



The effects of aging and cryogenic treatments on corrosion and hardness properties of A-360 aluminum alloys

Kubilay Karacif^{1*}, Hasan Hasirci², Duygu Candemir¹

¹Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Hitit University, 19030, Çorum, Türkiye

²Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Technology, Gazi University, 06560, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Aging heat treatment of A-360 aluminum alloys
- Cryogenic treatment of A-360 aluminum alloys
- Corrosion and hardness properties

Keywords:

- Aging
- Cryogenic
- Corrosion
- Hardness
- Aluminum

Article Info:

Research Article

Received: 08.03.2024

Accepted: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1449263

Correspondence:

Author: Kubilay Karacif

e-mail:

kubilaykaracif@hitit.edu.tr

phone: +90 364 219 1286

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effects of artificial aging, natural aging and cryogenic treatments on the corrosion and hardness properties of A-360 aluminum alloy were examined. Before aging, the solution treatment was applied at 560°C, the artificial aging treatment was applied at 190°C, and the cryogenic treatment was applied at -140°C for 8 and 16 hours. The corrosion properties of samples applied different heat treatments were determined by potentiodynamic corrosion tests in 3.5% NaCl environment. Hardness examinations of the samples were made by the Vickers method. Optical microscope was used for microstructural examinations. Table A shows the effects of applied aging and cryogenic heat treatments on the hardness, corrosion current density (I_{cor}), corrosion potential (E_{cor}) and corrosion rate (CR) of the A-360 aluminum alloy. According to corrosion test results; A significant improvement in the corrosion resistance of the alloy was achieved with the applied aging and cryogenic process. The maximum increase in corrosion resistance was 51% with the aging heat treatment and 92% with the cryogenic treatment. The hardness property that increased with aging increased even more with cryogenic treatment. With the application of cryogenic process, there was a 55 HV hardness increase in the alloy hardness. Increasing hardness is an indication that other mechanical properties of the alloy are also improving. The change in the microstructure of the alloy as a result of the applied heat treatments was effective in the increases in both corrosion resistance and hardness properties.

Table A. Applied aging treatment, cryogenic treatment, corrosion and hardness results of aluminum alloys

Heat Treatment	Sample Code	Hardness (HV1)	I _{cor} (A/cm ²)	E _{cor} (V)	CR (mm/y)
Non heat treatment	IY	108	9.62. 10 ⁻⁵	-1.98	1.049
Artificial aging (T6)	T6	130	4.69. 10 ⁻⁵	-2.15	0.512
Natural aging (T4)	T4	129	6.27. 10 ⁻⁵	-2.40	0.684
Cryogenic (8 hours) aging (T6)	K8T6	140	8.13. 10 ⁻⁶	-2.13	0.088
Cryogenic (16 hours) aging (T6)	K16T6	144	3.67.10 ⁻⁵	-2.54	0.401
Cryogenic (8 hours) aging (T4)	K8T4	158	1.12.10 ⁻⁵	-2.42	0.122
Cryogenic (16 hours) aging (T4)	K16T4	163	8.48.10 ⁻⁶	-2.25	0.092

Purpose: The purpose of this study is to examine the effects of aging and cryogenic aging treatments on the corrosion and hardness properties of A-360 aluminum alloy.

Theory and Methods: Different heat treatments were applied to the A-360 aluminum alloy. These heat treatments are artificial aging (T6), natural aging (T4), and cryogenic processes lasting 8 and 16 hours before aging. The corrosion properties of the samples to which these heat treatments were applied were examined in salt water (3.5% NaCl) environment. Tafel polarization method was used in electrochemical corrosion experiments. Vickers method was used for hardness measurements of samples. Microstructural examinations were made with an optical microscope.

Results: The maximum increase in corrosion resistance of aluminum alloy was 51% with the aging (T6) heat treatment and 92% with the cryogenic aging (K8T6) treatment. The hardness properties that increased with aging increased even more with cryogenic treatment. With the application of cryogenic treatment, there was 55 HV increase in the alloy hardness. The change in the microstructure of the A-360 aluminum alloy as a result of the applied heat treatments was effective in the increases in both corrosion resistance and hardness properties.

Conclusion: The corrosion resistance and hardness of the A-360 aluminum alloy increased with the applied aging process. The increase in corrosion resistance and hardness was greater with the cryogenic process applied before the aging process.



Yaşlandırma ve kriyojenik işlemlerin A-360 alüminyum alaşımının korozyon ve sertlik özelliklerine etkileri

Kubilay Karacif^{1*}, Hasan Hasirci², Duygu Candemir¹

¹Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 19030, Çorum, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06560, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- A-360 alüminyum alaşımının yaşlandırma ısıl işlemi
- A-360 alüminyum alaşımının kriyojenik işlemi
- Korozyon dayanımı ve sertlik özelliği

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.03.2024

Kabul: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1449263

Anahtar Kelimeler:

Alüminyum,
kriyojenik işlem,
yaşlandırma,
korozyon,
sertlik

ÖZ

Bu çalışmada, uygulanan suni yaşlandırma, doğal yaşlandırma ve kriyojenik ısıl işlemlerinin A-360 alüminyum alaşımının korozyon ve sertlik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Yaşlandırma öncesi çözeltiye alma işlemi 560°C sıcaklıkta, suni yaşlandırma işlemi 190°C sıcaklıkta, kriyojenik işlem ise -140°C sıcaklıkta uygulanmıştır. Kriyojenik işlem süresi 8 ve 16 saat olmak üzere iki farklı sürede uygulanmıştır. Farklı ısıl işlemlerin uygulandığı numunelerin korozyon özellikleri %3,5 NaCl ortamında potansiyodinamik korozyon testleri ile belirlenmiştir. Numunelerin sertlik incelemeleri Vickers yöntemi ile yapılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde optik mikroskop ve elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Korozyon test sonuçlarına göre; uygulanan yaşlandırma ve kriyojenik işlem ile alaşımın korozyon dayanımında çok büyük oranlarda iyileşme elde edilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi ile en yüksek %51, kriyojenik işlem ile %92 seviyelerinde korozyon dayanımı artışı olmuştur. Yaşlandırma ile artan sertlik özelliği, kriyojenik işlem ile daha da fazla artış göstermiştir. Kriyojenik işlem uygulaması ile alaşımın sertliğinde 55 HV artış olmuştur. Alaşım sertliğinin artması, alaşımının diğer mekanik özelliklerinin de geliştiğinin bir göstergesidir. Gerek korozyon dayanımı gerekse sertlik özelliklerindeki artışlarda, uygulanan ısıl işlemler sonucunda alaşımın mikroyapısında meydana gelen değişimler etkili olmuştur.

The effects of aging and cryogenic treatments on corrosion and hardness properties of A-360 aluminum alloys

HIGHLIGHTS

- Aging heat treatment of A-360 aluminum alloy
- Cryogenic treatment A-360 aluminum alloy
- Corrosion resistance and hardness properties

Article Info

Research Article

Received: 08.03.2024

Accepted: 15.09.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1449263

Keywords:

Aluminum,
cryogenic treatmentaging,
corrosion,
hardness

ABSTRACT

In this study, the effects of artificial aging, natural aging and cryogenic heat treatments on the corrosion and hardness properties of A-360 aluminum alloy were examined. Before aging, the solution was applied at 560°C, the artificial aging process was applied at 190°C, and the cryogenic process was applied at -140°C. Cryogenic treatment was applied in two different periods: 8 and 16 hours. The corrosion properties of the samples to which different heat treatments were applied were determined by potentiodynamic corrosion tests in 3.5% NaCl environment. Hardness examinations of the samples were made by the Vickers method. Optical microscope and electron microscope (SEM) were used for microstructural examinations. According to corrosion test results; A significant improvement in the corrosion resistance of the alloy was achieved with the applied aging and cryogenic process. The maximum increase in corrosion resistance was 51% with the aging heat treatment and 92% with the cryogenic treatment. The hardness property that increased with aging increased even more with cryogenic treatment. With the application of cryogenic process, there was an increase in alloy hardness by 55 HV. Increasing hardness is an indication that other mechanical properties of the alloy are also improving. Changes in the microstructure of the alloy as a result of the applied heat treatments were effective in the increases in both corrosion resistance and hardness properties.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *kubilaykaracif@hitit.edu.tr, hasirci@gazi.edu.tr, duyguorsacilar@hitit.edu.tr / Tel: +90 364 219 1286

1. Giriş (Introduction)

Kriyojenik işlem, malzemelerin özelliklerini geliştirmek için oda sıcaklığından sıfırın altındaki sıcaklık değerlerine belirli hızlarla kontrollü olarak soğutma, bu sıcaklıklarda belirlenen sürelerde bekletme ve sonrasında belirli hızlarla oda sıcaklığına tekrar ısıtma işlemidir [1-4]. Kriyojenik işlem sonrasında metalin kristal kusurları azalmakta ve kristal kafes içindeki boşlukların azalması nedeniyle kristal yapı homojenliği elde edilmektedir. Bu işlem sonucunda kalıntı gerilmeler azalarak dengeli bir yapıya ulaşılır. Kriyojenik işlem, çeliklerde kalıntı östenitin martenzite dönüşmesini ve ince ikincil karbürlerin çökmesini kolaylaştırır [1, 5, 6]. Kriyojenik işlem, alüminyum alaşımlarının mikroyapısını, tane boyutunu, tane yönelmesini, dislokasyonları, ikinci faz oluşumunu da etkilemektedir [2]. Günümüzde, sertliğin ve aşınma dayanımının artması, kalıntı gerilmelerin azalması, yüzey bütünlüğü ve boyutsal kararlılık gibi birçok avantajı nedeniyle kriyojenik işleme olan ilgi hızla artmaktadır [1, 4, 7]. Soğutma hızı, ısıtma hızı, tutma süresi, tutma sıcaklığı, kriyojenik işlemin performansını etkileyen başlıca faktörlerdir [1]. Kriyojenik işlem, -80°C sıcaklıklara kadar uygulanıyorsa “sığ kriyojenik işlem”, -196°C sıcaklıklara kadar uygulanıyorsa “derin kriyojenik işlem” olarak adlandırılır [4, 8].

