



Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretilmiş AA6060 Profilde Ön Isıtma Sıcaklığının Sertliğe Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması

İsmail SARAÇ^{1*} , Mehmet Akif DURNA¹ 

¹Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

AA6060 alaşımı,
Ekstrüzyon,
Yaşlandırma,
Ön ısıtma sıcaklığı

Özet

Alüminyum alaşımları diğer metal alaşımlarıyla karşılaştırıldığında, günümüz endüstrisinde büyük bir paya sahiptir. Alüminyum ekstrüzyon teknolojileri endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Ekstrüzyon prosesi sonrasında ürünün mekanik özelliklerini etkileyen üretim parametrelerinden birisi de biyet ön ısıtma sıcaklığıdır. Deneysel yöntem kullanılarak yapılan bu çalışmada, günümüzde en çok kullanılan Alüminyum alaşımlarından olan AA6060 alaşımının, sabit üretim koşullarında ve zımba hızında, farklı ön ısıtma sıcaklıklarında, yapay yaşlandırma prosesi öncesinde ve sonrasında sertlik değerleri ölçülmüştür. Çalışmanın amacı, üretim sonucunda sıklıkla karşılaşılan, istenilen sertlik değerlerini yakalayamama sorununa ön ısıtma sıcaklığının etkisini ortaya koymaktır. Deneysel çalışma sonucunda, farklı ön ısıtma sıcaklıkları kullanılarak üretilen numunelerden alınan örneklerin ön ısıtma sıcaklığı ile sertlik ilişkisi gösterildi. Elde edilen verilere göre, ideal ön ısıtma sıcaklığının yakalanmasıyla ekstrüzyon ve yaşlandırma prosesi sonucunda AA6060 alaşımının sertlik değerinde önemli bir gelişme elde edilmiştir.

*e-posta: ismailsarac@aksaray.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için:

İsmail SARAÇ; Mehmet Akif DURNA, "Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretilmiş AA6060 Profilde Ön Isıtma Sıcaklığının Sertliğe Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması", Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, C. 6, s 1, ss. 219-231

How to cite this article:

İsmail SARAÇ; Mehmet Akif DURNA, "Experimental Investigation of the Effect of Preheating Temperature on Hardness of AA6060 Profile Produced by Extrusion Method", Bayburt University Journal of Science, vol. 6, no 2, pp. 219-231

Experimental Investigation of the Effect of Preheating Temperature on Hardness of AA6060 Profile Produced by Extrusion Method

Keywords:

AA6060 alloy,
Extrusion,
Aging,
Preheating
temperature

Abstract

Compared with other metal alloys, aluminum alloys have a large share in today's industry. Aluminum extrusion technologies are used in many areas of industry. One of the production parameters that affect the mechanical properties of the product after the extrusion process is the billet preheating temperature. In this research, hardness values of AA6060 alloy, which is one of the most widely used aluminium alloys today, were measured before and after the artificial aging process at different preheating temperatures, under constant manufacturing conditions and punching speed. The aim of the study is to reveal the effect of preheating temperature on the problem of not achieving the desired hardness values, which is frequently encountered as a result of production. As a result of the experimental study, the correlation between the preheat temperature and hardness was demonstrated by comparing the samples extracted from the samples produced with different preheating temperatures. According to the obtained data, a significant improvement was achieved in the hardness value of AA6060 alloy as a result of the extrusion and aging process by achieving the ideal preheating temperature.

1 GİRİŞ

Alüminyum ekstrüzyon teknolojileri günümüz endüstrisinin büyük bir gereksinimidir. Özellikle mimari ürünler ve malzeme pazarındaki kullanıcıların talepleri mekanik özelliklerin ve mimari görünümünün iyileştirilmesi için giderek artmaya devam etmektedir. AA6060 ekstrüzyon ürünleri, çoğunlukla otomotiv, mimari (pencere ve kapı doğrama, cam balkon sistemleri, mobilya parçaları, giyotin sistemleri) ve yapı sektörlerinde üstün mekanik özellikleri ve fiziksel karakteristiklerinden dolayı tercih edilmektedir. Alüminyum, Çeliğe kıyasla 3 kat hafif olmasına rağmen alaşımlandırma ve ısıtma işlemi sayesinde benzer mukavemet özellikleri göstermektedir. Saf haldeki alüminyum düşük dayanım değerlerine sahipken, alaşımlandırma ve yaşlandırma ısıtma işlemiyle çekme dayanımı 690 MPa' a kadar artırılabilir (Örneğin 7001 alaşımının çekme dayanımı T6 yaşlandırma ısıtma işlemi uygulandıktan sonra 675 MPa'dır). Ancak bu özellikler alaşım elementlerinin etkisine ve ısıtma işlemi proseslerine bağlı olarak değişmektedir.

Alüminyum alaşımlarında en yüksek mekanik dayanım, 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlarının yaşlandırma ısıtma işlemi sonucunda elde edilmektedir. Ancak bu alaşımlar 6xxx seri alaşımlarla karşılaştırıldıklarında ekstrüzyon ve yaşlandırma işlemlerinde bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. 6xxx seri alaşımlar ekstrüzyon operasyonu sırasında düşük akış gerilmelerine sahiptirler ve işlenebilirlikleri daha iyidir [1].

6xxx serisi olarak bilinen AlMgSi alaşımları; iyi ekstrüzyon edilebilirlikleri, yüksek korozyon dayanımları, sıcak deformasyon sonrasında temiz yüzey ve orta derecede dayanım elde edebilmek için uygulanan süreçlerin düşük maliyetli olması ile tanınırlar. Dünya alüminyum ekstrüzyon üretiminin yaklaşık %80'inden fazlasını 6xxx serisi alaşımlar, bu serinin %70'ini de AA6063 grubu oluşturmaktadır [2].

AA6063 alaşımı, iyi yüzey kalitesi ve yüksek hızlarda ekstrüzyon edilebilme özelliğine sahiptir. 1990'lardan itibaren, AA6063 alaşımlarının yerini çoğu ülkede AA6060 alaşımı almıştır. AA6063 alaşımının türevi niteliğindeki AA6060 alaşımı daha sünek olması ve ekstrüde edilmesi daha kolay olmasından dolayı tavsiye edilmektedir. AA6060 alaşımı daha düşük seviyelerde magnezyum ve silisyum içermektedir. Si ve Mg içeriğinin fazla olması, sünekliği ve maksimum ekstrüzyon hızını önemli ölçüde azaltır. Dolayısıyla AA6063 yerine AA6060 alaşımının kullanılması üretim maliyetlerini azaltmaktadır [1].

Ekstrüzyon işlemlerine başlamadan önce ekstrüzyon oranının prese olan uygunluğunu belirlemek kontrol edilmesi gereken ilk basamaktır. Ekstrüzyon oranı malzeme akışını etkileyen faktörlerden birisidir. Ekstrüzyon oranı arttıkça deformasyon miktarı ve buna bağlı olarak da sıcaklık artışı görülmektedir. Sıcaklığın artması mikro yapının daha ince taneli olmasına neden olmaktadır. Tane yapısının küçülmesi ise mukavemeti arttırmaktadır [3-4].

