



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MİNİMUM ŞEKİL DEĞİŞTİRME ENERJİSİ
KULLANARAK EN AW 6082 ALAŞIMINA
OPTİMUM DÖVME KARAKTERİSTİĞİNİN
KAZANDIRILMASI**

Seracettin AKDI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim
Dalı**

Ağustos- 2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Seracettin AKDI tarafından hazırlanan “**MİNİMUM ŞEKİL DEĞİŞTİRME ENERJİSİ KULLANARAK EN AW 6082 ALAŞIMINA OPTİMUM DÖVME KARAKTERİSTİĞİNİN KAZANDIRILMASI**” adlı tez çalışması 21/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Volkan KALEM

Danışman

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet YILDIRIM

İmza



Handwritten signatures of the jury members, including the President, Advisor, and Member, each followed by a dotted line for identification.

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Seracettin AKDI

Tarih: 21/08/2109

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİNİMUM ŞEKİL DEĞİŞTİRME ENERJİSİ KULLANILAN EN AW 6082 ALAŞIMINA OPTİMUM DÖVME KARAKTERİSTİĞİNİN KAZANDIRILMASI

Seracettin AKDI

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2019, 89 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Doç. Dr. Volkan KALEM
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet YILDIRIM

Alüminyum yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok rastlanan elementtir. Doğada oksit halinde olan alüminyumu saflaştırmak ve metalik hale getirmek oldukça zordur. Alüminyum, metalik malzemeler içerisinde demir (Fe) esaslılardan sonra en çok kullanılan malzemedir. Alüminyum alaşımları özellikle düşük yoğunluğundan dolayı uzay, havacılık ve otomotiv endüstrisinde sıkça tercih edilmektedir. Yüksek özgül mukavemetinden dolayı alüminyum alaşımları ile enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Bu çalışmada otomotiv süspansiyon bileşeni olarak kullanılan alüminyum parçaların üretimi ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sıcak dövme yöntemi ile üretilen alüminyum parçaların daha az enerji harcanarak aynı mekanik özellikleri sağlaması hedeflenmiştir. Bu tez çalışmasının temel hedefi proses maliyetlerinin, dövme mekanik özellikleri korunarak azaltılmasıdır. Ön ısıtma teknolojisi, ön ısıtma sıcaklığı, deformasyon oranı, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oranı gibi parametreler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Üretim parametrelerinin tane boyutu üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Dövme ön ısıtma teknolojisinde rezistanslı sistem, infrared ısıtma (kızıl ötesi) ve indüksiyon ısıtma sistemleri araştırılmıştır. 4 farklı sıcaklık (450°C, 475°C, 500°C, 525°C) değerinde her ön ısıtma teknolojisinde dövülen parçaların mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı sıcaklık ve ön ısıtma teknolojisinde dövülen parçaların farklı deformasyon oranları ile de dövme yapılmıştır. Kalıp yüzey pürüzlülüğünün etkisinin belirlenmesi için farklı yüzey kalitesinde kalıplarla dövme yapılarak yayımları incelenmiştir.

En az enerji kullanarak en iyi malzeme özelliklerini sağlayan ön ısıtma teknolojisi indüksiyon ısıtma sistemidir. Ön ısıtma sıcaklığı yükseldikçe malzemeye yüklenen termomekanik enerji artışı için malzeme özellikleri iyileşmiştir. Yüksek ön ısıtma sıcaklığında tane boyutu büyümektedir. Deformasyon oranı %50' nin altında kaldığında tane irileşmesi görülmezken %70 deformasyon oranında tane boyutlarında büyüme olmuştur. Kalıp yüzey pürüzlülüğü arttıkça aynı parametrelerde malzemenin şekil değiştirme miktarı azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Dövme, Enerji Tüketimi, İndüksiyon, Kızıl Ötesi, T5 Isıl İşlemi.

ABSTRACT

MS THESIS

PROVIDING OPTIMUM FORGING CHARACTERISTICS OF EN AW 6082 ALLOY WITH MINIMUM DEFORMATION ENERGY

Seracettin AKDI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Metallurgical and Materials Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2019, 89 Pages

Jury

**Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM
Asst. Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM**

Aluminum is the most common element on earth after oxygen and silicon. It is quite difficult to purify and make metallic aluminum from its oxide in nature. Aluminum is the most widely used material after iron (Fe) among metallic materials. Aluminum alloys are mostly preferred in the aerospace, aviation and automotive industries, especially because of their low density. Due to its high specific strength, aluminum alloys could provide energy savings..

