

ALÜMİNYUM İŞLEM ALAŞIMLARINDA T651 ISIL İŞLEMİ UYGULAMALARI VE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF T651 HEAT TREATMENT APPLICATIONS AND EFFECTS IN ALUMINUM WROUGHT ALLOYS

Seracettin AKDI¹, Havva DEMİRPOLAT²

¹AKDI Mühendislik, Türkiye

²Selçuk Üniversitesi, Türkiye

Anahtar Kelimeler: ısıt işlemler, T651, işlemler alaşımları, özel ısıt işlemler

Abstract

546/5000

Aluminum alloys vary according to their production capability, chemical composition and heat treatment conditions. According to ASTM standards, 2XXX, 6XXX and 7XXX group alloys which are in process alloy group are strengthened by heat treatment. Heat treatment conditions between T1-T10 are applied to this group of alloys. The basic principle of these heat treatments is the precipitation hardening by solution and aging mechanisms. In addition, these heat treatment codes are 2 and 3 digits, indicating that the process is more specialized.

In this study, properties, application principles and performance of T651 heat treatment are investigated and reported. In routine T6 heat treatment, the workpiece was heated to above the solution temperature to give water and then artificially aged. T651 is the process of eliminating residual stress on the final product by applying stress relief after solution and before aging. At the end of this process, especially the loads to the workpiece become more homogeneous. In addition, dimensional changes were prevented after machining.

Özet

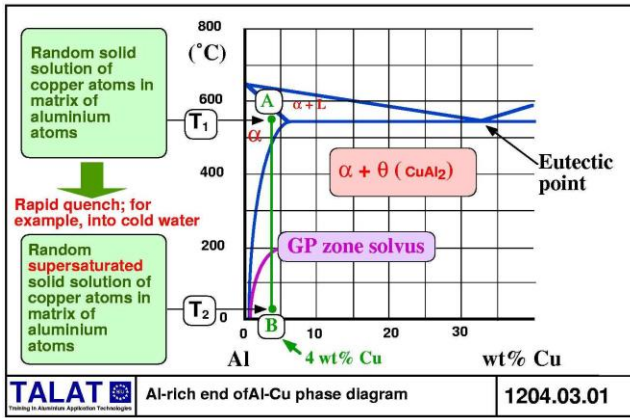
Alüminyum alaşımları üretilebilirlikleri, kimyasal kompozisyonları ve ısıt işlem koşullarına göre farklılıklar göstermektedirler. ASTM standartlarına göre işlem alaşımı gurubunda olan 2XXX, 6XXX ve 7XXX gurubu alaşımlar ısıt işlem ile mukavemetlenmektedirler. Bu gurup alaşımlara T1-T10 arası ısıt işlem koşulları uygulanmaktadır. Bu ısıt işlemlerin temel esası çözeltiye alma ve yaşlandırma mekanizmaları ile çökeltme sertleşmesidir. Ayrıca bu ısıt işlem kodlarının 2 ve 3 hane olması da prosesin daha da özelleştğini işaret etmektedir.

Bu çalışmada T651 ısıt işleminin özellikleri, uygulama esasları ve performansı araştırılarak raporlanmıştır. Rutin T6 ısıt işleminde iş parçası çözeltiye alma sıcaklığının üzerine kadar ısıtılarak su verilmiş ve ardından yapay yaşlandırılmıştır. T651 işleminde ise çözeltiye alma

sonrasında ve yaşlandırma öncesinde gerilim giderme uygulanarak nihai ürün üzerindeki kalıntı gerilim ortadan kaldırılması sürecidir. Bu süreç sonunda özellikle iş parçasına gelecek yükler daha homojen olmaktadır. Ayrıca talaşlı imalat sonrasında ölçüsel değişikliğin önüne geçilebilmektedir.

