



Al-7Si-0.3Mg Alaşımının Isıl İşlem Prosesinin Calphad Metodolojisi ile Modellenmesi ve Simülasyonu

Modeling and Simulation of The Heat Treatment Process of Al-7Si-0.3Mg Alloy with Calphad Methodology

Yağız AKYILDIZ¹ , Bartu SİMSAR² , Ümit KUTSAL³ , Yağız ARSLAN⁴ , Adnan AKMAN⁵ , Atıf KARKINLI⁶ , Rıdvan YAMANOĞLU^{7,*} 

¹Onatus Öngörü Teknolojileri, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-6012-9795

²TUSAŞ, Ankara, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-1041-6504

³Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye, **Orcid:** 0000-0001-8426-0050

⁴Onatus Öngörü Teknolojileri, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-2769-5215

⁵Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, TU Delft, Hollanda, **Orcid:** 0000-0002-6873-7311

⁶Metaller ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-1258-9281

⁷Metaller ve Malzeme Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 000-0002-4661-8215

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 17/05/2022

Kabul Tarihi : 01/09/2022

Anahtar Kelimeler

Al-7Si-0.3Mg
A356
Isıl İşlem
Modelleme
Simülasyon
Thermo-Calc

Research Paper

Received Date : 17/05/2022

Accepted Date : 01/09/2022

Keywords

Al-7Si-0.3Mg
A356
Heat Treatment
Modelling
Simulator

Özet

Al-Si-Mg alaşımlarında çökelti sertleşmesi yöntemi ile mukavemet artışı sağlanabilmektedir. Çökelti sertleşmesi prosesinde sıcaklık ve süre önemli bir parametredir. Su verme prosesi sonrasında, aşırı doymuş yapının belirli bir sıcaklıkta belli bir süre tutulması ile denge dışı çökelti oluşturularak mukavemet artışı sağlanmaktadır. Bu modelleme ve simülasyon çalışmasında Al-7Si-0.3Mg alaşımının Thermo-Calc yazılımı ile sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları analiz edilmiştir. Alaşım içerisindeki fazların kritik dönüşüm sıcaklıkları hesaplanmıştır. Ayrıca TC-Prisma yazılımı ile 180°C'de farklı yaşlandırma süreleri (2, 4, 6 ve 8 saat) ile çökelti boyutu ve mukavemet analizleri yapılmıştır. Böylece alüminyum alaşımlarına sık uygulanan ısıtma işlemi proselinin modelleme ve simülasyon çalışmaları ile analizleri yapılarak proses dizaynı konusunda öngörüler ortaya konmuştur. Çalışmanın çıktıları ile Türkçe literatüre katkı sunulması amaçlanmıştır.

Abstract

Strength can be increased with the precipitation hardening method in the Al-Si-Mg alloys. Temperature and time are important parameters in the precipitation hardening process. After the quenching process, by keeping the supersaturated structure at a certain temperature for a certain period, non-equilibrium precipitates are formed, resulting in an increase in strength. In this modeling and simulation study, temperature-dependent phase fractions of Al-7Si-0.3Mg alloy were analyzed with Thermo-Calc software. The critical transformation temperatures of the phases in the alloy were calculated. In addition, precipitate size and strength analyzes were performed with TC-Prisma software at 180°C with different aging times (2, 4, 6, and 8 hours). So, the heat treatment process, which is frequently applied to aluminum alloys, has been analyzed with modeling and simulation studies, and the prediction about the process design has been revealed. It is aimed to contribute to the Turkish literature with the outputs of the study.

1. Giriş

Alüminyum esaslı malzemeler yüksek spesifik mukavemetleri, üstün korozyon dirençleri, ısıtma ve elektriksel iletkenlikleri nedeniyle demir dışı malzemeler arasında oldukça fazla tercih edilmektedirler. Alüminyum alaşımları

içerisinde, Al-Si alaşımları; başta otomotiv, havacılık ve savunma sanayisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1-4]. Al-Si alaşımları, genel döküm alaşımlarının yaklaşık olarak %90'ını oluşturmaktadır ve bu alaşım grubunda, genellikle ilk olarak ötektik altı Al-7Si-0.3Mg (A356) alaşımı akla gelmektedir. Alaşıma ilave edilen Mg

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): ryamanoglu@kocaeli.edu.tr



sayesinde, T6 ısıtma işlemi uygulanarak mukavemet değerlerinde etkili bir artış sağlanmaktadır [5-7].