Alüminyum-silisyum alaşımları, iyi dökülebilirlik, üstün mukavemet/ağırlık oranı ve iyi şekillendirilebilirlik özellikleri nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan en popüler döküm alüminyum alaşımlarındandır. Ayrıca, iyi elektriksel özellik, yüksek termal iletkenlik ve düşük yoğunluk gibi arzu edilen bazı özelliklerin iyi bir kombinasyonuna sahiptir. Bununla birlikte, alüminyum-silisyum alaşımlarının dezavantajları, zayıf korozyon direnci, zayıf aşınma direnci ve zayıf işlenebilirlik özellikleridir [9].

Alüminyum alaşımlarına uygulanan kriyojenik işlemin mekanik özelliklere etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kumar vd. [10], 7075-T6 alüminyum alaşımının mikroyapı, mekanik ve balistik özelliklerine kriyojenik işlemin etkilerini incelemiştir. Kriyojenik işlem, mikroyapıda tane inceliği ve yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşturarak, mekanik ve balistik özellikleri geliştirmiştir. Başka bir çalışmada AA7075 alüminyum alaşımı levhalarda, kriyojenik işlem sonrası şekillendirme işleminde homojen uzamanın arttığı görülmüştür [11]. Sonia vd. [4], 6082 alüminyum alaşımına uygulanan kriyojenik işlemin, alaşımın çekme dayanımını ve sertliğini artırdığını, bu artışta mikroyapısal tane inceliğinin etkili olduğunu bildirmişlerdir. Klug vd. iki farklı çalışmada [12, 13], 6026 alüminyum alaşımına uygulanan kriyojenik işlem sonucunda diğer özelliklerin olumsuz etkilenmeden alaşımın aşınma dayanımının önemli oranda geliştiğini bildirmişlerdir. Bu gelişme, mikroyapıdaki modifikasyon sonucu sertlik artışına atfedilmiştir. 6026 alüminyum alaşımına yaşlandırma öncesi uygulanan kriyojenik işlem ile çökelti oluşumunda ve büyümesinde değişiklikler olmuştur. Çökeltilerin formu, küboidal şekilden küresel forma dönüşmüştür. Madhloom vd. [14], 6061 alüminyum alaşımında kriyojenik işlem ile alaşımın sertlik, akma ve çekme dayanımlarında önemli artışlar olduğunu, bu artışlarda magnezyum silikat çökmesinin etkili olduğunu bildirmişlerdir. Zhou vd. [15], 2024 alüminyum alaşımlarında kriyojenik işlem ile yorulma özelliğinin geliştiğini, bunda mikroyapısal inceleme ve çökelti oluşumunun etkili olduğunu görmüşlerdir. Araghchi vd. [16], 2024 alüminyum alaşımlarına farklı bir kriyojenik işlem uygulamışlardır. Kriyojenik işlemin devamında yağda ve kaynayan suda bekletme ile kalıntı gerilmeler azalmış, mekanik özellikler iyileşmiştir. Bu gelişmede mikroyapıda iyi dağılmış ince çökeltiler etkili olmuştur. Nazarian vd. [17], 2024 alüminyum alaşımında kriyojenik işlem ile alaşımın sertliğinde değişim olmadığını, çekme özelliklerinin geliştiğini, yorulma

sınırının azaldığını bildirmişlerdir. Dong vd. [18], yüksek dayanımlı alüminyum-bakır-lityum alaşımlarında su verme sonrasında yapılan kriyojenik şekillendirme işleminin şekillendirme özelliğini geliştirdiğini belirlemişlerdir. Su vd. [19], çözeltili alma, soğuk deformasyon ve kriyojenik işlem içeren çalışmalarında %3 deformasyonlu numunelerin en yüksek sertlik, çekme ve aşınma dayanımı sergilediğini tespit etmişlerdir.

Alüminyum alaşımlarında kriyojenik işlemin korozyon özelliklerine etkisi ile ilgili az sayıda çalışma yapılmıştır. Pan vd. çalışmalarında [20], alüminyum-çinko-magnezyum-bakır alaşımında kriyojenik işlemin, gerilme korozyonuna karşı direnci geliştirdiği, bu gelişimde oksit filmi kopmasının ve çatlak yayılmasının engellenmesinin etkili olduğu bildirilmiştir. Kriyojenik işlem, kalıntı gerilmeler nedeni ile alt tane sınırı ve küçük açılı tane sayısını artırmıştır. Anot korozyon kanalı, süreksiz çökeltiler tarafından tahrip edilmiş, yapısal heterojenlik azalmış ve böylece tane sınırı çökeltilerinin anodik çözünmesi ve galvanik korozyon azalmıştır. Ma vd. göre [21], 7075 alüminyum alaşımında kriyojenik işlem ile mikroyapıda tane sınırı çökeltilerinin sayısı, boyutu ve dağılımı değişmiştir. Çökeltiler daha iyi bir dağılım göstermiş ve korozyon direnci önemli oranda artmıştır. Vicere vd. [22], T6 ısıl işlemi sonrasında kriyojenik işlem ile 6012 alüminyum alaşımının korozyon davranışının değişmediğini bildirmişlerdir. Su ve diğerlerine göre [23], 7075 alüminyum alaşımında, kriyojenik işlem ile süreksiz tane sınırı çökeltileri ve geniş çökeltisiz bölgeler korozyon direncini önemli ölçüde artırmıştır. Zhang vd. [24], LC4 alüminyum alaşımında kriyojenik işlem sonrası uygulanan yaşlandırma işleminin en iyi mekanik özellikler ile birlikte korozyon direnci sağladığını bildirmişlerdir. Kucerova vd. çalışmasında [25], AW7075 alüminyum alaşımında yaşlandırma sonrası kriyojenik işlem ile tokluk özelliğinin azaldığı görülmüştür. Ağırlık kaybı yöntemi ile yapılan testlerde korozyon direnci azalırken, çekme dayanımı ve aşınma dayanımı gelişmiştir. Ma vd. [26], alüminyum-çinko-magnezyum-bakır alaşımında kriyojenik işlem sonucunda alaşımın korozyon direncinin geliştiğini belirlemişlerdir. Alaşımın matrix çökeltileri ince ve homojen bir şekilde dağılmış, tane sınırı çökeltileri ise süreksiz formda olmuştur. Cabeza vd. göre [27], 2017-T4 alüminyum alaşımında kriyojenik işlem, tane sınırlarındaki ikincil kararsız partikülleri artırmakta ancak mekanik özelliklerde değişim oluşturmamaktadır. Malzemedeki işlem sonrasında basma kalıntı gerilmeleri işlem öncesine göre daha fazla olmuştur. Bu iki etki sayesinde alaşımın gerilmeli korozyon çatlaması davranışı iyileşmektedir.

Alüminyum alaşımlarına uygulanan kriyojenik işlemin mekanik özelliklere etkisi ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Fakat bu işlemin farklı alüminyum alaşımlarının korozyon davranışına etkisini inceleyen çok az çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada kullandığımız A-360 alüminyum alaşımı ile ilgili ise yapılmış olan bir çalışma bulunamamıştır. A-360 gibi alüminyum-silisyum alaşımları, başta iyi dökülebilirlik olmak üzere, üstün özellikleri nedeniyle en popüler döküm alüminyum alaşım grubudur. Bu alaşım ısıl işlem ile geliştirilemeyen bir alüminyum alaşımı olup, alaşım içerisinde özellikle yaşlandırma sırasında çökelti fazları ve/veya intermetaliklerin oluşumunu sağlayan alaşım elementleri çok az oranlarda bulunmaktadır. Döküm yöntemi ile üretilen A-360 alüminyum alaşımları otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda tercih edilmektedir. Bu nedenle yaygın oranda kullanımı olan ve korozif ortamlarda çalışan, A-360 alüminyum-silisyum alaşımına uygulanan yaşlandırma ve yaşlandırma öncesi kriyojenik işlemin bu alaşımın korozyon ve sertlik özelliklerine etkisini incelediğimiz bu çalışma akademik anlamda önemli bir boşluğu dolduracak, alaşımın endüstriyel kullanım alanlarında da faydalı olacaktır.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

2.1. Malzemeler ve Hazırlama Teknikleri (Materials and Preparation Techniques)

Deneysel çalışmalarda Tablo 1’de kimyasal bileşimi verilen %0,35 bakır ilaveli A-360 alüminyum-silisyum alaşımı kullanılmıştır. Döküm esnasında alüminyum alaşımına bakır ilavesinin amacı, alaşımın yaşlandırma işleminin daha etkili olabilmesidir. Bu alaşım için bakırın uygun bir alaşım elementi olduğu, yaşlandırma işleminde çökelti oluşumuna katkı sağlayacağı ve alaşım özelliklerini geliştirebileceği düşünülmüştür. Bu kapsamda başka alaşım elementleri de kullanılabilirdi fakat bu çalışmada sadece bakır ilavesinin uygulanan farklı ısı işlemlerle birlikte alaşım özelliklerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Numunelerin döküm yoluyla elde edilmesinde metal kalıplar kullanılmış ve döküm işlemi ile 20 mm çapında ve 200 mm boyunda silindirik numuneler elde edilmiştir. Üretilen numunelere Tablo 2-Tablo 3’de ve Şekil 1- Şekil 2’de verilen farklı ısı işlemler uygulanmıştır.

