katkısı silisyum

fazlarının boyutlarını arttırırken daha yüksek oranlarda yapılan kobalt katkıları kademeli olarak silisyum fazlarının boyutlarını azaltmaktadır.

XRD analizlerine göre ağırlıkça %30 oranında silisyum içeren master alaşımların mikroyapılarında birincil silisyum,  $\alpha$ -Al ve  $\delta$ -Al<sub>4</sub>FeSi<sub>2</sub> intermetalik fazları belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Al-Si-Fe alaşımlarında eklenen kobalt, Fe-içeren intermetalik fazların boyutlarının yerine göre artmasına yerine göre ise azalmasına neden olmaktadır. Kobalt, Fe-içeren intermetaliklere nüfuz ederek onların boyutlarının artmasına neden olurken aynı zamanda da iç enerjilerinin düşmesine neden olur. Böylece, intermetalik içerisindeki kobalt miktarının belirli bir orana kadar artmasıyla intermetalik boyutları artmakta, daha sonra iç enerjinin yeteri kadar düşmesi ile birlikte daha kararlı hale gelen intermetalik boyutları azalmaktadır.

Ağ. %30Si içeren numunelerde en yüksek sertlik değeri ağ. %5 Co içeren TC30-5 numunesinde ölçülmüştür. Yapılan %1 kobalt katkısı sertlik değerinin azalmasına neden olurken %3 ve 5 kobalt katkıları sertlik değerlerinin artışına neden olmuştur. Sertlik değerinin nispeten yüksek olmasının nedeni olarak birincil silisyumların boyutunun azalması olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında geleneksel döküm yöntemiyle üretilen alaşıma eklenen kobalt miktarlarının, mikroyapılarını modifiye etmek için yeterli olmadıkları ortaya çıkmıştır. Ancak, Ağ. %30 numunelerin mikroyapısal modifikasyonları için bu çalışmada uygulananlardan daha fazla oranlarda kobalt ilavelerinin yapılması halinde yeterli modifikasyon elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

## 5. Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK (Proje No: 110M517) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürü borç biliriz.

## 6. Kaynaklar

- Hedge, S., Prabhu, K.N. 2008.** Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys. *J. Mater. Sci.*, 43: 3009-3027.
- Hong, S.J., Suryanarayana, C. 2005.** Mechanical properties and fracture behavior of an ultrafine-grained Al-20 wt pct Si alloy. *Metall. Mater. Trans. A.*, 36A: 715-723.
- Kang, Z., Nakata, K., Li, Y. 2007.** Hard thick-film and wear resistance of Al-50Si-10M ternary alloys on A6063 aluminum alloy coated by low pressure plasma spraying. *Surf. Coat. Technol.*, 201: 4999-5002.
- Knuutinen, A., Nogita, K., McDonald, S. D., Dahle, A. K. 2001.** Modification of Al-Si alloys with Ba, Ca, Y and Yb. *J. Light Met.*, 1: 229-240.
- Mulazimoglu, M. H., Zaluska, A., Gruzleski, J. E., Paray, F. 1996.** Electron microscope study of Al-Fe-Si intermetallics in 6201 aluminum alloy. *Metall. Trans. A.*, 27: 929.
- Raghavan, V. 2011.** Al-Fe-Si (Aluminum-Iron-Silicon). *J. Phase Equilib.*, 32-2: 140-142.
- Seifeddine, S. 2007.** Vilmer Project-5.2 Casting, Jönköping University The School of Engineering Component Technology, Sweeden, December, pp. 5-6.
- Sha, M., Wu S., Zhong, G., An, P. 2011.** Varietion of Microstructure of RE-containing Al20Si2Cu1Ni0.6RE alloy with different cobalt contents. *J. Alloys Compd.*, 509: 252-257.
- Srivastava, V.C., Mandal, R.K., Ojha, S.N. 2004.** Evolution of microstructure in spray formed Al-18%Si alloy. *Mater. Sci. Eng. A.*, 383: 14-20.
- Wang, F., Zhang, J., Xiong B., Zhang, Y. 2009.** Effect of Fe and Mn additions on microstructure and mechanical properties of spray-deposited Al-20Si-3Cu-1Mg alloy. *Mater. Charact.*, 60: 384-388.
- Zhang, Q., Liu X., Dai, H. 2009.** Re-formation of AlP compound in Al-Si melt. *J. Alloys Compd.*, 480: 376-381.
- Zhu, J. M., Fu, H. M., Zhang, H. F., Wang, A. M., Li, H., Hu, Z. Q. 2010.** Synthesis and properties of multiprincipal component AlCoCrFeNiSi<sub>x</sub> Alloys. *Mater. Sci. Eng. A.*, 527: 7210-7214.