



T6 ve Yüksek Sıcaklık Ön-Çökeltme HTPP Isıl İşleminin AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüksek Sıcaklıktaki Çekme Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi

The Investigation of the Effects of T6 and High Temperature Pre-precipitation HTPP Heat Treatments on Hot Tensile Properties of AA7075 Aluminium Alloys

Talha Sunar ¹ , Dursun Özyürek ¹ 

¹İmalat Mühendisliği Bölüm, Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, 78050 Karabük, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 11/04/2020

Kabul / Accepted: 29/05/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2020

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2020

Öz

Bu çalışmada, T6 ve HTPP olmak üzere iki farklı yaşlandırma ısıl işlem uygulanmış AA7075 alaşımının yüksek sıcaklık mekanik özellikleri incelenmiştir. Isıl işlemler ile alaşımın dayanımında ve sertliklerinde meydana gelen değişimlerin araştırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle, 100, 200 ve 300°C sıcaklıklarda çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri yapılan numunelerin mikroyapıları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin, HTPP uygulanan numunelere göre daha iyi dayanım özellikleri gösterdikleri fakat HTPP numunelerinin süneklik özelliklerinin T6'ya göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik sonuçları için de T6 uygulanan alaşımdan daha yüksek sertlik değeri sonuçları elde edilmiştir. Kırılma yüzeyleri incelemeleri 200°C altında yarı-sünek bir kırılma ve 200 ve 300°C sıcaklıklarda sünek kırılma olduğunu göstermektedir. Sünekliğin artan sıcaklıkla birlikte arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“AA7075 alaşımı, yaşlandırma, sertlik, mikroyapı, sıcak çekme”

Abstract

Mechanical properties at elevated temperatures for AA7075 aluminium alloy processed with two different heat treatment as T6 and HTPP, were investigated in this study. The alteration in strength and hardness which can be occur as a result of heat treatment was aimed to research. For this purpose, tensile tests were carried out at the temperatures of 100, 200, 300°C. The microstructures of the samples which tensile tests were applied, examined by optical microscope and scanning electron microscope SEM. As results for the studies made, it was observed that T6 samples showed better strength properties but HTPP samples has better ductility properties with respect to T6 samples. For the hardness results, higher hardness values were obtained from T6 samples. Fracture surfaces examinations showed that the fracture was semi-ductile for the temperatures below 200°C and ductile for the temperatures of 200 and 300°C. It is determined that the ductility was increased with the rise in the temperature.

Key Words

“AA7075 alloy, ageing, hardness, microstructure, hot tensile”

1. Giriş

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve yüksek korozyon dirençleri nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların yoğunluklarının düşük olması sebebiyle sağladığı enerji verimliliğinin yanında, kolay geri dönüşüm özellikleriyle de son yıllarda üzerinde durulan sürdürülebilirlik bakımından tercih edilmektedir. Uçak gövde ve iskelet yapılarında, otomobil aksamlarında ve genel kullanım uygulamalarında (yüksek mukavemet ve korozyon dayanımı gereken uygulamalar için) Al-Zn-Mg-Cu serisi olarak da nitelenen 7xxx serisi alaşımlar kullanılmaktadır. 7xxx serisi alaşımlarda birincil alaşım elementi olarak %1-8 arasında Zn bulunmaktadır (Deschamps vd., 1997; Cassada vd., 2002). 7xxx alaşımları ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları arasındaki en önemli grup olarak kabul edilmektedir. Uygulanan ısıl işleme bağlı olarak mekanik özelliklerinde büyük artışlar olmaktadır (Hatch, 1984). Yüksek dayanımın gerektiren uygulamalarda, yaşlandırma ile sertleştirilebilen 7xxx serisi alüminyum alaşımları tercih edilmektedir (Rometsch vd., 2014).