Şekil 1’de görüldüğü gibi suni yaşlandırma ve doğal yaşlandırma işlemleri için numuneler fırında 560°C sıcaklıkta bekletilerek katı çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır. Bu aşamada diğer alaşım elementleri ve bileşikler yapıda çözünerek tek fazlı katı çözelti elde edilmiştir. Sonrasında hızlı soğutma (su verme) işlemi uygulanarak

difüzyona fırsat vermeden aşırı doymuş katı çözelti elde edilmiştir. Normalde yavaş soğuma durumunda oluşacak olan ikincil fazlar, bileşikler difüzyon olamadığı için oluşamamıştır. Sonrasında bir grup numunenin 190°C sıcaklıkta fırında bekletilmesi ile suni yaşlandırma, diğer grup numunenin oda sıcaklığında bekletilmesi ile doğal yaşlandırma işlemleri yapılmıştır. Bakır ilaveli alüminyum alaşımı numuneler özel bir alaşım olduğu için, ideal yaşlanma süresinin belirlenmesinde yapılmış olan diğer benzer çalışmalardan faydalanılmıştır. Bu işlemler sonucunda alüminyum alaşımının özelliklerinin gelişmesini sağlayan ikinci faz çökeltileri yapıda oluşmaktadır. Diğer iki grup numuneye ise Şekil 2’de görüldüğü gibi kriyojenik işlem uygulanmıştır. Bu numuneler önceki grupta olduğu gibi fırında 560°C sıcaklıkta bekletilerek katı çözeltiye alma işlemi gerçekleştirilmiş, sonrasında hızlı soğutma işlemi ise kriyojenik işlem olarak -190°C sıcaklığa soğutma şeklinde uygulanmıştır. Bu sıcaklıkta bir grup numune 8 saat, diğer grup numune ise 16 saat bekletilmiştir. Sonrasında yine suni ve doğal yaşlandırma işlemleri aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3’te verildiği şekilde altı farklı ısı işlem uygulanan numunelerin ve ısı işlem uygulanmayan numunelerin mikroyapısal özelliklerini görmek için metalografik incelemeler, tuzlu su ortamında numunelerin elektrokimyasal özelliklerini belirlemek için korozyon deneyleri ve numunelerin mekanik özellikleri hakkında bilgi edinebilmek için sertlik testleri yapılmıştır.

Tablo 1. Alüminyum alaşımı numunelerin kimyasal bileşimi (%Ağ.)
(Chemical composition of aluminum alloy samples) (wt.%)

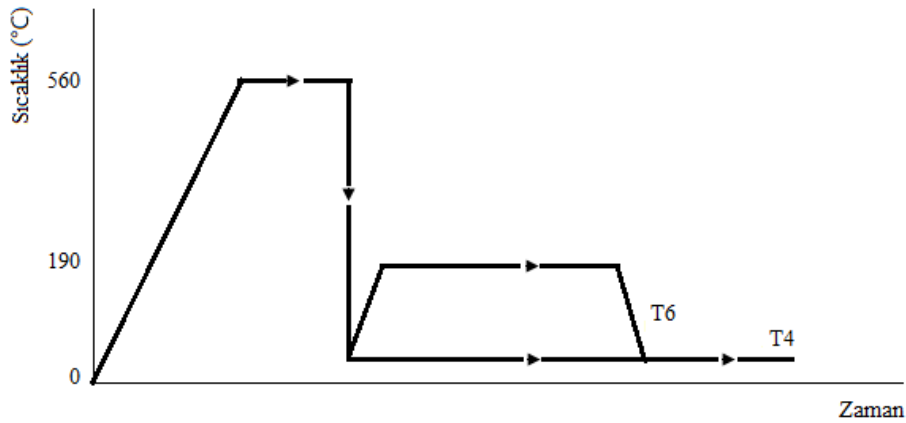
Alaşım Elementleri	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
%Ağırlık	12,5	2,86	0,35	0,033	0,033	Kalan

Tablo 2. Uygulanan ısı işlemler ve kodları (Applied heat treatments and codes)

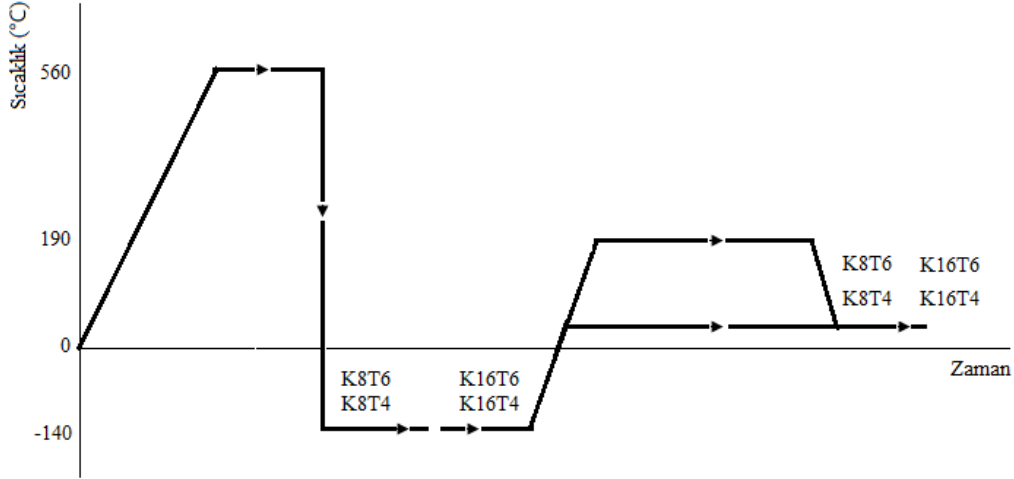
Numune	Isıl İşlem
IY	Isıl İşlem Yapılmayan
T6	Çözeltiye Alma + Su Verme + Suni Yaşlandırma (T6)
T4	Çözeltiye Alma + Su Verme + Doğal Yaşlandırma (T4)
K8T6	Çözeltiye Alma + Kriyojenik İşlem (8 saat) + Suni Yaşlandırma (T6)
K16T6	Çözeltiye Alma + Kriyojenik İşlem (16 saat) + Suni Yaşlandırma (T6)
K8T4	Çözeltiye Alma + Kriyojenik İşlem (8 saat) + Doğal Yaşlandırma (T4)
K16T4	Çözeltiye Alma + Kriyojenik İşlem (16 saat) + Doğal Yaşlandırma (T4)

Tablo 3. Uygulanan ısı işlem sıcaklıkları ve süreleri (Temperature and duration of applied heat treatments)

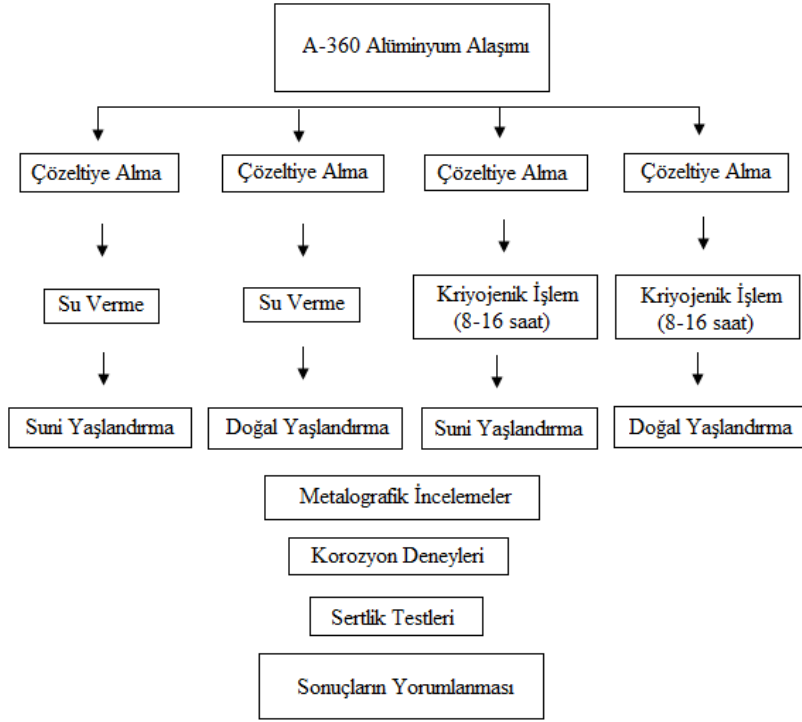
Parametreler	Çözeltiye Alma	Su Verme	T6	T4	Kriyojenik İşlem
Sıcaklık (°C)	560	25	190	25	-140
Süre (saat)	2	-	6	8 ve 16	



Şekil 1. Uygulanan suni (T6) ve doğal (T4) yaşlandırma ısı işlemlerinin sıcaklık-zaman diyagramı
(Temperature-time diagram of applied artificial (T6) and natural (T4) aging heat treatments)



Şekil 2. Uygulanan kriyojenik ısı işlemlerin sıcaklık-zaman diyagramı (Temperature-time diagram of applied cryogenic treatments)



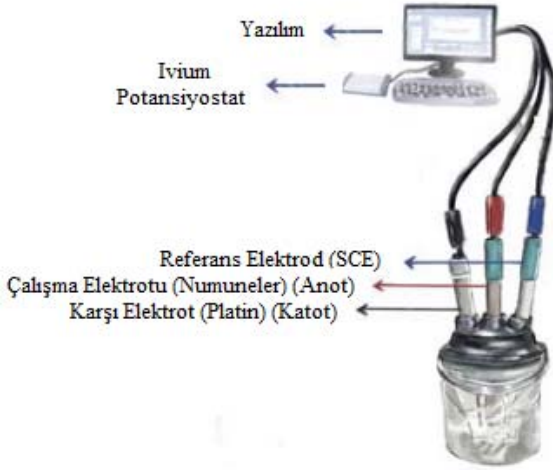
Şekil 3. Çalışmanın deneysel aşamaları (Experimental procedure of the present work)

2.2. Malzemelerin Karakterizasyonu (Characterization of Materials)

Farklı ısı işlemlerin uygulandığı numunelerin korozyon testleri %3,5 NaCl çözeltisinde Ivium marka potansiyostat cihazı ile yapılmıştır. Şekil 4'te gösterilmiş olan üç elektrotlu korozyon hücresinde, çalışma elektrotu olarak ısı işlem uygulanmayan ve farklı ısı işlemler uygulanan alüminyum alaşımı numuneler, karşı elektrot olarak platin ve referans elektrot olarak doymuş kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Çalışma elektrotu olan silindirik numunelerin 1 cm² yüzey alanına sahip kısmı açıkta kalacak şekilde diğer yüzeyler epoksi reçine ile soğuk kalıplama yapılarak kapatılmıştır. Potansiyodinamik korozyon testlerinde, çalışma elektrotu olarak korozyon hücresine yerleştirilen alüminyum alaşımı numunelere belirli aralıklarda potansiyel uygulanarak akımdaki değişimin izlendiği pasifleşme eğrisi ve uygulanan potansiyelle karşılık logaritmik ölçekte akım

değişimi grafiğe aktararak numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerden numunelerin korozyon akım yoğunluğu (I_{cor}), korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon hızı (KH) değerleri belirlenmiştir.