Sertliği etkileyen faktörlerden biri olan ekstrüzyon oranı, profilin prese uygunluğu ve sertleştirilebilme durumu hakkında bilgi verir. Uygulamada 6000 serisi alaşımların ideal ekstrüzyon oranı 1/70 olarak belirlenmiştir. Bu oranının paydasının, 70'in altına düşmesi üretimi kolaylaştırırken 70'in üzerine çıkması da üretimi zorlaştırır, 12'nin altında ekstrüzyon oranına sahip bir profilin üretiminde biyet yapısındaki Mg₂Si kristalleri yeterli uzama değerine ulaşamayacağı için işlemler sonunda, mikro yapı olarak profil biyet şartlarına dönüşür. Bundan dolayı, profilin yeterli sertlik alması mümkün olmaz. Ekstrüzyon oranı, 12-20 arasında olan profillere azot (12-16) veya sulu (16-20) soğutma ile istenilen sertlikler aldırılabilir ancak imalat şartlarının çok dikkatli ve kontrollü yapılması zorunludur, 20-100 arasındaki orana sahip profiller sorunsuz üretilir, 100-140 arasındaki profillerin üretim miktarları düşük, imalat problemleri fazla (ölçü ve yüzey kalitesi), kalıp ömürleri kısadır. 140 oranı üzerindeki profiller çok zorunlu olmadıkça imalata alınmamalıdır [5].

Alüminyum alaşımları sınıflandırılırken ilave edilen metallere göre sınıflandırma yapılır. Alüminyuma eklenen alaşım elementleri, malzemenin mekanik özelliklerini geliştirerek diğer metallere göre üstün olmasını sağlar. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarında en fazla ilave edilen elementler Magnezyum (Mg) ve Silisyum'dur (Si). Mg, yüksek dayanım, süneklik ve korozyon direnci sağladığı gibi malzeme yoğunluğunu da düşürmez. Magnezyum-silisit (Mg₂Si) oluşuracak oranda Mg ve Si bulunduran alaşımlar ısı işlem uygulanabilen ve kolay işlenebilen alaşımlardır. Silisyum oranı arttıkça çekme ve akma dayanımı artış gösterir. Alaşımın içerisinde Si içeren fazın şekli ve dağılımı önemlidir. Küçük ve yuvarlak primer faz veya ötektik yapı yüksek dayanım ve süneklik verir. İğne şeklindeki Si'li faz çekme dayanımını arttırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma dayanımını düşürür [6].

Bakır (Cu) miktarı arttıkça alaşımın akıcılığı, çekme dayanımı ve sertliği artar. Demir (Fe) bazı uygulamalarda dayanımı, yüksek sıcaklıklarda sertliği artırma gibi alaşım özelliklerini geliştirici etkiye sahiptir [7].

AA6060 alaşımının ekstrüzyon prosesinde, 400-480 °C ön ısıtmaya tabii tutulan biyetler istenilen boya getirilerek bir konveyör aracılığıyla prese aktarılır. Ardından biyet, kovan hizasına bir yükleme arabası ile kaldırılır ve zımba (ıstamp) tarafından yüksek basınçta itilerek karşı tarafta bulunan kalıbın içinden biyetin kesiti küçültülerek şekil alması sağlanır.

Şekil almayla ve sürtünme enerjisiyle oluşan ısı enerjisi, tavllanmış kalıbın ve ön ısıtmaya tabii tutulmuş biyetin ısı kaybından daha fazlaysa kalıptan çıkan malzemenin sıcaklığını arttıracaktır. Kayıpların yüksek olması durumunda ise kalıptan çıkan malzemenin sıcaklığı azalacaktır. Şekil almış alüminyum profilin kalıbı terk ettiği andaki çıkış sıcaklığı pek çok sebepten dolayı önem arz etmektedir. Ekstrüzyon sıcaklığının nihai ürün kalitesine ve kalıp ömrüne iki farklı açıdan etkisi söz konusudur. Profil kalitesi açısından, çıkış sıcaklığı ısı işlem basamaklarını ve tanecik kararlılığını etkilemektedir, aynı zamanda ekstrüzyon hatalarına da yol açabilmektedir. Ön ısıtma sıcaklığı matris ömrü açısından da kritik bir konudur. Profilin kalıptan çıkış sıcaklığı sonuç itibarıyla kalıp kaynama odalarındaki sıcaklık artışıyla ilişkilidir, bu nedenle ürün çıkış sıcaklığı kalıp aşınması ve imalat performansı için önemli bir etkidir.

Aşırı doymuş katı çözelti iç yapısını sağlamak için presten çıkan, ekstrüzyon işlemi sonunda üretilmiş profilin ani olarak soğutulması ile, Mg₂Si partiküllerinin çökelmeden katı çözelti içinde kalması amaçlanır. Ekstrüzyon ürününde aşırı doymuş bir katı çözelti elde etmek için, Mg₂Si çökelmeden kalmalıdır. Bunun için presten çıkan sıcak ürün, en az 95°C/dk hızla, 260 °C' ye kadar soğutulmalıdır. Böylece, daha sonraki yapay yaşlandırma işleminde en yüksek mekanik değerler elde edilebilir [8].

Genel olarak değerlendirildiğinde, Al alaşımlarının Ekstrüzyon işlemi sonucunda elde edilecek ürün özellikleri; biyet ön ısıtma koşulları, ekstrüzyon çıkış sıcaklığı, soğutma işlemi ve yaşlandırma işlemi aşamalarına doğrudan bağlıdır. Yapılan bazı araştırmalarda bu faktörlerdeki değişimlerin etkileri incelenmiştir. Presleme hızı, kalıp yapısı, profil kesit geometrisi, kalıp ve konteynir sıcaklığı, metal akışını ve ekstrüzyon çıkış sıcaklığını etkileyen diğer faktörlerdir.

Alüminyum ekstrüzyon ürünlerinin ekstrüzyon şartlarına göre nasıl mekanik özellikler göstereceği ile ilgili çalışmalar ve çeşitli Al alaşımlarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik ısı işlem temelli çalışmalar literatürde bulunmaktadır.

Siddiqui ve ark. [9], AA 6063 alaşımını, 520 °C'de çözeltiye aldıktan sonra, zaman ve sıcaklık olarak farklı yaşlandırma koşullarının mekanik dayanıma etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda en iyi mukavemet değerleri, 175 °C de 8-10 saatlik yaşlandırma koşullarında elde edilmiştir.

Zhou ve ark. [10], AA6101 alaşımından ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş bir çarpışma kutusunda, çeşitli ısı işlem parametrelerinin (çözeltiye alma sıcaklığı ve zamanı, yaşlanma sıcaklığı ve ısı işlem prosesi vb.) dayanıma

etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda optimum ısıtma işlem parametreleri olarak 45 dakika süreyle, 510 °C'de çözeltiye alma ve 175 °C'de 7 saat yaşlandırma koşulları belirlenmiştir.