Yaşlandırma ile alaşımların mekanik özelliklerinin artması, yapıda ısıl işleme oluşturulan ikincil faz çökeltilerin dislokasyon hareketinin engellenmesi/zorlaştırılmasından kaynaklanmaktadır (Şimşek vd., 2019, Tekeli vd., 2019). Yaşlandırma üç aşamalı olarak gerçekleştirilen bir ısıl işlemdir. Bunlar solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma aşamalarından oluşmaktadır. Solüsyona alma aşamasında, alaşım elementlerince zengin aşırı doymuş, tek fazlı bir katı-çözelti elde etmek amacıyla malzeme yüksek sıcaklıkta bekletilmektedir. Su verme aşamasında ise malzeme hızlı şekilde soğutulur, aşırı doymuş mikroyapının oda sıcaklığında korunması amaçlanmaktadır. Son aşama olan yaşlandırma aşamasında, hızlı soğutulan alaşım belirli bir yaşlandırma sıcaklığında belirli bir süre bekletilerek yapıda ikincil faz oluşumu sağlanmaktadır. Yaşlandırma ısıl işleminin gerçekleşebilmesi için alaşımdaki bir veya daha fazla alaşım elementinin matris içerisinde tümüyle veya yüksek oranda çözünmesi gerekmektedir (Mouritz, 2012). Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının yaşlandırılabilme kabiliyetine sahip olmaları ise, içerdikleri Zn ve Mg elementlerinin yüksek oranda çözümlerinden kaynaklanmaktadır (Chinh vd., 2004). Su verme sırasında sıcaklığın ani olarak düşmesiyle, matrisin çözünürlüğü azalmaktadır. Matriste çözülmüş olan Zn ve Mg, kafes dışına itilerek ikincil bir fazı oluşturacak şekilde kümeleşmektedir. Bu tür II. fazlar, deformasyon sırasında dislokasyon hareketini engellediklerinden dolayı, malzemenin dayanımında bir artış meydana gelmektedir. Bu durum daha detaylı ifade edilirse, su verme sonrasında mevcut aşırı doymuş katı çözelti (η) içerisinde yaşlandırma sıcaklığının etkisiyle çözülmüş olan Zn ve Mg atomları bir araya gelerek, matris kristal kafesiyle uyumlu bölgeler oluşturmaktadır. Bu bölgeler Guinier-Preston (GP bölgeleri) bölgeleri olarak adlandırılmaktadır. Sonraki yaşlanma evrelerinde GP bölgelerinde kümeleşen atomların artmasıyla, matris kristal kafesi ile yarı-uyumlu ve η' olarak ifade edilen ikinci faz oluşmaktadır. Devam eden yaşlandırma aşamalarında ise η' fazı matris kristal kafesiyle uyumsuz ve kararlı η' -MgZn₂ ikincil fazı olarak çökelmektedir (Berg vd., 2001). Malzemede meydana gelen dayanım artışı, bu kararlı ikincil faz çökeltilerin dislokasyon hareketlerini engelleyerek, dislokasyon yığımlarına sebep olması veya dislokasyonların ikincil faz çökeltilerini kesmeye çalışarak çevrelerinde halkacıklar oluşturması olarak tanımlanan Orowan mekanizması gibi iç-yapı olaylarından kaynaklanmaktadır (Ma vd., 2014). Ayrıca elde edilen bu dayanım artışı, ikincil faz çökeltilerinin boyutuna ve yapıdaki homojen dağılımına bağlıdır. 7xxx serisi alüminyum alaşımları üzerinde yapılan çalışmalar ve uygulamalar, bu alaşımların yaygın olarak optimum dayanım ve süneklik özelliklerinin elde edildiği yapay yaşlandırma (T6) ısıl işlemi üzerinde yoğunlaşmaktadır (Hatch, 1984). Fakat T6 yaşlandırılmış alaşımlar, yüksek dayanım özelliklerinin yanında korozyon dayanımı bakımından dezavantaj sağlamaktadırlar (Rao vd., 2016; Ozer & Karaaslan, 2017; Li vd. 2008). Buna karşılık, T73 gibi diğer yaşlandırma metodları, korozyon dayanımında artış sağlamalarının yanında dayanım özelliklerini olumsuz etkilemektedirler (Donald 1994, Andreatta vd. 2004, Marlaud vd. 2010). Bu nedenle, korozyon dayanımının yanında mekanik özelliklerin de korunması amacıyla, yeniden çözültüye alma ve yeniden yaşlandırma (RRA) ve yüksek sıcaklıkta ön-çökelme (HTPP) gibi farklı yaşlandırma metodları geliştirilmiştir (Cina, 1974; Melvin, 1943; Huang vd., 2007; Song & Chen, 2008). Bazı araştırmacılar tarafından, farklı metodlarla yaşlandırılan 7xxx serisi alaşımların sertlik, mekanik dayanım, aşınma dayanımı ve yorulma gibi mekanik özellikleri çalışılmıştır (Ozer & Karaaslan, 2017; Fakioglu vd., 2013; Kalyon & Özyürek, 2017). HTPP ısıl işlemi, korozyon direncini arttırmak amacıyla tane sınırlarındaki çökelti dağılımını ve kimyasını geliştirmek için farklı sıcaklık aralıklarında uygulanan, çok-adımlı bir çözültüye alma yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Rometsch vd., 2017). Huang vd. korozyon direnci ve mekanik özellikleri incelemek amacıyla Al-Zn-Mg alaşımlarına T61 ve HTPP ısıl işlemleri uygulamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda HTPP ısıl işleminin alaşımların korozyon direncini arttırdığını, aynı zamanda dayanım özelliklerinde belirgin bir düşme gerçekleşmediğini belirtmişlerdir (Huang vd., 2007). HTPP ısıl işleminin, kaba çökeltilerin tane sınırı boyunca devam eden dağılımını iyileştirdiği ve tane-sınır çökeltilerinin Cu içeriğini arttırarak gerilim korozyon direncini arttırırken, taneler arası korozyon direnci duyarlılığını azalttığı ifade edilmektedir. Ayrıca, alaşımların mekanik dayanım ve sünekliğini muhafaza ettiği de vurgulanmaktadır (Huang vd., 2012). Süneklik ve mekanik dayanım özellikleri, alaşımların kullanım koşullarına uygunluğu bakımından oldukça önemlidir. Bu alaşımların sahip oldukları alaşım elementi miktarı, oda sıcaklığında şekillendirme özelliklerini azaltmaktadır (Zhou vd., 2014). Araştırmacılar, optimum şekillendirme özelliklerini belirlemek amacıyla yüksek sıcaklıklarda altındaki mekanik özelliklerini sıcak çekme ve basma testleriyle incelemişlerdir (Park vd., 2017; Guo vd., 2018). Shojaei vd. hem tavllanmış hem de soğuk haddelenmiş 7075 alüminyumun davranışının sıcaklık ve gerilme oranından güçlü bir şekilde etkilendiğini, fakat tavllanmış numune üzerindeki etkinin daha az dikkat çekici olduğunu belirtmişlerdir (Shojaei vd., 2016).

Daha önce yapılan çalışmaların çoğu, malzemelerin yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesinin araştırılması ve uygun parametrelerin belirlenmesi amacıyla ve yüksek sıcaklıklarda (>400°C) gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda ısıl işlem koşullarının bu sıcaklıklara etkilerinin incelenmesi konusunda bir boşluk olduğu görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada, korozyon direncinin artırılması ve mekanik özelliklerinin korunması gibi olumlu etkiler sağladığı bilinen HTPP ısıl işlemi ve en yüksek mekanik özelliklerin elde edildiği T6 (yapay yaşlandırma) ile yaşlandırılan AA7075 alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda sergiledikleri mekanik özellikleri incelenmiştir. T6 ve HTPP ısıl işlemleri uygulanmış AA7075 malzemelere 100, 200 ve 300°C sıcaklıklarda çekme testleri yapılarak alaşımların sergilediği elastik ve plastik davranışlar karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Method

Deneyisel çalışmalarda kullanılan AA7075 ekstrüzyon çubuk malzemeler, Alkor Döküm Alaşımaları ve Mak. San. Tic. Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Tablo 1 de deneyisel çalışmalarda kullanılan AA7075 alaşımının kimyasal bileşimi verilmektedir.

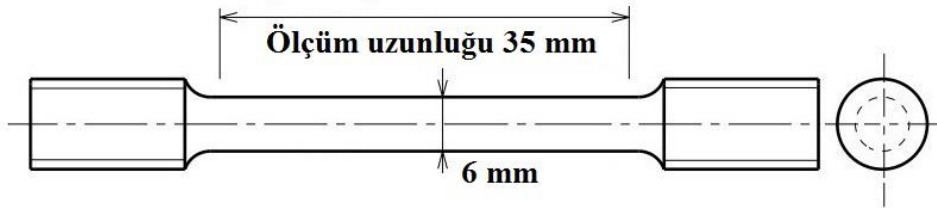
Tablo 1. AA7075 malzemeye ait kimyasal analiz sonuçları

Elementler	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti
Kimyasal bileşim [%]	5.16	2.19	1.3	0.28	0.17	0.15	0.19	0.009

Yaşlandırma ısıl işlemleri, Protherm PLF110 ısıl işlem fırında gerçekleştirilmiştir. Temin edilen tüm numuneler, öncelikle 500°C sıcaklıkta 2 saat homojenleştirilmiştir. Daha sonra ASTM E21-09 (Standard, 2009) standartlarına uygun biçimde torna tezgahında şekillendirilmişlerdir. Üretilen çekme numunelerine T6 ve HTPP ısıl işlemleri uygulanmıştır. T6 ısıl işlemi için numuneler 485°C'de 2 saat çözeltiye alındıktan sonra suda hızlı soğutulmuştur. Hızlı soğutulan numuneler 120°C sıcaklıkta 24 saat yaşlandırılmıştır. HTPP ısıl işlemi için ise numuneler T6 ısıl işlemi ile aynı parametrelerde çözeltiye alındıktan sonra fırında 450°C'de 30 dakika bekletilmiş (ön-çökme) ve yine su verme işlemini takiben 120°C sıcaklıkta 24 saat yaşlandırılmıştır.