In this study, production and mechanical properties of aluminum parts used as automotive suspension components were investigated. It was aimed to gain the same mechanical properties by consuming less energy for aluminum parts produced by hot forging method. The main objective of this thesis study is to reduce process costs while maintaining the forging mechanical properties. Parameters such as preheating technology, preheat temperature, deformation rate, surface roughness and burr rate were examined comparatively. The effect of production parameters on grain size was determined.

Resistance system, infrared heating and induction heating systems were investigated in forging preheating technology. The mechanical properties of the forgings were compared in each preheating technology at 4 different temperatures (450 ° C, 475 ° C, 500 ° C, 525 ° C). In addition, different temperature and preheating technology forged parts with different deformation rates were also forged. In order to see the effect of mold surface roughness, spreading was done by forging with different surface quality molds.

The induction heating system is the preheating technology that provides the best material properties using the least energy. As the preheating temperature rises, the material properties are improved for the thermomechanical energy surplus charged to the material. The grain size does not grow at high preheating temperature. When the deformation rate is below 50%, there is no grain coarsening and there is growth in grain size at 70% deformation rate. As the surface roughness of the mold increases, the amount of deformation of the material decreases with the same parameters.

Keywords: Aluminum Forging, Energy Consumption, Induction, Infrared, T5 Heat Treatment.

TEŞEKKÜR

Bu alıŐmayı hazırlarken geirdiğim srete benden yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarıma, ayrıca manevi desteğini her an yanımda hissettiğim anneme, babama, kardeŐime, eŐime, alüminyum ile ilgili yaptığım tm alıŐmalarda rehber olan ve çalışmalarından bolca faydalandığım merhum hocam Prof. Dr. Yücel BİROL' a, desteği ve yol göstericiliği ile her zaman yanımda olan hocam Prof. Dr. Mustafa ACARER' e, tez baŐlangıcındaki danıŐmanım değerli hocam Prof. Dr. Remzi ÇETİN' e, yapmış olduğum çalışmalarda yn gösterici ve bana bu tez çalıŐmasını vererek kendimi daha da geliŐtirmeme katkı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU' na teŐekkürü bir borç bilirim.

Seracettin AKDI
KONYA- 2019



İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| TEŞEKKÜR | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | ix |
| 1 GİRİŞ | 1 |
| 2 KAYNAK ARAŞTIRMASI | 4 |
| 3 MATERYAL VE YÖNTEM | 37 |
| 3.1 Materyal | 37 |
| 3.1.1 Isıtma teknolojileri | 37 |
| 3.1.2 Şekillendirme teknolojisi | 44 |
| 3.1.3 Metalografik numune hazırlama | 45 |
| 3.1.4 Çekme testi numunesi hazırlama ve çekme testi | 47 |
| 3.1.5 Sertlik ölçümü..... | 48 |
| 3.1.6 Ölçüm cihazları..... | 48 |
| 3.2 Yöntem..... | 49 |
| 3.2.1 Farklı deformasyon ve sıcaklıklarda numune dövme | 51 |
| 3.2.2 T6 Isıl işlemi uygulaması..... | 52 |
| 3.2.3 Dövme denemeleri için numune hazırlama ve çekme testi yapılması..... | 52 |
| 3.2.4 Üretim hattında indüksiyon ve T5 denemesi | 54 |
| 3.2.5 İndüksiyon ön ısıtma sıcaklığının T5 sürecinde sertlik değerine etkisi.... | 55 |
| 3.2.6 T5 sürecinde ön ısıtma ile %Cu oranının sertlik değerine etkisi | 55 |
| 3.2.7 Simülasyon çalışması..... | 56 |
| 3.2.8 Enerji tüketim ölçümü | 56 |
| 4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA | 58 |
| 4.1 Ön Isıtma Teknolojilerinin Karşılaştırılması | 58 |
| 4.2 Ön Isıtma Sıcaklığı ve Deformasyon Oranının Karşılaştırılması | 67 |
| 4.3 Enerji Sarfıyatı Ölçümü ve Karşılaştırılması | 70 |
| 4.4 T5 Isıl İşlem Denemesi ve Ön Isıtma Sıcaklığı Karşılaştırması | 71 |
| 4.5 T5 Isıl İşlem Denemesi ve Alaşım Karşılaştırması | 73 |
| 4.6 Dövme Kalıp Özelliklerinin Araştırılması ve Deneysel Karşılaştırılması..... | 75 |
| 4.7 Simülasyon Analizleri | 75 |
| 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 79 |
| 5.1 Sonuçlar..... | 79 |
| 5.2 Öneriler | 81 |

