

Al-10Si-xMg Alaşımının CALPHAD Metodolojisi ile Termodinamik Karakterizasyonu

Yağız AKYILDIZ^{1,2}, Onur ÖZTÜRK¹, Bartu SİMSAR³

¹Onatus Öngörü Teknolojileri, 41400, Kocaeli, Türkiye

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli, Türkiye

³Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir, Türkiye

(Alınış / Received: 16.08.2021, Kabul / Accepted: 17.11.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 25.12.2021)

Anahtar Kelimeler

Alüminyum,
CALPHAD Metodolojisi,
Thermo-Calc,
Al-Si-Mg Alaşımları,
Isıl İşlem

Özet: Alüminyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, korozyon dayanımı, yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık ve uzay, savunma sanayilerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Genellikle malzemelerin mukavemetlerinin artırılması bakımından, alüminyum alaşımlarında ısıl işlem ve deformasyon prosesleri uygulanmaktadır. Magnezyum ve bakır alaşım elementlerinin ilavesi ile alüminyum alaşımlarında kayda değer bir mukavemet artışı sağlanabilmektedir. Malzemelerin özellikleri; malzemelerin kimyasal kompozisyonlarına, proseslerine ve mikroyapılarına bağlı olarak değişmektedir. Bu modelleme ve simülasyon çalışmasında, Al-10Si-xMg alaşımında değişen % ağırlıkça Mg oranlarının malzeme üzerindeki etkisi incelenmiş ve CALPHAD metodolojisinin kullanımı ile termodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelleme ve simülasyon çalışmalarında Thermo-Calc yazılımı 2021a versiyonundaki TCAL7.1 alüminyum veri tabanı kullanılmıştır. Al-10Si-xMg alaşımında değişen % ağırlıkça Mg oranının liküdüs, solidüs ve Al-Si alaşımlarında görülen ötektik reaksiyon sıcaklıklarına etkisi incelenmiştir. Ayrıca ısıl işlem ile mukavemet artışı sağlayan Mg₂Si çökeltilerinin oluşum sıcaklıkları ve miktarları belirlenerek Türkçe literatüre katkı sağlanması düşünülmüştür.

Thermodynamic Characterization of Al-10Si-xMg Alloy with CALPHAD Methodology

Keywords

Aluminum,
CALPHAD Methodology,
Thermo-Calc,
Al-Si-Mg Alloy,
Heat Treatment

Abstract: Aluminum and its alloys are widely used in the automotive, aerospace space, and defence industries due to their low density, high specific strength, corrosion resistance, high electrical and thermal conductivity properties. Generally, heat treatment and deformation processes are applied in aluminum alloys in order to increase the strength of the materials. A significant increase in strength can be achieved in aluminum alloys with the addition of magnesium and copper as alloying elements. The properties of the materials vary depending on their chemical compositions, processes, and microstructures. In this modeling and simulation study, the effect of varying wt.% Mg ratios in Al-10Si-xMg alloy on the material was investigated and thermodynamic analyzes were carried out using the CALPHAD methodology. TCAL7.1 aluminum database in the Thermo-Calc software version 2021a was used in the modelling and simulation studies. The effect of varying wt.% Mg ratio in Al-10Si-xMg alloy on liquidus, solidus, and eutectic reaction temperatures observed in Al-Si alloys was investigated. In addition, it is thought to contribute to the Turkish literature by determining the formation temperatures and amounts of Mg₂Si precipitates, which increase strength with heat treatment.