Çekme testleri sonrasında çekilen AA7075 malzemelerden örnekler kesilerek ASTM E3-11 (Standard, 2011) standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Keller solüsyonunda (95 mL saf su, 2.5 mL nitrik asit, 1.5 mL hidroklorik asit, 0.5 mL hidroflorik asit) 45 saniye dağlanmıştır. Optik incelemeler için Nikon Epiphot 200 serisi Clemex kamera sistemli Optik mikroskop kullanılmıştır. Detaylı mikroyapı ve mikroyapı incelemeleri, Bruker X Flash 6/10 enerji dağılım spektrometresi (EDS) Carl Zeiss Ultra Plus Gemini taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında yapılmıştır. Yapıda meydana gelen değişimlerin ve ikincil fazların belirlenmesi için, Rigaku Ultima IV X-Ray kırınım deseni analiz (XRD) cihazında ve 10-90 derece aralığında 3 derece/sn hızında XRD incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Sertlik ölçümleri için hazırlanan numunelerin yüzeyi gerekli hassasiyete temizlenerek sertlikleri ölçülmüştür. Ölçümler Shimadzu mikro-sertlik cihazında 500gf (HV0.5) yük ve 15 s yüzeye uygulanarak yapılmıştır ve yapılan her ölçüm beş kez tekrarlanarak ortalamaları alınmıştır. Yüksek sıcaklıklardaki çekme testleri 600 kN yük kapasitesine sahip ve 1100°C sıcaklığa kadar çekme yapabilen Zwick/Roell Z600 mekanik test cihazı kullanılarak 0.001/saniye çekme hızında ASTM E21-09 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan çekme numunelerinin ölçüleri ve ölçüm uzunluğu, Şekil 1'de verilmektedir. Çekme testleri sonucunda elde edilen eğrilerden akma gerilmesi, maksimum çekme gerilmesi, elastikiyet modülü ve yüzde uzama miktarları gibi değerler hesaplanmış ve ısıl işlem metotlarının bu değerlere etkileri tartışılmıştır.

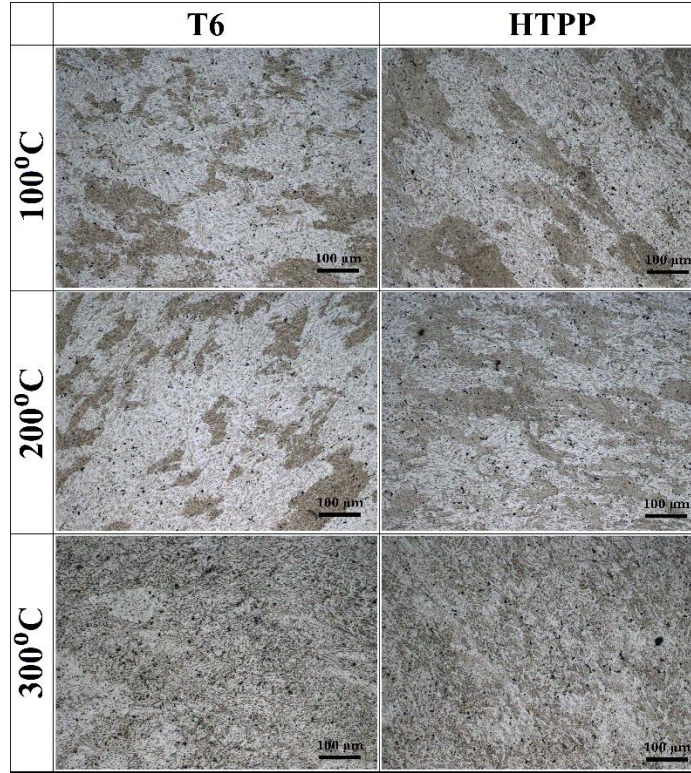


Şekil 1. AA7075 malzemenin şekillendirilen çekme testi numunelerinin ölçüleri.

3. Bulgular ve Tartışma

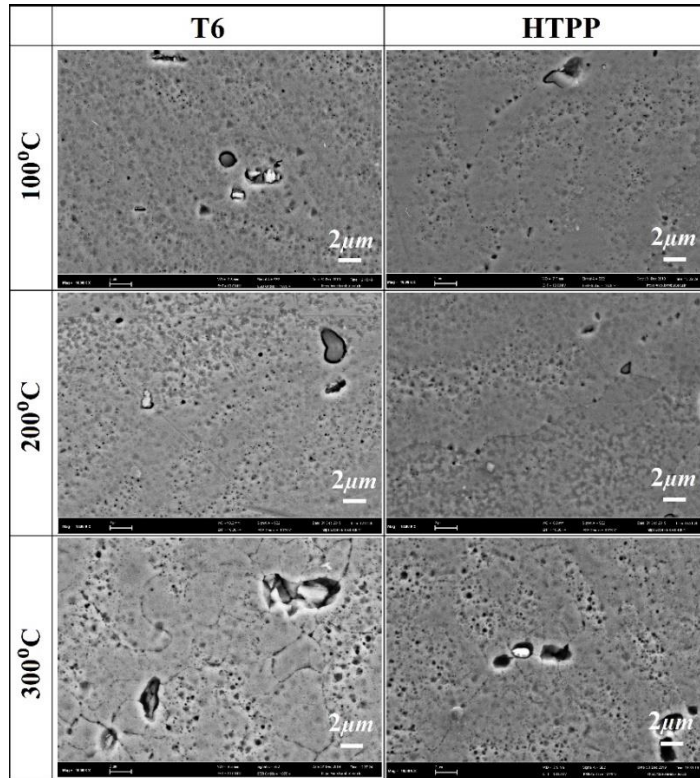
3.1. Mikroyapı İncelemeleri

T6 ve HTPP ısıl işlemleri uygulanarak yüksek sıcaklıklarda çekme işlemi yapılan AA7075 numunelerin mikro-yapılarının optik mikroskop görüntüleri, Şekil 2'de verilmiştir. Mikroyapılar incelendiğinde 200°C'ye kadar olan sıcaklıklarda mikroyapılarda kayda değer bir değişim görülmemiştir. Fakat 300°C'de çekmeye maruz kalan numunenin mikroyapısındaki yaşlanma etkisinin neredeyse tamamen kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklığın matris fazının çözünürlüğünü artırarak Al-Zn-Mg-Cu alaşımında görülen Al-Cu-Mg ötektik veya Al-Cu türü ötektik fazlarının dağılması şeklinde yorumlanabilir (Kim vd., 2001; Liu vd., 2003).