1. Giriş

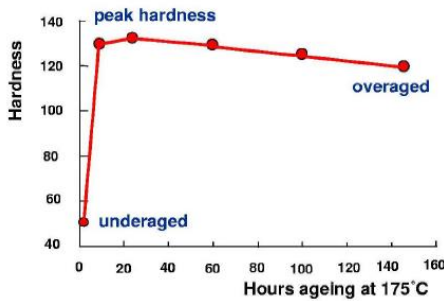
Alüminyum, dünya üzerinde bulunan en fazla 3. elementtir. Alüminyum kendi başına oldukça yumuşak bir metal olmasına rağmen alaşım elementlerinin eklenmesi ile yüksek akma ve çekme mukavemetine ulaşabilmektedir. Alüminyum alaşım oranları aynı zamanda üretim teknolojilerini de belirlemektedir. Örneğin Si (silisyum) ötektik alaşımları kalıba döküm yöntemi ile kolaylıkla üretilebilirken düşük Si (%0,5-1.5) içeren alaşımlar ancak sürekli çil döküm yöntemleri ile üretilebilmektedirler. Alaşımın malzeme özellikleri üzerindeki etkisi olduğu gibi üretim yöntemi ve sonrasında uygulanan ısıt işleminde malzeme özellikleri üzerinde etkisi vardır. Alüminyum ısıt işlemi teknolojisi, çökeltme sertleşmesi prensibine göre gerçekleştirilmektedir. Alüminyum ana fazı içerisinde bulunan ikincil fazlar (Al - Cu, Al- Mg₂Si, Al - ZN) önce yüksek sıcaklıkta katı katı olarak difüzyon mekanizması ile çözünür ve dağılır.[1, 2] Çözeltiye alınmış alaşımın sertliği en düşük halindedir. Yapay veya doğal yaşlandırma ile alaşımın sertliği en yüksek hale gelir ve ardından aşırı yaşlanma ile tekrar düşmeye başlar. Alüminyum mekanik özelliklerini pratik olarak ölçüp değerlendirebilmek için sertlik değerleri referans alınmaktadır. Şekil 1 de faz diyagramı üzerinden ısıt işlem mekanizması anlatılmıştır.



Şekil.1. çökeltme sertleşmesi mekanizmasının faz diyagramı üzerinden gösterimi.[1]

Bir alaşımda çökeltme sertleşmesi olabilmesi için 2 temel esas vardır. Birincisi, ikincil faz bileşeninin ana matris elementi içinde çözünebilmesi ikincisi ise faz diyagramında çözünen elementin kesilebileceği bir solvüs eğrişi olmasıdır. Çökeltme sertleşmesi işlemi 3 aşamadan oluşur. Bunlar sırasıyla; solvüs çizgisi üzerinde çözeltiye alma, ani su vererek oda sıcaklığına soğutma ve yaşlandırma. Matris içerisinde yer alan ikincil faz elementi çözeltiye alındığında katı katı içerisinde çözünerek tek bir α fazı oluşmuş olur. Faz diyagramları denge koşullarına göre çizilmiştir. Ani soğutma ise bu dengenin dışında bir durumdur. Aşırı doymun çözelti içinde hapseden Cu (bakır) matris dışına çıkarak θ fazını oluşturmak ister. Bunun için 2 seçenek vardır; ya bir süre beklenerek difüzyon etkisi ile alaşımın doğal yaşlanması yada ikincil fazları kontrollü bir şekilde çöktürerek daha yüksek mukavemete de ulaşabilmesi için difüzyonu da hızlandıran yapay yaşlandırma işlemi için ısıtmak.[1-3]

AA 6061 alaşımının 175°C da farklı sürelerle bağlı sertlik değişimi şekil 2 de yer almaktadır.[1]



Şekil.2. AA 6061 alaşımının 175°C da farklı süreler için sertlik değişimi grafiği [1]

Çökeltme sertleşmesi için farklı üretim süreçleri ve ısıtım teknikleri ile alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtım işlemlere kodları standart haline gelmiştir. Bu ısıtım kodları ASTM standartlarına göre çizelge 1 de yer almaktadır.[4]

Çizelge.1. ASTM standartlarına göre ısıtım işlem kodları.

