

Araştırma Makalesi - Research Article

Farklı Miktarlarda Seryum ve Silisyum İçeren Alüminyum Alaşımlarının Karşılaştırılması

Sezgin Cengiz^{1*}

Geliş / Received: 19/04/2020

Revize / Revised: 14/08/2020

Kabul / Accepted: 15/08/2020

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında sınırlı seviyede kullanılabilen ticari Al-Si alaşımlarına iyi bir alternatif olabilecek Al-Ce alaşımlarının sentezlenmesi ve mikroyapısal açıdan incelenmesidir. Bu kapsamda ticari olarak Al-9Si Al-12,5Si ve Al-18Si (ağırlıkça % Si) alaşımlarıyla, Al-13,5Ce, Al-18Ce ve Al-27Ce (ağırlıkça % Ce) alaşımları karşılaştırılmıştır. Al-Si alaşımlarında α -Al, ötektik Al-Si, birincil Si yapıları, Al-Ce alaşımlarında ise α -Al, ötektik ince $Al_{11}Ce_3$ ve birincil kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik parçacıklarının olduğu tespit edilmiştir. Al-Ce alaşımı içerisine katkılanırılan Ce miktarı artışına bağlı olarak ötektik $Al_{11}Ce_3$ fazı azalırken, kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik yapılarının miktarı ve iriliği artmaktadır. Alaşım içerisine katkılanırılan alaşım elementleri miktarının artışı, alaşımların sertlik değerlerini arttırmıştır. Bu iki alaşım grubunun sertlik değerleri karşılaştırıldığında Al-Si alaşımlarının sertlik değerleri Al-Ce alaşımlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Alüminyum Alaşımları, Seryum, Silisyum, Ötektik Faz, Mikroyapı, Sertlik

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: scengiz@gtu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4236-7084>)
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, Kocaeli, Türkiye

Comparison of Different Amount of Cerium and Silicon in Aluminum Alloys

ABSTRACT

The aim of this study is the synthesis and the microstructural investigation of Al-Ce alloys, which can be a good alternative to commercial Al-Si alloys that can be used at a limited level especially in high temperature applications. Within this context, commercially available Al-9Si, Al-12.5Si and Al-18Si (wt. % Si) alloys and Al-13.5Ce, Al-18Ce and Al-27Ce (wt. % Ce) alloys were compared. While α -Al, eutectic Al-Si, primary Si structures were observed in Al-Si alloys; α -Al, eutectic fine $Al_{11}Ce_3$ and primary coarse $Al_{11}Ce_3$ intermetallic particles were identified in Al-Ce alloys. In addition, while $Al_{11}Ce_3$ phase decreased depending on the increase of added Ce amount in Al-Ce alloy, the amount and size of coarse $Al_{11}Ce_3$ intermetallic structures increased. The increase in the amount of alloying elements added to the alloy increased the hardness values of the alloys. When the hardness values of these two alloys group were compared, it was observed that the hardness values of Al-Ce alloys were lower than that of Al-Si alloys.

Keywords- Aluminum Alloys, Cerium, Silicon, Eutectic Phase, Microstructure, Hardness

I.GİRİŞ

Alüminyum alaşım grupları içerisinde en çok kullanılan ve yaklaşık olarak üretilen tüm alaşımların %80-90'nına tekabül eden silisyum eklentili Al-Si döküm alaşımları, düşük üretim maliyetleri, kolay dökülebilir olması, yüksek özgül mukavemet ve geri dönüştürülebilir olma kolaylığı gibi nedenlerden dolayı, özellikle oda sıcaklığında ve alüminyum için oldukça yüksek sıcaklık olarak kabul edilen yaklaşık olarak 200 °C'ye kadar çalışan otomotiv bileşenleri üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Al-Si alaşımlarını ötektik altı (hypo- % 12,6 Si miktarının altında), ötektik (% 12,6 Si) ve ötektik üstü (hyper- % 12,6 Si miktarının üzerinde) olarak üçe ayırmak mümkün olup farklı uygulamalarda kullanılabilir. Al-Si alaşımlarının oda ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerinin daha da geliştirilmesi amacıyla Cu ve Mg gibi alaşım elementleri ile zenginleştirilmektedirler. Cu ve Mg gibi döküm alaşım elementleri, alaşım mikroyapısını, ötektik Si çökeltilerini veya parçacıklarını modifiye etmekte, Al_2Cu , Mg_2Si ve demirce zengin intermetaliklerin oluşmasına katkı sağlayarak alaşımın mekanik özelliklerinin iyileşmesine yol açtıkları raporlanmıştır [4, 5]. Otomotiv ve uzay endüstrisinde artan talepler ve bu taleplerin doğrultusunda kullanılan malzemelerden beklenen yeni özellikler, Al-Si gibi üstün özelliklere sahip alaşım grupları için bile karşılanması oldukça güç yeni taleplerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Özellikle içten yanmalı motorlarda, yakıtın daha verimli yakılması konusunda yüksek basınç ve sıcaklıklara kadar çıkan motor ve motor aksamı parçalarının yüksek kullanım sıcaklıklarında bile oda sıcaklıklarındaki mekanik, ısıl ve mikroyapı özelliklerinin kararlı olarak sabit tutulabilmesi son dönemde alaşımlardan beklenen yeni talepler olarak görülmektedir [6, 7]. Alüminyum alaşımları için yüksek sıcaklık olarak kabul edilen 230 °C'nin daha üstündeki sıcaklıklarda alaşım içerisinde bulunan Si parçacıkları daha da kabalaşmakta, Cu ve Mg gibi mekanik özellikleri daha da artırması amacıyla katkılanırlan elementlerin oluşturduğu Al_2Cu ve Mg_2Si çökeltileri de matris fazı içerisinde ya kabalaşmakta ya da tamamen çözünmekte olup, yüksek sıcaklık kullanımlarında Al-Si alaşımlarıyla yapılmış parçaların mekanik özelliklerinin zayıflamasına neden olmaktadır [5-8].

Özellikle daha yüksek sıcaklıklarda kullanıma sunulması amacıyla, Al-Sc ve Al-Zr bazlı alaşımlar sentezlenmiş ve bu alaşımlarda uyumlu L_{12} nano çökelti yapıları oluşturularak özellikle yüksek ısıl kararlılığı ve çökeltilerin kabalaşmasına karşı dirençli alaşımların hazırlanması başarılmıştır. L_{12} çökeltilerinin, özellikle 300-400 °C'de bile dislokasyonların tırmanma hareketlerini engelledikleri için alaşımların sürünme dirençlerini iyileştirdiği raporlanmıştır. Ancak, 300-400 °C'de uzun süre kullanılan bu alaşımlarda bulunan nano parçacıkların kabalaştığı, alaşım içerisindeki miktarlarının azaldığı ve sıcaklık etkisi ile gerçekleşen faz dönüşümleri neticesinde oluşan yeni parçacıkların ise matris yapıyla uyumsuzluklara neden olduğu için sürünme direncinden önemli kayıplara sebep olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [9, 10].