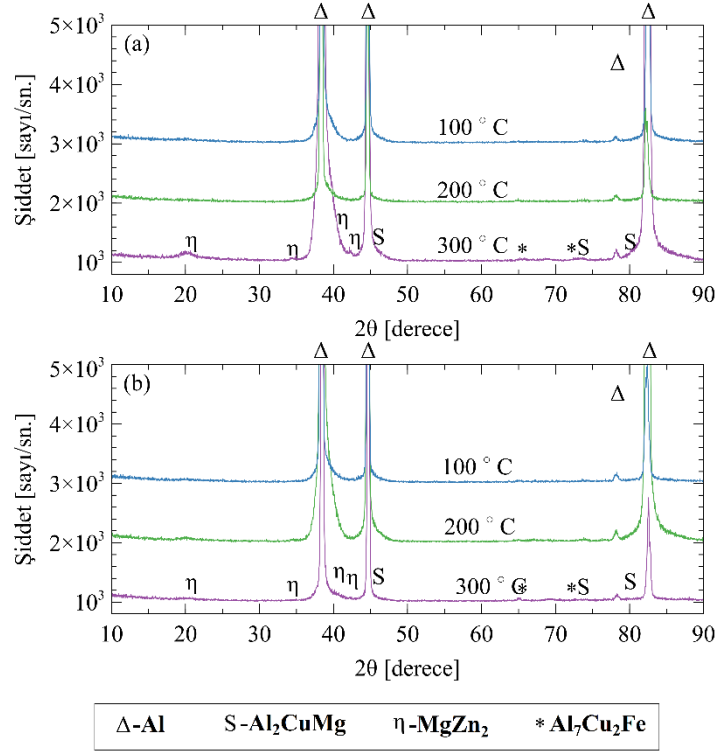
Şekil 2. T6 ve HTPP ısıt işlemleri ile yaşlandırılan ve farklı sıcaklıklarda çekme testi uygulanan AA7075 numunelerin optik mikroyapı görüntüleri.

Şekil 3’de, T6 ve HTPP ısıt işlemleri ile yaşlandırılan ve farklı sıcaklıklarda çekme testi uygulanmış AA7075 alaşımının mikroyapı SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 2’de verilen optik mikroyapı görüntüleri gibi SEM görüntüleri arasında benzerlik olduğu görülebilmektedir. Hem T6, hem de HTPP ısıt işlemleri uygulanarak yaşlandırılan AA7075 alaşımlarının mikroyapıları karşılaştırıldığında, T6 ısıt işlemi uygulanan alaşımın mikroyapısında görülen $MgZn_2$ (ikinci faz) çökeltilerinin HTPP ısıt işlemi uygulanan alaşımın mikroyapısına kıyasla daha belirgindir. Bu durum, uygulanan ısıt işlem yöntemi ve parametrelerinin yapıda oluşan $MgZn_2$ çökeltilerinin boyutları ve hacimce oranları üzerinde etkili olduğunu göstermektedir (Berg vd., 2001; Viana vd., 1999).



Şekil 3. T6 ve HTPP yöntemleriyle yaşlandırılan ve farklı sıcaklıklarda çekme testi uygulanmış AA7075 alaşımının mikroyapı SEM görüntüleri.

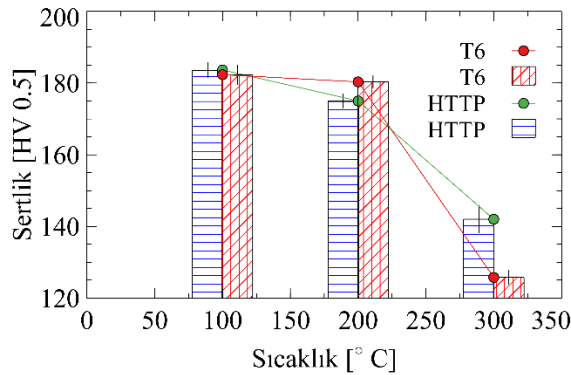
Yüksek sıcaklıklarda çekme testi uygulanan alaşımların XRD analizi sonuçlarına göre, alaşımların mikroyapılarında alüminyumun (matris faz) yanında 7xxx serisi alaşımlarda S fazı olarak da bilinen tanımlanan Al_2CuMg fazı, η (MgZn_2) fazı ve $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ fazının olduğu belirlenmiştir (PDF Card No.: 00-001-1176, Al_2CuMg PDF Card No: 00-028-0014, MgZn_2 PDF Card No: 00-034-0457, $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ PDF Card No: 00-025-1121). Şekil 4’de Elde edilen XRD sonuçları verilmiştir. AA7075 alaşımlarının yapısında MgZn_2 (η) ve $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ (S) fazlarının bulunduğu, daha önce yapılan bazı çalışmalarda da belirtilmektedir (Fakioglu vd., 2013; Zou vd., 2017; Taheri-Mandarjani vd., 2015).



Şekil. 4. Isıl işlem uygulanmış AA7075 numunelerin XRD sonuçları. (a) T6, (b) HTPP.

3.2. Sertlik Sonuçları

Yaşlandırma ısıl işlemleri ile alaşımların yapısında ikinci faz çökeltilerin oluşturularak, dayanımlarının ve sertliklerinin artırılabilirdiği bilimsel bir gerçektir (Ferrer vd., 2003). Genel olarak sertlik ve dayanımdaki artış mekanizması, matristeki ikinci faz parçacıklarının dislokasyon hareketini zorlaştırması/engellemesi ve böylece deformasyon için gerekli olan gerilme seviyesinin yükselmesi olarak açıklanmaktadır. Şekil. 5’de T6 ve HTPP yaşlandırma ısıl işlem uygulanmış ve farklı sıcaklıklarda çekme testi yapılan AA7075 alaşımının sertlik değişimleri verilmiştir.



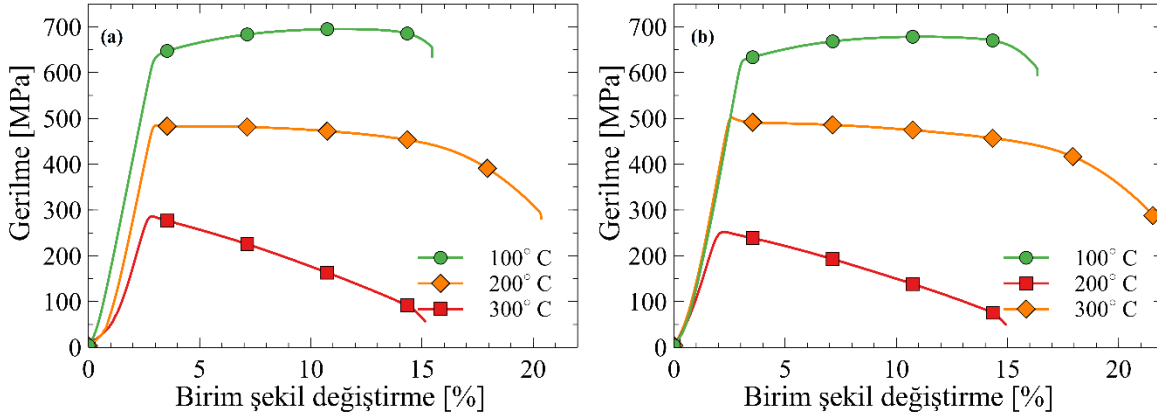
Şekil. 5. T6 ve HTPP yaşlandırma ısıl işlem uygulanmış ve farklı sıcaklıklarda çekme testi yapılan AA7075 alaşımının sertlik değişimleri.