Kod	Proses
T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, doğal yaşlandırma
T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, soğuk şekillendirme, doğal yaşlandırma
T3	Çözeltiye alma, soğuk şekillendirme, doğal yaşlandırma
T4	Çözeltiye alma, doğal yaşlandırma
T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, yapay yaşlandırma
T6	Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma
T7	Çözeltiye alma, aşırı yaşlandırma
T8	Çözeltiye alma, soğuk şekillendirme, yapay yaşlandırma
T9	Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma, soğuk şekillendirme

2. Araştırmalar

Bu çalışmada T651 ısıtım işlem süreci araştırılmış ve uygulamaları ile ilgili örnekler verilmiştir. Öncelikle bu çalışmada üzerinde durulan kavramlar açıklanmış ardından da bu konuda literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmada alüminyum işlem alaşımları için T651 ısıtım işlemi araştırılarak bir derleme yapılmıştır.

2.1. Teknolojik alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımları; kullanım koşulları, kimyasal içerikleri ve üretim teknolojilerine göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadırlar. ASTM standartlarına göre döküm ve işlem alaşımları olarak 2 ana guruba ayrılmaktadırlar. Döküm alaşımlarında 3 haneli işlem alaşımlarında ise 4 haneli kodlama yapılmıştır. 1. Hane alaşım element türünü, 2. Hane revizyon sırasını ve son haneler ise alaşım özel kodunu vermektedir. Çizelge 2 de alüminyum alaşımların ASTM ye göre sınıflandırması yer almaktadır.[3]

Çizelge.2. İşlem (dövme) alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi (ASM International, 1991).

Ana alaşım elementi	Gösterim kodu
Alüminyum \geq 99	1xxx
Al-Cu-Mg (Cu % 1-6)	2xxx
Al-Mn-Mg	3xxx
Al-Si	4xxx
Al-Mg-Mn (Mg % 1-6)	5xxx
Al-Mg-Si	6xxx
Al-Zn-Mg-Cu	7xxx
Al-Li-Cu-Mg	8xxx

Alüminyum alaşım kodlarına göre 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 9xxx gibi guruplara T6 ısıtım işlemi uygulanabilir. Bununla birlikte 2xx ve 3xx gibi alaşımlara da ısıtım işlem uygulanabilmektedir ancak döküm alaşımlarına ısıtım uygulanırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır.

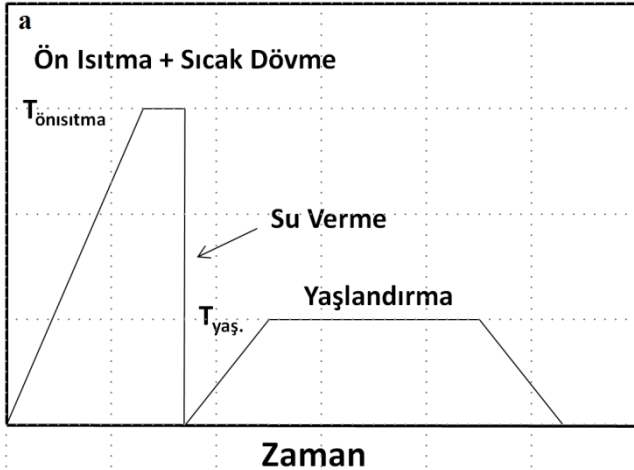
Yüksek basınçlı döküm ile üretilen parçalara ısı işlem uygulanırsa çözeltiliye alma sıcaklığında parça içine hapis olan basınçlı gaz yumuşak metal içerisinde genişleyerek parça yapısını bozabilir. Buda süngerimsi bir yapıya neden olur. Gaz alma ve sıvı metal rafinasyonu her ne kadar iyi yapılmış olsa da H₂ nüfuziyeti gibi durumlar her zaman risk teşkil etmektedir. Ötektik alaşımların su verilmesinde de özellikle Si morfolojisi çatlama eğilimi gösterebilir. Bundan dolayı su sıcaklığı 50-70 °C civarında olması tavsiye edilir.[4]

İşlem alaşımlarında ikincil fazların dönüşümü ve çözünmesi esas alınırken bazı döküm alaşımlarında Si modifikasyonu içinde ısı işlem yapılabilir. Döküm alaşımlarına yapılan bu ısı işlemdeki amaç malzeme mukavemetini artırmaktan ziyade kırılabilirliği önlemek ve gerilme özelliğini artırmaktır.[4]

Bu çalışmada 6xxx ve 7xxx alaşımları ile ilgili ısı işlemlere değinilmiştir.