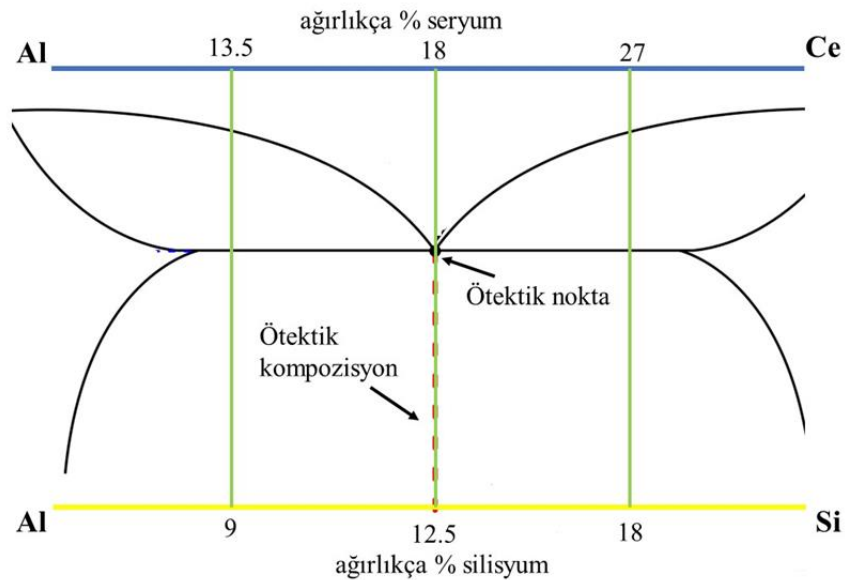
Son yıllarda ise, alüminyum alaşımlarında ana alaşım elementlerinden biri olmayan, alüminyum içerisindeki çözünürlüğü çok kısıtlı (ağırlıkça %0,005) seryum elementinin, alüminyum içerisindeki difüzyon hızı düşük olması ve özellikle alüminyum alaşımları için yüksek sayılabilecek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini kararlı şekilde koruyabileceği ortaya atılmıştır [11, 12]. Alüminyum içerisine ağırlıkça % 6-12 arasında Ce katkılanırlan alaşımların döküm kabiliyetlerinin Al-Si alaşımları kadar iyi olduğu, bunun özellikle seri üretim ve döküm kalıbı boşluğu doldurmak için önemli olduğu, oda sıcaklığında ve oda sıcaklığından 315 °C'ye kadar olan farklı sıcaklıklarda yapılan çekme testi sonuçlarına göre elde edilen değerlerin ticari olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından daha iyi olduğu raporlanmıştır [12, 13]. Al-12,5Ce ikili alaşımı 8 hafta 322 °C'de ve 12 hafta boyunca 400 °C'de bekletildiğinde mikrosertlik değerlerinde herhangi bir değişim tespit edilmemiş olup, alaşımın içerisinde bulunan ince $Al_{11}Ce_3$ lamellerinin kabalaşmadan yapıyı güçlendirdiği belirlenmiştir [9].

Ticari olarak kullanılan Al-Si alaşımlarına özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında önemli bir alternatif olması beklenen seryum katkılı alaşımlar üzerine şu anada kadar kısıtlı çalışmalar yapılmış olmak ile beraber, gelecek dönemde seryumun ticarileşebilme ihtimallerinden dolayı bu alaşım elementi gelecek vadedmektedir.

Bu çalışmada, endüstride çokça kullanılan ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü ticari Al-Si alaşımlarıyla bu alaşım kompozisyonlarından ötektik noktanın merkez alınarak aynı oranlarda ötektik altı ve üstü kompozisyonlara karşılık gelecek şekilde Al-Ce alaşımları hazırlanmıştır. Bu iki farklı alaşım gruplarının, mikroyapıları, mikroyapıda bulunan fazların oluşum mekanizmaları ve mikrosertlik değerleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır.

II.MATERYAL VE METOT

Al-9Si (ağırlıkça 9 % Si), Al-12,5Si (ağırlıkça 12,5 % Si) ve Al-18Si (ağırlıkça 18 % Si) alaşımları ticari Al-Si alaşımlarından, yüksek saflıkta Al (99,99 %) ve Ce (99,9 %) kullanılarak Al-13,5Ce, Al-18Ce, Al-27Ce (ağırlıkça % Ce) ikili alaşımları alümina pota içerisinde atmosfer kontrollü (sisteme kuru argon gazı verilmiştir) indüksiyon fırın (Ambrell 10 kVA, GTÜ Metal Döküm Lab.) içerisinde hazırlanmıştır. Alaşımlar hazırlanırken Al-Si ve Al-Ce ikili faz diyagramlarındaki ötektik noktalar referans olarak alınmış, her iki alaşımda ötektik öncesi ve sonrası bölümlerin yaklaşık eşit oranlarda katları alınmıştır. Al-Si ve Al-Ce alaşımlarının kimyasal kompozisyonları şematik olarak Şekil 1’de verilmiştir. Ayrıca Al-Si ve Al-Ce alaşımlarına ait faz diyagramları ekte paylaşılmıştır. Ergitme sonunda elde edilen Al-Si ve Al-Ce alaşımları 15 mm x 10 mm boyutlarında kesilerek, tüm yüzeyleri 240-2400 numara SiC zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. 1-3 µm tane boyutu aralığına sahip alümina süspansiyon yardımıyla mikroyapı incelemesi için kullanılacak yüzeyleri parlatılmıştır. Daha sonra sırasıyla su ve etanol içerisinde ultrasonik banyoda beş dakika süreyle bekletilmişlerdir. Alaşımların faz analizleri Bruker D8 X-ışınları kırınımı cihazında, Cu-Kα ışını (40 kW, 40 mA) ve 10°-90° 2θ açısı aralığının 1°/dakika hızla taranmasıyla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemesi öncesi alaşımlar, 50 ml su içerisinde 5 g KOH çözülürerek hazırlanan solüsyona bir dakika süreyle daldırılmıştır. Alaşımların mikroyapısal incelemeleri için Nikon Eclipse LV 100 optik mikroskop cihazı ve Clemex görüntü analiz programından yararlanılmıştır. Ayrıca, alaşım içerisindeki çökelti benzeri yapıların daha belirgin olarak ortaya çıkarılması amacıyla KOH içerikli çözelti hazırlanmış olup, yüzeyleri parlatılan alaşımlar bu çözelti içerisinde 30 dakika süreyle bekletilmiştir. Sonrasında, alaşım yüzeyi bol su ve etanol ile yıkanıp, ılık hava ile kurutulmuştur. Elde edilen yüzeylerden optik mikroskop yardımıyla farklı büyüklüklerde görüntüler elde edilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri alınırken, optik mikroskoba bağlı görüntüleme sistemi veya uygulamasında bulunan farklı bölgelerin odaklanması ve farklı odaklı bölgelerinde birleştirilmesi gibi özellikler sayesinde elde edilen görüntülerin birleştirilmesi sonucunda derinlik kazanılmış çökelti veya benzeri yapıların görüntüleri elde edilmiştir. Alaşımların mikroyapı ve elementel analizlerinin yapılmasında Philips XL30 FEG SEM elektron mikroskobu ve bu cihaza bağlı EDS detektörü kullanılmıştır. Alaşımların sertlik değerlerinin belirlenmesinde Instron Testor 2100 cihazı kullanılmış, her bir alaşımdan 500 g yükte ve en az beş adet sertlik izi ölçümü alınmıştır (Yük 5 saniye süreyle tatbik edilmiştir). Alaşımların ısı analiz eğrilerinin belirlenmesinde DTA Netzsch STA 449 F3 marka cihaz kullanılmış ve alaşımlar 10 °C/dk. hızla ısıtılmışlardır.