Güven ve Delikanlı [11], ısıtma işlem uygulanabilir bir alaşım türü olan AA2024 alaşımı kullanarak hazırladıkları numunelere, farklı çözeltiye alma sıcaklıkları uygulamışlardır. Daha sonra ise numunelere yapay yaşlandırma işlemi yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda çözeltiye alma sıcaklığının artmasının sertliği ve mekanik özellikleri geliştirdiği gösterilmiştir. En iyi sonuçlar 530 °C çözeltiye alma sıcaklığında ve 190 °C-6 saat yaşlandırma prosesinde elde edilmiştir.

Akyüz ve Şenaysoy [12], AA6013 ve AA6082 alaşımlarında yaşlandırma işleminin alaşımın mekanik özellikleri ve işlenebilirlik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla, AA6082 ve AA6013 numuneler 530 °C'de ısıtma işlem fırınında (8 saat) çözeltiye alma işleminden sonra sıcak suya atılmış (70 °C'de) daha sonra ısıtma işlem fırınında (180 °C'de) farklı sürelerde (1, 3, 6, 9, 12 ve 24 saat) bekletilerek yapay yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Alüminyum alaşımlarında 6 saat yaşlandırma işlemi sonunda yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir.

Gao ve ark. [13], AA6063 alaşımında, farklı ön yaşlandırma ve ikincil yaşlandırma koşullarının alaşımın mukavemetine olan etkilerini araştırmışlardır. 2,4 mm kalınlığındaki düz ekstrüzyon profili ilk olarak 585 °C'de 3 saat çözeltiye alınmıştır. Daha sonra 288 saat doğal yaşlandırma, 3 saat doğal yaşlandırma, 3 saat doğal yaşlandırma ve 5 saat 80 °C'de yapay yaşlandırma olmak üzere 3 farklı ön yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Ön yaşlandırma işlemi takiben numuneler 165 °C, 185 °C ve 205 °C'lerde farklı sürelerde yapay yaşlandırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda aynı ön yaşlandırma koşullarına sahip malzemelerde, daha yüksek ikinci yaşlandırma sıcaklığına maruz kalan malzemelerin çekme dayanımı ve maksimum çekme dayanımına ulaşılan süre daha düşük ölçülmüştür. Eşit ikinci yaşlandırma koşullarına sahip malzemelerde ise daha uzun doğal ön yaşlandırma uygulanmış numunelerin çekme mukavemetleri daha fazla çıkmıştır.

Clausen ve ark. [14], deneysel amaçlı olarak ürettikleri AA6082 ve AA7108 alaşımı profillerden elde ettikleri T1 temperine sahip 49 adet içi boş profilden ekstrüzyon doğrultusuna 0o, 45o ve 90o açılarda ve farklı kalınlıklara sahip 392 adet çekme testi numunesine çekme testleri uygulayarak mekanik özellikleri incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, malzemenin mekanik özelliklerine en çok alaşımın ve yönün etki ettiği belirlenmiştir.

Karabay ve ark. [15], AA6063 alaşımı ekstrüzyon profillerine çekme ve sertlik (HB) testleri uygulayarak ekstrüzyon oranının mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları testler sonucunda, ekstrüzyon oranının artması ile profillerin maksimum çekme dayanımının ve sertliğinin arttığı, ancak uzama oranının düştüğü görülmüştür.

Karabay ve ark. [16], AA6101 alaşımı için farklı ekstrüzyon oranlarının mekanik özelliklere nasıl etki edeceğini incelemek için çekme testi, sertlik (HB) testi ve mikro yapı muayenesi yapmışlardır. Çalışma sonunda ekstrüzyon oranı arttıkça maksimum çekme dayanımı ve sertlik değerleri yükselmiş, uzama oranı azalmıştır.

Eser ve ark. [17], AA6005, AA6061 ve AA6082 tipi alaşımlarda çözeltiye alma süresi ve sıcaklığı (540 °C) sabit alınarak farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma koşullarının etkilerini araştırmışlardır. Yaşlandırma sıcaklıkları 170 °C, 200 °C ve 250 °C, süreleri ise 10 dakikalık aralıklarla 10 farklı zamanda alınmıştır (en düşük 10 dk- en yüksek 100 dk). Yapılan çalışma sonucunda üç alaşım içinde en yüksek sertlik değerlerine 170 °C'de ulaşılmıştır. Yapay yaşlandırma sıcaklıklarının artmasıyla sertlik değerleri azalmış ancak en yüksek sertlik değerine ulaşma zamanı düşmüştür.

Al-Saadi ve Tunay [18], Al-25Zn-1Mg alaşımında suni yaşlandırma parametrelerinin, alaşımın sertliğine etkisini incelemişlerdir. 20x20 mm kare kesitli numunelere, 180 °C sıcaklıkta, 1, 3, 6, 12 ve 24 saat bekletme sürelerinde yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. En yüksek sertlik değeri 12 saat yaşlandırma süresinde elde edilmiştir.

Doruk ve ark. [19], yaptıkları çalışmada AA6082 alüminyum ekstrüzyon ezilme kutularının çarpışma performansına ısıtma işlem parametrelerinin etkileri incelemişlerdir. AA6082 profiller, 600 °C'de 4 saat çözeltiye alma işleminden sonra hava ile soğutulmuştur. Yaşlandırma işlemi 160 °C'de 8, 10,15, 18 ve 24 saat sürelerde yapılmıştır. En yüksek akma ve çekme dayanımı değerleri 24 saat yaşlandırma süresi sonucunda elde edilmiştir.

Polat ve ark. [20], AA6061 alaşımında, yapay yaşlandırma sıcaklık (160 °C, 180 °C ve 200 °C) ve sürelerinin (2,5, 5, 10, 20, 40, 60 ve 80 saat) mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda ideal yaşlandırma zaman aralığı 5-40 saat aralığı sıcaklık değeri ise 180 °C olarak belirlendi.

Uğurlu [21], direkt ekstrüzyon yöntemiyle imal edilmiş 6060 alüminyum alaşımlı profillerde, 530°C’de çözeltiyeye alma ve hava ile soğutma proseslerinin ardından farklı sürelerde ve sıcaklıklarda yaşlandırılarak, yaşlandırma prosesindeki zaman-sıcaklık değişkenlerinin malzemenin mekanik özellikleri ve mikroyapısına etkileri incelemiştir. Yaşlandırma deney tasarımı; 160°C, 180°C ve 200°C’lerde 4, 6 ve 8 saat parametreleri ile oluşturulmuştur. Akma ve çekme mukavemetleri incelendiğinde, profil için en iyi değerlere 180°C – 8 saat yaşlandırma uygulanan numunelerde ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde 6060 profilinin ekstrüzyon işleminde ön ısıtma sıcaklıklarının sertliğe etkisi ile ilgili bir çalışma ile karşılaşmamıştır. Yapılan bu deneysel çalışmada, kalıp tavlama sıcaklık ve süresi, kalıp çelik türü, ekstrüzyon hızı, kovan sıcaklığı ve soğutma faktörleri sabit olmak koşuluyla, 6060 alaşımında biyet ön ısıtma sıcaklığının, yapay yaşlandırma prosesi sonucuna göre sertliğe etkisi Brinell sertlik ölçüm metodu kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, 6060 alaşımının ekstrüzyon prosesinde sertlik değerine ön ısıtma sıcaklığının etkisini göstermektir.