2.2. T6 ısı işlemi

T6 ısı işleminde iş parçası öncelikle çözeltiliye alma sıcaklığının üzerine kadar ısıtılıp parça kalınlığına göre belirli bir zaman beklenir daha sonra ani su verilerek aşırı doymun çözeltili oluşturulmuş olur daha sonra ise 160-190°C aralığında yapay yaşlandırarak süreç tamamlanır. Şekil 3 de T6 ısı işlem adımları yer almaktadır. Isı işlem süreçlerinin pratik olarak değerlendirilebilmesi için sertlik değerleri üzerinden yorum yapılmıştır. Sertlik değeri diğer malzeme mekanik özellikleri ile de bağlantılıdır.[5] Alüminyum malzemenin sertliği ağırlıklı olarak HB (birinell) veya HV (vickers) değerinden ölçülür.[6]

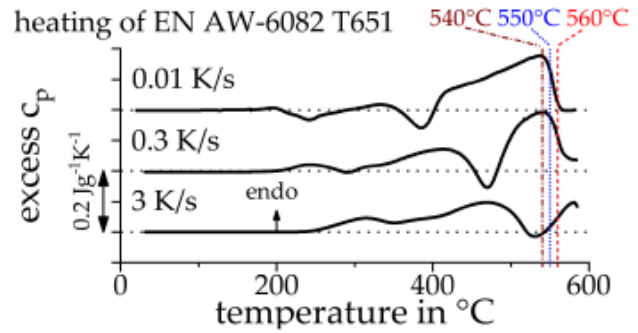


Şekil 3. T6 ısı işlem süreci[6]

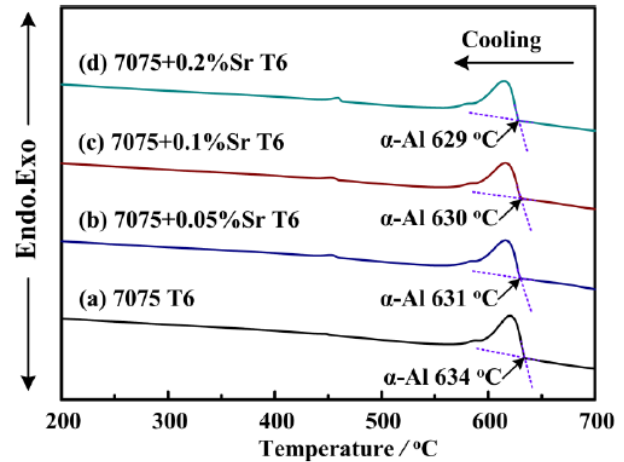
T6 ısı işlem süre ve sıcaklıkları farklı yöntemleri ile belirlenmektedir. Bunlardan birisi parametrik deneme yöntemidir. Bu yöntemde ısı işlem parametrelerinden hangisi belirlenecek ise bu süreç ele alınır ve diğer tüm süreçler sabit tutulur. Örneğin çözeltiliye alma sıcaklığı belirlenecekse yaklaşık çözeltiliye alma sıcaklığı 10 derece artırılıp azaltılarak numune boyutunda T6 ısı işlemi

yapılır. Aynı numune boyutunda aynı fırında ve aynı yapay yaşlandırma aşamalarında deney yapılır. Sertlik ölçümü ve gerekir ise çekme testi yapılarak ideal sıcaklık belirlenmiş olur. Bu yöntem her ne kadar endüstride pratik olarak kullanılıyor olsa da neden sonuç bağlantısını açıklayamamaktadır. [2]