| | |
|------------------------|-----------|
| KAYNAKLAR | 82 |
| ÖZGEÇMİŞ | 85 |



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|----------------|--|
| α | : Alüminyum fazı |
| β | : Alüminyum çökelti fazı Mg_2Si |
| σ_y | : Akma dayanımı |
| σ_{UTS} | : Çekme dayanımı |
| $\epsilon \%$ | : Kopma uzaması |
| $^{\circ}C$ | : Celcius sıcaklık |
| J | : Joule enerji, Darbe dayanım enerjisi |
| A | : Akım |
| V | : Voltaj |
| t | : Sıcaklık |

Kısaltmalar

| | |
|------------------|--|
| BSTB | : Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı |
| SAN-TEZ | : Sanayi tezleri destek projesi |
| SEM | : Taramalı elektron mikroskobu |
| EDS | : Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi |
| XRD | : X-ışını faz analizi |
| OS | : Optik emisyon kimyasal analizi |
| OEM | : Orijinal ekipman üretimi |
| HB | : Brinell sertlik |
| HV | : Vickers sertlik |
| AC | : Alternatif akım |
| T5 | : Sıcak şekillendirmese çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma |
| T6 | : Çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma |
| AA | : Alüminyum alaşım |
| EN | : Alman standardı |
| AW | : İşlem alaşımları |
| CAD | : Bilgisayar destekli geometrik tasarım |
| Al | : Alüminyum |
| Cu | : Bakır |
| Zn | : Çinko |
| Zr | : Zirkonyum |
| Mg | : Magnezyum |
| Mn | : Mangan |
| Li | : Lityum |
| Fe | : Demir |
| Ti | : Titanyum |
| MPa | : Mega paskal |
| Dk | : Dakika |
| Sn | : Saniye |
| S | : Saat |
| SLC | : Süper hafif araba |
| BMW | : Otomobil markası (Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft) |
| VW | : Otomobil markası (Volkswagen AG) |
| H ₂ O | : Su |
| HCl | : Hidroklorik asit |
| HNO ₃ | : Nitrik asit |
| HF | : Hidroflorik asit |
| kWh | : Kilovat saat |

1 GİRİŞ

Alüminyum (Al) gümüş renkte sünek bir metaldir. Atom numarası 13 tür. Doğada genellikle boksit cevheri halinde bulunur. Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisinde çok önemli bir yeri vardır. Alüminyumdan üretilmiş yapısal bileşenler uzay ve havacılık sanayi için vazgeçilmezdir. Hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri gerektiren taşımacılık ve inşaat sanayilerinde geniş kullanım alanı bulur. Alüminyumun keşfi ve ticarileşmesi oldukça yeni sayılabilir. Jules Verne' in "Aya Yolculuk" adlı kitabında alüminyum ile ilgili olarak "Bu değerli metal gümüşün beyazlığına, altının dayanıklılığına, demirin azmine, bakırın kaynaşmasına, camın hafifliğine sahip. Kolayca işlenebiliyor ve demirden 3 kat daha hafif olması gösteriyor ki, bizim füzemizin malzemesi olarak yaratılmış." (Jules Verne, "From the Earth to the Moon", 1865). Alüminyum ilk keşfedildiği zamanlarda oldukça değerli ve pahalıydı. Bu genç metal 1. Dünya savaşında değer kazanmaya başlamış ve 2. Dünya savaşından sonra teknolojik olarak kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum üretimi 1943 yılında dünyada toplam 2 milyon tonu bulmuştur.

Alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra ağırlıkça %8,3' lük pay ile yer kabuğunda en çok bulunan 3. elementtir. Oksijene karşı aşırı ilgisi nedeniyle element halinde bulunmaz; genellikle oksit ve silikat halindedir. Ticari olarak boksit mineralinden zenginleştirilerek elde edilir. Türkiye' de Seydişehir Konya'da açık madencilikle üretilmektedir. ETİ Alüminyum Tesisi üretimi yıllık ortalama 67 bin ton civarında iken Türkiye piyasasında yıllık kullanım İDDMİB verilerine göre 2017 yılında bir buçuk milyon tonu bulmaktadır. Dünyada bilinen rezervin bu üretim hızı ile 100 yıl kadar yetebileceği hesaplanmıştır. Bununla beraber alüminyum geri dönüşümü oldukça kolay ve ekonomiktir. Dünya alüminyum üretiminde liderler; Gine, Avustralya Vietnam ve Brezilyadır.

Alüminyum; yoğunluk, iletkenlik, şekillendirilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı inşaat, otomotiv, uzay, havacılık, gıda ambalaj ve enerji sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum, başta Si olmak üzere Mg, Mn, Li, Zn, Cu, Fe ve Ti gibi birçok elementle alaşımlandırılarak malzeme özellikleri yüksek performanslı hale getirilebilmektedir. Alüminyum alaşım gruplarına göre döküm, DC döküm, enjeksiyon

döküm, ekstrüzyon, sac, folyo ve dövme gibi birçok üretim tekniği ile üretilmektedir.

Alüminyum özgül mukavemet ve endüstriyel üretilbilirlik bakımından birçok metalik malzemeye göre daha üstündür. Bu nedenden dolayı sırasıyla uzay sanayi, savunma sanayi, otomotiv sanayi ve dayanıklı tüketim eşyaları sektörüne kadar kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları farklı teknolojiler ile üretilerek kullanıma sunulmaktadır. Şekil 1.1'de alüminyum üretim teknolojilerinin sınıflandırması yer almaktadır. Bu tez çalışmasında otomotiv sektöründe kullanılan alüminyum parçalar ile ilgili çalışma yapılmıştır. Alüminyum ve alaşımlarının diğer metalik malzemelere göre dezavantajı; sonlu ömre sahip olmasıdır. Otomotiv sektöründe birçok parçada kullanılan alüminyum alaşımları son zamanlarda birinci dereceden emniyet parçalarına kadar kullanılmaktadır. Bu alüminyum alaşımlar yüksek nitelikli özel işlem alaşımları olarak sınıflandırılmaktadırlar. Klasik döküm yöntemleri ile üretilmeyen bu alaşımlar sürekli döküm yöntemi ile Biyet/ Ingot olarak üretilir daha sonra termomekanik işlemler ile nihai kullanım şekillerine ulaşırlar. Mukavemetlendirme mekanizmaları olarak ısı işlem ve deformasyon sertleşmesi süreçlerine tabi tutulmaktadır.