2 MATERYAL VE METOT

2.1 Çalışmada kullanılan hammadde spektrometre analizi

Yapılan çalışmada kullanılan alüminyum alaşımının, AA6060 standartlarına uygunluğunu ölçmek ve alaşımın kimyasal bileşimini tespit edebilmek amacıyla, spektrometre analizi yapılmıştır. Ölçüm sonucunda AA6060 alaşımının spektrometre analizi sonunda standartlara uygun olduğu doğrulanmıştır. Standartlarda referans alınan kimyasal bileşenler ve ölçülen spektrometre analizi değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 1’te gösterilmiştir.

Tablo 1. AA6060 Alüminyum alaşımı kimyasal bileşen değerlerinin karşılaştırılması

Element	European standart bileşim oranları (%)	Hammadde optik emisyon spektrometre ölçülen bileşim oranları (%)
Demir (Fe)	0,1-0,3	0,2205
Manganez (Mn)	0-0,1	0,0421
Magnezyum (Mg)	0,35-0,6	0,4755
Silisyum (Si)	0,3-0,6	0,4066
Bakır (Cu)	0-0,1	0,0202
Çinko (Zn)	0-0,15	0,0165
Titanyum (Ti)	0-0,1	0,0189
Krom (Cr)	0-0,05	0,0069
Alüminyum (Al)	Dengeli	98,7561
Diğer	0-0,15	0,0367

2.2 Biyet ön ısıtma ve ekstrüzyon işlemleri

AA6060 biyetlere ön ısıtma yapılmasının amacı, yapı içindeki Mg₂Si bileşiğinin tam olarak çözünmesidir [22]. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında Mg₂Si çökelti çözünür ve malzeme birkaç dakika içerisinde hızlı soğutma yapılarak aşırı doymuş yapı elde edilir. Ekstrüzyon prosesinde, matriste elde edilen Mg₂Si partikülleri yaşlandırmadan sonra elde edilen mukavemeti etkiler [23]. Buna göre çalışmada kullanılacak AA6060 hammaddesinin biyet fırınında ön ısıtma süreci tamamlanmıştır. Biyetlerin bir yükleme arabası aracılığıyla Tablo 2’de özellikleri belirtilen alüminyum ekstrüzyon presinde 7 mm/s zimba hızıyla ve 410 °C kovan sıcaklığı şartlarında profil haline getirilerek üretilmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmanın yapıldığı tesiste bulunan, alüminyum ekstrüzyon üretim prosesinde yer alan biyet ön ısıtma hattı, ekstrüzyon presi ve yapay yaşlandırma fırını sırasıyla Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3’te gösterilmiştir.

Uygulamada soğutma çok hızlı olursa, alüminyum profillerin gerilmelerden kaynaklanan deformasyon nedeniyle bozulduğu gözlemlenmiştir. Tersine soğutma çok yavaş olursa, profillerin mukavemetinde yapılan ölçümler sonucunda azalmalar tespit edilmiştir. Bu çalışmada üretim esnasında doğrudan hammadde sıcaklığının etkileri araştırıldığından herhangi bir hızlı soğutma işlemi (su verme veya hava soğutma) uygulanmamıştır.

Tablo 2. Alüminyum ekstrüzyon pres özellikleri

Biyet çapı (mm)	152
Biyet uzunluk aralığı (mm)	300-880
Kovan çapı (mm)	158
Kovan uzunluğu (mm)	900
Ekstrüzyon hızı (mm/s)	1,2-18
Tavsiye edilen ekstrüzyon oranı	12-72



Şekil 1. Ön ısıtma işlemi için kullanılan biyet fırını



Şekil 2. Deney profilinin elde edilmesinde kullanılan ekstrüzyon pres



Şekil 3. Yapay yaşlandırma termik fırını

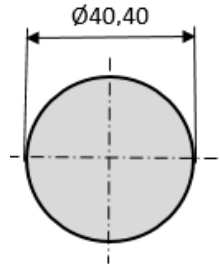
2.3 Yapay yaşlandırma ve Brinell sertlik ölçümü

Presten çıkan profillerden, yapay yaşlandırma öncesinde numuneler kesilerek alınıp sertlikleri ölçülmüştür. Numuneler bir sonraki işlem olan yapay yaşlandırma için termik fırınına alınmıştır. Kanoko ve ark. [24], tarafından yapılan çalışma referans alınarak deney numunelerine termik fırında 185°C'de 300 dk yaşlandırma ısıl işlemi

uygulanmıştır. Yapay yaşlandırma sonrası, numuneler ortam sıcaklığına kadar soğutulup sertlik ölçümü amacıyla kesilmiştir.

2.4 Ekstrüzyon oranı kontrolü

Ekstrüzyon oranı, kovan kesit alanının üretimi yapılacak profilin kesit alanına bölünmesiyle bulunmaktadır. Kovan kesit alanı için gerekli parametre olan kovan çapı Tablo 2’de belirtildiği gibi 158 mm’dir. Deney aşamasında silindirik tek figürlü kalıp profili kullanılmıştır (Şekil 4). Buna göre kovan kesit alanının profil kesit alanına bölünmesiyle Ekstrüzyon Oranı (EO), 15,295 olarak Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır. D_k (mm), kovan çapı, D_p (mm) profil çapıdır.



Şekil 4. Deneide kullanılan profil kesiti

$$EO = \frac{\frac{\pi D_k^2}{4}}{\frac{\pi D_p^2}{4}} = 15,295 \quad (1)$$

Hesaplanan ekstrüzyon oranına göre, ekstrüzyon oranının prese uygun olduğu fakat yeterli sertliklere ulaşılabilmesi için azot ile soğutma gerektirdiği anlaşılmaktadır. Ancak deneyde ön ısıtma sıcaklığının yapay yaşlandırma sonrası sertliğe etkileri araştırıldığından, azot veya zorlanmış hava ile soğutma işlemi uygulanmamıştır. Bu durumda 15,295 EO değeri 12-72 aralığında olduğundan deneyde kullanılan profilin prese uygun olduğu doğrulanmıştır.