1. Giriş

Alüminyum ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek spesifik mukavemet, korozyon dayanımı, geri dönüşümü, yüksek elektriksel ve ısı iletimi, deformasyon ve ısıl işlemle mukavemet artışı gibi

özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık ve uzay, savunma, gıda, enerji sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [1-5]. Yüksek akıcılık, yüksek korozyon dayanımı, kaynaklanabilirlik, mukavemet artışı, dar katılma aralığına sahip olma gibi özelliklerinden dolayı alüminyum alaşımları

içerisinde Al-10Si-Mg ve Al-7Si-Mg gibi hipo-ötektik Al-Si-Mg alaşımları dikkat çekmektedir [6-8]. Magnezyum ve bakırın alüminyum alaşımlarına ilave edilmesi durumunda, çökelti sertleşmesi ısıl işlemi ile Mg₂Si ve Al₂Cu gibi çökelti oluşturarak alüminyum alaşımlarında mukavemet artışı sağlanmaktadır [9-11]. Alüminyum alaşımlarında çökelti sertleşmesi prosesi üç aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar çözeltili alma, su verme ve yaşlandırma adımlarını içermektedir [12].

Çökelti sertleşmesi prosesinde, alüminyum döküm alaşımlarında oluşan kaba α -Al tane sınırlarında bulunan sürekli formdaki çökelti oluşum sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta çözeltili olarak, alüminyum yüzey merkezli kübik yapı içerisinde çözünmesi ile birlikte homojen bir yapı oluşturulur. Bu işlem genellikle yüksek sıcaklıkta difüzyon ile gerçekleştirilerek yüzey merkezli kübik alüminyum kristali içerisinde Cu, Mg gibi alaşım elementlerinin çözünmesi durumunda çözeltili alma ısıl işlemi ile başlamaktadır [13-15]. Yüzey merkezli kübik yapıda yüksek sıcaklık ve difüzyon ile homojen bir yapı oluşturulduktan sonra, su verme işlemi gerçekleştirilir. Sıcaklığın ani düşürülmesi ile birlikte difüzyon engellenerek yüksek sıcaklıktaki homojen, yüzey merkezli kübik yapı korunmuş olur. Çözeltili alma ve su verme işlemi ile aşırı doymuş α -Al tanelerinin solvüs eğrisi altındaki bir sıcaklıkta belirli bir süre tutulması ile birlikte Cu ve Mg atomlarının difüzyonuna izin verilmiş olur. Bu sayede Al₂Cu ve Mg₂Si gibi çökelti oluşturularak malzemede mukavemet artışı sağlanır [16]. Yapı içerisinde oluşturulan çökelti boyutu ve dağılımı, malzemenin mukavemetini etkilemektedir. Alüminyum alaşımlarında bu ısıl işlem prosesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl işlem proseleri malzemelerin kimyasal kompozisyonuna göre belirlenirken, termodinamik ve termokinetik modeller yaygın olarak kullanılmaktadır [17, 18]. Güvenilir termodinamik ve termokinetik veriler CALPHAD metodolojisi ile sağlanarak gerekli alaşım ve proses tasarımları gerçekleştirilebilmektedir.

Malzemelerin özellikleri kimyasal kompozisyon, proses ve mikroyapılarına bağlı olarak değişmektedir. Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmalarında ilk olarak malzemelerin kimyasal kompozisyonu belirlenmektedir. Malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve proseslerinin belirlenmesi durumunda nihai olarak mikroyapıları hakkındaki öngörüler çeşitli CALPHAD ve sonlu elemanlar metotları ile modelleme-simülasyon çalışmaları yapılarak çeşitli malzeme özellikleri belirlenmektedir [19, 20]. CALPHAD metodolojisi, alaşımların kimyasal kompozisyonuna göre mikroyapı ve üretim proses parametrelerinin belirlenmesinde güvenilir termodinamik veriler sağlamaktadır. Termodinamik veriler kullanılarak; kararlı ve yarı kararlı fazları, faz bileşenleri ve miktarı, kritik dönüşüm sıcaklıkları, Scheil-Gulliver yaklaşımı ile denge dışı katılaşma analizi gibi hesaplamalar

sonucunda alaşımlar hakkında çeşitli veriler elde edilmektedir. Malzemeleri oluşturan fazlar, karbürler, çökelti, intermetalikler ve oluşum sıcaklıkları hakkında elde edilen veriler ile üretim, şekillendirme ve ısıl işlem proses sıcaklıkları belirlenerek proses dizaynları yapılmaktadır [21-23].