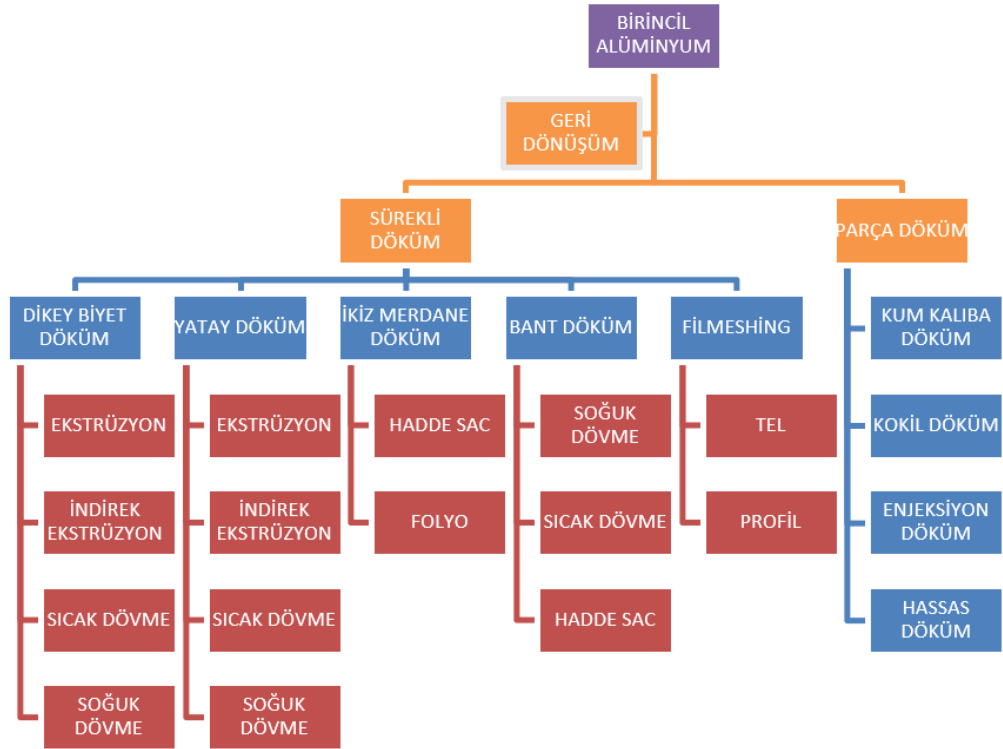
Otomotiv sektöründe gün geçtikçe önemi artan alüminyum alaşımları üstün mekanik özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında alüminyum sıcak dövme yöntemi ile üretilen ve çökelme sertleşmesi ile mukavemet kazanan süspansiyon parçalarının üretim süreci incelenmiştir.

Çalışma kapsamında ekstrüzyon hammadde kullanılarak alüminyum sıcak dövme deneysel olarak yapılmıştır. 3 farklı ısıtma teknolojisinde, farklı sıcaklıklarda ve farklı deformasyon oranlarında denemeler yapılmıştır.

Çalışma sonucunda indüksiyon ısıtma teknolojisinde minimum enerji maliyeti elde edilmiş olup deformasyon ve sıcaklık farklılıklarına göre sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı parametrelerdeki enerji tüketimi ve malzeme özellikleri karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması, Selçuk Üniversitesi ve AYD (Aydınlar Yedek Parça A.Ş) arasında yapılmış bir SAN-TEZ projesidir. Proje BSTB (Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı) tarafından desteklenmiştir. Proje ortağı firma tarafından 7. Alüminyum sempozyumu için 2 bildiri hazırlanmış ve sunuma uygun bulunmuştur. Bu bildirimler,

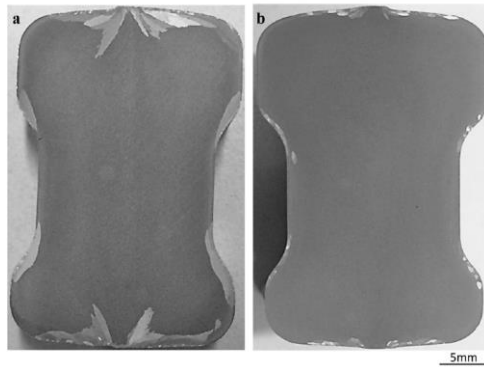
“ALÜMİNYUM SICAK DÖVMEDE ÖN ISITMA TEKNOLOJİSİNİN YAŞLANDIRMA PARAMETRELERİNE ETKİSİ” ve “ALÜMİNYUM DÖVME SICAKLIĞININ VE DEFORMASYON ORANININ TANE YAPISI VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ” isimli çalışmalar ile bu tez kapsamında yayınlanmıştır.