2.5 Mikroyapı kontrolü

Doğal ve yapay yaşlandırılan AA6060 alaşım numunelerinin mikroyapısal incelemelerinin yapılması amacıyla profil numuneleri sırasıyla 400, 800 ve 1200 meshlik su zımparaları ile zımparalanmıştır. Daha sonra 1 μ m elmas solüsyonu ile parlatılmıştır. Dağlama yapılması için 95 ml saf su, 2ml HCl ve 3 ml H₂SO₄ kullanılarak oluşturulan kimyasal çözeltide numuneler 90 saniye süreyle dağlanmıştır.

Dağlanarak elde edilen mikroyapı fotoğrafları, Şekil 5’te gösterilen NİKON marka Eclipse MA100 model optik mikroskopta çekilmiştir. Tüm numunelerin farklı bölgelerinden değişken büyüklüklerde görüntüler alınarak bu görüntülerin bütün mikro yapıyı temsil edebilir olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca numunelerin tane boyutu, uygun büyütmelerde Clemex Vision Lite marka mikroyapı analiz sistemi kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 5. Mikroyapı kontrollerinin yapıldığı optik mikroskop

3 BULGULAR

Tablo 3'te deneysel çalışmada kullanılan ön ısıtma sıcaklıkları ve bu ön ısıtma sıcaklıkları uygulandığında ölçülen kalıp çıkış sıcaklıkları gösterilmiştir.

Tablo 3'teki sıcaklık değerlerinden de görüldüğü gibi, ekstrüzyon işlemi sonrasında sıcaklıklar kalıp içi sürtünmelerden ve kaynama odasından dolayı artmaktadır. Kalıp çıkışında ise maksimum sıcaklık değerlerine ulaşmaktadır. Ekstrüzyon işleminde kalıp çıkış sıcaklığı ile ön ısıtma sıcaklığı arasında doğrudan bir bağlılık mevcuttur. Ekstrüzyon işlemi esnasında pres hızının sabit kalması şartıyla ön ısıtma sıcaklığının değiştirilmesi ile sabit ekstrüzyon çıkış sıcaklığı elde edilebilmektedir. Artan ön ısıtma sıcaklığı ile ekstrüzyon çıkış sıcaklığı yüksek değerlere çıkmıştır. Artan çıkış sıcaklığı ile birlikte ortama ortalama şekil değiştirme hızı yükselmekte ve şekil değiştirme bölgesindeki malzeme mukavemetinin yükselmesi sağlanmaktadır. Artan mukavemet değerlerinden kaynaklı olarak kalıbın içinde meydana gelen şekil değiştirme işindeki hız, çıkış sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Ancak ön ısıtma sıcaklıklarının her bir deney numunesi için yaklaşık 20 °C kadar artırılmasına rağmen kalıp çıkış sıcaklıklarının aynı oranda artmadığı görülmüştür. Ön ısıtma sıcaklığı ve kalıp çıkış sıcaklığı arasındaki fark 1. deney numunesi için 52,2 °C, 2. deney numunesi için 47,4 °C, 3. deney numunesi için 44,3 °C olarak hesaplanmıştır.

Yapay yaşlandırma işlemi öncesinde ve sonrasında sertlikler, Brinell (HB) sertliği cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri, sonucun doğruluğunu artırma amacıyla her deney numunesi için 3 farklı noktadan yapılmıştır. Tablo 4'te deney numuneleri için ölçülen değerler yapay yaşlandırma işlemi öncesi ve sonrası için gösterilmiştir.

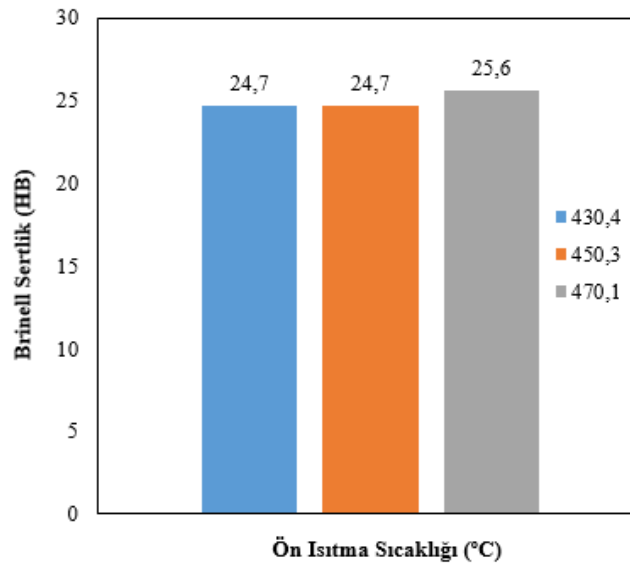
Tablo 3. Ön ısıtma ve kalıp çıkışı sıcaklık ölçüm tablosu

Deney numune numarası	Ön ısıtma sıcaklığı (°C)	Kalıp çıkışı sıcaklığı (°C)
1	430,4	482,6
2	450,3	497,7
3	470,1	514,4

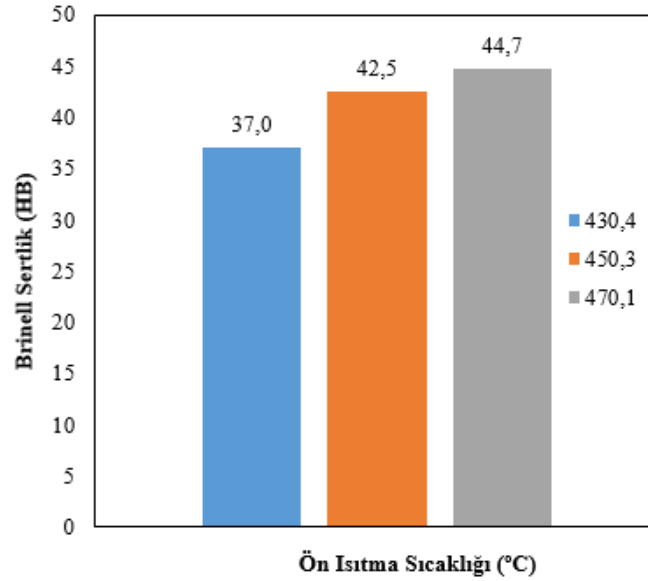
Tablo 4. Deney numunelerinin sertlik ölçümleri

Deney numune numarası	Ön ısıtma sıcaklığı (°C)	Yapay yaşlandırma öncesi sertlik (HB)	Yapay yaşlandırma sonucu sertlik (HB)
1	430,4	23,9 - 25,5 - 24,7	36 - 38 - 37,1
2	450,3	24,2 - 25,1 - 24,8	41,9 - 42,6 - 42,9
3	470,1	25,8 - 25,3 - 25,9	43,7 - 46,7 - 43,7

Şekil 6 ve Şekil 7'de farklı ön ısıtma sıcaklıklarına göre yapay yaşlandırma öncesinde ve sonrasında elde edilen ortalama sertlik değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Yapay yaşlandırma öncesi ortalama sertlik değerleri



Şekil 7. Yapay yaşlandırma sonrası ortalama sertlik değerleri

Tablo 3-4, Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilen sonuçlara göre, ön ısıtma sıcaklığının ve ekstrüzyon sıcaklığının artmasıyla yapay yaşlandırma öncesi sertlikte kayda değer bir artış gözlemlenmemesine rağmen yapay yaşlandırma sonucu sertlik değerlerinde dikkat çeken bir fark oluşmuştur. AA6060 alaşımında, ön ısıtmada 430,4°C sağlanmasıyla en yüksek sertlik değeri 38 HB iken, 450,3°C için 42,9 HB ve 470,1°C için 46,7 HB ölçülmüştür. Ekstrüzyon sıcaklığı 500°C-540°C aralığına ulaştığında çökeltme sertleşmesi için ideal koşullardır. Tablo 3’e bakıldığında 3 numaralı deney numunesinin 514,4°C ile bu aralığı sağladığı görülmektedir.