Bu modelleme ve simülasyon çalışmasında CALPHAD metodolojisi kullanılarak farklı oranda Mg içeren Al-10Si-xMg alaşımları ($x=0.2, 0.4, 0.6$ % ağırlıkça) incelenmiştir. İlk olarak Al-Si ikili denge sisteminin analizi yapılmıştır. Daha sonra Al-Si alaşımına Mg ilavesi ile birlikte alaşımı oluşturan α -Al, ötektik silisyum ve Mg₂Si fazları ve bu fazların oda sıcaklığındaki dağılımları hesaplanmıştır. Bu faz bölgelerini birbirinden ayıran liküdüs, solidüs, ötektik reaksiyon ve çökelti meydana geldiği kritik dönüşüm sıcaklıkları belirlenmiştir. Böylece endüstriyel olarak yaygın kullanılan Al-10Si-xMg alaşımlarında Mg oranının üretim, şekillendirme ve ısıl işlem sıcaklıkları gibi kritik sıcaklıkları nasıl etkilediği incelenerek literatüre katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

Modelleme ve simülasyon çalışmalarında Thermo-Calc yazılımı 2021a versiyonundaki TCAL7.1 termodinamik veri tabanı kullanılmıştır. Termodinamik modelleme süreçlerinde, alaşımların kimyasal kompozisyonlarından yola çıkarak Gibbs Serbest Enerji denklemine göre çözüm yapılmaktadır. Gibbs Serbest Enerjisi'ni etkileyen üç ana bileşen vardır. Bunlar sıcaklık, basınç ve kimyasal kompozisyonudur. Parametrelerin etkileşimleri sonucunda, Gibbs Serbest Enerjisi minimizasyonu ile faz bölgeleri oluşturulmaktadır. Endüstriyel olarak yapılan deneysel çalışmalar sabit sıcaklık ve basınç altında yapılmaktadır. Dolayısıyla Gibbs Serbest Enerjisi'ni minimize etmenin yolu kimyasal kompozisyon değişimleri ile meydana gelmektedir. Alaşımların çok bileşenli sistemlerinde, Gibbs Serbest Enerjisi'nin minimizasyonunda, Denklem 1'de verilen formül kullanılmaktadır. Denkleme göre elementlerin referans durumları (G_m^0), karışım durumundaki enerjileri (G_m^{ideal}) ve ikili, üçlü, dördü gibi çoklu etkileşimlerindeki (G_m^{xs}) enerjilerin toplamı sistemin çözeltili durumundaki mol başına Gibbs Serbest Enerjisi'ni vermektedir [24, 25].

$$G_m = G_m^0 + G_m^{ideal} + G_m^{xs} \quad (1)$$

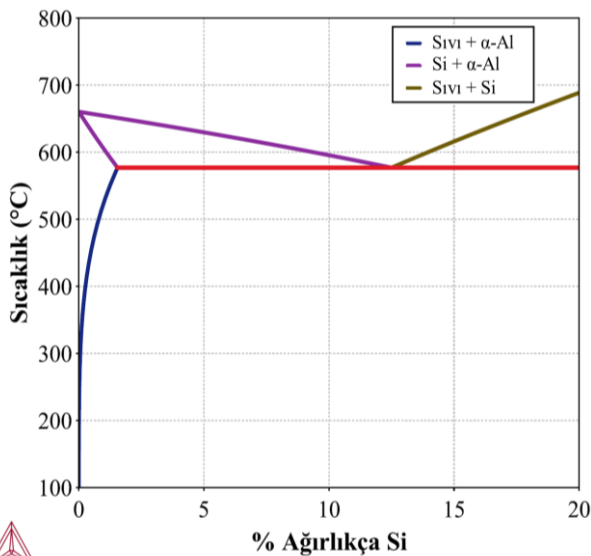
CALPHAD metodolojisinin kullanımı ile Thermo-Calc yazılımının 2021a versiyonunda gerçekleştirilen modelleme ve simülasyon çalışması çerçevesinde, Al-10Si-xMg ($x=0.2, 0.4, 0.6$ % ağırlıkça) alaşımlarının termodinamik karakterizasyonları yapılmıştır. Gibbs Serbest Enerjisi denkleminin kullanımına dayalı olarak gerçekleştirilen bu termodinamik karakterizasyon ile birlikte; Al-10Si-xMg alaşımlarında liküdüs, solidüs ve ötektik dönüşüm