T6 ısıtma işlemi çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma adımlarından oluşur. Çözeltiye alma işlemi, alaşım içerisinde mukavemete katkı sunan Mg_2Si , Al_2Cu ve Al_3Sc gibi çökeltilerinin solvüs sıcaklığının üzerinde belli bir süre tutulması ile gerçekleşir. Bu sayede tane sınırlarında sürekli yapıda oluşan bu çökeltilerin $\alpha-Al$ içerisinde çözünmesi sağlanır. Çözeltiye alma ile elde edilen homojen yapıya su verilerek aşırı doymuş $\alpha-Al$ taneleri elde edilir [8]. Ardından solvüs sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta, magnezyum ve silisyumun difüzyonuna izin verilerek denge dışı çökeltilerin oluşturulması sağlanır. Yaşlandırma prosesinde ilk olarak, çok hızlı oluşup büyüyen Guinier-Preston (GP) çökeltileri; sürenin artması ile birlikte, difüzyon devam ederken β'' ve β' çökeltileri oluşmaktadır [9, 10].

Günümüz mühendislik çalışmalarında, modelleme ve simülasyon analizleri ile mühendislik problemlerinin çözümlenmesinin önemi giderek artmaktadır. Dijital tasarım süreçleri, mühendislik parçalarının kimyasal bileşiminden yola çıkılarak üretimi, imalat zinciri döngüleri, nihai işlemler ve servis koşullarının bir bütün olarak bilgisayar ortamında dijital ikizlerinin oluşturulmasına dayanmaktadır [11, 12]. Bu yaklaşım ile mühendislik parçalarının tasarım ve optimizasyon çalışmalarında; olası hatalar engellenmekte, optimum proses parametreleri ve nihai malzeme özellikleri saptanmakta, çevresel kaygılar azaltılmakta, enerji verimliliği ve maliyet tasarruf çalışmaları yapılmaktadır. Son yıllarda özellikle otomotiv, savunma, havacılık, tıp alanlarında dijital tasarım süreçleri ile yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Kimyasal bileşim ve sıcaklık ilişkisinden yola çıkarak CALPHAD (CALculation of PHase Diagram) metodolojisi ile malzeme tabanlı modelleme çalışmaları sayesinde; termodinamik, termokinetik, termofiziksel, termomekanik özellikler hesaplanabilmektedir. Bilgisayar ortamındaki bu çözümler, özellikle ısıtma işlemi gibi yüksek enerji gerekliliği ve çevreye etkisi olan proseslerin yapılabilirliği açısından oldukça önemlidir. Modelleme ve simülasyon çalışmaları ile zaman, enerji, hammadde, insan/saat, test, deneme yanılma maliyetleri düşürülerek optimum tasarımlar yapılabilmektedir [13-15].

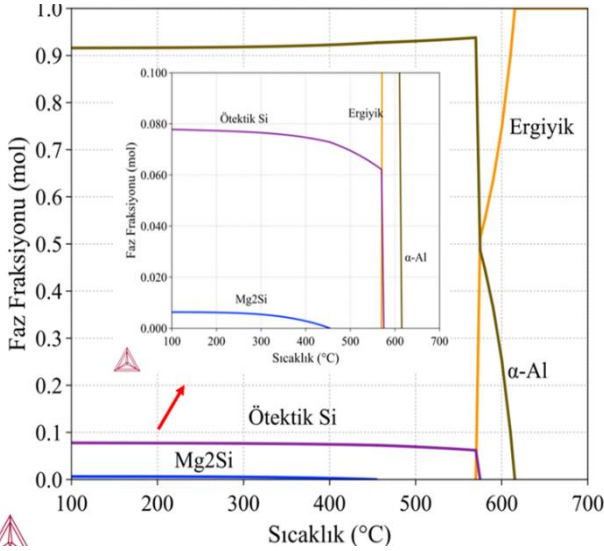
Bu modelleme ve simülasyon çalışmasında, Al-7Si-0.3Mg alaşımının Thermo-Calc yazılımı ile termodinamik analiz yapılarak, sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu ve kritik dönüşüm sıcaklıkları analiz edilmiştir. Daha sonra, ısıtma proseslerinde malzeme özelliklerini etkileyen çökelti sertleşmesi süreci için farklı yaşlandırma sürelerinde; malzemenin termodinamik, termokinetik ve termomekanik özellikleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların Türkçe literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