T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış AA7075 alaşımının 100, 200 ve 300°C sıcaklıklarda çekme testlerinden sonraki sertlikleri sırasıyla 182, 180 ve 125 HV olarak gözlemlenirken bu değerler HTPP uygulanmış numuneler için 183, 175 ve 142 HV olarak ölçülmüştür. 100°C sıcaklıkta çekilen numunelerde elde edilen sonuçlar, AA7075 alaşımının ısıl işlem uygulanmamış halinin yaklaşık 2 katıdır. Yaşlandırma ısıl işlemlerinin AA7075 alaşımının sertliğini belirgin olarak artırdığı bilindiği için, elde edilen sertlik değerleri literatürdeki çalışmalarla uyumludur (Zhang vd., 2020; Zhang vd., 2019; Jung vd., 2018). Bununla birlikte, T6 ısıl işlemi uygulanan malzemelerin ise HTPP uygulanan alaşımlara göre daha yüksek sertliğe sahip olduğu bildirilmiştir (Kalyon & Özyürek, 2017; Rahman vd., 2018; Iwaszko & Kudła, 2020). T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan alaşımlarda ikinci faz

çökeltilerin tane sınırlarında yoğun ve sürekli dağılım sergilemektedir (Li vd., 2008). Bu durum, T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin sertliklerinin daha yüksek olduğunu açıklamaktadır. Yüksek sıcaklıkta çekme testi uygulanan numunelerin sertlikleri, artan sıcaklıkla birlikte azalmaktadır. Bilindiği gibi artan sıcaklıkla birlikte bütün metal ve alaşımlarının dayanımı ve sertlikleri azalmaktadır.

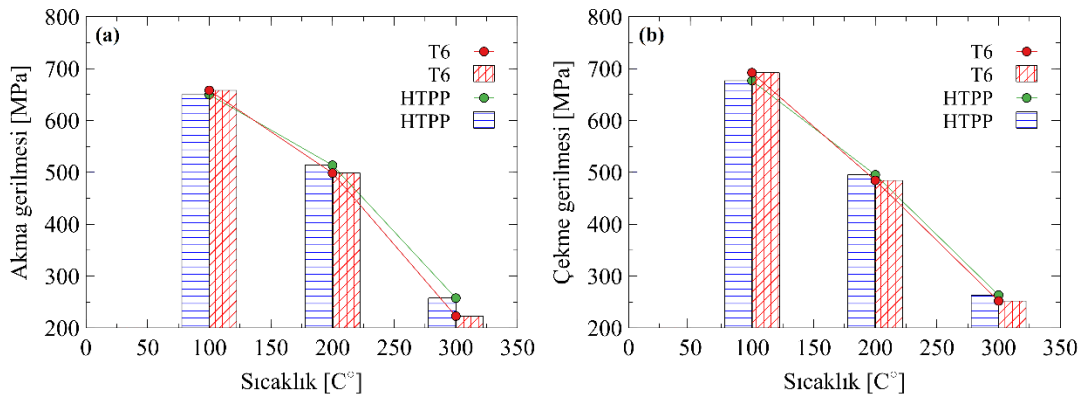
3.3. Çekme Testi Sonuçları

Şekil 6'da, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Farklı yaşlandırma ısıl işlemleri (T6 ve HTPP) uygulanmış AA7075 alaşımların çekme-uzama eğrileri tahmin edildiği gibi, artan sıcaklıkla birlikte azalma eğilimi sergilemektedir. Bu da daha düşük gerilme seviyelerinde deformasyonun meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil. 6. AA7075 numunelerin farklı sıcaklıklardaki gerilme- birim şekil değiştirme eğrileri (a) T6, (b) HTPP.

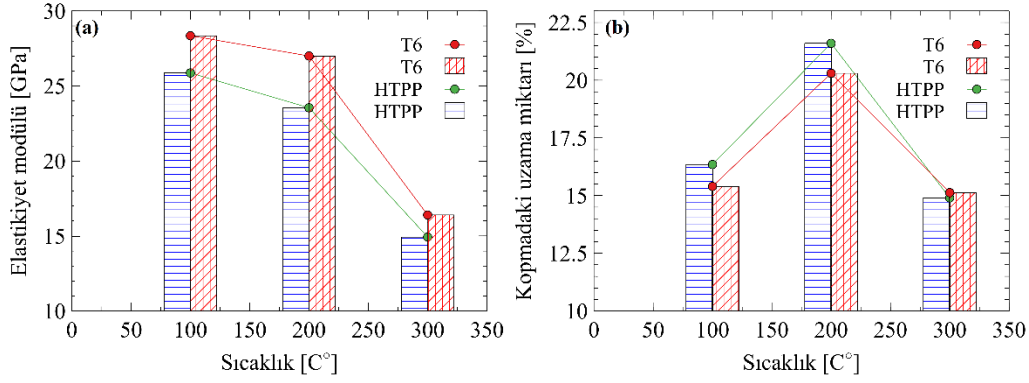
İki farklı (T6 ve HTPP) yaşlandırma ısıl işlem uygulanan numunelerden elde edilen eğrilerin birbirleriyle benzer bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri üzerinden akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve elastikiyet modülü gibi değerler hesaplanarak, Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil. 7. AA7075 numunelerin farklı sıcaklıklardaki akma ve çekme gerilmeleri değerlerinin karşılaştırılması (a) akma gerilmesi, (b) çekme gerilmesi.