aralıkları, Mg₂Si intermetaliklerinin çökelmeye başlama sıcaklıkları ve yapıdaki hacimce faz oranları hesaplanmıştır. Analiz çıktılarının yorumlanması ile Al-10Si alaşımına ilave edilen % ağırlıkça 0.2, 0.4 ve 0.6 Mg'nin, yukarıda bahsedilen faz ve faz miktarları ile kritik dönüşüm sıcaklıklarına olan etkileri değerlendirilmiş ve bu veriler Türkçe literatüre kazandırılmıştır.

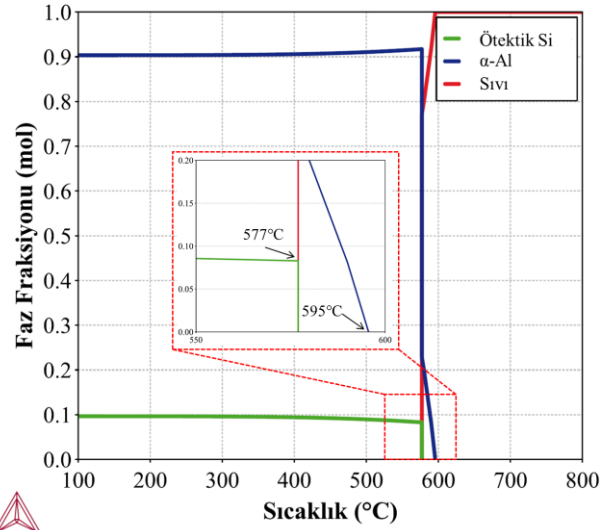
3. Bulgular

Thermo-Calc yazılımı 2021a versiyonunda TCAL7.1 veri tabanı ile Şekil 1'de verilen Al-Si ikili denge diyagramı hesaplanmıştır. Al-Si alaşımı 577°C'de yaklaşık % ağırlıkça 12 Si oranında ötektik reaksiyona sahiptir. Ötektik reaksiyon ile ergiyik, α-Al ve ötektik silisyuma dönüşmektedir. Silisyum oranına bağlı olarak Al-Si alaşımları hipo-ötektik, ötektik ve hiper-ötektik olarak gruplandırılmaktadır. Bu modelleme ve simülasyon çalışmasında % ağırlıkça 10 Si içeren Al-10Si-xMg alaşımı üzerine yoğunlaşmıştır. Alaşımın katılma durumuna göre ergiyikten ilk katılan faz α-Al'dur. Daha sonra sıcaklığın düşmesi ile ötektik reaksiyon meydana gelerek, ergiyik faz iki ayrı faza dönüşmektedir. Al-Si alaşımlarına Mg ilavesi ile birlikte katı fazdan Mg₂Si çökelmektedir.

Şekil 1'de verilen Al-Si ikili denge diyagramında % ağırlıkça 10 Si içeren noktadan yapılan termodinamik hesaplamalar sonucunda katılma analizi Şekil 2'deki gibi hesaplanmıştır. Saf alüminyum içerisine ilave edilen % ağırlıkça 10 Si ile ergime sıcaklığı 65°C'lik bir azalma ile 595°C'ye düşmüştür. Şekil 1'de verilen Al-Si ikili denge diyagramında da ötektik noktaya kadar artan % ağırlıkça Si oranı ile birlikte ergime sıcaklıkları 577°C'lere kadar düşebilmektedir. Al-Si ikili denge sisteminde 577°C'de meydana gelen ötektik reaksiyon ile ergiyik, α-Al ve ötektik silisyuma dönüşmektedir. Al-10Si alaşımı oda sıcaklığında α-Al ve ötektik silisyum fazlarından oluşmakta ve hacimce %11 ötektik Si ve %89 α-Al içermektedir.