Çalışma kapsamında seçilen Al-Si-Mg alaşımının kimyasal kompozisyonu (ağ. %) 7 Si ve 0.3 Mg olarak belirlenmiştir. Alaşımın kimyasal kompozisyonundan yola çıkılarak, sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, termodinamik olarak faz ve kritik dönüşüm sıcaklıkları hesaplanmıştır. Termodinamik hesaplamalar için Thermo-Calc yazılımı 2022a versiyonu TCAL8.1 veri tabanı kullanılmıştır. Al-Si-Mg alaşımının ısıtma işlemi sırasında, yaşlandırma adımına odaklanılmıştır. Yaşlandırma prosesinin modellenmesinde, TC-Prisma yazılımı 2022a versiyonu TCAL8.1 termodinamik ve MOBAL7 termokinetik veri tabanı kullanılmıştır. Yaşlandırma prosesinde, başarılı bir şekilde çözeltiye alma ve su verme işlemi uygulanmış yapı modellenmiştir. Modelleme sonucunda ortalama yarıçap ve mukavemet değeri simüle edilmiştir. Alaşım içerisinde çökelen Mg_2Si çökeltilerinin homojen çökelediği varsayılmıştır. Al-7Si-0.3Mg alaşımına $180^\circ C$ 'de sabit sıcaklıkta 2, 4, 6 ve 8 saatlik yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Böylelikle 4 farklı yaşlandırma operasyonu yapılmış ve akma dayanımına etkisi incelenmiştir. Bununla birlikte çökelti yarıçapının $180^\circ C$ 'de süreye bağlı olarak değişimi de hesaplanmış ve çökelti yarıçapı ile akma dayanımı arasındaki ilişki incelenmiştir.