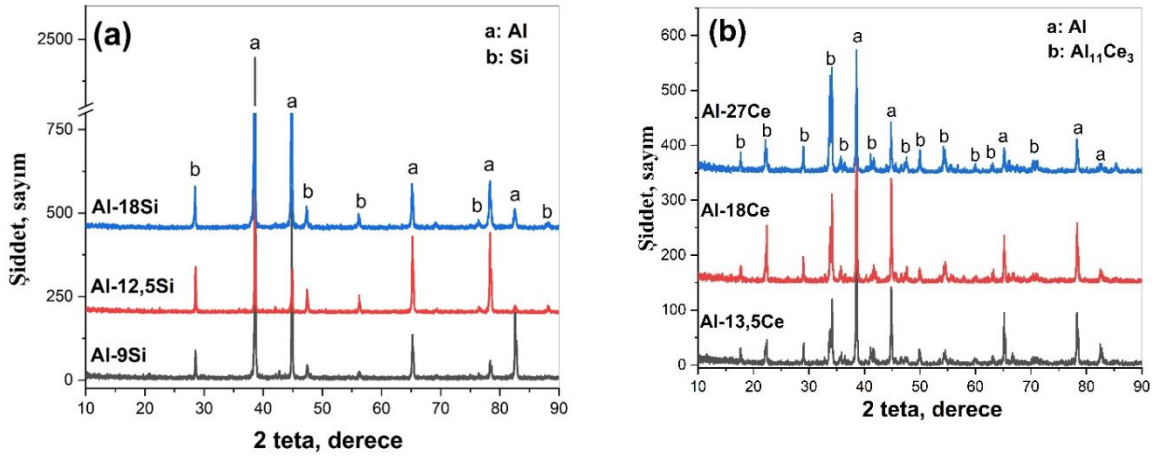


Şekil 1. Al-Si and Al-Ce alaşımlarının kimyasal kompozisyonlarının şematik olarak gösterimi

III.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. Faz Analizi

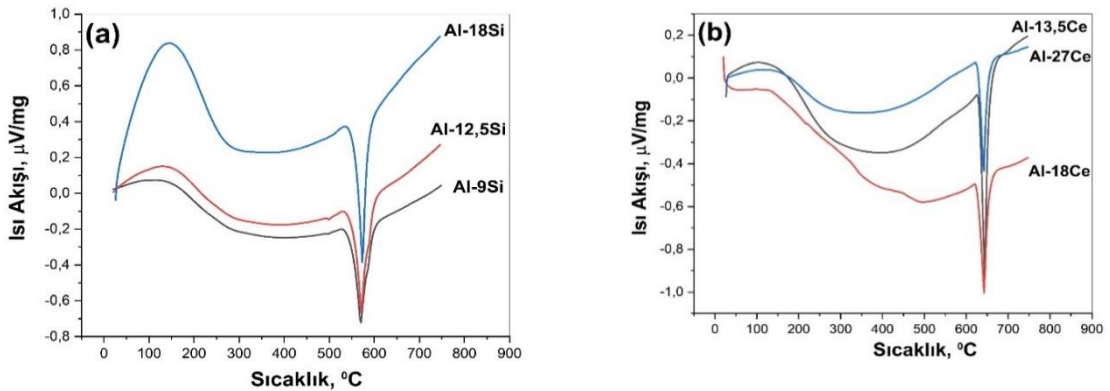
Şekil 2’de Al-Si ve Al-Ce alaşımlarından alınan XRD sonuçları verilmiştir. Al-Si alaşımlarının tümünde α -Al ve Si tespit edilmiş iken, Al-Ce alaşımlarında ise α -Al ve $Al_{11}Ce_3$ fazı tespit edilmiştir. Al-Si alaşımlarında, alaşım içerisine katkılanırılan silisyum elementi miktarındaki artışa bağlı olarak XRD spektrumları takip edildiğinde, Si fazına ait piklerin şiddetlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Benzer bir eğilim Al-Ce alaşımları içerisinde katkılanırılan seryum elementi miktarındaki artışla beraber $Al_{11}Ce_3$ fazının piklerinin şiddetlerinde artış olduğu görülmüştür. Alaşım içerisindeki element miktarındaki artış, katkılanan bu elementlerin yalın olarak veya bileşik şekline yaptıkları fazların miktarındaki artışa ve bu da XRD spektrum şiddetlerinin güçlenmesine neden olmaktadır.



Şekil 2. (a) Al-Si ve (b) Al-Ce alaşımlarına ait XRD spektrum sonuçları

B. Isıl Analiz Eğrileri

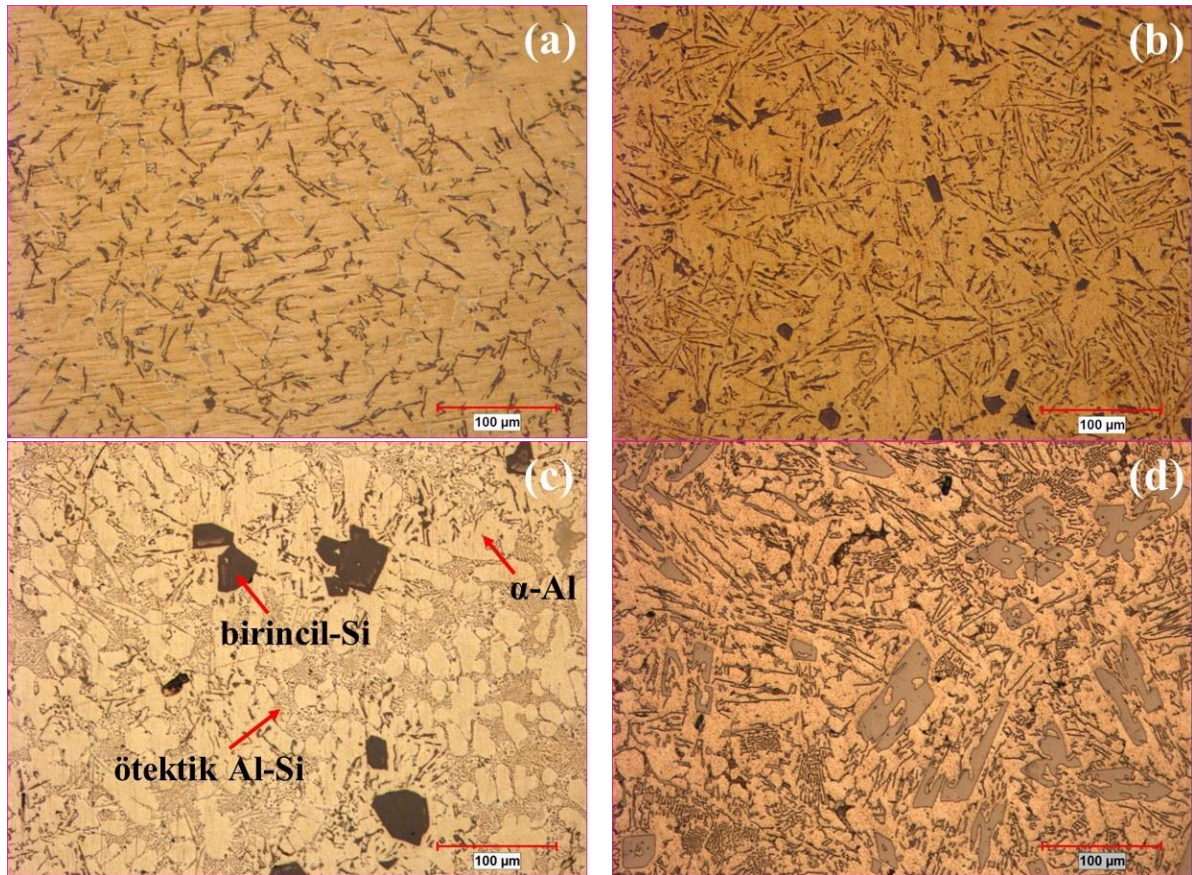
Her iki grup alaşımın ergime noktalarının belirlenmesi amacıyla DTA yardımıyla ısıl analiz eğrileri ortaya çıkarılmış olup, Şekil 3’te verilmiştir. Tüm alaşımlara ait ergime noktalarının ısıl analiz eğrileri Al-Si ve Al-Ce faz diyagramları ile karşılaştırıldığında uyumlu olduğu ve hazırlanan kompozisyonların belirtilen değerlerde sentezlendiği tespit edilmiştir. Al-Si alaşımlarının ötektik noktası yaklaşık olarak 573 °C olarak, Al-Ce alaşımlarının ötektik noktası ise yaklaşık olarak 642 °C olarak belirlenmiştir.