Malzemelerin sertlik değerleri, genel anlamda malzemelerin mekanik özelliklerinin bir göstergesidir. Bu nedenle uygulanan suni ve tabii yaşlandırma ısı işlemleri ile bu yaşlandırma ısı işlemleri öncesinde uygulanan kriyojenik işlemlerin mekanik özelliklere etkilerini belirlemek için sertlik deneyleri yapılmıştır. Sertlik deneylerinde Metkon Duroline universal sertlik test cihazı kullanılmıştır. Ölçüm öncesinde numune yüzeylerine metalografik hazırlama işlemleri yapılmış ve yüzey uygun hale getirilmiştir. Sertlik ölçümleri Vickers yöntemi ile malzeme yüzeyine 15 saniye boyunca 1 kg yük uygulanarak yapılmıştır. Her numunede 5 ölçüm yapılarak bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.



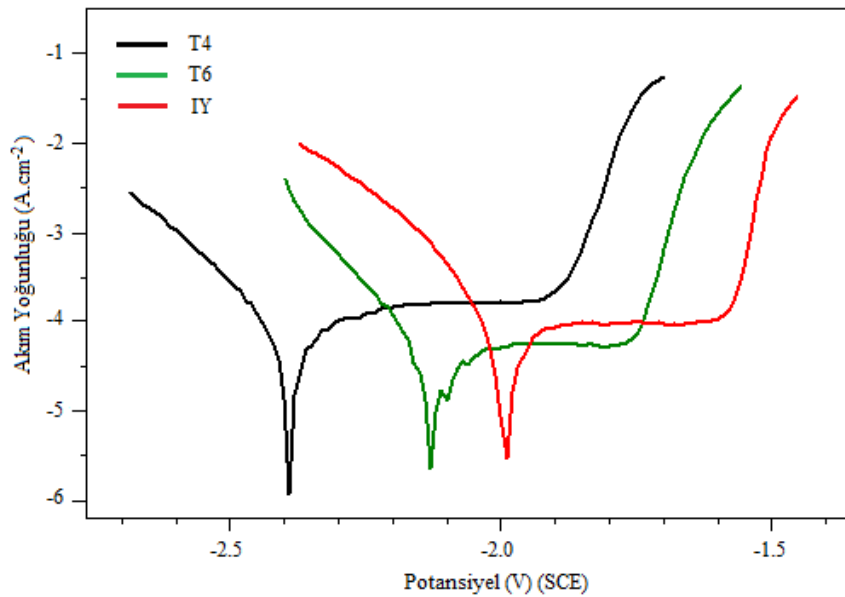
Şekil 4. Elektrokimyasal korozyon deneylerinde kullanılan üç elektrotlu korozyon hücresi (Corrosion cell with three electrodes)

Mikroyapı incelemelerinde metalografik hazırlama işlemleri uygulanan alüminyum alaşımı numunelerin mikroyapı görüntüleri için Olympus marka optik mikroskop kullanılmıştır. Uygulanan ısıl işlemlerin yapı üzerindeki etkisi SEM incelemeleri ile daha detaylı olarak JEOL 6060 marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

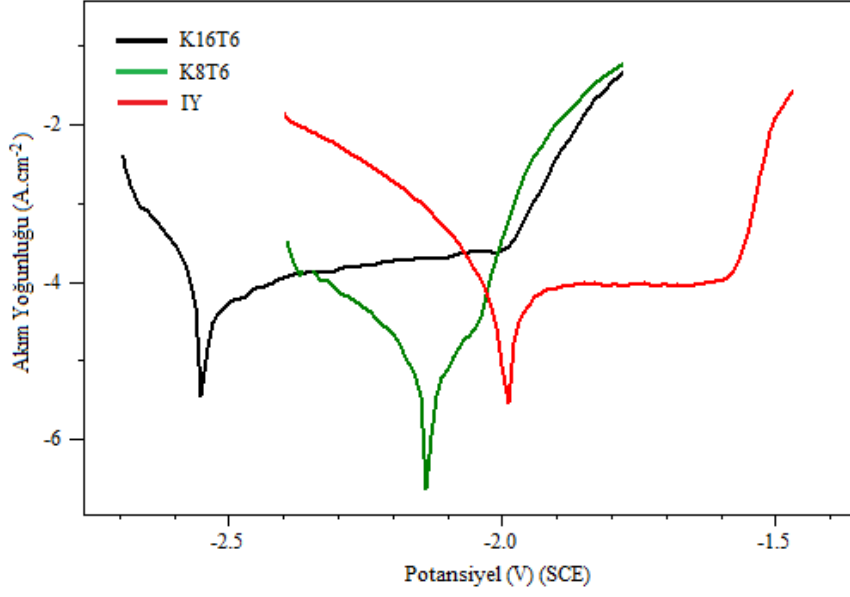
3.1. Korozyon Sonuçları ve Tartışma (Corrosion Results and Discussion)

Isıl işlem uygulanmayan A-360 alüminyum alaşımı numune ile suni (T6) ve doğal (T4) yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanmış A-360 alüminyum alaşımı numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 5’de verilmektedir. 8 saat ve 16 saat kriyojenik işlem ve T6 ısıl işlemi uygulanan numunelerin (K8T6 ve K16T6) Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 6’da yine 8 saat ve 16 saat kriyojenik işlem ve T4 ısıl işlemi uygulanan numunelerin (K8T4 ve K16T4) Tafel polarizasyon eğrileri

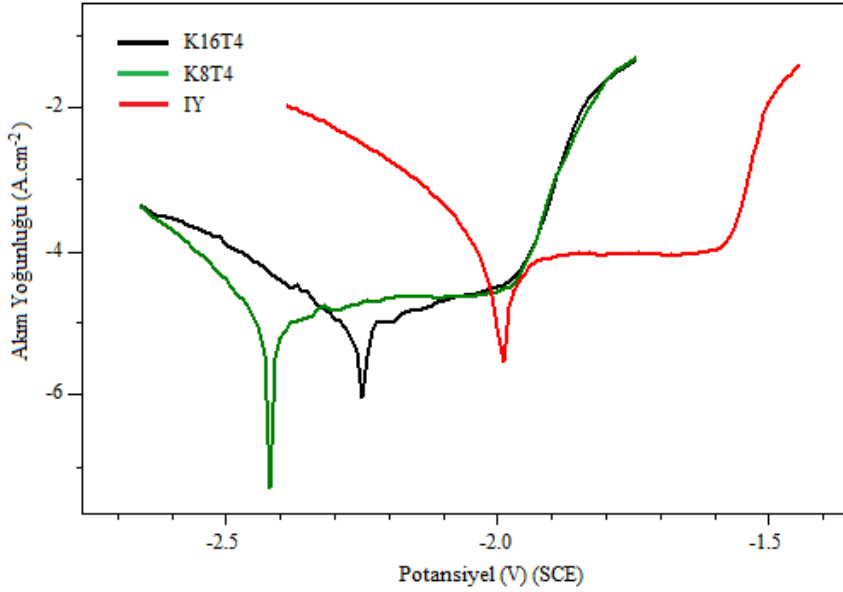


Şekil 5. Isıl işlem yapılmayan (IY), suni (T6) ve doğal (T4) yaşlandırma yapılmış numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of non-heat treated (IY), artificial aged (T6), natural aged (T4) samples)

de Şekil 7’de verilmektedir. Tafel polarizasyon eğrilerinden belirlenen korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}), korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon hızı (KH) değerleri Tablo 4’te görülmektedir. Şekil 5’de görülen Tafel polarizasyon eğrileri, korozyon sayısal verilerinin belirlenebilmesi için gayet uygun şekilde elde edilmiştir. Bu eğrilerde anodik ve katodik kolların lineer kısımlarının kesiştirilmesi ile korozyon potansiyeli ve korozyon akımları belirlenmiştir. Numunelerin yüzey alanı 1 cm^2 olduğu için korozyon akımı ve korozyon akım yoğunluğu değerleri aynıdır. Tablo 4’te görülen korozyon verilerine göre ısıl işlem yapılmayan A-360 alüminyum alaşımının korozyon akım yoğunluğu $9,62 \cdot 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve korozyon hızı $1,049 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ olarak görülmektedir. T6 ısıl işlemi sonucunda alaşımının korozyon akım yoğunluğu $4,69 \cdot 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve korozyon hızı $0,512 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ olarak görülmektedir. T4 ısıl işlemi sonucunda ise alaşımının korozyon akım yoğunluğu $6,27 \cdot 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve korozyon hızı $0,684 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ seviyesindedir. Bu sonuçlara göre; suni yaşlandırma ısıl işlemi ile korozyon hızında %51, doğal yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda ise korozyon hızında %35 oranında azalma olmaktadır. Dolayısıyla hem doğal yaşlandırma hem de suni yaşlandırma ısıl işlemleri A-360 alüminyum alaşımının korozyon dayanımını önemli ölçüde geliştirmektedir. Korozyon dayanımının artmasında suni yaşlandırma işleminin daha etkili olduğu görülmektedir. Şekil 6’da verilen Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen Tablo 4 verilerine göre, yaşlandırma ısıl işlemi öncesinde uygulanan kriyojenik işlem ve sonrasında uygulanan suni yaşlandırma ısıl işlemleri, A-360 alüminyum alaşımının korozyon özelliklerini etkilemektedir. Kriyojenik işlem (8 saat) ve suni yaşlandırma ısıl işlemi ile alaşımın korozyon akımı $8,13 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve korozyon hızı $0,088 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ seviyesinde olmuştur. Kriyojenik işlem (16 saat) ve suni yaşlandırma ısıl işlemi ile alaşımın korozyon akımı $3,67 \cdot 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ve korozyon hızı $0,401 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre; kriyojenik işlem (8 saat) ve suni yaşlandırma ısıl işlemi ile korozyon hızı %92 oranında azalmaktadır. Kriyojenik işlem (16 saat) ve suni yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda ise korozyon hızında %62 oranında azalma olmaktadır. Dolayısıyla yaşlandırma işlemi öncesinde 8 saat ve 16 saat süreli kriyojenik işlem ve devamında yapılan suni yaşlandırma ısıl işlemleri A-360 alüminyum alaşımının korozyon dayanımını önemli ölçüde geliştirmektedir. 8 saat süreli kriyojenik işlem ve suni yaşlandırma uygulamasının alaşımın korozyon dayanımını çok daha yüksek oranlarda geliştirdiği tespit edilmiştir.