T6 ısı işlem parametrelerini belirlemede kullanılan bir diğer yöntem ise DSC (Difransiyel Taramalı Kalorimetre) analizidir.[7] Bu yöntemin temeli faz değişimlerinde gerçekleşen termal etkilere dayanır. Bu faz değişimlerinin hangi sıcaklık aralığında gerçekleştiği çözeltiliye alma ve yapay yaşlandırma sıcaklığı ile ilgili fikir vermektedir. Şekil 4 da EN AW 6082 nin ve şekil 5 de EN AW 7075 in DSC analizleri yer almaktadır. [7, 8]



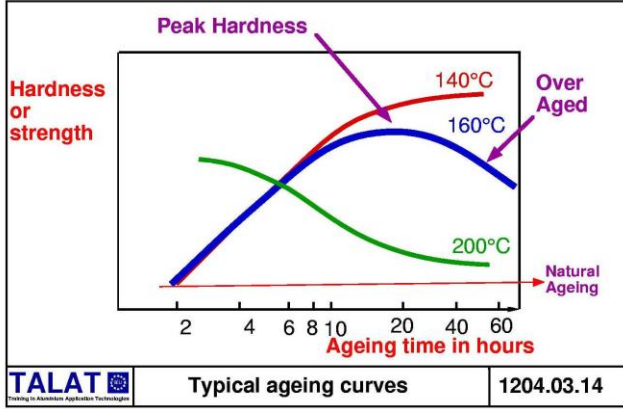
Şekil.4. EN AW 6082 alaşımının DSC analizi



Şekil.5. EN AW 7075 alaşımının DSC analizi[8]

Bazı alaşımlarda çözeltiliye alma sıcaklığı arttıkça nihai sertlik bundan etkilenecek yükselirken bazı alaşımlarda çözeltiliye alma sıcaklığı nihai sertliği etkilemez Yaşlandırma işleminde yaşlandırma süresi ile önce sertlik değeri artar daha sonra tekrar azalmaya başlar. Sertlik değerinin pik noktasından sonra tekrar düştüğü bölgeye aşırı yaşlanma (over age) denir. Şekil 6 de yapay yaşlandırma ve sertlik değişim grafiği yer almaktadır. Yapay yaşlandırma sıcaklığı alt sınırlarda iken ulaşılacak maksimum sertlik değeri artarken yaşlandırma süresi uzamaktadır. Ancak yapay yaşlandırma

sıcaklığının üst sınıra yaklaşması ile ulaşılacak maksimum sertlik değeri düşer ve buna karşın maksimum sertliğe ulaşma süresi kısalmır.



Şekil 6. Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde sertlik değişimi grafiği [1]

2.3. çözeltiye alma ve yaşlandırma

İşlem alaşımlarının sürekli döküm yöntemi ile üretilmesini ardından homojenizasyon tavı gerçekleştirilir. Bu işlemin amacı en başta sıcak şekillendirilebilirliği sağlamak ve ardından ısıtma sürecinde ikincil fazların dönüşümünü sağlayabilmektir. Çizelge 3 de 6063 alaşımının da homojenizasyon esnasında dönüşen fazlar yer almaktadır.[9]

Çizelge.3 homojenizasyon sürecinde değişen fazlar.[9]

Temperature (°C)	Time (h)		
	2	4	6
540	β -AlFeSi, α -AlFeSi	β -AlFeSi, α -AlFeSi	β -AlFeSi, α -AlFeSi
560	α -AlFeSi (β -AlFeSi)	α -AlFeSi (β -AlFeSi)	α -AlFeSi (β -AlFeSi)
580	α -AlFeSi (β -AlFeSi)	α -AlFeSi (β -AlFeSi)	α -AlFeSi

The major constituent is underlined, the minor ones are put into parentheses. The constituents are listed in the order of their volume fractions.

Homojenizasyon tavında dönüşen fazlar T6 ısıtma sürecinde çözünerek nihai sertliği etkiler. Bundan dolayı iyi bir T6 ısıtma işlemi yapabilmek için öncelikle doğru bir şekilde homojenizasyon yapılması gerekir. Çözeltiye alma sürecinde beta ve beta üssü fazlar çözünür. Ancak bu çözünme tamamen bir çözünme değildir GP zonu olarak adlandırılan çekirdek yapı çözünmez. Çökeltme sırasında ise Mg₂Si fazları bu zonları çekirdek olarak kabul ederek etrafında büyümeye başlar.