Deney ölçüm sonuçları incelendiğinde ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla AA6060 alaşımı için yapay yaşlandırma sonrası en yüksek sertlik değeri 46,7 HB ile 470,1°C’de ölçülmüştür. Sonuç olarak AA6060 alaşımının ön ısıtma sıcaklığı arttıkça yapay yaşlandırma işlemleri sonucu sertlik değerleri de artmıştır.

Nowotnik ve Sieniawski [25], 6005 ve 6082 alaşımlarında, çözeltiliye alma ısıl işlem sıcaklığının sertliğe etkisini incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, 6082 alaşımında çözeltiliye alma sıcaklığının (515-565 °C aralığında) artmasının sertliği belirgin bir şekilde artırdığını, 6005 alaşımında ise çözeltiliye alma sıcaklığının (520-570 °C aralığında) sertlik üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Yapılan açıklamada, aşırı doymuş katı çözeltili içerisindeki çözülmüş Mg ve Si miktarının sertliği etkilediği belirtilmiştir. 6005 alaşımında Mg ve Silisyum içeriği, 6082 alaşımına kıyasla daha az olduğu için sıcaklığın artması katı çözeltili içerisinde bulunan Mg ve Si miktarını arttırmamıştır. Ancak 6082 alaşımında Mg ve Si oranının daha fazla olması, katı çözeltili içerisinde sıcaklığın artmasıyla çözünen Mg ve Si oranını arttırmıştır. Mg ve Si, yapıda sertleştirici etki yapan Mg₂Si fazının yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında çökmesi için gereklidir.

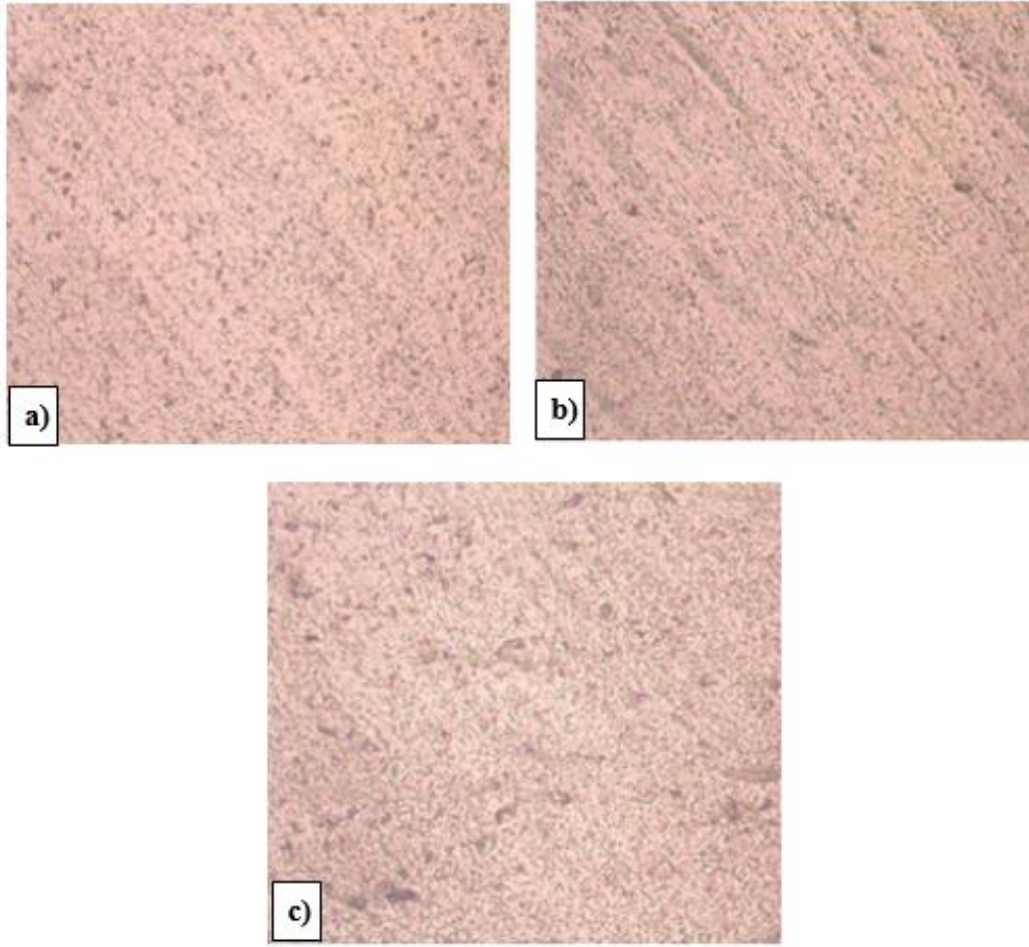
Şekil 7’de verilen sertlik değerleri dikkate alındığında, ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla katı çözeltili içerisinde daha fazla Mg ve Si çözüldüğü, bunun sonucunda da yaşlandırma işlemi sonucunda sertliği artırıcı yönde etki yapan daha fazla Mg₂Si çökeltisi oluştuğu düşünülmektedir.

Şekil 6’da yaşlandırma işlemi öncesindeki sertlik değerlerinde belirgin bir fark olmaması ise, sıcak ekstrüzyon işlemi sonrası içyapıda henüz çökeltme sertleştirmesi için yeterli difüzyonun olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla numunelerde yeterli Mg₂Si fazı oluşmadığından sertleşme gözlemlenmemiştir.

3 farklı ön ısıtma sıcaklığına sahip biyetlerden elde edilen numunelerin yapay yaşlandırma sonrası mikro yapı görüntüleri Şekil 8’de gösterilmiştir.