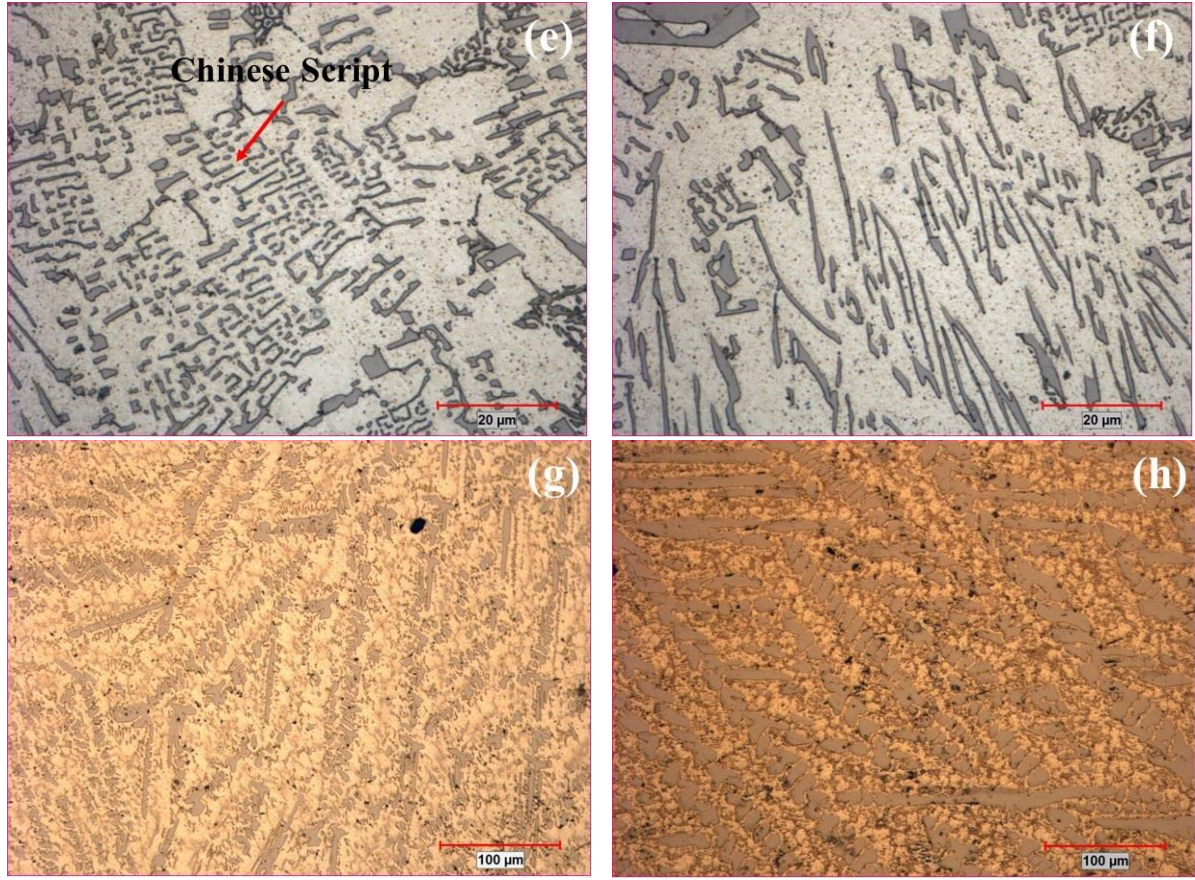


Şekil 3. (a) Al-Si ve (b) Al-Ce alaşımlarına ait DTA eğrileri

C. Mikroyapı İncelemesi

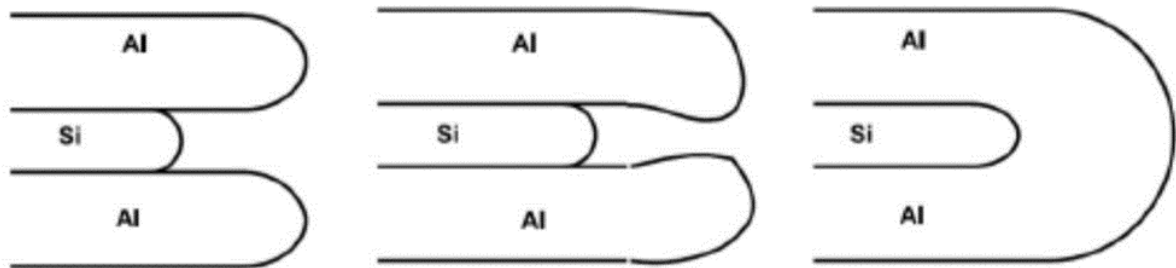
Şekil 4'te Al-Si ve Al-Ce alaşımlarına ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler optik mikroskopla alınmış olup, tüm görüntüler 200x büyütmede verilmiştir. Al-13,5Ce alaşımında bulunan farklı yapıların daha ayrıntılı olarak görüntülenmesi amacıyla Şekil 4e,f'de 1000x büyütmede mikroyapı görüntüleri de verilmiştir. Al-Si alaşımları dendritlerin birincil çökmesiyle katılaşmaktadır ve Al-Si ötektik içine gömülmüş birincil alüminyum dendrit (α -Al) yapısı Şekil 4c'de üzerinde işaretlenmiştir. Al-Si alaşımları sabit sıcaklıktan soğutulup ve sıvı halden katılaşırken, Al ve Si'nin aynı anda çökmeye başladığı Al-Si alaşımları için faz diyagramında ötektik noktada belirtilmiştir [1, 14]. Al-Si faz diyagramına göre ötektik nokta yaklaşık olarak ağırlıkça %12,5 Si içermektedir ve ergime noktası 577 °C'dir. Alüminyum içerisinde maksimum ağırlıkça %1,6 Si çözünebilirken, silisyum içerisinde alüminyum çözünürlüğü yaklaşık olarak ağırlıkça %0,5 kadardır [1, 14]. Al-Si alaşımlarının göstermiş olduğu bu özellikler alaşımların kompozit yapısı kazanmasına neden olmaktadır. Döküm alaşımında bu kompozit yapı, α -Al ve ötektik Al-Si karışımından meydana gelmekte olup, ötektik karışım miktarı alaşım içerisindeki silisyum miktarına bağlıdır. Döküm kompozit yapısında bulunan ötektik karışım Si parçacıklarından ve bu parçacıkların bulunduğu alüminyum matristen oluşmaktadır. Silisyumca zengin Al-Si alaşımlarında, birincil (primer) Si adı verilen parçacıkların çökeldiği Şekil 4b,c'de tespit edilmiş ve işaretlenmiştir. Al-Si alaşımları içerisinde bulunan Si miktarındaki artışa bağlı olarak birincil Si kristalleri kabalaşmaktadır (Şekil 4b,c). Alaşım içerisinde artan Si elementi miktarı ile bu kaba birincil Si yapıların homojen olmayan bir dağılım sergilediği de tespit edilmiştir.