Çözeltiye alınan malzeme ani su verilerek aşırı doymuş çözelti haline getirilir. Genellikle ani su verme işlemi tabanı düşen ısıtma fırınlarında yapılır. Burada su verme işlemi ne kadar hızlı olursa Mg ve Si lerin Al matris içerisinde kalması sağlanmış olur. Çok hızlı su verilmesi durumunda iş parçası çarpılabilir. Bu çarpılma termal kalıntı gerilmeler nedeniyle olmaktadır. Alüminyum yüksek termal iletkenlik ve genişleme özelliğinden dolayı termal çarpılmaya oldukça müsaittir.

Su verme işleminde; Parça geometrisi Sepetteki konumu Suyun termal iletkenliği önemlidir. Parça ilk suya girdiği

anda etrafını bir buhar fazı kaplar. Su buharının ısıtma iletkenliği düşük olduğu için soğumayı yavaşlatır. Bundan dolayı sepet hareketi bu buhar fazını dağıtacak şekilde olmalıdır.

Su verme suyunun ısıtma iletkenliği malzemenin hızlı soğutulmasında en önemli etkidir. Saf suyun ısıtma iletkenliği oldukça düşük olmasına rağmen suyun içerisinde iyonik çözeltilerin artması ısıtma iletkenliği giderek artırmaktadır. Isıtma iletkenliği dengede tutabilmek için suya çeşitli kimyasal katkılar ilave edilebilmektedir. Bu şekilde oldukça homojen bir soğutmasağlanmaktadır.

2.4. Kalıntı gerilme

Metalik malzemelerde kalıntı gerilmeler, bir iş parçası hiçbir yüke maruz kalmadığı anda ortaya çıkan elastik gerilmelerdir ve ulaşabileceği maksimum değer malzemenin akma gerilmesi ile sınırlıdır. Metal yapılarda mekanik ve termal uygulamalar gibi birçok işlem teknikleri kalıntı gerilmelere neden olabilmektedir. Özellikle kaynak yöntemi ile birleştirme ve ısıtma işlemlerinden sonra sıklıkla meydana gelmektedir. Bir kalıntı gerilme akma sınırını aşacak kadar büyük olursa parçayı deforme ederek şekil değişimine neden olur. Bu da endüstride çarpılma olarak tabir edilen durumdur. [5]

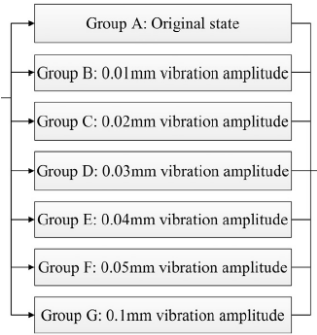
Metalik malzemeler sıcaklığın etkisiyle genişler ve soğumanın etkisiyle tekrar eski boyutlarına dönerler. Geometrik tasarım farklılıkları ve heterojen soğuma iş parçası üzerinde farklı bölgelerde farklı gerilmeler oluşturabilir. Buda iç gerilme veya kalıntı gerilme olarak iş parçasında kalıcı hale gelir.

2.5. T651 ısıtma işlemi

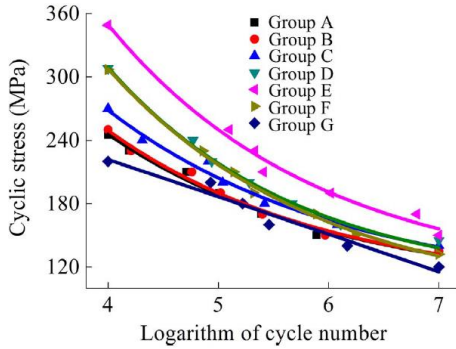
Alüminyum malzemenin T6 ısıtma işleminde olduğu gibi önce çözeltiye alınıp su verilmesi ve ardından da yapay yaşlandırma ile gerçekleşmektedir. Ancak T651 sürecinde su vermenin ardından oluşan kalıntı gerilmeler giderilerek yapay yaşlandırma sürecine geçilmektedir. Çözeltiye alma ısıtma işlemi işin hadde ürünlerine uygulanacak deformasyon miktarı ASTM B209 -96 da belirlenmiştir.[10] profil ve çubuklara uygulanacak deformasyon oranı ise ASTM B222-95 yer almaktadır.[11]