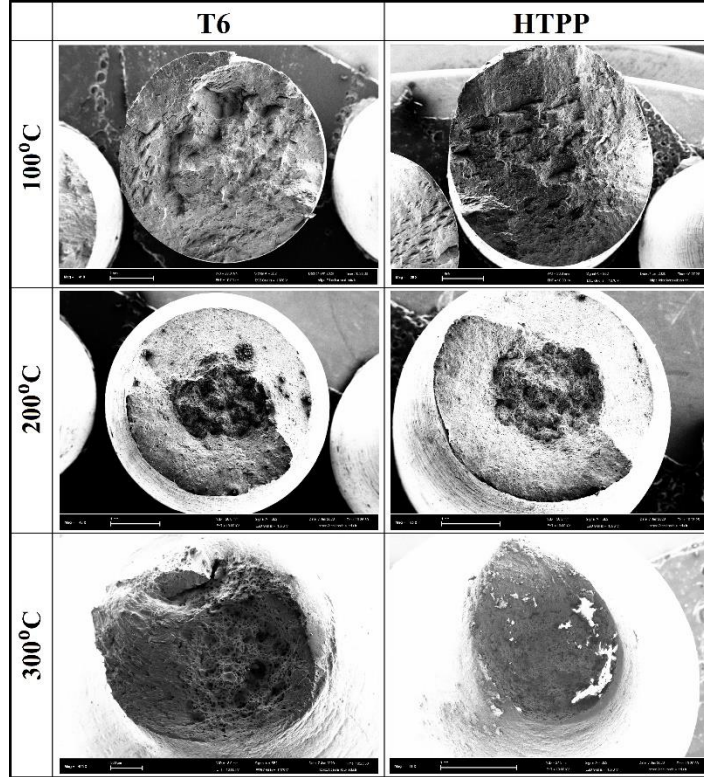
Şekil 7'de verilen akma ve çekme gerilmesi sonuçları incelendiğinde, T6 ısıl işlemi uygulanan AA7075 numunelerin 100, 200 ve 300°C sıcaklıklarda akma ve çekme dayanımı değerleri sırasıyla (akma gerilmesi/çekme gerilmesi) 658/692, 484/498 ve 222/252 MPa iken aynı değerler HTPP numuneler için 649/676, 495/513 ve 257/263 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu veriler dikkate alındığında, HTPP ısıl işlemi ile T6 ısıl işlemi ile elde edilen dayanıma oldukça yakın bir dayanım artışının elde edildiğini göstermektedir. T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan alaşımın akma ve çekme dayanımının, HTPP uygulanan malzemelerden bir miktar daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, HTPP numunelerin yaşlandırma öncesinde daha uzun süre ısıl işleme maruz kalmaları ve dolayısıyla oluşan $MgZn_2$ çökeltilerinin daha kaba ve az yoğun oluşması olarak yorumlanabilir. Benzer durum uzun süreli yaşlandırma sürelerinde yapıdaki $MgZn_2$ çökeltilerinin boyutlarının büyümesi olarak ifade edilmektedir (Ozer & Karaaslan, 2017). Akma gerilmesi ve çekme gerilmesi değerlerinin de sıcaklığın artmasıyla önemli bir miktarda azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilen mikroyapılardaki farklılıklardan da anlaşılacağı gibi artan sıcaklıkla malzemedeki yaşlanma etkilerinin kaybolması sebebiyle gerçekleştiği söylenebilir. Gerilme-birim şekil değişikliği grafiklerinden elde edilebilecek ve malzemenin elastik ve plastik özellikleri hakkında bilgi verebilecek diğer parametreler ise elastikiyet modülü ve

numunelerin toplam uzama miktarlarıdır. Şekil 8'de, AA7075 alaşımlarının elastikiyet modülü değerleri ve kopma anına kadar gerçekleşen uzama miktarları verilmiştir.



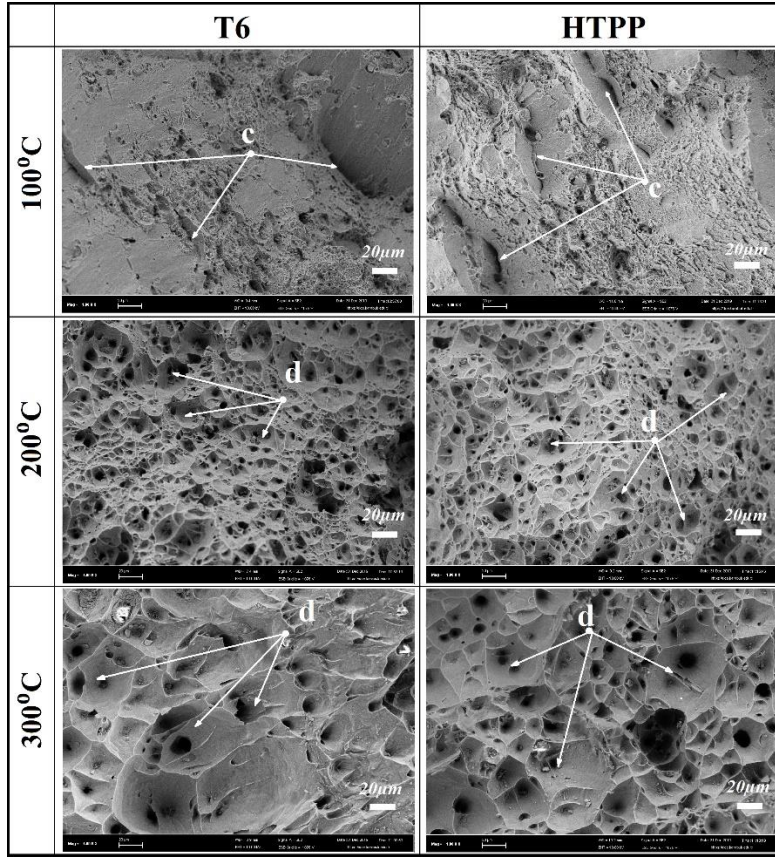
Şekil. 8. AA7075 numunelerin farklı sıcaklıklardaki (a) elastikiyet modülü, (b) kopma anındaki uzama miktarı.

Şekil. 8 'de verilen AA7075 numunelerin farklı sıcaklıklardaki elastikiyet modülleri karşılaştırıldığında, T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış olan numunelerin yüksek sıcaklıklarda HTPP ısıl işlemi uygulanan numunelere kıyasla daha yüksek elastikiyet modülüne sahip olduğu görülmektedir. Kopma anına kadar gerçekleşen plastik deformasyonla birlikte numunelerin uzama miktarları incelendiğinde, HTPP yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin 300°C sıcaklığa kadar, T6 uygulanan numunelere kıyasla daha fazla uzama sergiledikleri görülmektedir. Bu sonuçlardan sonra, HTPP ısıl işlemi uygulanan numunelerin daha sünek oldukları söylenebilir. T6 ısıl işlemi uygulanan malzemelerin daha yüksek elastikiyet modülüne sahip olması daha gevrek oldukları anlamına geldiği gibi, daha düşük yüzde uzama davranışı göstermelerini de açıklamaktadır. T6 ve HTPP ısıl işlemleri uygulanmış olan AA7075 numunelerin yüksek sıcaklıklardaki deformasyon davranışını daha detaylı olarak irdeleyebilmek adına çekme numunelerinin kırık yüzeyleri incelenmiş ve bu yüzeylerin SEM görüntüleri Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil. 9. AA7075 numunelerin farklı sıcaklıklardaki kırılma yüzeylerinin makro görüntüleri.

Şekil 9'de numunelerin kırılan yüzeylerin makro görüntüleri bulunmaktadır. 100°C sıcaklıkta çekilen numunelerin kırık yüzeylerinin eğik düzlemsel oldukları gözlemlenmiştir. Fakat 200°C sıcaklıkta çekilen numunelerin kırık yüzeylerinin merkezlerinin düz, kenarlarının ise konik oldukları görülmektedir. Numunelerin boyun çapları başlangıca göre 100°C sıcaklıkta yaklaşık %18, 200°C sıcaklıkta yaklaşık %34 ve 300°C sıcaklıkta ise yaklaşık %60 küçülmüştür. Uygulanan iki farklı ısıl işlemin numunelerin kırılma yüzeylerinin makro-yapılarında belirgin bir farklılık olmadığı görülmektedir. Şekil 10'da kırık yüzeylerin SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil. 10 AA7075 numunelerin farklı sıcaklıklardaki kırılma yüzeylerinin mikro görüntüleri.