Şekil 4. Alaşımlara ait optik mikroskopla alınmış mikroyapı görüntüleri; (a) Al-9Si 200x büyütme, (b) Al-12,5Si 200x büyütme, (c) Al-18Si 200x büyütme, (d) Al-13,5Ce 200x büyütme, (e) Al-13,5Ce 1000x büyütme, (f) Al-13,5Ce 1000x büyütme, (g) Al-18Ce 200x büyütme, (h) Al-27Ce 200x büyütme

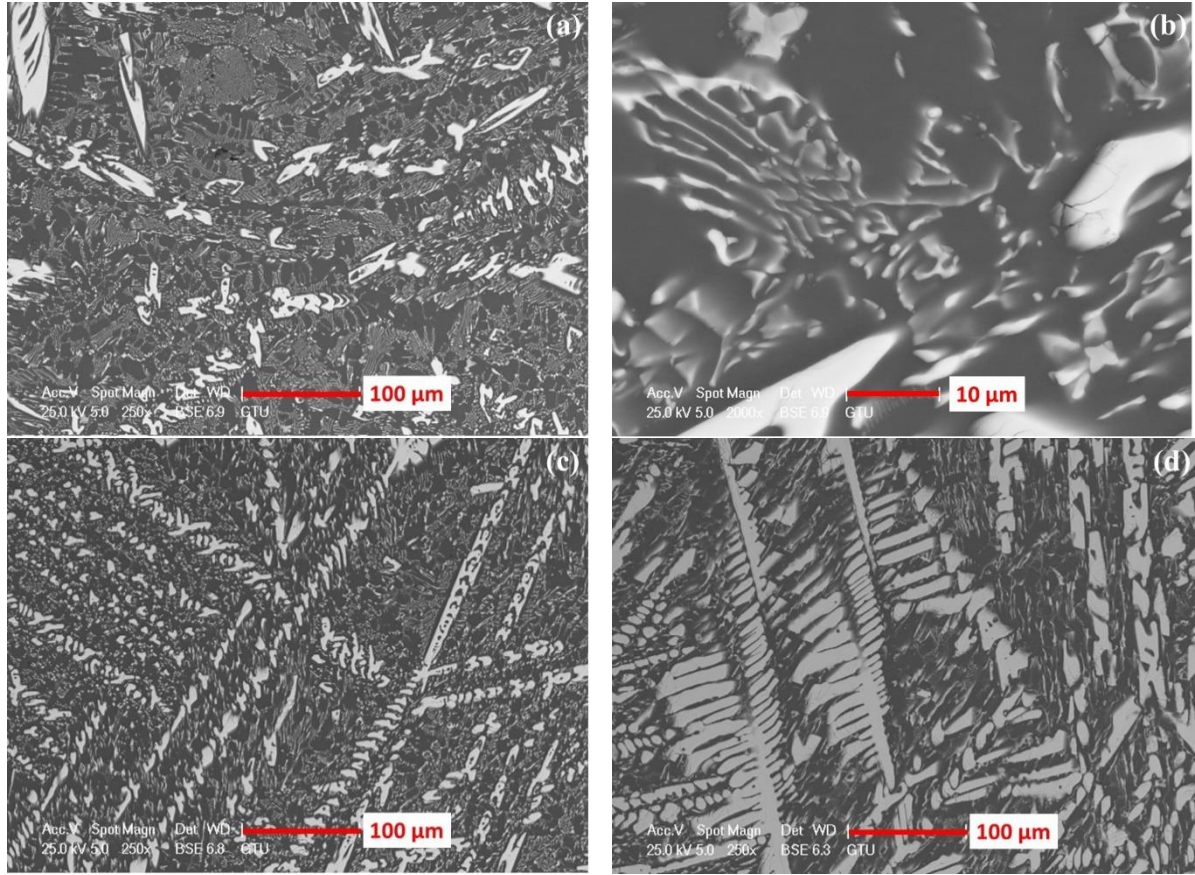
Ötektik reaksiyon sırasında meydana gelen silisyum lamellerinin oluşumu Al-Si katı arayüzeyinde yüzey enerjisi üzerine temellendirilmiştir. Katılaşma sırasında meydana gelen katılaşma arayüzeyinin ilerleme hızı, arayüzeyde sıvıdan katıya ısı akış hızı ile katılaşma sırasında dışarı salınan gizli ergime ısıları arasındaki dengeye bağlı olduğu Thall ve Chalmers tarafından ileri sürülmüştür. Al ve Si'nin saf haldeki ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 205 ve 83 W/mK ve gizli ergime ısıları ise sırasıyla 94,6 and 337 cal/g'dır. Gizli ergime ısıları arasındaki bu fark sebebiyle Al, Si'den çok daha hızlı katılaşacaktır. Şekil 5'te gösterildiği gibi ötektik alaşımın katılaşması sırasında Al, Si'ye göre daha hızlı ilerleyecektir. Si fazının daha da büyümesi, daha çok katılan Si miktarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır [14].



Şekil 5. Modifiye edilmemiş soğuk döküm Al-Si alaşımlarında ötektik katılaşma [14]

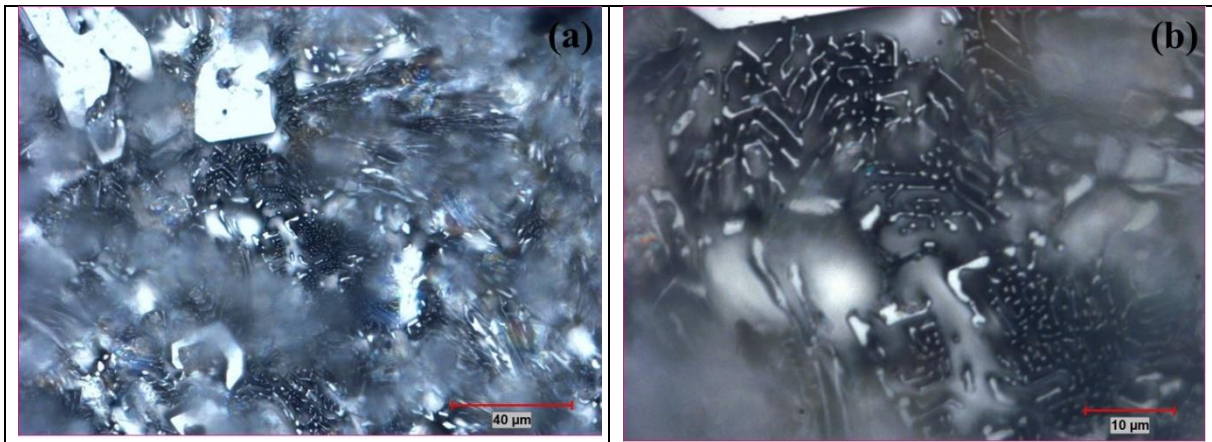
Al-Si alaşımlarında birincil silisyumun oktahedral morfoloji üzerine yakın geçmişte yapılan araştırmalarda oktahedral birincil silisyumun esasen tabakalı büyüme ile meydana geldiği tespiti yapılmıştır [15, 16]. Diğer bir araştırmada ise, yönelmiş birincil kristallerin oluşumunda baskın parametrenin arayüzey kinetiği ve madde taşınımı olduğu belirtilmiştir [15-17]. Al-Ce alaşımlarına ait özgün mikroyapı görüntüleri Şekil 4d-h’te verilmiştir. Açık renkle belirtilen kısımlar alüminyumca zengin bölgeler iken, koyu bölgeler ise $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerini temsil etmektedir. Al-13,5Ce alaşımında çok ince birbirleriyle bağlı olmayan ötektik mikroyapılar tespit edilmiş olup, ayrıca Al-13,5Ce alaşımında rastgele şekilde dağılmış ve daha detaylı tespit için yüksek büyütme fotoğrafları Şekil 4e’de verilmiştir. Bu yapılar literatürde “Chinese Script” morfolojisi olarak adlandırılmaktadır. “Chinese Script” morfolojisi Al-Si-Fe içerikli alüminyum alaşımlarında da görülmektedir [18]. Al-Si-Fe ticari alaşımlarında katılma sırasında demirce zengin intermetalik yapılar oluşmakta olup, demirce zengin bu intermetalik fazlar α -Fe ve β -Fe kristal yapısındadırlar. Katılma sırasında oluşan α -Fe ve β -Fe fazları ve sıvı alaşımın katılma hızının “Chinese Script” morfolojisinin oluşmasına neden olduğu rapor edilmiştir [19, 20]. Lakin, Al-Ce ikili alaşımlarının hazırlanmasında yüksek saflıkta Al ve Ce elementleri kullanılmış olup, alaşımlara daha sonra yapılan elementel analiz sonuçlarında da Al ve Ce dışında herhangi bir elemente rastlanmamıştır. Fakat “Chinese Script” morfolojisi Al-Ce alaşımlarında çok sık rastlanmasa da bazı bölgelerde görülmüş olup, literatürde de benzer görüntüler tespit edilmiştir [6, 9, 12, 13].