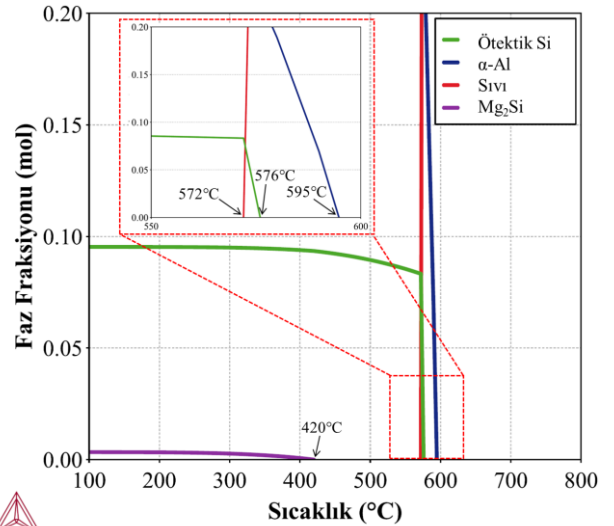


Şekil 1. Al-Si ikili denge diyagramı



Şekil 2. Al-10Si alaşımının sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu

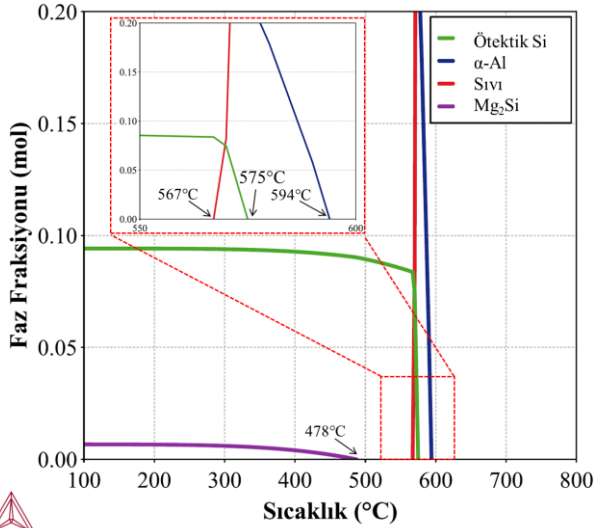
Al-10Si-0.2Mg alaşımının termodinamik karakterizasyonu sonucunda Şekil 3'de verilen sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu diyagramı hesaplanmıştır. Alaşımın 23°C'lik bir katılma aralığına sahip olduğu görülmektedir. Hipo-ötektik Al-10Si-0.2Mg alaşımında 595°C'de α-Al katılmaya başlamaktadır. Çok bileşenli sistemlerde görülen çeşitli faz reaksiyonları, izoplet faz diyagramlarında alana dönüşmektedir. Dolayısıyla ergiyikten, α-Al ve ötektik silisyum dönüşümü 576-572°C arasında meydana gelmektedir. % ağırlıkça 0.2 Mg içeren alaşım 4°C'lik bir ötektik reaksiyon aralığına sahiptir. Mg ve Si alaşım elementleri arasında 2:1 stokiometrik oranlı Mg₂Si 420°C çökelmeye başlamaktadır. Termodinamik analiz sonucunda Al-10Si-0.2Mg alaşımının oda sıcaklığında hacimce %11 ötektik Si, %88.5 α-Al ve %0.5 Mg₂Si içermektedir.