Şekil 1-1. Alüminyum üretim teknolojilerinin sınıflandırması

2 KAYNAK ARAŞTIRMASI

Alüminyum sıcak dövme süspansiyon parçalarının üretiminde çözeltiye alma sürecini kaldırmış ve malzeme özelliklerini karşılaştırmıştır. Bu çalışmada 2 grup deney seti oluşturulmuştur. Bunlardan birincisi normal süreç olup, 500 °C ye kadar ısıtılan ekstrüzyon hammaddeler dövülmüş, soğutulmuş, 520 °C da çözeltiye alınarak su verilmiş ve 180 °C da yaşlandırılmıştır. İkincisinde ise 520 °C ye kadar ısıtılan ekstrüzyon hammaddeler dövüldükten sonra su verilerek çözeltiye alınmıştır. Daha sonra bu malzemeler 180 °C'e yaşlandırılmıştır. Bu iki grup numune: çekme testi, makro yapı, mikro yapı, iletkenlik farkı, yorulma testi, çentik darbe testi, SEM, EDS, XRD ve DSC analizleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2.1'de makro yapıları ve Çizelge 2.1'de ise mekanik özellikleri yer almaktadır. Çözeltiye alma sürecinin ortadan kaldırıldığı 2, grup numunenin malzeme özelliklerinin kısmen daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca çözeltiye alma sürecinin ortadan kaldırılması süreç maliyetlerini %30 kadar azaltmaktadır. Aradaki farklılıklar aşağıdaki Çizelge 2.1'de özetlenmektedir. Ayrıca tane boyutunun küçüldüğü makro yapı ve SEM analizlerinde de görülmektedir. (Birol ve ark., 2016)

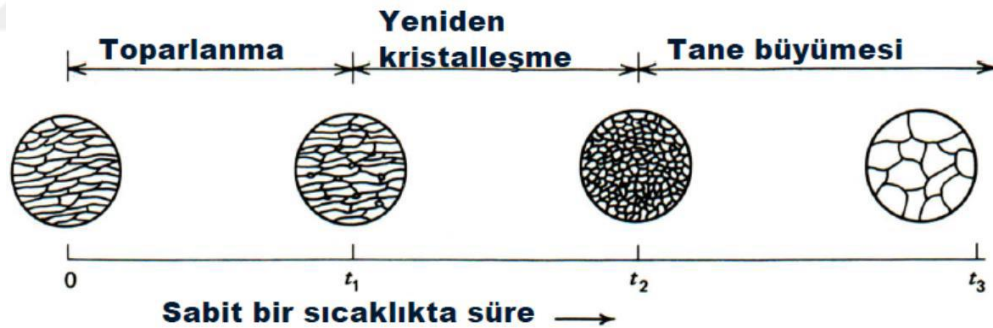


Şekil 2-1. EN AW 6082 sıcak dövme + çözeltiye alma + yaşlandırma a. EN AW 6082 çözeltiye alma sıcaklığında dövme + yaşlandırma b. (Birol ve ark., 2016)

Çizelge 2.1 EN AW 6082 alaşımında çözeltili alma sürecinin ortadan kaldırılmasının mekanik özellikler üzerindeki etkisi. (Bırol ve ark., 2016)

| Proses | σ_y MPa | σ_{UTS} MPa | ϵ % | Sertlik HB | Yorulma N (170 MPa) | Darbe dayanımı J |
|--------------------------------------|----------------|--------------------|--------------|------------|---------------------|------------------|
| Dövme + çözeltili alma + yaşlandırma | 313 | 342 | 8,6 | 106 3 | 204.625-128756 | 14-0,6 |
| Dövme + yaşlandırma | 305 | 329 | 10,3 | 103 1 | 211265-134111 | 31-1 |