Şekil 10 da verilen kırık yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, yüksek sıcaklıklarda çukurcukların (Şekil 10, “d”) ve çatlak benzeri hatların düzlemsel olduğu bölgelerin (Şekil 10, “c”) varlığı görülebilmektedir. Kırık yüzeylerde çukurcuklar, mikro gözenekler ve $MgZn_2$ çökeltileri gözlenmektedir. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan alüminyum alaşımlarının $MgZn_2$ çökeltileri içerdiklerinde, kırılma yüzeylerde çukurcuk oluşumu şeklinde sünek bir davranış gösterdiği daha önce yapılan bir çalışmada ifade edilmektedir (Kobayashi, 2000). Aynı zamanda çukurcuk oluşumunda, çekme testleri sırasındaki gerilim yüklemesi sırasında oluşan mikro gözeneklerin birleşmesi de önemli bir faktördür (Rout vd., 2015). Bu mikro gözeneklerin çekme testi sırasındameydana gelen gerilmelerden kaynaklı, parçacık (çökeltili) matris ayrışmasından veya bu parçacıklarda meydana gelen kırılmalardan da kaynaklanabilmektedir (Maire vd., 2011). Kırılma yüzeyi SEM görüntülerinin, literatürdeki benzer alaşımların görüntüleri ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır (Rout vd., 2015; Malarvizhi & Balasubramanian, 2011; Acer vd., 2016; Liu vd., 2003]. Sonuç olarak numunelerin 200°C sıcaklığa kadar yarı-sünek bir kırılma davranışı gösterdiği söylenebilir. Bazı çalışmalarda her iki kırılma mekanizmasının da aynı malzemedeki farklı bölgelerde meydana gelebildiği vurgulanmaktadır (You vd., 1995; Pahlavani vd., 2019). Sıcaklığın artmasıyla çatlak yüzeyi gibi düzlemsel kırılma yüzeyleri yerlerini, daha düzenli ve yoğun çukurcuk oluşumuna bırakmaktadır. Bu sıcaklıklarda malzeme tümüyle sünek olarak kırılmaya uğramaktadır. Sıcaklık arttıkça çukurcukların boyutlarında da bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum ikinci faz çökeltilerinin birleşmesinden ve boyutlarının büyümesinden kaynaklanabilmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, T6 ve HTPP yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanmış AA7075 alaşımlarının 300°C sıcaklığa kadar olan yüksek sıcaklıklardaki çekme davranışının incelenmesini kapsamaktadır. Optik ve taramalı elektron mikroskobu ile yapılan mikroyapı incelemelerinde, yaşlandırma ısıl işlemleri sonucunda yapıda ikincil faz ($MgZn_2$) çökeltilerinin olduğu görülmüştür. Çekme testi sonuçlarına göre T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numuneler az miktarda daha yüksek akma ve çekme dayanımı özellikleri göstermektedirler. Sertlik sonuçlarında, T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin en iyi sonucu verdiğini göstermekle birlikte, artan sıcaklıkla birlikte, HTPP yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin sertliklerinin, T6 ısıl işlem uygulanan numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Sıcaklığın artmasıyla tüm mekanik özelliklerde bir azalma gözlemlenmiştir. Fakat 300°C sıcaklıkta her bakımdan ani bir düşüş meydana gelmiştir. Süneklik bakımından HTPP yaşlandırma ısıl işleminin AA7075 alaşımında sünekliği arttırdığı belirlenmiştir. Yapılan kırılma yüzeyleri incelemeleri ile numunelerin 100°C sıcaklığa kadar yarı-sünek, daha yüksek sıcaklıklarda ise sünek bir kırılma mekanizması ile deforme olduğu belirlenmiştir.

Referanslar

Acer, E., Çadırli, E., Erol, H., Kirindi, T. & Gündüz, M. (2016). Effect of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of Al-5.5Zn-2.5Mg alloy. *Materials Science and Engineering A*, 662,144–156.

- Andreatta, F., Terryn, H. & De Wit J. H. W. (2004). Corrosion behaviour of different tempers of AA7075 aluminium alloy. *Electrochimica Acta*, 49 (17–18), 2851–2862.
- Berg, L. K., Gjønnnes, J., Hansen, V., Li, X. Z., Knutson-Wedel, M., Schryvers, D., & Wallenberg, L. R. (2001). GP-zones in Al–Zn–Mg alloys and their role in artificial aging. *Acta materialia*, 49(17), 3443–3451.
- Cassada, W., Liu, J. & Staley, J. (2002). Aluminum alloys for aircraft structures. *Advanced Materials And Processes*, 160 (12), 27–29.
- Chinh, N. Q., Lendvai, J., Ping, D. H. & Hono, K. (2004). The effect of Cu on mechanical and precipitation properties of Al–Zn–Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 378(1-2), 52–60.
- Cina, B. M. (1974). Unitet States Patent. Patent Number: 3,856,584.
- Deschamps, A., Bréchet, Y., Guyot, P. & Livet, F. (1997). On the influence of dislocations on precipitation in an Al-Zn-Mg alloy. *Zeitschrift Fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques*, 88 (8), 601–606.
- Donald O. S. (1994). United States Patent. Patent Number: 3,198,676.
- Fakioglu, A., Özyürek, D. & Yilmaz, R. (2013). Effects of different heat treatment conditions on fatigue behavior of AA7075 alloy. *High Temperature Materials and Processes*, 32 (4), 345–351.
- Ferrer, C. P., Koul, M. G., Connolly, B. J. & Moran, A. L. (2003). Improvements in strength and stress corrosion cracking properties in aluminum alloy 7075 via low-temperature retrogression and re-aging heat treatments. *Corrosion*, 59 (6): 520–528.
- Guo, Y., Zhou, M., Sun, X., Qian, L., Li, L., Xie, Y., Liu, Z., Wu, D., Yang, L., Wu, T., Zhao, D., Wang, J., & Zhao, H. (2018). Effects of temperature and strain rate on the fracture behaviors of an Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials*, 11 (7), 1–15.
- Hatch, J. E. (1984). *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals,
- Huang, L. P., Chen, K. H., Li, S. & Song, M., (2007). Influence of high-temperature pre-precipitation on local corrosion behaviors of Al-Zn-Mg alloy. *Scripta Materialia*, 56 (4), 305–308.
- Huang, L., Chen, K., & Li, S. (2012). Influence of grain-boundary pre-precipitation and corrosion characteristics of inter-granular phases on corrosion behaviors of an Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials Science And Engineering B: Solid-State Materials For Advanced Technology*, 177 (11), 862–868.
- Iwaszko, J. & Kudła, K. (2020). Surface remelting treatment of 7075 aluminum alloy — microstructural and technological aspects. *Materials Research Express*, 7(1): 016523
- Jung, S. H., Lee, J. & Kawasaki, M. (2018). Effects of pre-strain on the aging behavior of Al 7075 alloy for hot-stamping capability. *Metals*, 8 (2):137.
- Kalyon, A., & Özyürek, D. (2017). Investigation of the effect of different heat treatments on wear behavior of AA7075 Alloy. *Acta Physica Polonica A*, 131 (1), 150–152.
- Kim, S. W., Kim, D. Y., Kim, W. G. & Woo, K. D. (2001). The study on characteristics of heat treatment of the direct squeeze cast 7075 wrought Al alloy. *Materials Science and Engineering A*, 304–306 (1–2), 721–726.
- Kobayashi, T. (2000). Strength and fracture of aluminum alloys. *Materials Science And Engineering A*, 286 (2), 333–341.
- Li, J. F., Peng, Z. W., Li, C. X., Jia, Z. Q., Chen, W. J. & Zheng, Z. Q. (2008). Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(4), 755–762.
- Liu, D., Atkinson, H. V., Kapranos, P., Jirattiticharoen, W. & Jones, H. (2003). Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixoformed high performance aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 361 (1–2), 213–224.
- Liu, G., Zhang, G. J., Ding, X. D. Sun, J. & Chen, K. H. (2003). Dependence of fracture toughness on multiscale second phase particles in high strength Al alloys. *Materials Science and Technology*, 19 (7), 887–896.
- Ma, K., Wen, H., Hu, T., Topping, T. D., Isheim, D., Seidman, D. N., Lavernia, E. J. & Schoenung, J. M. (2014). Mechanical behavior and strengthening mechanisms in ultrafine grain precipitation-strengthened aluminum alloy. *Acta Materialia*, 62 (1), 141–155.
- Maire, E., Zhou, S., Adrien, J. & Dimichiel, M., (2011). Damage quantification in aluminium alloys using in situ tensile tests in X-ray tomography. *Engineering Fracture Mechanics*, 78 (15), 2679–2690.
- Malarvizhi, S. & Balasubramanian, V. (2011). Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties. *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)*, 21 (5), 962–973.