Şekil 6’da, Al-Ce alaşımlarına ait elektron mikroskopuyla alınmış mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Açık renk ile görülen bölgeler $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerine ait iken, koyu renkli bölgeler Al matris fazına aittir. $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri hem ince iğnemi hem de kaba parçacıklar şeklinde yapı içerisinde bulunmaktadırlar. İnce iğnemi (lameller) morfolojisinde katılma $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerinin genişlikleri yaklaşık olarak 60 nm’nin altında olup, bu yapılar Al ergime noktasına yakın sıcaklıklara kadar Al matris içerisinde çözünmeden kararlı kalabilen yapılardır. Al-Ce faz diyagramı incelendiğinde Ce’nin Al içerisindeki çözünürlüğünün yaklaşık olarak ağırlıkça <0,005 % kadar olması bu intermetaliklerin matris fazı oluşturan Al’nin ergime noktasına kadar kararlı olarak alaşım içerisinde kalmasına katkı sağlamaktadır [7, 11, 13]. Al-13,5Ce alaşımında kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri alaşım içerisinde rastgele dağılım sergilerken, alaşım içerisine katılardırılan Ce miktarındaki artışı bağlı olarak kaba çökelti şeklinde oluşan $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerinin miktarında ve boyutlarında göreceli olarak bir artış tespit edilmiştir (Şekil 6). Özellikle en yüksek Ce miktarına sahip Al-27Ce alaşımında, kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri dentritik yapıda katılmış olup, rastgele olarak değil de, belirli yönlerde katıldıkları ve bununda döküm esnasında sıvı fazın soğutulma yönünden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri (daha sonra bu yapıya birincil yapılar diyeceğiz), katılardırılan seryum miktarı artışı veya ergimiş alaşımın soğutma hızının yavaşlığı ile ilişkili olup, tüm alaşımlar benzer şartlarda sentezlendiği için bu kaba parçacıklar alaşım elementi miktarıyla ilişkilendirilebilir. Bu kaba parçacıkların büyüme sebeplerinden biri de, Al-Si alaşımlarında gözlemlenen iki faz arasındaki ısı iletkenlik katsayısı farklılığına benzer şekilde olup, Al-Ce alaşımlarında tespit edilen α -Al ve $Al_{11}Ce_3$ fazları arasındaki ısı iletkenlik katsayılarının farklı oluşudur. $Al_{11}Ce_3$ fazının ısı iletim katsayısı değerinin α -Al’nin değerinden küçük olması, düşük katılma hızına sahip olmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, alaşım içerisinde yüksek Ce konsantrasyonu durumunda, ötektik öncesi aşama bastırılmamakta ve kaba birincil $Al_{11}Ce_3$ parçacıklarının büyümesi daha kolay gerçekleşebilmektedir. Özetle Al-Ce alaşımı içerisine katılardırılan Ce miktarı artışına bağlı olarak ötektik $Al_{11}Ce_3$ fazı azalırken, kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik yapıların miktarı ve iriliği artmaktadır.



Şekil 6. Al-Ce alaşımına ait SEM görüntüleri, (a) Al-13,5Ce 250x büyütme, (b) Al-13,5Ce 2000x büyütme, (c) Al-18Ce 250x büyütme, (a) Al-27Ce 250x büyütme

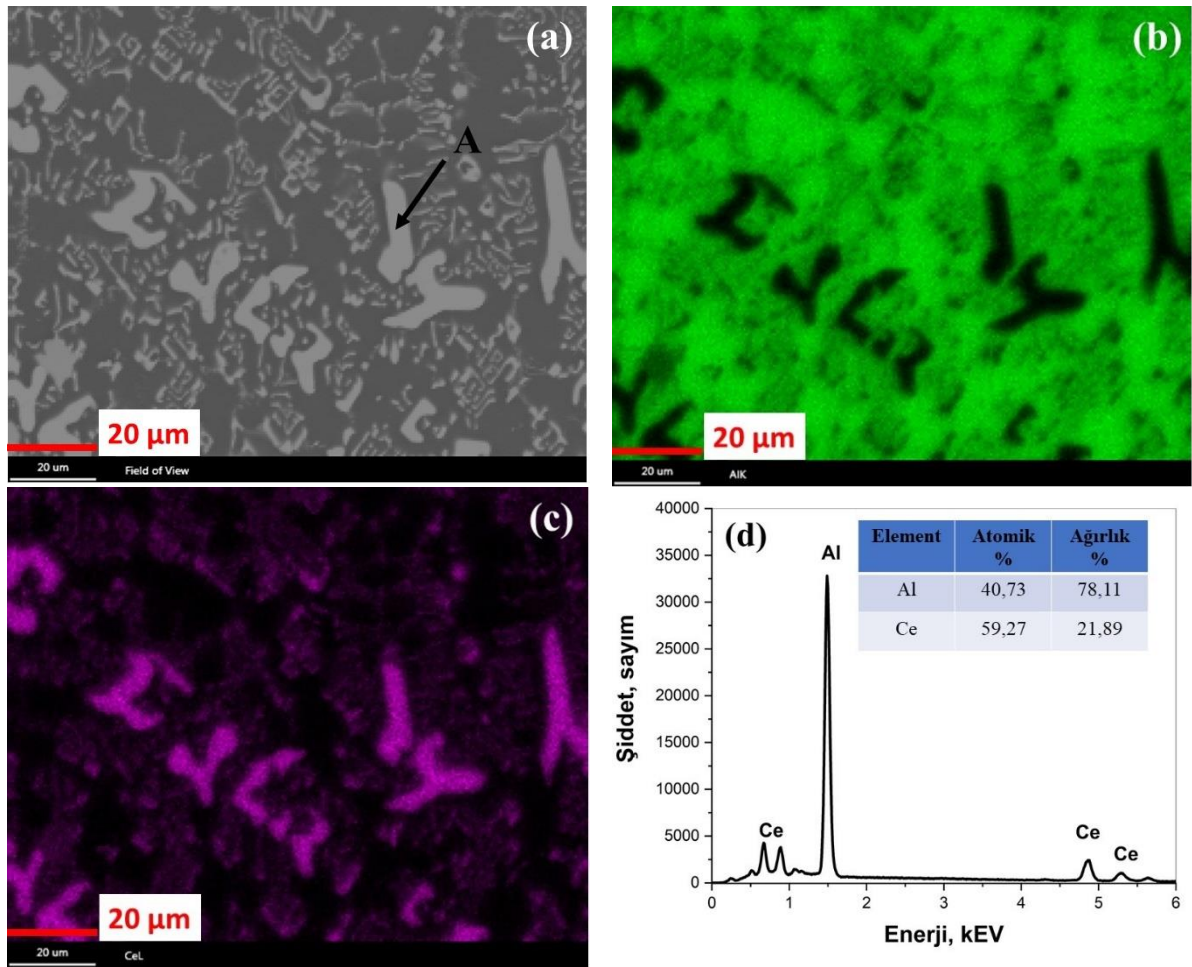
Şekil 7’de, Al-13,5Ce alaşımının matris fazının çözülerek elde edilmiş iki farklı büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir. İnce $Al_{11}Ce_3$ intermetalikleri, α -Al matris fazı içerisine dağılımları şekilde görülmekte olup, ince lameler yapıların matris fazın içerisine doğru büyüdüğü ve matris faza gömüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 7. Al-13,5Ce alaşımına ait optik mikroskop görüntüleri, (a) 500x büyütme, (b) 1500x büyütme