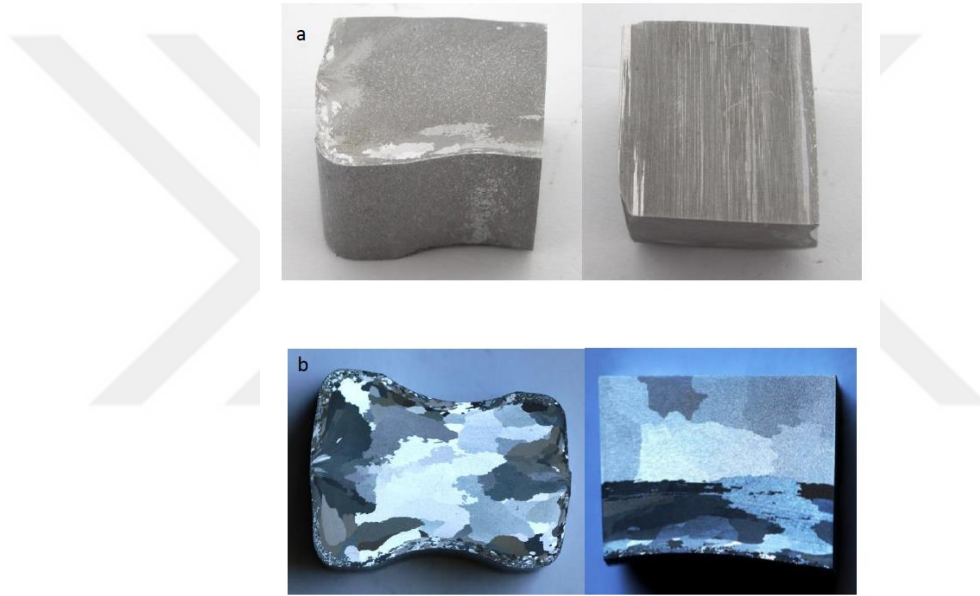
Alüminyum ekstrüzyon ve alüminyum dövme sürecindeki yeniden kristalleşme mekanizmasını incelemişlerdir. Şekil 2.2’de yeniden kristalleşme ve tane büyümesi mekanizması yer almaktadır. Farklı sıcaklıklarda ekstrüze edilip dövülen numunelerin tane boyutu karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada tane irileşmesi problemine üretim parametrelerini kontrol ederek çözüm sunulmuştur. (Akdı ve ark., 2013)



Şekil 2-2. Yeniden kristalleşme mekanizması (Akdı ve ark., 2013)

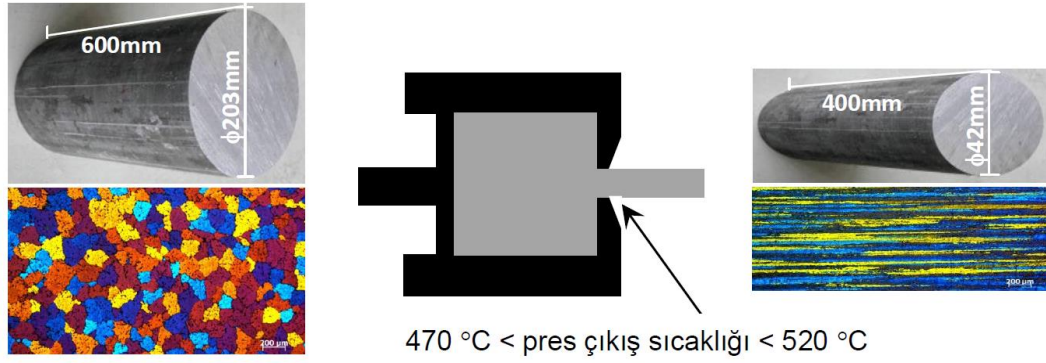
Bu çalışma sonucunda EN AW 6082 alaşımında dövme+T6 ısıt işleminin sonucunda görülen tane irileşmesi Barker yöntemi ve makro dağlama ile incelenmiştir. Şekil 2.3’de dövme sonrası makro yapı görüntüleri yer almaktadır. Barker yöntemi ile yapılan incelemelerde pres çıkış sıcaklıkları 470 °C, 480 °C ve 490 °C olan numunelerin 490-500 °C’ de dövülenlerinde numune iç kısımlarına doğru tane incelmeleri görülmüştür ancak 520 °C pres çıkış sıcaklığında bu durum görülmemiştir. Pres çıkış sıcaklığının artmasıyla beraber kenar kısımda oluşan yeniden kristalleşme

sonrası oluşan tane irileşmesi kalınlığı azalmıştır. En fazla tane irileşmesi 480 °C pres çıkış sıcaklığı ve 490°-500 °C’ de dövülen numunenin kenar kısmında görülmüştür. Dövme sıcaklığının çözeltiliye alma sıcaklığının üstünde olduğu durumda tane irileşmesi kontrol altına alınmış, sadece ekstrüzyon sonrasında görülen kısmi yeniden kristalleşen tabaka kenar kısmında oluşmuştur. Aşırı plastik deformasyon ve sıcaklıkla beraber dinamik yeniden kristalleşme görülmektedir. Tane sınırlarından başlayan ve tüm yapıya yayılan yeniden kristalleşmiş ince taneler birleşerek çözeltiliye alma esnasında aşırı büyümüş taneleri oluşturur.(Akdı ve ark., 2013)