Şekil 6. Isıl işlem yapılmayan (IY), kriyojenik işlem (8 saat) +suni yaşlandırma yapılan (K8T6) ve kriyojenik işlem (16 saat) +suni yaşlandırma yapılan (K16T6) numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of non-heat treated (IY), cryogenic treated (8 hours)+artificial aged (K8T6) and cryogenic treated (16 hours)+artificial aged (K16T6) samples)



Şekil 7. Isıl işlem yapılmayan (IY), kriyojenik işlem (8 saat) +doğal yaşlandırma (K8T4) yapılan ve kriyojenik işlem (16 saat) +doğal yaşlandırma (K16T4) yapılan numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of non-heat treated (IY), cryogenic treated (8 hours)+natural aged (K8T4), cryogenic treated (16 hours)+natural aged (K16T4) samples)

Tablo 4. Isıl işlem yapılmayan ve farklı ısı işlemler uygulanmış alüminyum alaşımı numunelerin korozyon verileri (Corrosion data of samples non-heat treated and different heat treated)

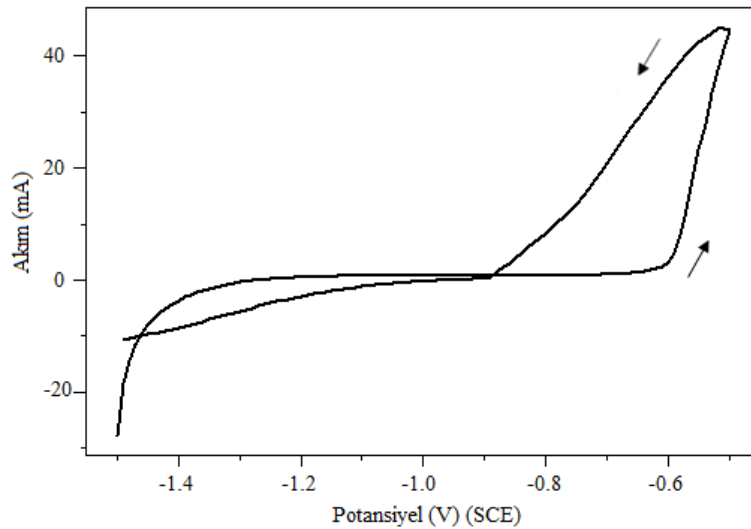
Isıl İşlem	Numune Kodu	\dot{I}_{kor} (A/cm ²)	E_{kor} (V)	KH (mm/y)
Isıl İşlem Yapılmayan	IY	$9,62 \cdot 10^{-5}$	-1,98	1,049
Suni Yaşlandırma (T6)	T6	$4,69 \cdot 10^{-5}$	-2,15	0,512
Doğal Yaşlandırma (T4)	T4	$6,27 \cdot 10^{-5}$	-2,40	0,684
Kriyojenik işlem (8 saat)+suni yaşlandırma (T6)	K8T6	$8,13 \cdot 10^{-6}$	-2,13	0,088
Kriyojenik işlem (16 saat)+suni yaşlandırma (T6)	K16T6	$3,67 \cdot 10^{-5}$	-2,54	0,401
Kriyojenik işlem (8 saat)+doğal yaşlandırma (T4)	K8T4	$1,12 \cdot 10^{-5}$	-2,42	0,122
Kriyojenik işlem(16 saat)+doğal yaşlandırma (T4)	K16T4	$8,48 \cdot 10^{-6}$	-2,25	0,092

Şekil 7’de görülen Tafel polarizasyon eğrileri ve Tablo 4’e göre, kriyojenik işlem ve doğal yaşlandırma ısıl işlemleri, A-360 alüminyum alaşımının korozyon özelliklerini olumlu yönde değiştirmektedir. Kriyojenik işlem (8 saat) ve doğal yaşlandırma ısıl işlemi ile alaşımın korozyon akımı $1,12 \cdot 10^{-5}$ A.cm⁻² ve korozyon hızı 0,122 mm.y⁻¹ seviyesindedir. Kriyojenik işlem (16 saat) ve doğal yaşlandırma ile alaşımın korozyon akımı $8,48 \cdot 10^{-6}$ A.cm⁻² ve korozyon hızı 0,092 mm.y⁻¹ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre kriyojenik işlem (8 saat) ve doğal yaşlandırma ısıl işlemi ile korozyon hızı %88 oranında azalmaktadır. Kriyojenik işlem (16 saat) ve doğal yaşlandırma ısıl işlemi ile korozyon hızında %91 oranında azalma olmaktadır. Dolayısıyla kriyojenik işlem sonrasında doğal yaşlandırma ısıl işlemleri uygulaması, A-360 alüminyum alaşımının korozyon dayanımını önemli ölçüde geliştirmektedir. İki farklı sürede uygulanan kriyojenik ısıl işlemler alaşımın korozyon dayanımını yaklaşık olarak aynı seviyelerde geliştirmiştir.

Korozyon verileri incelendiğinde; hem sadece yaşlandırma ısıl işlemi yapılması hem de yaşlandırma öncesi kriyojenik işlem uygulanması ile A-360 alüminyum alaşımının korozyon dayanımının büyük oranlarda geliştiği görülmektedir. Özellikle yaşlandırma ısıl işlemi öncesinde kriyojenik işlem uygulaması, alaşımın korozyon hızının azalmasında çok daha fazla etkili olmuştur. Bu gelişimde, kriyojenik işlem ile alüminyum alaşımının yapısında ve mikroyapısında meydana gelen değişimler etkili olmaktadır. Uygulanan kriyojenik işlem, alüminyum alaşımının mikroyapısını, tane boyutunu, tane yönelmesini, ikinci faz oluşumunu etkilemektedir [4, 10, 13, 15]. Sonia vd. 6082 alüminyum alaşımında kriyojenik işlemin etkilerini inceledikleri çalışmada [4], uygulanan kriyojenik işlem sonucunda alaşım mikroyapısında tane boyutunun azaldığını, kriyojenik işlem süresi arttırıldığında tane boyutundaki azalmanın daha fazla olduğunu bildirmişlerdir. Kumar vd. 7075 alüminyum alaşımına uygulanan kriyojenik işlem ile ilgili çalışmasında [10], kriyojenik işlem uygulamasının alaşımın matrix tane yapısını incelediğini belirlemişlerdir. Aynı çalışmada, uygulanan kriyojenik işlem ile alaşım yapısında oluşan intermetalik ikinci fazların yapıdaki dağılımlarının daha homojen olduğu da görülmüştür. Zhou vd. 2024 alüminyum alaşımında kriyojenik işlemin etkilerinin incelendiği çalışmada [15], kriyojenik işlem ile daha ince ve daha uniform dağılımlı tane yapısının oluştuğu bildirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca kriyojenik işlem uygulamasının alaşım yapısında daha yüksek yoğunluklu dislokasyon üretebileceği ve ikinci faz çökeltileri oluşumunun tetiklenebileceği belirtilmiştir.

Metalik malzemelere uygulanan kriyojenik işlem sonrasında metalin kristal kusurlarının azaldığı, kristal kafes içindeki atom boşluklarının azalması nedeniyle kristal yapı homojenliği elde edildiği ve işlem sonrasında kalıntı gerilmelerin daha dengeli olduğu diğer çalışmalardan bilinen bir durumdur [1, 5, 6]. Pan vd. yaptıkları bir çalışmada [20], alüminyum-çinko-magnezyum-bakır alaşımında kriyojenik işlem uygulamasının, alaşımdaki kalıntı gerilmeler nedeni ile alt tane sınırı ve küçük açılı tane sayısını arttırdığı ve yapısal heterojenliğin azaldığı bildirilmektedir. İki farklı çalışmada [23, 26] ise, kriyojenik işlemin etkisi ile alaşımın yapısında oluşan çökeltilerin daha ince morfolojide oluştuğu ve homojen bir şekilde dağıldığı belirtilmiştir.

Yaptığımız çalışmada kullanılan A-360 alüminyum-silisyum alaşımı numunelere ait Şekil 9 ve Şekil 10’da verilen mikroyapı görüntülerinde de bu yapısal değişim durumu görülmektedir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, alüminyum alaşımına sadece yaşlandırma ısıl işlemi ve yaşlandırma öncesi uygulanan kriyojenik işlem ile özellikle ötektik yapıya sahip bölgelerde silisyum fazında mikroyapısal küçülme ve daha homojen dağılımlı mikroyapıların oluştuğu görülmektedir. Isıl işlem uygulanmamış numunelerde (Şekil 9a ve Şekil 10a) özellikle silisyum fazlarının daha uzun çubuklar şeklinde olduğu, ötektik katılaşmanın olduğu bölgelerde toplandıkları ve homojen dağılmadıkları görülmektedir. Bu mikroyapısal oluşumlar, mekanik özellikleri de olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle uygulanan yaşlandırma işlemleri, bu olumsuzlukları gidermek için tercih edilen bir ısıl işlemidir. Ancak yaşlandırma işleminde çözeltilen alaşımlar oda sıcaklığına kadar soğutulmuş aşırı doymuş katı eriyik yapılar elde edilmektedir. Bu işlemlerde soğutma hızları yaklaşık 20-27°C/s aralığında olmaktadır. Bu soğutma hızına bağlı olarak oluşacak çökelti fazı miktarı ve boyutları da değişmekte, soğutma hızı arttıkça çökelti faz miktarı artmakta ve boyutu da küçülmektedir. Yaşlandırma sonucunda oluşan fazlar aynı zamanda küresel forma dönüşmektedir. Diğer yandan, çözeltilen alaşımın ısıl işleminden sonra uygulanan yaşlandırma işleminin türü de oluşacak çökelti faz şeklini ve miktarını etkilemektedir. Suni yaşlandırma ile (Şekil 9b ve Şekil 10b) daha çok sayıda ve daha küçük taneli çökelti fazlar meydana gelirken, doğal yaşlandırma uygulaması (Şekil 9c ve Şekil 10c) sonucunda ise daha büyük boyutlu/kaba ve az sayıda çökelti faz oluşumu gerçekleşmektedir. Doğal ve suni yaşlandırma işlemleri çökelti fazların boyut ve dağılımını etkilerken, aynı zamanda benzer şekilde silisyum fazını da etkilemektedir.