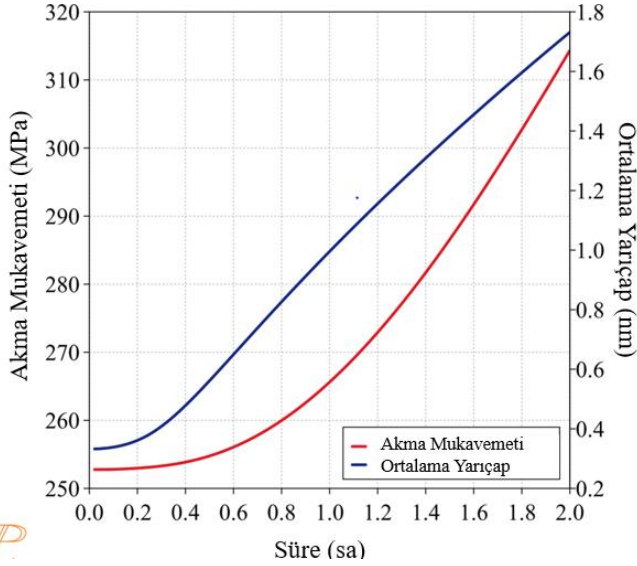
3. Bulgular ve Tartışmalar

Thermo-Calc yazılımıyla hesaplanan termodinamik karakterizasyon sonucunda, Al-7Si-0.3Mg alaşımının sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu Şekil 1' de verilmiştir. Al-Si-Mg alaşımında Si ve Mg elementleri 1:2 stokiometrik oranda Mg_2Si çökeltilerini oluşturmaktadır [15] ve oluşan bu çökelti daha sonra ısıtma işlemi sırasında mukavemet artışını sağlamaktadır. Ötektik altı alaşımlarda sıvı fazdan ilk olarak $\alpha-Al$ katılaşmaktadır. Al-7Si-0.3Mg alaşımında $615^\circ C$ 'de katılaşma meydana gelmektedir. Al-Si alaşımlarında $577^\circ C$ 'de meydana gelen ötektik reaksiyon Al-7Si-0.3Mg'de $3^\circ C$ 'lik bir düşüş ile $574^\circ C$ 'de başlamaktadır. Ötektik reaksiyon çok bileşenli sistemlerde bir alana dönüşerek, ergiyik $5^\circ C$ 'lik bir sıcaklık aralığında $\alpha-Al$ ve ötektik Si'ye $569^\circ C$ 'de dönüşmektedir. Mg ve Si'nin oluşturduğu çökelti fazı, $454^\circ C$ 'de çökelmeye başlamaktadır. Çözeltiye alma ısıtma işlemi süreci için alaşımın en az $454^\circ C$ 'nin üzerinde prosese alınması gerekmektedir. Katılaşma ile birlikte Al-7Si-0.3Mg alaşımında oda sıcaklığında %7.8 ötektik Si, %91.6 $\alpha-Al$ ve %0.6 Mg_2Si fazları bulunmaktadır.



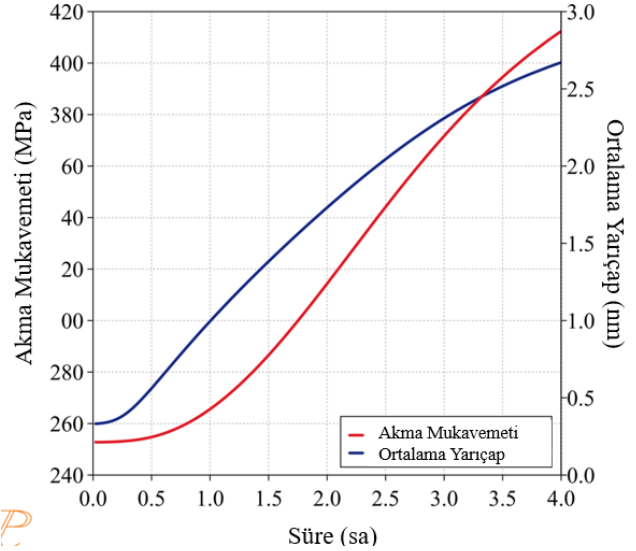
Şekil 1. Al-7Si-0.3Mg alaşımında sıcaklığa bağlı faz fraksiyonu

Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'deki 2, 4, 6 ve 8 saat süreli yaşlandırma prosesinin simülasyonu sonucunda elde edilen ortalama partikül boyutu ve mukavemet değerleri Şekil 2, 3, 4 ve 5'te verilmiştir. Şekil 2'de, 180°C'de 2 saat boyunca uygulanan yapay yaşlandırma sonucunda elde edilen akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı sırasıyla 314 MPa ve 1.73 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2: Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'de 2 saat yapay yaşlandırma sonrası akma mukavemeti ve çökelti ortalama yarıçapları

Şekil 3'te ise, alaşımın yaşlandırma prosesine devam edilmesi sonucunda, yaklaşık 3 saat 20 dakika sonunda akma mukavemeti ve çökelti yarıçapının kesiştiği görülmektedir. Bu kesişmedeki akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı değerleri 412 MPa ve 2.62 nm'dir.



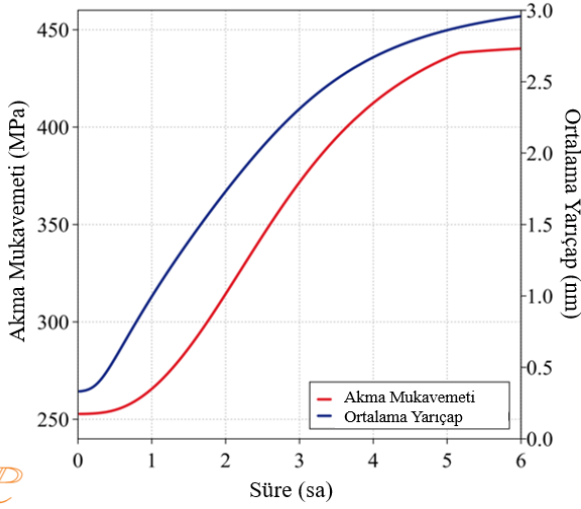
Şekil 3: Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'de 4 saat yapay yaşlandırma sonrası akma mukavemeti ve çökelti ortalama yarıçapları