- Marlaud, T., Deschamps, A., Bley, F., Lefebvre, W., & Baroux, B. (2010). Influence of alloy composition and heat treatment on precipitate composition in Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Acta Materialia*, 58 (1), 248–260.
- Melvin, H. B., (1943). Unitet States Patent. Patent Number: 4,477,292.
- Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to Aerospace Materials*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd.
- Ozer G., & Karaaslan A. (2017). Properties of AA7075 aluminum alloy in aging and retrogression and reaging process. *Transactions of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)*, 27 (11), 2357–2362.
- Pahlavani, M., Marzbanrad, J., Rahmatabadi, D., Hashemi, R. & Bayati, A. (2019). A comprehensive study on the effect of heat treatment on the fracture behaviors and structural properties of Mg-Li alloys using RSM. *Materials Research Express*, 6(7), 076554.
- Park, S. Y., & W. J. Kim. (2017). Enhanced Hot Workability and Post-Hot Deformation Microstructure of the As-Cast Al-Zn-Cu-Mg Alloy Fabricated by Use of a High-Frequency Electromagnetic Casting with Electromagnetic Stirring. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(7), 3523-3539.
- Rahman, A. M., Sirajudeen, N. & Patnaik, S. (2018). Effect of different heat treatments and varying volume fraction of nano Al₂O₃ particles on the hardness and wear resistance of Al 7150 alloy matrix composite synthesized by hot uniaxial compaction technique. *Materials Research Express*, 6(8), 086515.
- Rao, A. C. U., Vasu, V., Govindaraju, M. & Srinadh, K. V. S., (2016). Stress corrosion cracking behaviour of 7xxx aluminum alloys: A literature review. *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)*, 26 (6), 1447–1471.
- Rometsch, P. A., Zhang, Y. & Knight, S. (2014). Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys - Some recent developments. *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)*, 24 (7), 2003–2017.
- Rout, P. K., Ghosh, M. M. & Ghosh, K. S. (2015). Microstructural, mechanical and electrochemical behaviour of a 7017 Al-Zn-Mg alloy of different tempers. *Materials Characterization*, 104,49–60.
- Shojaei, K., Sajadifar, S. V., & Yapici, G. G. (2016). On the mechanical behavior of cold deformed aluminum 7075 alloy at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering A*, 670,81–89
- Şimşek, İ., Şimşek, D., Özyürek, D. & Tekeli, S. (2019). The effect of the aging time on microstructure and mechanical properties of the AA7075 alloy after T6 heat treatment. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*, 41(6), 817-824.
- Song, M. & Chen, K. (2008). Effects of the enhanced heat treatment on the mechanical properties and stress corrosion behavior of an Al-Zn-Mg alloy. *Journal of Materials Science*, 43 (15), 5265–5273.
- Standard, A. S. T. M. (2009). ASTM E21–09: standard test method for elevated temperature tension tests of metallic materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Standard, A. S. T. M., E3-11. (2011). Standard guide for preparation of metallographic specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Taheri-Mandarjani, M., Zarei-Hanzaki, A., & Abedi, H. R. (2015). Hot ductility behavior of an extruded 7075 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*, 637,107–122.
- Tekeli, S., Şimşek, İ., Şimşek, D. & Özyürek, D., (2019). Effects of different solid solution temperatures on microstructure and mechanical properties of the AA7075 alloy after T6 heat treatment. *High Temperature Materials and Processes*, 38 (1), 892-896.
- Viana, F., Pinto, A. M. P., Santos, H. M. C. & Lopes, A. B. (1999). Retrogression and re-ageing of 7075 aluminium alloy: microstructural characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 92,54–59.
- You, C. P., Thompson, A. W. & Bernstein, I. M. (1995). Ductile fracture processes in 7075 aluminum. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 26 (2), 407–415.
- Zhang, H. B., Wang, B., Zhang, Y. T., Li, Y., He, J. L. & Zhang, Y. F. (2020). Influence of aging treatment on the microstructure and mechanical properties of CNTs/7075 Al composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 814,152357.
- Zhang, P. X., Yan, H., Liu, W., Zou, X. L. & Tang, B. B. (2019). Effect of T6 heat treatment on microstructure and hardness of nanosized Al₂O₃ reinforced 7075 aluminum matrix composites. *Metals*, 9 (1),44.
- Zhou, M., Lin, Y. C., Deng, J., & Jiang, Y. Q. (2014). Hot tensile deformation behaviors and constitutive model of an Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials and Design*, 59,141–150.
- Zou, X. L., Hong, Y. A. N., & Chen, X. H. (2017). Evolution of second phases and mechanical properties of 7075 Al alloy processed by solution heat treatment. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(10), 2146-2155.