Şekil 8. Alüminyum alaşımı numunenin pasifleşme eğrisi (Passivation curve of aluminum alloy sample)

Alüminyum alaşımlarında yüzeyde oluşan pasif özellikteki çok ince Al_2O_3 filmi, bu alaşımların korozyon dayanımlarında çok etkilidir. Alaşım yapısındaki homojensizlikler, atom boşlukları, tane boyutu ve morfolojisi, ikinci faz çökeltileri, kalıntı gerilmeler gibi faktörler korozyon türünü ve korozyon davranışını etkilemektedir. Tuzlu su ortamında alüminyum alaşımlarında oluşabilecek muhtemel korozyon türü çukur korozyondur. İkinci faz çökeltileri etkisi ile galvanik korozyon, kalıntı gerilmelerin etkisiyle gerilmeli korozyon oluşumu da olasıdır. Bu çalışmada alüminyum alaşımına uygulanan kriyojenik işlem ile yapısal olarak alaşımda meydana gelen değişimlerin korozyon davranışını etkilediği düşünülmektedir. Kriyojenik işlem ile ikinci faz çökeltilerinin çekirdeklenme yerleri artırmakta, çökeltilsiz bölgeler azalmakta, atom boşlukları gibi kristal yapı kusurları azalabilmekte, böylece daha homojen bir yapı oluşmaktadır. Bu homojen yapı nedeniyle korozyon hızı azalarak alaşımın korozyon dayanımı artmaktadır. Alaşım yapısının homojen olması yüzeydeki pasif oksit filminin de kararlılığını artırarak korozyon dayanımı artışına katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen korozyon deneyi verilerine göre, uygulanan kriyojenik işlem ile alaşım yapısında meydana gelen değişimlerin çoğunluğu korozyon dayanımını geliştirici değişimler olmuştur.

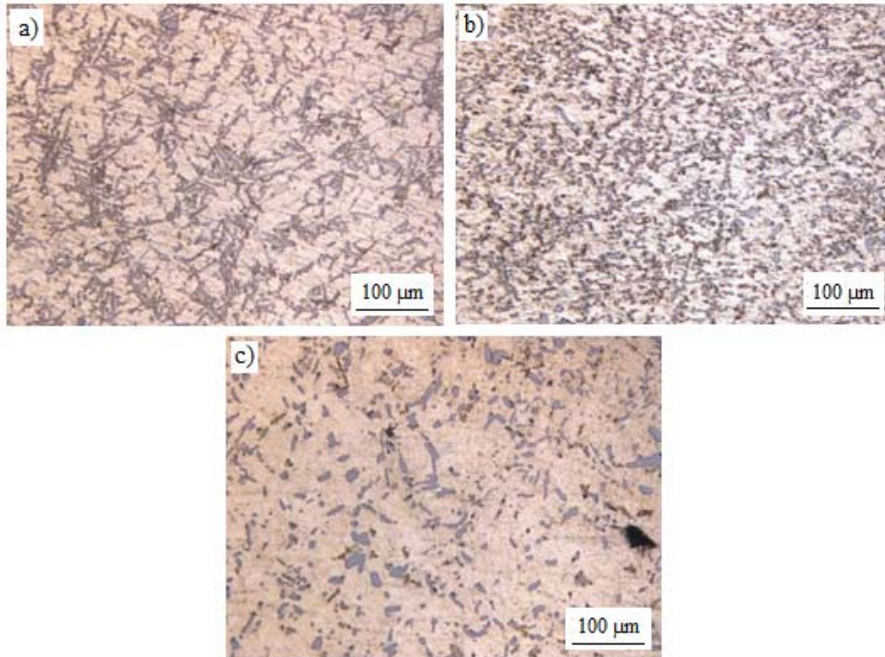
Şekil 8'de bu çalışmada kullanmış olduğumuz bakır ilaveli A-360 alüminyum alaşımının pasifleşme eğrisi verilmektedir. Bu eğriyi elde edebilmek için korozyon hücresindeki numuneye daha negatif potansiyelden (-1,5 V) daha pozitif yöndeki potansiyele (-0,5 V) doğru artan yönde potansiyel uygulanmış ve bu potansiyel değerinden (-0,5 V) sonra başlangıç potansiyeline (-1,5 V) dönüş yapılmıştır. Buradaki amaç, alaşımdan geçen akım değişimini izleyerek alaşımın pasifleşme davranışı hakkında bilgi edinmektir. Normalde alüminyumun yükseltgenme durumu için elektrot potansiyeli oldukça yüksek olup anodik (aktif) davranış göstermektedir. Yani elektron verip pozitif iyon haline geçme ve oksitlenme eğilimi fazladır. Fakat bu mekanizma sonrası yüzeyde hızla oluşan oksit filmi pasifleşme denilen durumu sağlamakta ve korozyona karşı iyi bir dayanım sağlamaktadır. Grafikte sıfır akım seviyesinde eğrinin yatay olarak görüldüğü potansiyel bölgesi bu alaşımın pasif davranış

gösterdiği potansiyel aralığıdır. Bu bölgede alüminyum alaşımı yüzeyinde pasif özellikte alüminyum oksit (Al_2O_3) filmi oluşmakta ve oldukça dayanıklı olan bu pasif film, alüminyum alaşımını yaklaşık -0,6 V potansiyel değerine kadar korozyona karşı korumaktadır. -0,6 V potansiyel değerinden sonra ise alaşımdan geçen akım hızla yükselmektedir. Akımdaki bu yükselişin nedeni, tuzlu su ortamında saldırgan klor iyonlarının da etkisiyle pasif filmin yüksek potansiyel değerlerinde koruyuculuk özelliğini kaybetmesidir. Potansiyelin tekrar negatif yöne döndürülmesiyle birlikte tepe noktasından itibaren akım değerleri de düşmeye başlamaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının korozyon dayanımında bu pasifleşme mekanizması oldukça önemlidir. Bu pasif filmin bozunmadan kararlı yapıda kalabilmesi ve korozif ortama karşı film altındaki alaşım yüzeyini koruyabilmesi, alaşımın korozyon dayanımını da geliştirmektedir. Bu çalışmada uygulanan kriyojenik işlemler ile alaşımda üstteki paragrafta anlatılan yapısal değişimlerin olması, özellikle de homojen bir yapının oluşmasını, pasif filmin kararlılığının korunmasında etkili olduğu düşünülmektedir.

Farklı alüminyum alaşımlarına uygulanan kriyojenik işlemin, alaşımların korozyon davranışına etkilerini inceleyen çok az çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle alüminyum-çinko-magnezyum-bakır alaşımları [20, 26] ve alüminyum-bakır alaşımları incelenmiş ve uygulanan kriyojenik işlemler ile bu alaşımların korozyon dayanımlarının geliştiği bildirilmiştir [21, 23, 24, 27]. Diğer çalışmalarda farklı alüminyum alaşımları için elde edilen sonuçlar, bu çalışmada incelenen A-360 alüminyum-silisyum alaşımı için elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

3.2. Sertlik Sonuçları ve Tartışma (Hardness Results and Discussion)

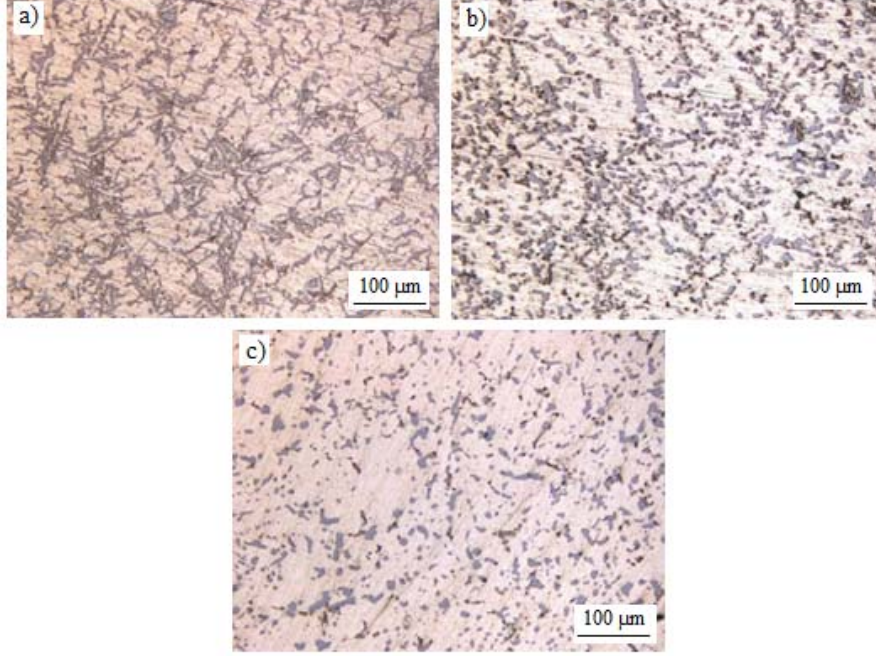
Bilindiği gibi malzemelerin sertlik özelliği akma dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve aşınma dayanımı gibi diğer mekanik özellikler ile doğru orantılıdır. Bu nedenle alüminyum alaşımı numunelere Vickers sertlik testi uygulanmıştır. Isıl işlem yapılmayan, suni ve doğal yaşlandırma yapılan ve yaşlandırma ısıl işlemi öncesinde 8-16 saat kriyojenik işlemlerin uygulandığı A-360