Bu kesişmeden sonra, çökelti yarıçapındaki artış hızı azalmaya başlamaktadır. Bu aşamada mukavemet bir süre daha düşük hızda artacak, azalmaya başlamasıyla taneler kabalaşacak ve Orowan mekanizmasıyla mukavemet 1/r ile orantılı olacaktır. Faz dönüşümü tarafından bakılacak olursa: β'' fazının sabit yaşlandırma sıcaklığında, süreye bağlı olarak, mukavemetin de düşmesiyle β' fazına dönüşmesi, bir sonraki adımda beklenmektedir. Ancak β'' fazının literatürde iğnemsî yapıda olduğu ve daha kararlı durumdaki β' fazının yapı içerisinde istendiği bilinmelidir [16].

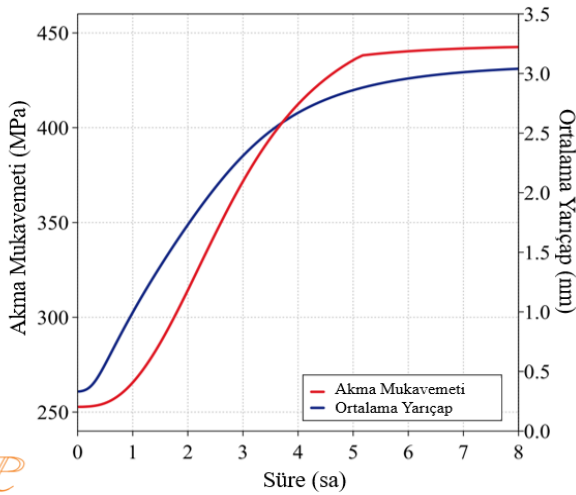
Kesişme noktasından sonra, mukavemet artış hızındaki azalma ve çökeltilerin büyümesi ve kabalaşması sebebiyle optimum sürenin 4 saat olduğu söylenebilir. 4 saat sonunda elde edilen akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı değerleri sırasıyla 412 MPa ve 2.7 nm'dir. Bu süre, literatürle karşılaştırılmıştır. Möller ve ark. [17], Mg içeriğinin A356 alaşımının yaşlanma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve A356'nın 160°C'de suni yaşlandırmasının 180°C yaşlandırmaya kıyasla daha yüksek pik sertlik ürettiğini ortaya koymuşlardır. Başka bir çalışmada, Rosso ve Grande [18], reo-döküm A356 için T6 işleminin optimizasyonunu inceleyerek mekanik özellikler açısından optimum yapay yaşlandırma işleminin 180°C'de 4 saat olduğunu öne sürülmüştür. Benzer şekilde Dewhirst ve ark. [19], A356 alaşımında T6 işleminin optimizasyonunu için 180°C'de 4 saat yaşlandırmanın gerekli olduğunu ifade etmişlerdir.

Şekil 4'te, akma mukavemeti eğrisinin tepe noktasından sonra, beklendiği gibi, 5. saat ile birlikte mukavemetteki artış hızı azalmıştır. 6 saat sonunda elde edilen akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı değeri sırasıyla 442 MPa ve 3 nm'dir. Bu noktada parçamızın en yüksek mukavemet

değeri söz konusudur ve faz dönüşümü için gerekli enerjinin toplanarak eğrinin tepe noktasından sonra düşüşüyle birlikte, β'' fazının dönüşümü tamamlanmış olacaktır.