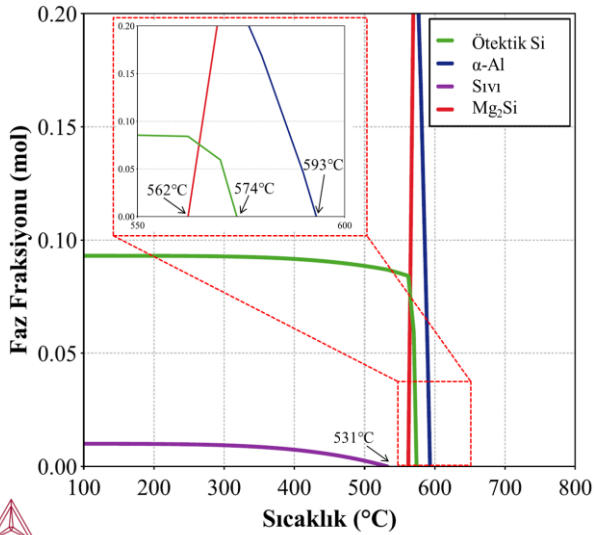
Şekil 3. Al-10Si-0.2Mg alaşımının sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu

Al-10Si-0.4Mg alaşımının termodinamik karakterizasyonu ile elde edilen sıcaklığa bağlı faz fraksiyon diyagramı Şekil 4'de verilmiştir. % ağırlıkça 0.4 Mg ilavesi ile alaşım 27°C'lik bir katılma aralığı

ile katılışmaktadır. 594°C'de Al-10Si-0.4Mg hipo-ötektik alaşım α -Al fazı ile katılışmaya başlamaktadır. 575-567°C arasında 8°C'lik bir ötektik reaksiyon ile α -Al ve ötektik silisyum oluşmaktadır. Mg oranının % ağırlıkça 0.2'den 0.4'e çıkması ile birlikte katılışma ve ötektik reaksiyon aralığında bir artış meydana gelirken, 420°C'de çökelen Mg_2Si intermetaliti 487°C'de çökmeye başlamaktadır. Katılışma ile birlikte Al-10Si-0.4Mg alaşımı oda sıcaklığında hacimce %11 ötektik Si, %88.1 α -Al ve %0.9 Mg_2Si fazlarını içermektedir.



Şekil 4. Al-10Si-0.4Mg alaşımının sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu



Şekil 5. Al-10Si-0.6Mg alaşımının sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu

Alaşım içerisindeki Mg oranının % ağırlıkça 0.6 olması ile elde edilen faz fraksiyonu diyagramı Şekil 5'de verilmiştir. Ergiyikten ilk katılışan α -Al fazı 593°C'de görülmektedir. Al-10Si-0.6Mg alaşımında meydana gelen ötektik reaksiyon ile ergiyik fazın, ötektik silisyum ve α -Al fazına dönüşmesi 12°C'lik sıcaklık aralığı ile 574-562°C'leri arasında meydana gelmektedir. Alaşım 562°C'de katılışmasını 31°C'lik bir katılışma aralığı ile tamamlamaktadır. Mg oranın

% ağırlıkça 0.6 olması ile birlikte katı faz içerisinde çökelen Mg_2Si çökeltileri 531°C'de oluşmaktadır. Alaşım içerisindeki Mg oranının % ağırlıkça 0.6 olması ile birlikte oda sıcaklığındaki hacimce faz oranı %11 ötektik Si, %88 α -Al ve %1 Mg_2Si 'dir.