Şekil 9. a) Isıl işlem yapılmayan, b) suni yaşlandırma yapılmış, c) doğal yaşlandırma yapılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri (Microstructure images of non-heat treated (a), artificial aged (b) and natural aged (c) samples)

alüminyum alaşımı numunelerde, uygulanan ısı işlemlerin malzemenin sertlik özelliğine etkilerini belirlemek için yapılan sertlik test sonuçları Tablo 5’de, sertlik değişim grafiği ise Şekil 11’de verilmektedir. Isıl işlem yapılmayan numunenin sertlik değeri 108 HV iken, T6 ve T4 yaşlandırma ısı işlemleri uygulanması ile bu değer

sırasıyla 130 HV ve 129 HV olarak ölçülmüştür. 8 saat kriyojenik işlem sonrasında T6 yaşlandırma işlemi yapılan numunede sertlik değeri 140 HV olarak ölçülürken, 16 saat kriyojenik işlem sonrasında uygulanan T6 yaşlandırma işlemi sonucunda sertlik değeri 144 HV olmuştur. 8 saat kriyojenik işlem sonrasında T4 yaşlandırma işlemi

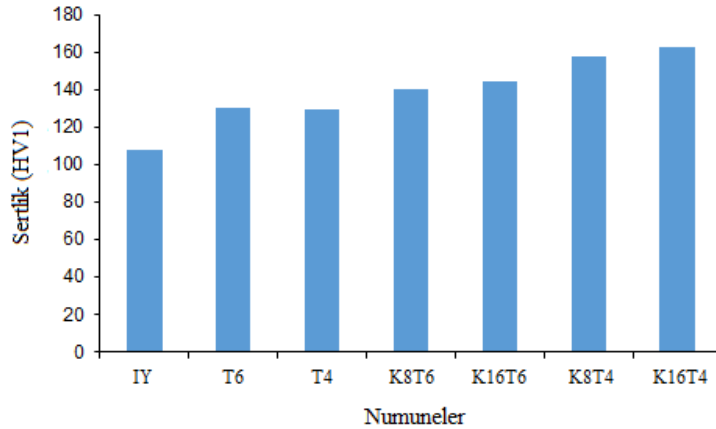


Şekil 10. a) Isıl işlem yapılmayan, b) kriyojenik işlem ve suni yaşlandırma yapılmış, c) kriyojenik işlem ve doğal yaşlandırma yapılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

(Microstructure images of non-heat treated (a), cryogenic artificial aged (b) and cryogenic natural aged (c) samples)

Tablo 5. Isıl işlem yapılmayan ve farklı ısı işlemler uygulanmış alüminyum alaşımı numunelerin sertlik değerleri
(Hardness values of samples non-heat treated and different heat treated)

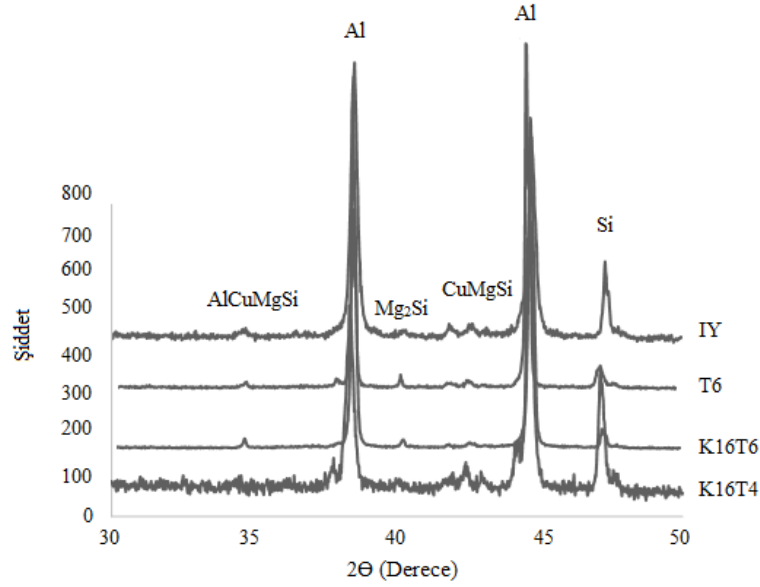
Isıl İşlem	Numune Kodu	Sertlik (HV1)	Sertlik Artış Oranı (%)
Isıl İşlem Yapılmayan	IY	108	-
Suni Yaşlandırma (T6)	T6	130	20
Doğal Yaşlandırma (T4)	T4	129	19
Kriyojenik işlem (8 saat) +suni yaşlandırma (T6)	K8T6	140	30
Kriyojenik işlem (16 saat) +suni yaşlandırma (T6)	K16T6	144	33
Kriyojenik işlem (8 saat) +doğal yaşlandırma (T4)	K8T4	158	46
Kriyojenik işlem (16 saat) +doğal yaşlandırma (T4)	K16T4	163	51



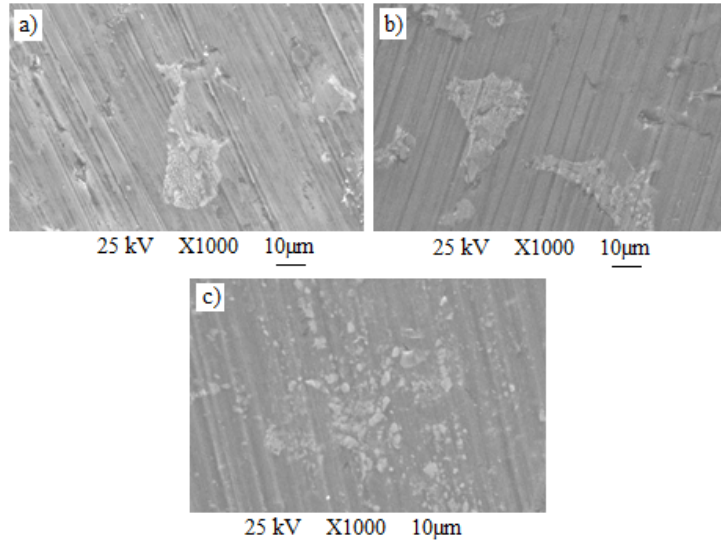
Şekil 11. Isıl işlem yapılmayan (IY) ve farklı ısı işlemler (T6, T4, K8T6, K16T6, K8T4, K16T4) yapılan numunelerin sertlik değerleri
(Hardness values of non-heat treated (IY) and different heat-treated (T6, T4, K8T6, K16T6, K8T4, K16T4) samples)

yapılan numunede sertlik değeri 158 HV iken, 16 saat kriyojenik işlem sonrasında uygulanan T4 yaşlandırma işlemi sonucunda sertlik değeri 163 HV olarak belirlenmiştir. Sertlik değişim grafiğinde görüldüğü gibi, uygulanan T6 ve T4 yaşlandırma ısıl işlemleri, malzemenin sertlik değerini ısıl işlem yapılmayan numuneye göre yaklaşık 22 HV (%20) artırmıştır. T6 yaşlandırma ısıl işlemi öncesinde uygulanan 8 ve 16 saat süreli kriyojenik işlem ile sertlik değerindeki artışlar, ısıl işlem yapılmayan numuneye göre 32 HV (%30) ve 36 HV (%33) olmuştur. T4 yaşlandırma ısıl işlemi öncesinde uygulanan 8 ve 16 saatlik kriyojenik işlemler ise sertliği, ısıl işlem yapılmayan numuneye göre 50 HV (%46) ve 55 HV (%51) artırmıştır. Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısıl işlemleri sonrasında sertliğin artması beklenen bir durumdur. Çünkü yaşlandırma ısıl işlemleri ile yapıda ikincil faz çökeltileri oluşmakta ve bu çökeltiler deformasyon esnasında dislokasyon hareketlerine engeller oluşturarak dislokasyonların hareketlerini zorlaştırmaktadır

[10, 12]. Yaşlandırma ısıl işlemleri öncesi uygulanan kriyojenik işlem ile alüminyum alaşımının sertliğinde meydana gelen artış daha fazla olmuştur. 8 ve 16 saat olmak üzere iki farklı sürede uygulanan kriyojenik işlemlerde sürenin fazla uygulanması (16 saat), sertlik özelliğinin daha fazla artışı sağlamıştır. Kriyojenik işlem, oluşan ikincil faz çökeltilerinin yaşlandırma ısıl işlemi yapılanlara göre daha küçük boyutlu olmasını sağlamaktadır. Çökelti boyutu küçüldükçe dislokasyonların hareketi daha da zorlaşmaktadır. Ayrıca çökelti miktarı artmakta ve dağılım sertleşmesi meydana gelmektedir. Kriyojenik işlemler ile atom boşlukları gibi kristal yapı kusurları azalmakta, alaşımda yapısal dengelenme ve daha homojen bir mikroyapı oluşabilmektedir. Bu durum kriyojenik işlem sonrasında sertlik değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan alüminyum-silisyum alaşımında Mg_2Si , $CuMgSi$, $AlCuMgSi$ türü çökeltiler oluşmaktadır. Şekil 12’de verilen numunelerin XRD grafiklerinde, yapıda oluşan fazların pikleri görülmektedir. Ayrıca



Şekil 12. Isıl işlem yapılmayan (IY) ve farklı ısıl işlemler (T6, K16T6, K16T4) yapılan numunelerin XRD grafikleri (XRD patterns of non-heat treated (IY) and different heat-treated (T6, K16T6, K16T4) samples)