2.6. T651 literatür taraması

7075 T651 alüminyum malzemenin titreşimli stres giderici (VSR) ile kalıntı gerilmesinin yorulma ömrüne etkisi araştırılmıştır.[12] Hanjun ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada farklı genliklerde titreşime tabi tuttukları numunelerin yorulma dayanımlarını ve kalıcı gerilmelerini ölçmüşlerdir. Titreşim frekansı 52 HZ olarak belirlenmiştir. Şekil 7 de numune gruplarına uygulanan genlik değerleri şekil 8 de kalıntı gerilmelerin ömür dayanımı üzerindeki etkileri yer almaktadır.



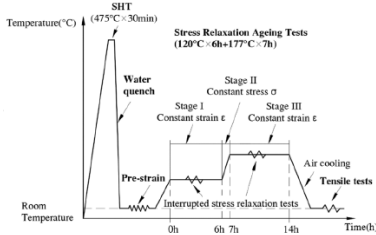
Şekil 7 VSR denemesi deney guruplarının genlik değerleri. [12]



Şekil 8. Farklı genliklerde titreşime maruz kalan numunelerin wöhler eğrileri.[12]

0,04 mm genlikte yapılan gerilim gidermenin olumlu sonuç verdiğini göstermektedir. Yüksek genlikte yapılan testler ise olumsuz sonuç vermektedir.

Jing ve arkadaşları[13] 7XXX alaşımlarda çoklu adımda gerilim giderme ve yaşlandırma yapmışlardır. Şekil 9 de yer alan proses adımlarına göre çözeltiye alınmış malzemenin gerilimini gidermişlerdir.



Şekil 9. çoklu adımda gerilim giderme proses şeması [13]

Bu kademeli gerilim giderme işlemi ile ilgili matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonuçlarının mikro yapı ve mekanik özellik değerleriyle doğrularak özellikle havacılık sanayi için endüstriyel uygulanabilirliği ortaya koymuşlardır.

Mukherjee ve arkadaşları AA 7075 alaşımına T651 ısıl işlemi uyguladıktan sonra farklı gerilimler altında korozyon davranışını incelemişlerdir. 2 grup numune arasından yüksek gerilmeye maruz kalan ve düşük gerilmeye maruz

kalan malzemeleri karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma çizelge 4 de yer almaktadır.

Çizelge 4 farklı gerilim oranlarındaki malzemenin farklı şekillendirme hızlarındaki korozyon dayanımı

Immersion Samples	Impact velocity (m/s)	Weight loss, Δw (g)	Corrosion Rate (m/y)
High strain Rate test	1.5	5.01 – 2.09	312 – 270
	1.9	4.32 – 2.41	289 – 234
	2.2	4.14 – 2.04	275 – 254
	2.5	3.41 – 1.66	259 – 250
Slow strain Rate test	1.5	2.19	152
	1.9	1.91	141
	2.2	1.87	130
	2.5	1.41	113