AA6xxx serisi alaşımların sertliği, matriste homojen ve ince bir şekilde dağılmış ikinci fazın (Mg₂Si) çökeltmesiyle önemli ölçüde artırılabilir. Mg₂Si fazının çökmesi oldukça kompleks olan bir sıralamaya göre gerçekleşir. Buna göre, Al-Mg-Si alaşımlarının literatürde genel olarak kabul edilen çökeltme sırası şu şekildedir:

Aşırı doymuş katı çözeltili → atomik kümeler → GP bölgeleri → β''(Mg₂Si) → β'(Mg₂Si) → β (kararlı Mg₂Si)



Şekil 8. 430,4 °C (a) 450,3 °C (b) ve 470,1 °C (c) ön ısıtma sıcaklığına sahip numunelerin yapay yaşlandırma sonrasında mikro yapı görüntüleri

Katı eriyik içerisinde çözünen Mg ve Si atomlarının toplanması, ilk aşamada literatürde Guiner-Preston (GP) bölgesi olarak isimlendirilen yerlerde meydana gelir. Bu bölgeler, daha sonra çökelmelerin oluşacağı yerler hakkında bilgi verir. Mg_2Si 'nin çökmesi boyuta göre üç farklı şekilde meydana gelmektedir:

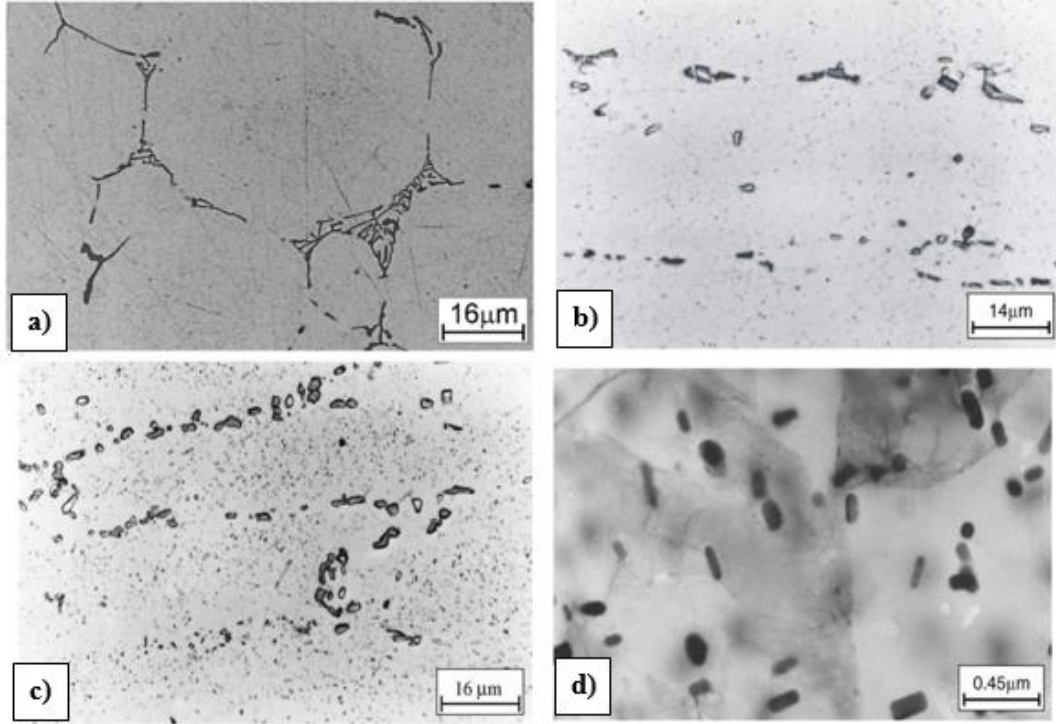
β'' Mg_2Si : Mg_2Si 'nin en küçük boyutta çökelmiş formudur. Mekanik özelliklere katkısı en fazla olan fazdır.

β' Mg_2Si : Orta boyuttaki çökme formudur.

β Mg_2Si : Mg_2Si 'nin en büyük boyuttaki çökelmiş formudur. Mekanik özellikleri olumsuz etkiler [24-26].

Şekil 9'da AA6082 serisi bir alaşımın biyet formundaki (a), sıcak ekstrüzyon işlemi sonrasındaki (b), çözeltiye alma işlemi sonrasındaki (c) ve yaşlandırma prosesi sonrasındaki (d) oluşan mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 9a'da, Al katı çözeltisinin interdrititik boşluklarında fazların çökeltileri (tane sınırlarındaki koyu kısımlar) görülmektedir. Ekstrüzyon prosesinde, biyetlerin sıcak işlenmesi sırasında, intermetalik faz parçacıkları, bant yapısının oluşumuna izin veren, plastik deformasyon yönüne paralel konumlarda düzenlenir. Sonuç olarak daha büyük parçacıkların boyutunda azalma meydana gelebilir (Şekil 9b). Şekil 9c'de çözeltiye alma işlemi ve hava ile soğutma prosesi sonrasında içyapıdaki çok ince dağılmış β - Mg_2Si çökeltileri görülmektedir. Şekil 9d'de, yapay yaşlandırma işlemi sonrasındaki mikro yapı görülmektedir. Şekil 9d'de, çökelen ve sertliği arttıran koyu renkli β - Mg_2Si fazının yapı içerisinde dağılımı açık bir şekilde görülmektedir.

Yapılan çalışmada, Şekil 8'de gösterilen mikro yapı optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, literatüre uygun olarak, yapay yaşlandırma işlemi sonrasındaki yapı içerisinde çökelen koyu renkli β - Mg_2Si fazı net bir şekilde görülmektedir. Bu durum yapay yaşlandırma öncesindeki duruma göre sertlik değerindeki artışı açıklamaktadır. Ön ısıtma sıcaklığının artması sonucunda sertlik değerlerindeki artış, mikro yapıdaki β - Mg_2Si çökeltilerinin artmasıyla açıklanabilir. Mikro yapıdaki β - Mg_2Si çökeltilerinin artması ise, ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla kristal yapıda çözünen Mg ve Si elementlerinin artmasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 9. AA6082 alaşımında biyet durumunda (a), sıcak ekstrüzyon işlemi sonrasında (b), çözeltiye alma ısıl işlemi sonrasında (c) ve yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında mikro yapı görüntüleri [24]

4 SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmada, AA6060 alaşımı kullanılarak ekstrüzyon yöntemiyle üretilen profillerde ön ısıtma sıcaklığının değişiminin, yapay yaşlandırma öncesinde ve sonrasında sertliğe etkisi incelenmiştir. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

Biyetlerde ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla yapay yaşlandırma öncesinde sertlik değerlerinde fazla bir değişim görülmemiştir.

Yapay yaşlandırma işlemi sonrasında sertlik değerlerinde, ön ısıtma sıcaklığına göre değişim gözlemlenmiştir. 430,4°C, 450,3°C ve 470,1°C ön ısıtma sıcaklıklarında yaşlandırma işlemi sonrasında en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 38 HB, 42,9 HB ve 46,7 HB olarak ölçülmüştür. 470,1 °C ön ısıtma sıcaklığına sahip deney numunesinde diğer sıcaklıklara kıyasla en yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

Deney numunelerinde yapay yaşlandırma sonrası mikro yapıda oluşan β -Mg₂Si çökelti fazı optik mikroskop ile yapılan incelemede görülmüştür.