4. Tartışma ve Sonuç

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Al-10Si-x-Mg alaşımında Mg oranının değişmesi termodinamik olarak CALPHAD metodolojisi ile analiz edilmiştir. Termodinamik analizler Thermo-Calc yazılımı 2021a versiyonu TCAL7.1 veri tabanı kullanılarak yapılmıştır. Al-10Si alaşımına ilave edilen % ağırlıkça 0.2, 0.4 ve 0.6 Mg ilavesinin faz ve faz miktarına, kritik dönüşüm sıcaklıklarına etkisi incelenmiştir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları ile Al-Si-Mg alaşımının kritik dönüşüm sıcaklıkları ile Türkçe literatüre katkı sağlanmıştır. İnceleme sonuçlarına göre:

- Mg oranının artması ile birlikte alaşımın ergime sıcaklığında 1°C'lik azalmalar meydana gelmiştir.
- Al-10Si alaşımı katılışmasını 595-577°C arasında 18°C'lik bir aralıkta tamamlarken, Mg oranının artması ile alaşımın katılışma aralığı sırasıyla 23, 27 ve 31°C olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla alaşıma ilave edilen Mg oranı ile birlikte katılışma sıcaklık aralığı artmaktadır.
- Alüminyum ve silisyumdan oluşan ikili alaşım sisteminde ötektik reaksiyon 577°C'de tamamlanmaktadır. Fakat alaşım içerisine ilave edilen Mg ile birlikte ötektik reaksiyon belli bir sıcaklık aralığında tamamlanmaktadır. Mg oranının artması ile birlikte ötektik reaksiyon sırasıyla 4, 8 ve 12°C'lik aralıkta tamamlanmaktadır. Böylece Mg oranının artması ile birlikte ergiyiğin, α -Al ve ötektik silisyuma dönüşüm aralığı artmaktadır.
- Al-Si-Mg sistemlerinde Mg ve Si'nin oluşturduğu Mg_2Si çökeltisi ile mekanik özelliklerde artış meydana gelir. Alüminyum ısıl işleminde çözeltiye alma ile Mg_2Si çökeltisini alüminyumun yüzey merkezli kübik sisteminde çözme işlemi başlar. Mg oranının artması ile birlikte sırasıyla Al-10Si-xMg alaşımının minimum çözeltiye alma sıcaklıkları 420, 487 ve 531°C olarak belirlenmiştir.

- Mg oranının artması ile birlikte alaşım içerisinde çökelen Mg_2Si intermetaliti hacimce miktarı sırasıyla 0.5, 0.9 ve 1 olarak hesaplanmıştır.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi

geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Ahn, C., Jo, I., Ji, C., Cho, S., Mishra, B., Lee, E. 2020. Creep behavior of high-pressure die-cast AlSi10MnMg aluminum alloy. *Materials Characterization*, 167, 110495.
- [2] Babaremu, K. O., Joseph, O. O., Akinlabi, E. T., Jen, T. C., Oladijo, O. P. 2020. Morphological investigation and mechanical behaviour of agrowaste reinforced aluminium alloy 8011 for service life improvement. *Heliyon*, 6(11), e05506.
- [3] Georgantzia, E., Gkantou, M., Kamaris, G. S. 2021. Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*, 227, 111372.
- [4] Vijayakumar, M., Dhinakaran, V., Sathish, T., Muthu, G. 2021. Experimental study of chemical composition of aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1790-1793.
- [5] Ymanoğlu, R., Karakulak, E., Zeren, A., Zeren, M. 2013. Effect of heat treatment on the tribological properties of Al-Cu-Mg/nanoSiC composites. *Materials & Design*, 49, 820-825.
- [6] Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., Shakerin, S., Kelly, J., Li, J., Mohammadi, M. 2020. Microstructural investigation and mechanical behavior of a two-material component fabricated through selective laser melting of AlSi10Mg on an Al-Cu-Ni-Fe-Mg cast alloy substrate. *Additive Manufacturing*, 31, 100937.
- [7] Rafieezad, M., Mohammadi, M., Gerlich, A., Nasiri, A. 2021. Enhancing the corrosion properties of additively manufactured AlSi10Mg using friction stir processing. *Corrosion Science*, 178, 109073.
- [8] Wei, P., Chen, Z., Zhang, S., Fang, X., Lu, B., Zhang, L., Wei, Z. 2021. Effect of T6 heat treatment on the surface tribological and corrosion properties of AlSi10Mg samples produced by selective laser melting. *Materials Characterization*, 171, 110769.
- [9] Gao, Y. H., Kuang, J., Zhang, J. Y., Liu, G., Sun, J. 2020. Tailoring precipitation strategy to optimize microstructural evolution, aging hardening and creep resistance in an Al-Cu-Sc alloy by isochronal aging. *Materials Science and Engineering, A* 795, 139943.
- [10] Karakulak, E., Zeren, M., Ymanoğlu, R. 2013. Effect of heat treatment conditions on microstructure and wear behaviour of Al4Cu2Ni2Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(7), 1898-1904.
- [11] Kuchariková, L., Tillová, E., Chalupová, M., Hanusová, P. 2020. Investigation on microstructural and hardness evaluation in heat-treated and as-cast state of secondary AlSiMg cast alloys. *Materials Today: Proceedings*, 32, 63-67.
- [12] Chou, C.-Y., Hsu, C.-W., Lee, S.-L., Wang K.-W., Lin, J.-C. 2008. Effects of heat treatments on AA6061 aluminum alloy deformed by cross-channel extrusion. *Journal of materials processing technology*, 202(1-3), 1-6.
- [13] Wu, Y., Xiong, J., Lai, R., Zhang, X., Guo, Z. 2009. The microstructure evolution of an Al-Mg-Si-Mn-Cu-Ce alloy during homogenization. *Journal of Alloys and Compounds*, 475(1-2), 332-338.
- [14] Yan, L.-Z., Zhang, Y.-A., Li, X.-W., Li, Z.-H., Feng, W., Liu, H.-W., Xiong, B.-Q. 2014. Microstructural evolution of Al-0.66 Mg-0.85 Si alloy during homogenization. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(4), 939-945.
- [15] Yang, H., Ji, S., Yang, W., Wang, Y., Fan, Z. 2015. Effect of Mg level on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al-Si-Cu alloys. *Materials Science and Engineering, A* 642, 340-350.
- [16] Dons, A. L. 2001. The Alstruc homogenization model for industrial aluminum alloys. *Journal of light Metals*, 1(2), 133-149.
- [17] Milkereit, B., Froeck, H., Schick, C., Kessler, O. 2014. Continuous cooling precipitation diagram of cast aluminium alloy Al-7Si-0.3Mg. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(7), 2025-2033.
- [18] Sjölander, E., Seifeddine, S. 2010. The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(10), 1249-1259.
- [19] Ågren, J. 1996. Calculation of phase diagrams: Calphad. *Current opinion in solid state and materials science*, 1(3), 355-360.
- [20] Jha, R., Dulikravich, G. S. 2020. Solidification and heat treatment simulation for aluminum alloys with scandium addition through CALPHAD approach. *Computational Materials Science*, 182, 109749.
- [21] Fabrichnaya, O., Saxena, S. K., Richet P., Westrum, E. F. 2004. Thermodynamic data, models, and phase diagrams in multicomponent oxide systems: An Assessment for Materials and Planetary Scientists Based on Calorimetric, Volumetric and Phase Equilibrium Data. *Springer Science & Business Media*.
- [22] Sieniutycz, S. 2016. Thermodynamic approaches in engineering systems. *Elsevier*. 738s.
- [23] Ymanoğlu, R., Akyıldız, Y., Öztürk, O. 2021. AlSi10Mg Alaşımının Toz Metalurjisi ile Üretimi:

Basınç Destekli Sinterleme ve Calphad Metodolojisi. International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies, Bandırma Onyediy Eylöl Üniversitesi.

[24] Liu, C., Shi, Q., Yan, W., Shen, C., Yang, K., Shan, Y., Zhao, M. 2019. Designing a high Si reduced activation ferritic/martensitic steel for nuclear power generation by using Calphad method. Journal of materials science & technology, 35(3), 266-274.

[25] Pelton, A. D. 2018. Phase diagrams and thermodynamic modeling of solutions. Academic Press. 401s.