Şekil 4: Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'de 6 saat yapay yaşlandırma sonrası akma mukavemeti ve çökelti ortalama yarıçapları



Şekil 5: Al-7Si-0.3Mg alaşımının 180°C'de 8 saat yapay yaşlandırma sonrası akma mukavemeti ve çökelti ortalama yarıçapları

Şekil 5'te 8 saatlik yaşlandırma modellenmiştir. 8 saat sonunda elde edilen akma mukavemeti ve çökelti yarıçapı değerleri 443 MPa ve 3.1 nm'dir. Yaşlandırma boyunca yaklaşık 3.5 saat sonunda akma mukavemeti eğrisi ve çökelti yarıçapı eğrilerinde kesişme görülmüştür. Bu noktaya kadar sürekli artan mukavemet, kesişme noktasından sonra bir süre daha artarak, beşinci saat sonrasında artışın sabitlendiği tespit edilmiştir. Kabalaşma evresinde çökelti, daha küçük çökeltilere oranla dislokasyonları sarmaya başlar. Tane sınırlarında, tane köşelerinde, tane kenarlarında veya tane içerisinde homojen çökelen çökelti sıcaklığa bağlı sürenin artmaya başlaması

ile dağılmaya başlarlar. Kabalaşma ve dağılmanın olacağı evre mukavemet yarıçapın artışıyla ters orantılı ilerler. Ayrıca β' fazı, β kararlı fazına dönüşerek en düşük mukavemet gözlemlenebilir [20].

Ghulam ve ark. A357 alaşımı için Mg_2Si çökeltilerinin boyutunun mekanik özelliklere etkisini inceleyerek, aşırı yaşlanmanın sadece çökelti uzunluğunu arttırmadığı, ayrıca iğnemi β'' yapısının çubuk tipi β' çökeltilerine kısmi dönüşümüne de neden olduğunu ifade etmişlerdir. Bu durumun aynı zamanda sertlik ve süneklikteki azalmanın temel nedeni olduğunu ve aşırı yaşlanma üzerine mukavemet özelliklerinde az da olsa bir artış olduğunu iddia etmişlerdir. Ayrıca 175 °C' de 12 saatlik aşırı yaşlandırmada sünekliğin düştüğünü ortaya koyarak, bu durumu çökelti boyutlarındaki kabalaşmayla ilişkilendirmişlerdir [21]. Bu çalışmada ise, akma mukavemeti ve çökelti kritik yarıçapındaki kesişim sonucunda, mukavemetin çalışmayla benzer şekilde arttığı görülmüştür. Bu çalışmada gözlenen sünekliğin, muhtemel yapı değişikliği sebebiyle akma dayanımının maksimum değere ulaşmasıyla en düşük süneklik olabileceği düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Al-7Si-0.3Mg alaşımının Thermo-Calc yazılımı ile sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları analiz edilmiştir. Alaşım içerisindeki fazların kritik dönüşüm sıcaklıkları hesaplanmıştır. Ayrıca TC-Prisma yazılımı ile 180°C'de farklı yaşlandırma süreleri ile çökelti boyutu ve mukavemet analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Al-7Si-0.3Mg alaşımı için ergime sıcaklığı 615°C, çözeltili alma sıcaklığı minimum 454°C ve ötektik reaksiyon ise 574 °C olarak hesaplanmıştır. Al-7Si-0.3Mg alaşımı oda sıcaklığında %7.8 ötektik Si, %91.6 α -Al ve %0.6 Mg_2Si fazlarını içermektedir.
- CALPHAD metodolojisi ile 180°C'de 2, 4, 6 ve 8 saat yaşlandırma prosesleri modellenmiştir. Modelleme sonucunda, 4. Saat ile birlikte akma dayanımındaki artış hızı azalmaya başlamış, 5. saat ile birlikte nispeten sabitlenmiştir.
- Yapılan modellemeler ile maksimum mukavemete ulaşan Al-7Si-0.3Mg alaşımının, β'' fazından β' ve β fazlarına geçişiyle birlikte çekirdeklenme teorisine ve çökelti termokinetiğine uygun şekilde çökelti boyutlarındaki küçülmeler literatür ile doğrulanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı:

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

Etik Standartlar Beyanı:

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Kaufman J. G., (2000). Applications for aluminum alloys and tempers. Introduction to Aluminum Alloys and Tempers; ASM International: Materials Park, OH, USA, 1100, 242.
- [2] Karakulak E., Ymanoğlu R., Erten U., Zeren A., Zor S., Zeren M., (2014). Investigation of corrosion and mechanical properties of Al-Cu-SiC-xNi composite alloys. *Materials & Design*, 59, 33-37.
- [3] Yamanoglu R., Zeren M., German R. M., (2012). Solidification characteristics of atomized AlCu4Mg1-SiC composite powders. *Journal of Mining and Metallurgy B: Metallurgy*, 48(1), 73-79.
- [4] Zeren M., Karakulak E., Gümüş S., (2011). Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(8), 1698-1702.
- [5] Baskaran J., Raghuvaran P., Ashwin S., (2021). Experimental investigation on the effect of microstructure modifiers and heat treatment influence on A356 alloy. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3007-3010.
- [6] Yasin M., Razak A., (2022). Effect of high temperature solution heat treatment time on quality index and morphology of A356 DC alloy. *Materials Today: Proceedings*, 48, 1924-1928.
- [7] Cheng W., Liu C. Y., Huang H. F., Zhang L., Zhang B., Shi L., (2021). High strength and ductility of Al-Si-Mg alloys fabricated by deformation and heat treatment. *Materials Characterization*, 178, 111278.
- [8] Rajan T. S., Sharma C. P., Sharma A. K., (2011). Heat treatment: principles and techniques. PHI Learning Pvt. Ltd.
- [9] Rheingans B., Mittemeijer E. J., (2015). Modelling precipitation kinetics: Evaluation of the thermodynamics of nucleation and growth. *Calphad*, 50, 49-58.
- [10] Totten G. E., MacKenzie D. S., (2016). Modeling and Simulation of the Heat Treatment of Aluminum Alloys.
- [11] Akyıldız Y., Öztürk O., Simsar B., (2021). Al-10Si-xMg Alaşımının CALPHAD Metodolojisi ile Termodinamik Karakterizasyonu. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(3), 699-704.
- [12] Akyıldız Y., Akman A., Horasan B., Ymanoğlu R., Aydın H., 2022. Investigating The Effect Of Quenching Media And Agitation Conditions On The Microstructure, Hardness, And Stress Distribution Of Aisi 4140 Steel By Using Fem. 16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences, Mardin, Turkey, February 22-23, pp. 156-163.
- [13] Ågren J., (1996). Calculation of phase diagrams: Calphad. *Current opinion in solid state and materials science*, 1(3), 355-360.
- [14] Akyıldız Y., Arslan Y., Aydın H., Ymanoğlu R., 2022. Fe-Mn-C Çeliğinin Calphad Metodolojisi ile Hesaplanan Sinterleme Sıcaklığının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi. 16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences, Mardin, Turkey, February 22-23, pp. 164-174.
- [15] Yamanoglu 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 Eylül Üniversitesi*, 314-325.
- [16] Polat A., Avsar M., Ozturk F., (2015). Effects of the artificial-aging temperature and time on the mechanical properties and springback behavior of AA6061. *Material in tehnologije*, 49(4), 487-493.
- [17] Möller H., Govender G., Stumpf W. E., (2007). Natural and artificial aging response of semisolid metal processed Al-Si-Mg alloy A356. *International Journal of Cast Metals Research*, 20(6), 340-346.
- [18] Rosso M., Actis Grande M., (2006). Optimization of heat treatment cycles for automotive parts produced by rheocasting process. In *Solid State Phenomena (Vol. 116, pp. 505-508)*. Trans Tech Publications Ltd.
- [19] Dewhirst B. A., (2005). Optimization of the heat treatment of semi solid processed A356 aluminum alloy. *Optimization*, 2005, 11-17.
- [20] Gladman T., (1999). Precipitation hardening in metals. *Materials science and technology*, 15(1), 30-36.
- [21] Asghar G., Peng L., Fu P., Yuan L., Liu Y., (2020). Role of Mg₂Si precipitates size in determining the ductility of A357 cast alloy. *Materials & Design*, 186, 108280.