D. Elementel Analiz

Al-13,5Ce alaşımının mikroyapı görüntüsü, bu görüntüden alınan noktasal elementel ve haritalamalı analiz sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Mikroyapı görüntüsünde bulunan ince iğnemsî ve kaba yapıların $Al_{11}Ce_3$ intermetaliklerini temsil ederken, daha koyu bölgeler α -Al fazını temsil etmektedir. Haritalanmış elementel analiz sonuçları da bu tespiti doğrulamakta olup, açık renkli bölgelerin seryumca zengin olduğu, diğer koyu bölgelerin ise alüminyumca zengin olduğu belirlenmiştir (Şekil 8b,c). Şekil 8a'da mikroyapı görüntüsü üzerinde işaretlenen birincil $Al_{11}Ce_3$ intermetalik çökeltilerinden bir tanesi "A" ile işaretlenmiş olup, bu bölgeden alınan noktasal elementel analiz spektrumu ve element dağılım miktarı Şekil 8d'de verilmiştir. "A" ile işaretli bölgede Al ve Ce elementleri tespit edilmiş, $Al_{11}Ce_3$ intermetalığının ağırlık-atomik yüzde elementel değerleriyle EDS sonucundan elde edilen elementel dağılım değerlerinin hemen hemen birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Al-13,5Ce alaşımına ait SEM görüntüsü ile SEM-EDS elementel haritalama analizi, (a) SEM görüntüsü, (b) Al, (c) Ce elementel haritalaması ve (d) Şekil 8a'da "A" işaretli bölgeden alınan noktasal EDS spektrumu sonucu

E. Sertlik

Al-Si ve Al-Ce alaşımlardan alınan mikrosertlik değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Al-Si alaşımları grubunda, alaşım içerisine katkılanırılan silisyum miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerinde fark edilebilir bir artış tespit edilmiştir. Al-Ce alaşım gruplarına ait sertlik değeri incelendiğinde ise alaşım içerisine katkılanırılan Ce miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerinin arttığı ve artış değerinin yüzde olarak Al-Si alaşımlarında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Al-Ce alaşımlarından en yüksek sertlik değerine sahip olan Al-

27Ce alaşımlarının sertlik değeri, Al-Si alaşımlarındaki en düşük sertlik değerinden daha düşüktür. Al-Si alaşımlarına katkılan silisyum miktarı artışı ile birincil Si parçacıklarının miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerinin daha da yükselmesine katkı sağlanmıştır. Benzer bir eğilimi Al-Ce alaşım grubunda da görmek mümkün olup, alaşım içerisine katkılan seryum miktarı artışı, kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik yapıların miktarını ve büyüklüğünü arttırmış bu da alaşımın sertlik değerinde yükselmeye katkı sağlamıştır.

Tablo 1. Al-Si ve Al-Ce alaşımlarının sertlik değerleri

Alaşım Grubu	Sertlik Değeri, HV
Al-9Si	228 ± 8
Al-12,5Si	256 ± 5
Al-18Si	263 ± 7
Al-13,5Ce	131 ± 10
Al-18Ce	143 ± 10
Al-27Ce	218 ± 3

IV. GENEL SONUÇLAR

Al-Si ve Al-Ce alaşımları farklı kompozisyonlarda hazırlanmış olup, döküm mikroyapısı, faz analizi, elementel dağılım, ısıl özellik ve mikrosertlik açısından incelenmiştir. Genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

•Al-Si alaşımlarında, α -Al, ötektik Al-Si ve birincil Si yapıları tespit edilmiştir. Al-Ce alaşımlarında ise, α -Al, ince $Al_{11}Ce_3$ intermetalik lamellerinin de olduğu ötektik Al/ $Al_{11}Ce_3$ ve kaba $Al_{11}Ce_3$ intermetalik yapıları tespit edilmiştir. Bu yapılar ek olarak Al-13,5Ce alaşımında “Chinese Script” morfolojisinde yapılar raporlanmıştır.

•Al-Si alaşımlarına katkılan silisyum miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerinde artış olduğu, benzer bir yaklaşımla da Al-Ce alaşımına katkılan seryum miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinde artış tespit edilmiştir. Al-Si alaşımlarının sertlik değerlerinin, Al-Ce alaşımlarının sertlik değerlerine göre yüksek olduğu belirlenmiştir.

•Al-Si alaşımlarının tümünde α -Al ve Si fazları, Al-Ce alaşımlarında ise α -Al ve $Al_{11}Ce_3$ fazları tespit edilmiştir. Al-Si alaşımına katkılan silisyum miktarındaki artışa bağlı olarak Si fazına ait piklerinin şiddetlerinde artış, Al-Ce alaşımlarına katkılan seryum miktarındaki artışa bağlı olarak da $Al_{11}Ce_3$ fazının piklerinin şiddetlerinde artış olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

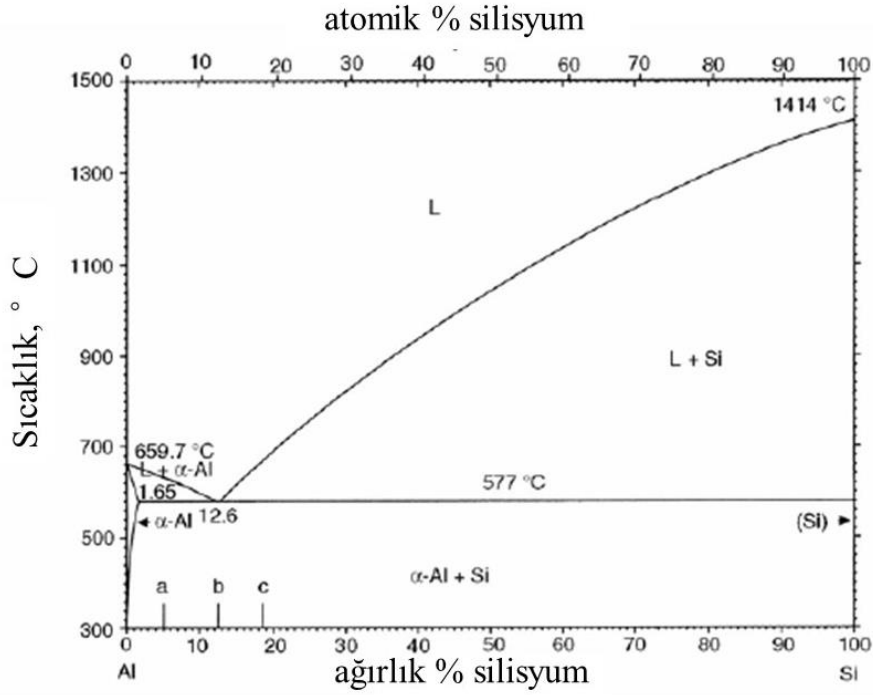
SEM, EDS ve XRD çalışmaları sırasında analitik ölçümlerin gerçekleştirilmesinde teknik yardımları bulunan teknisyenler Ahmet Nazım ve Adem Şen'e teşekkür ederim. Ayrıca Prof. Mehmet Tarakçı ve Prof. Yücel Gencer'e Metal Döküm Laboratuvarı'nın imkanlarını kullanmama olanak tanıdıkları için teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