Yapılan çalışma sonucunda biyet ön ısıtma sıcaklığı-sertlik bağlantısı dikkate alındığında, biyet ön ısıtma sıcaklığı faktörünün sertlik üzerinde önemli etkisinin olduğu sonucuna varılmaktadır. Buna göre ön ısıtma sıcaklığı doğru aralıklarda yapılırsa, AA6060 alaşımı için ekstrüzyon sıcaklığı, maksimum oranda Mg ve Si atomlarının çözülebileceği sıcaklık değerlerine aralığa ulaşabilecektir.

Sonraki çalışmalarda, ön ısıtma sıcaklığı, soğutma yöntemleri, sertlik arasındaki ilişki ve ön ısıtma sıcaklığı, yapay yaşlandırma sıcaklık ve süresi, sertlik ilişkileri araştırma konusu olarak ele alınabilir.

Yazar Katkıları

İsmail SARAÇ: Kavramlaştırma, Metodoloji, Yazım - Değerlendirme & Düzenleme, Görselleştirme, Süpervizyon

Mehmet Akif DURNA: Araştırma, Materyaller / Kaynaklar, Veri İyileştirme

Yazarlar makalenin son halini okuyup onaylamışlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça

- [1] X. Chen, "The effect of extrusion conditions on yield strength of 6060 Aluminium Alloy," PhD Thesis. Auckland University of Technology, 2008.
- [2] Y. Erarslan, "ETİAL-60 Alaşımında Döküm ve Homojenizasyon Uygulamalarının Ekstrüzyon Kabiliyetine Etkileri," Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999.
- [3] S. Bingöl, "Kalıp girişinin ekstrüzyon edilebilirlik üzerindeki etkisi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 7, no. 1, 159-167, 2016.
- [4] H. Evlen, and H.İ. Demirci, "Ekstrüzyon oranının Al-Mg alaşımının aşınma davranışı üzerine etkisi," 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye, 2009.
- [5] L. Li, J. Zhou, and J. Duszczak, "Prediction of temperature evolution during the extrusion of 7075 aluminium alloy at various ram speeds by means of 3D FEM simulation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 145, no. 3, 360-370, 2004.
- [6] A.O. Coşkun, "5000 serisi alüminyum magnezyum alaşımlarının döküm ve termomekaniksel prosesleri," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
- [7] P. Demircioğlu, "Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Gaz Oluşumu ve Gaz Giderme Tekniklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
- [8] E.B. Bjørnbakk, J.A. Sæter, O. Reiso, and U. Tundal, "The influence of homogenisation cooling rate, billet preheating temperature and die geometry on the T5-properties for three 6xxx alloys extruded under industrial conditions," *In Materials Science Forum*, vol. 396, 405-410, 2002.
- [9] R.A. Siddiqui, H.A. Abdullah, and K.R. Al-Belushi, "Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 102, no. 1-3, 234-240, 2000.
- [10] J. Zhou, G. Wang, Y. Li, and X.M. Wan, "Influence of heat treatment parameters on mechanical properties and crashworthiness of aluminum crash box," *Advanced Materials Research*, vol. 14, no. 14, 194-199, 2014.
- [11] Ş. Güven, and Y. Delikanlı, "AA2024 Alüminyum Alaşımında Çökeltme Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi," *Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 2, no. 2, 13-20, 2012.
- [12] B. Akyuz, and S. Şenaysoy, "Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma işleminin mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerindeki etkisi," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 1, no. 1, 1-8, 2014.
- [13] R.Q. Gao, K. Stiller, V. Hansen, A. Oskarsson, and F. Danoix, "Influence of aging conditions on the microstructure and tensile strength of aluminium alloy 6063," *In Materials Science Forum*, vol. 396, 1211-1216, 2002.
- [14] A.H. Clausen, T. Tryland, and S. Remseth, "An investigation of material properties and geometrical dimensions of aluminium extrusions," *Materials & Design*, vol. 22, no. 4, 267-275, 2001.
- [15] S. Karabay, M. Zeren, and M.Yılmaz, "Investigation extrusion ratio effect on mechanical behaviour of extruded alloy AA-6063," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 135, no. 1, 101-108, 2003.
- [16] S. Karabay, M. Yılmaz, and M. Zeren, "Investigation of extrusion ratio effect on mechanical behaviour of extruded alloy AA-6101 from the billets homogenised-rapid quenched and as-cast conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 160, no. 2, 138-147, 2005.
- [17] A.Eser, E. Gökçil, S. Akdı, and Y. Birol, "Alüminyum işlem alaşımlarının T6 ısıl işleminde yaşlandırma sıcaklık ve sürelerinin incelenmesi", 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul, 2015.
- [18] H.I.A. Al-Saadi, and R.F. Tunay, "Sunı Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 5, no. 3, 525-532, 2017.
- [19] E. Doruk, G. Yılmazoğlu, A. Zeki, T. Başer, and İ. Durgun, "Yaşlandırma Parametrelerinin Farklı Geometrilere Sahip Alüminyum Ekstrüzyon Ezilme Kutularında Darbe Performansına Etkileri," *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, vol. 14, no. 1, 17-22, 2018.

- [20] A. Polat, M. Avsar, and F. Ozturk, “Effects of the artificial-aging temperature and time on the mechanical properties and springback behaviour of AA6061,” *Materials and Technology*, vol. 49, no. 4, 487-493, 2015.
- [21] U.R. Uğurlu, “Farklı Isıl İşlemler Uygulanmış 60XX Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 2022.
- [22] K.H. Rendings, “Aluminium Structures Used in Aerospace Status and Prospects,” *Materials Science Forum*, vol. 242, 11–24, 1997.
- [23] J.V. Langkruis, W.H. Kool, C.M. Sellars, M.R. Winden, and S. Van der Zwaag, “The Effect of β , β' and β'' Precipitates in A Homogenised AA6063 Alloys on the Hot Deformability and the Peak Hardness,” *Materials Science and Engineering*, vol. 299, 105–115, 2001.
- [24] T. Kanoko, Y. Yoshida, N. Yukawa, T. Ishikawa, and H. Sano, “Study of metal flow in extruded billet,” In Proc 53rd Japanese Joint Conference for the Technology of Plasticity, 439-440, 2002.
- [25] G. Mrówka-Nowotnik, and J. Sieniawski, “Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 162, 367-372, 2005.
- [25] A.K. Gupta, D.J. Lloyd, and S.A. Court, “Precipitation hardening processes in an Al–0.4% Mg–1.3% Si–0.25% Fe aluminum alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 301, no. 2, 140-146, 2001.
- [26] C.D. Marioara, S.J. Andersen, J. Jansen, and H.W. Zandbergen, “Atomic model for GP-zones in a 6082 Al–Mg–Si system,” *Acta Materialia*, vol. 49, no. 2, 321-328, 2001.