Düşük gerilim oranında korozyon ile kaybedilen malzeme miktarı daha azdır. Deformasyon hızı korozyon direncini düşürmektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada T651 ısıl işlem süreci ve kural dışı yöntemler ile gerilim giderme teknikleri araştırılmıştır. Hadde ürünler için haddeleme sürecinde ASTM standartlarına göre [10] T651 ısıl işlemi uygun bir seçenektir ancak ekstrüzyon profillerde ve ekstrüzyon sonrası yapılan ısıl işlemlerde gerilim giderme süreci güçlü çıkarmaktadır. ASTM standartlarında verilen [11] değerlerde deformasyon uygulamak için ayrıca bir hat gerektiğinden bu bir endüstriyel problem haline gelmektedir.[12] literatürde yapılan çalışmalara göre ultrasonik etki veya düşük genlikteki titreşimlerde malzemenin geometrik yapısını bozmadan gerilim giderme yapabilmektedir. Çözeltiye alınarak su verilen malzemeye ultrasonik yöntem ile gerilim giderme uygulaması başarı sağlamaktadır. Bundan dolayı T651 yöntemi ile mukavemetlendirilen alüminyum alaşımlarına gerilim giderme yöntemi olarak ultrasonik proses eklenebilir. Ancak yüksek hacimli üretimlerde bu sistem çözeltiye alma fırını veya ekstrüzyon hattına bir otomasyon sistemi ile eklenerek yüksek verim alınabilir.

4. Sonuç

Bu çalışmada T651 çökeltme sertleşmesi prosesi incelenmiştir. Sonuç olarak:

1. Kalıntı gerilmeler çözeltiye alma esnasında oluşmaktadır.
2. Bu problem akma sınırını aşarak çarpılmaya sebep olacak düzeyde ise su verme suyu ve soğutma hızı kontrol edilerek homojen soğuma sağlanabilir.
3. Kalıntı gerilim giderme işlemi su verme sürecinden sonra yapılmaktadır.
4. Hadde ürünlerde gerilim giderme ASTM standardına bağlı kalarak hadde merdanesinde yapılabilir.

5. Ekstrüzyon ve dövme ürünlerde deformasyon verebilmek zor bir süreç olacağından farklı sistemler denenebilir.
6. Yüksek frekansa ve 0,04 mm gibi düşük genlikte titreşim uygulanabilir.
7. Ultrasonik ses dalgası ile kalıntı gerilim gidermesi yapılabilir.

Teşekkür

Bu çalışmada alüminyum sektörün ve alüminyum sempozyumalarına büyük katkı sağlamış merhum hocamız Prof. Dr. Yücel BİROL u saygı ve özlemle anarak teşekkür ederiz.

Referanslar

- [1] M.H. Jacobs, Training in Aluminum application technologies 1204 (1999) 47.
- [2] Y. Birol, E. Gokcil, S. Akdi, Metallurgical Research & Technology 114 (2017).
- [3] E. Gokcil, S. Akdi, Y. Birol, Materials Research Innovations 19 (2015) S10-311-S310-314.
- [4] A.T. GÜNER, Yarı-Katı Halde Şekil Verilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Su Verme Sıcaklığının Etkisi, makina Mühendisliği, vol yüksek lisans teszi, Pamukkale üniversitesi, denizli, 2013.
- [5] E. GÖKÇİL, A. ESER, S. AKDI, Y. BİROL, 7. alüminyum sempozyumu (2015) 7.
- [6] E. GÖKÇİL, B.U. YAKIŞAN, S. AKDI, Y. BİROL, 7. alüminyum sempozyumu (2015).
- [7] H. Fröck, B. Milkereit, P. Wiechmann, A. Springer, M. Sander, O. Kessler, M. Reich, Metals 8, 265; doi:10.339 (2018) 16.
- [8] S. Ma, Y. Sun, H. Wang, X. Lü, M. Qian, Y. Ma, C. Zhang, B. Liu, Metals 7, 13; (2017).
- [9] Y. BİROL, Journal of Materials Processing Technology (2004) 250–258.
- [10] ASTM, Standard Specification For Aluminum And Aluminum Alloy Sheet And Plate, B209-96, 1996.
- [11] ASTM, Standard Specification For Aluminum And Aluminum Alloy Bar, Rod Wire, B222-95, 1995.
- [12] H. Gao, Y. Zhang, Q. Wu, J. Song, K. Wen, International Journal of Fatigue 108 (2018) 62-67.
- [13] J.-H. Zheng, J. Lin, J. Lee, R. Pan, C. Li, C.M. Davies, International Journal of Plasticity 106 (2018) 31-47.