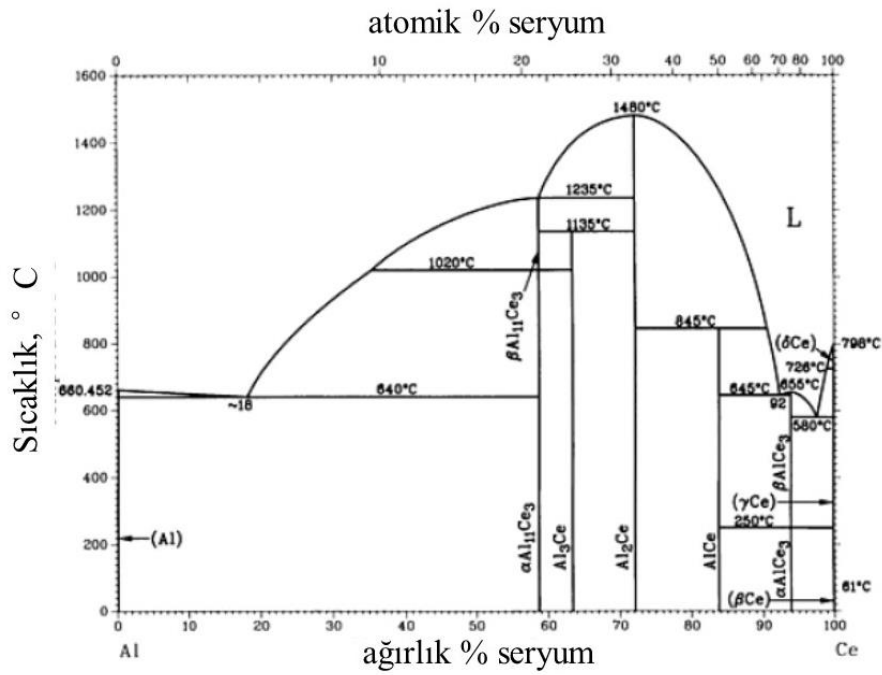
- [1] Davis,J.R.(1993). Aluminum and Aluminum Alloys.
- [2] Miller,W.S., Zhuang,L., Bottema,J., Wittebrood,A., De Smet,P., Haszler,A., &Vieregge A. (2000)Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, Mat Sci Eng a-Struct, 280, 37-49.
- [3] Grzesleski,J.E.,&Closset,B.M. (1990). The treatment of liquid aluminum-silicon alloys, American Foundrymen's Society.

- [4] Stadler,F., Antrekowitsch,H., Fragner,W., Kaufmann,H., Pinatel,E.R., &Uggowitzer,P.J.(2013). The effect of main alloying elements on the physical properties of Al-Si foundry alloys, *Mat Sci Eng a-Struct*, 560, 481-491.
- [5] Zamani,M. (2015).Al-Si Cast Alloys Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperature, in: School of Engineering Jönköping University.
- [6] Weiss,D. (2019). Improved High-Temperature Aluminum Alloys Containing Cerium, *J Mater Eng Perform*, 28, 1903–1908.
- [7] Sims,Z.C., Weiss,D., McCall,S.K., McGuire,M.A., Ott,R.T., Geer,T., Rios,O.,&Turchi,P.A.E. (2016). Cerium-Based, Intermetallic-Strengthened Aluminum Casting Alloy: High-Volume Co-product Development, *Jom-Us*, 68, 1940-1947.
- [8] Wang,L., Makhlof,M.,&Apelian D. (1995). Aluminium die casting alloys: Alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships, *Int Mater Rev*, 40, 221-238.
- [9] Liu,Y., Michi,R.A. &Dunand,D.C. (2019). Cast near-eutectic Al-12.5 wt.% Ce alloy with high coarsening and creep resistance, *Mat Sci Eng a-Struct*, 767, 138440.
- [10] Knipling,K.E., Siedman,D.N.,&Dunand,D.C.(2011). Ambient- and high-temperature mechanical properties of isochronally aged Al–0.06Sc, Al–0.06Zr and Al–0.06Sc–0.06Zr (at.%) alloys, *Acta Mater*, 59, 943-954.
- [11] Sun,Y., Hebert,R.J., Fennessy,C., Tulyani,S.,&Aindow,M. (2019). Eutectic microstructures in dilute Al-Ce and Al-Co alloys, *Mater Charact*, 154, 269-276.
- [12] Sims,Z.C., Rios,O., Weiss,D., Turchi,P.A.E., Perron,A., Lee,J.R., &Li,T.T. (2017). High Performance Aluminum-Cerium Alloys for High-Temperature Applications, *Materials Horizons*, 4, 1070-1078.
- [13] Weiss,D. (2017). Castability and Characteristics of High Cerium Aluminum Alloys, in: T.R. Vijayaram (Ed.) *Advanced Casting Technologies*, Intechopen, pp. 47-56.
- [14] Makhlof,M., &Guthy,H.V. (2001). The aluminum–silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography, *Journal of Light Metals*, 1, 199-218.
- [15] Xu,C.L., Wang,H.Y., Liu,C., &Jiang,Q.C. (2006). Growth of octahedral primary silicon in cast hypereutectic Al–Si alloys, *Journal of Crystal Growth*, 291, 540-547.
- [16] Wang,R.Y., Lu,W.H., &Hogan,L.M. (1997). Faceted growth of silicon crystals in Al-Si alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A* 28, 1233-1243.
- [17] West,R., &Fredriksson,H. (1985). On the mechanism of faceted growth *J Mater Sci Technol*, 20, 1061-1068.
- [18] Taylor,J.A. (2012). Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys, *Procedia Materials Science*, 1, 19-33.
- [19] Irizalp,S.G., &Saklakoglu,N. (2014). Effect of Fe-rich intermetallics on the microstructure and mechanical properties of thixoformed A380 aluminum alloy, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 17, 58-62.
- [20] Ferdian,D., Josse,C., Nguyen,P., Gey,N., Thebault,Y., Malard,B., Lacaze,J., &Salvo,L. (2015). Chinese Script vs Plate-Like Precipitation of Beta-Al₉Fe₂Si₂ Phase in an Al-6.5Si-1Fe Alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46, 2814-2818.

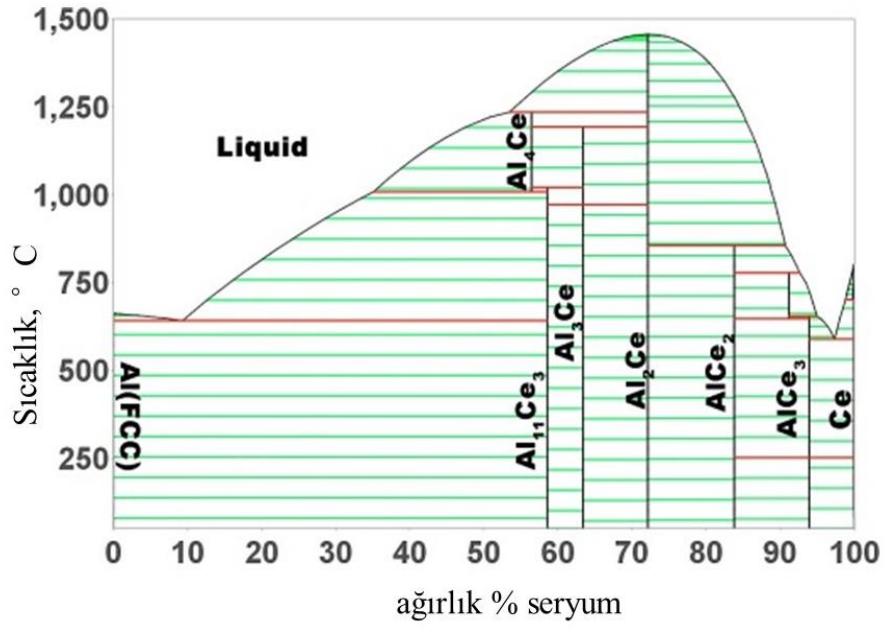
EKLER



Şekil Ek-1. Al-Si faz diyagramı. Murray, J.L. and McAlister, A.J. (1984). ASM Metals HandBook Volume 03-Alloy Phase Diagrams.



Şekil Ek-2. Al-Ce faz diyagramı. Okamoto, H. (2011) Al-Ce (Aluminum-Cerium). J Phase Equilib Diffus 32, 4, 392-393.



Şekil Ek-3. Al-Ce faz diyagramı. Plotkowski, A., Rios, O., Sridharan, N., Sims, Z., Unocic, K., Ott, R.T., Dehoff, R.R., Babu, S.S. (2017). Evaluation of an Al-Ce alloy for laser additive manufacturing. Acta Materialia 126, 507-519.