Şekil 13. a) Suni yaşlandırma, b) doğal yaşlandırma, c) kriyojenik işlem yapılan numunelerin SEM mikroyapıları (SEM micrographs of artificial aged (a), natural aged (b), cryogenic aged (c) samples)

kriyojenik işlem, alaşım mikroyapısının daha fazla incelmelerini sağlamaktadır. Şekil 13'de ısıtma işlemi görmüş numunelere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Mikroyapıların incelenmesi, dislokasyonların hareketine diğer bir engel durumunu oluşturan toplam tane sınırı alanının artırılmasına neden olacak faz ve dolayısıyla tane küçülmelerini işaret etmektedir. Yapılmış olan diğer çalışmalarda da [12, 16, 28, 29] başka alüminyum alaşımlarında kriyojenik işlem uygulamasının benzer etkiler ile alaşımların sertlik değerlerinde artış sağladığı bildirilmektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada döküm yöntemi ile elde edilen A-360 alüminyum-silisyum alaşımına suni yaşlandırma (T6), doğal yaşlandırma (T4) ısıtma işlemleri ve bu yaşlandırma ısıtma işlemleri öncesinde 8 ve 16 saat süreli kriyojenik işlem uygulanmıştır. Uygulanan suni yaşlandırma, doğal yaşlandırma ve kriyojenik işlemlerin A-360 alüminyum-silisyum alaşımının tuzlu su ortamındaki korozyon özelliklerine ve sertlik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Alaşıma uygulanan suni yaşlandırma ısıtma işlemi ile alaşımın korozyon dayanımında yaklaşık %51, doğal yaşlandırma ısıtma işlemi ile yaklaşık %35 oranında iyileşme elde edilmiştir.
- Suni yaşlandırma öncesinde iki farklı sürede (8 ve 16 saat) uygulanan kriyojenik işlem sonucunda alaşımın korozyon dayanımında %92 ve %62 oranında gelişme sağlanmıştır.
- Doğal yaşlandırma öncesinde uygulanan iki farklı süredeki (8 ve 16 saat) kriyojenik işlemler ile korozyon dayanımında %88 ve %91 oranında artış olmuştur.
- Yaşlandırma ısıtma işlemleri ve yaşlandırma öncesinde uygulanan kriyojenik işlemler ile alaşımın korozyon dayanımında gerçekleşen artışta, uygulanan ısıtma işlemleri ile alaşım mikroyapısındaki inceleme ve homojenleşmenin etkili olduğu düşünülmektedir.
- Alüminyum alaşımına uygulanan suni ve doğal yaşlandırma ısıtma işlemleri ile alaşım sertliğinde yaklaşık 22 HV artış olmuştur. Bu sertlik artışında yaşlandırma sonucu yapıda oluşan ikinci faz çöktürücü ve çözücü alma işlemi sonrasında uygulanan hızlı soğutma ile oluşan mikroyapı inceliği etkili olmaktadır.
- Suni yaşlandırma ısıtma işlemi öncesinde iki farklı sürede (8 ve 16 saat) uygulanan kriyojenik işlem sonucunda alaşımın sertliğinde 32 HV ve 36 HV gelişme sağlanmıştır.
- Doğal yaşlandırma öncesinde uygulanan iki farklı süredeki (8 ve 16 saat) kriyojenik işlemler ile alaşımın sertliğinde 50 HV ve 55 HV artış olmuştur.
- Yaşlandırma ısıtma işlemi öncesinde uygulanan kriyojenik işlem süresinin 8 saatten 16 saate çıkarılması alüminyum alaşımının sertliğini bir miktar daha fazla artırmıştır.
- Uygulanan yaşlandırma ısıtma işlemi ve kriyojenik işlemler ile alüminyum alaşımının sertliğinde meydana gelen artış olayında, hızlı soğutma sonucunda alaşım mikroyapısının inceliği, ikinci faz çöktürücülerinin oluşumu, bu çöktürücülerin dislokasyon hareketlerine engel oluşturması etkili olmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Sonar, T., Lomte, S., Gogte, C., Cryogenic treatment of metal-a review, *Materials Today: Proceedings*, 5, 25219-25228, 2018.
2. Yao, E., Zhang, H., Ma, K., Ai, C., Gao, Q., Lin, X., Effect of deep cryogenic treatment on microstructures and performances of aluminum alloys: a review, *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 3661-3675, 2023.
3. Harsha, S., Dasharath, S.M., Effect of cryogenic heat treatment & ageing on ultrafine grained aluminum-lithium alloy- a review, *Materials Today: Proceedings*, 45, 338-348, 2021.
4. Sonia, P., Verma, V., Saxena, K.K., Kishore, N., Rana, R.S., Effect of cryogenic treatment on mechanical properties and microstructure of

- aluminum 6082 alloy, *Materials Today: Proceedings*, 26, 2248-2253, 2020.
5. Kızılkaya, E., Ovalı, İ., The effects of shallow cryogenic process on the mechanical properties of AISI 4140 steel, *Gazi University Journal of Science, Part C*, 6 (1), 137-148, (2018).
6. Höke G., Şahin, İ., Çinicı, H., Fındık, T., Effect of cryogenic processes on the mechanical properties of SAE 4140 steel, *Journal of Selçuk-Technic*, 13 (2), 25-37, 2014.
7. Zhang, W., Bai, P., Yang, J., Xu, H., Dang, J., Du, Z., Tensile behavior of 3104 aluminum alloy processed by homogenization and cryogenic treatment, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 2453-2458, 2014.
8. Güney, F., Kam, M., Gerengi, H., Kaya, E., Yıldız, M., Investigation of the effect of deep cryogenic treatment with different holding time on the corrosion behavior of cementation steel, *Bilecik Şeyh Edebali University Journal of Science* 9 (2), 703-712, 2022.
9. Vamsi, K., Krishnakumar, M., Saravanan, R., Effect of preheating temperatures on distribution of FeTiO₃ on A 360 aluminum alloy by stirring, *Materials Today: Proceedings*, 27 (3), 2412-2417, 2020.
10. Kumar, S.D., Magarajan, U., Kumar, S.S., Millan, R., Effect of deep cryogenic treatment on the microstructural, mechanical and ballistic properties of AA7075-T6 aluminum alloy, *Defense Technology*, 30, 101-110, 2023.
11. Feng, B., Gu, B., Li, S., An efficient pre-hardened cryogenic forming process for AA7075 aluminum alloy sheets, *Journal of Manufacturing Processes*, 92, 534-547, 2023.
12. Klug, M.J., Tegg, L., Klug, P.J., Drazic, G., Almasy, L., Lim, B., Cairney, J.M., Podgornik, B., Multiscale modification of aluminum alloys with deep cryogenic treatment for advanced properties, *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 3062-3073, 2022.
13. Klug, M.J., Rezar, R., Klug, P.J., Podgornik, B., Influence of deep cryogenic treatment on natural and artificial aging of Al-Mg-Si alloy EN AW 6026, *Journal of Alloys and Compounds*, 899, 163323, 2022.
14. Madhloom, M.A., Ataiwi, A.H., Dawood, J.J., Influence of cryogenic treatment on hardness, tensile properties, and microstructure of aluminum alloy AA6061, *Materials Today: Proceedings* 60, 2157-2161, 2022.
15. Zhou, J., Li, J., Xu, S., Huang, S., Meng, X., Sheng, J., Zhang, H., Sun, Y., Feng, A., Improvement in fatigue properties of 2024-T351 aluminum alloy subjected to cryogenic treatment and laser peening, *Surface & Coatings Technology*, 345, 31-39, 2018.
16. Araghchi, M., Mansouri, H., Vafaei, R., Guo, Y., A novel cryogenic treatment for reduction of residual stresses in 2024 aluminum alloy, *Materials Science & Engineering A*, 689, 48-52, 2017.
17. Nazarian, H., Krol, M., Pawlyta, M., Vahdat, S.E., Effect of sub-zero treatment on fatigue strength of aluminum 2024, *Materials Science & Engineering A*, 710, 38-46, 2018.
18. Dong, F., Huang, S., Yi, Y., Huang, K., Jia, Y., Yu, W., Zhao, Z., Comparative study on the formability and microstructure evolution of different tempered Al-Cu-Li alloy sheets during room and cryogenic temperature forming process, *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 3137-3150, 2023.
19. Su, R., Jia, Y., Li, G., Qu, Y., Li, R., Effect of deformation amount on microstructure and properties of AA2024-T8I4 with deep cryogenic treatment, *Journal of Alloys and Compounds*, 947, 169578, 2023.
20. Pan, Y., Duan, S., Guo, F., Matsuda, K., Wang, T., Zou, Y., Stress corrosion inhibition mechanism of hot rolled medium thickness Al-Zn-Mg-Cu plate by cryogenic-aging treatment, *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 894-910, 2023.
21. Ma, S., Su, R., Li, G., Qu, Y., Li, R., Effect of deep cryogenic treatment on corrosion resistance of AA7075-RRA, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 167, 110747, 1-7, 2022.
22. Vicere, A., Roventi, G., Paoletti, C., Cabibbo, M., Bellezze, T., Corrosion behavior of AA6012 aluminum alloy processed by ECAP and cryogenic treatment, *Metals*, 9 (4), 1-13, 2019.
23. Su, R., Ma, S., Wang, K., Li, G., Qu, Y., Li, R., Effect of cyclic deep cryogenic treatment on corrosion resistance of 7075 alloy, *Metals and Materials International*, 28, 862-870, 2022.
24. Zhang, W., Jang, J., Dang, J., Liu, Y., Xu, H., Effects of cryogenic treatment on mechanical properties and corrosion resistance of LC4 aluminum alloy, *Advanced Materials Research*, 627, 694-697, 2013.
25. Kucerova, L., Hajek, J., Vitek, J., The effect of cryogenic treatment on mechanical properties, wear and corrosion resistance of aluminum alloy AW7075, *Manufacturing Technology*, 20 (1), 60-65, 2020.

26. Ma, S., Su, R., Wang, K., Yang, Y., Qu, Y., Li, R., Effect of deep cryogenic treatment on wear and corrosion resistance of an Al-Zn-Mg-Cu alloy, Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 62 (1), 89-96, 2021.
27. Cabeza, M., Feijoo, I., Merino, P. and Trillo, S., Effect of the deep cryogenic treatment on the stress corrosion cracking behavior of AA 2017-T4 aluminum alloy, Materials and Corrosion, 67 (5), 504-512, 2016.
28. Aksöz S., Özdemir A.T., Çalm R., Altınok Z., Bostan B., Effects of sintering, ageing and cryogenic treatments on structural and mechanical properties of AA2014-B₄C composite, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (4), 831-839, 2013.
29. Li, G.R., Cheng, J.F., Wang, H.M., Li, C.Q., The influence of cryogenic-ageing circular treatment on the microstructure and properties of aluminum matrix composites, Journal of Alloys and Compounds 695, 1930-1945, 2017.