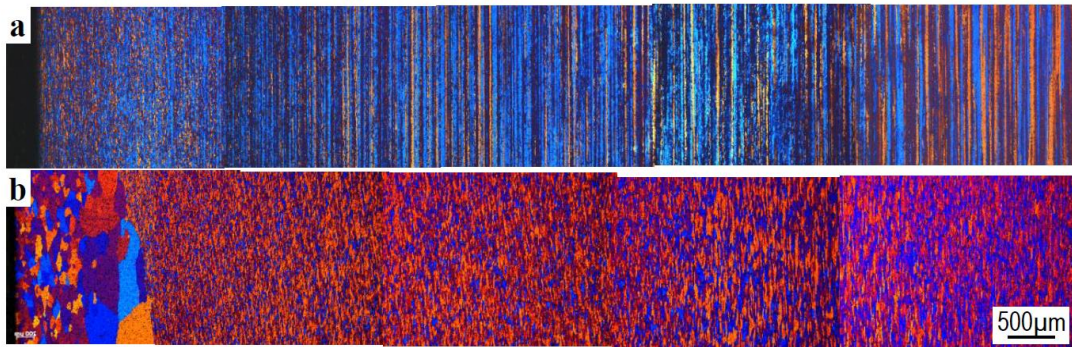
Şekil 2-3. Alüminyum sıcak dövülmüş ve T6 ısıl işlemi görmüş numuneler, 530-540 °C dövülmüş parçanın farklı kesitlerdeki makro yapısı a. 490-500 °C dövülmüş parçanın farklı kesitlerdeki makro yapısı b..(Akdı ve ark., 2013)

Yaptıkları çalışmada alüminyum sıcak dövmede ekstrüzyon hammaddesi kullanılarak tane büyümesi araştırılmıştır. Şekil 2.4 de ekstrüzyon öncesi ve sonrası tane boyutu yer almaktadır. Bu çalışmada rutin üretimde ekstrüzyon çıkış sıcaklıkları; 470 °C ve 520 °C ve dövme sıcaklıkları; 430 °C ve 500 °C parametre değerlerinde denenmiştir. (Birol ve ark., 2013)



Şekil 2-4. EN AW 6082 ekstrüzyon öncesi ve sonrası tane yapısı (Biol ve ark., 2013)

Yapılan çalışmada şu sonuçlar elde edilmiştir; 470 °C-520 °C aralığında pres çıkış sıcaklıklarında profil kesit yapısında ekstrüzyon deformasyon yapısı büyük ölçüde korunmuştur. Sadece yüzeyde sonlu derinlikte bir kesit bölgesinde yeniden kristalleşme yaşanmıştır. 470 °C ile 520 °C aralığındaki pres çıkış sıcaklıklarında üretilen profillerin tümünde dövme işlemi sonrasında yeniden kristalleşme gerçekleşmiş ve ayrıca yüzey bölgesinde yeni taneler büyümeye uğramıştır. Kesit tane yapısı dövme aşamasında bozulmaktadır. Standart EN AW 6082 alaşımında mevcut Mn oranı dövme aşamasındaki tane büyümesi kontrolü için yeterli olmamaktadır. Dispersoidler oluşturarak dövme işlemi sırasında tane sınırlarının hareketini yavaşlatması ve böylece tane büyümesini kontrol etmesi için Mn' dan başka Cr ve Zr gibi geçiş elementlerinden yararlanmak gerektiği düşünülmektedir. Şekil 2.5'de 520 °C pres çıkış sıcaklığındaki profilin kesit tane yapısı ve bu profilden 430 °C dövülen parçanın kesit tane yapısı yer almaktadır.



Şekil 2-5. Alüminyum sıcak dövme işleminde 520 °C pres çıkış sıcaklığındaki profilin kesit tane yapısı a. Bu profilden 430 °C dövülen parçanın kesit tane yapısı b. (Biol ve ark., 2013)

Alüminyum sıcak dövme sonrasında T6 ısıl işlemi için özgün sepet tasarımı yaparak EN AW 6082 süspansiyon parçalarının ısıl işlemi sürecini daha verimli hale getirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda özel sepet tasarımı ile ilgili patent alınmıştır. Şekil 2.6'da yaşlandırma fırını, çözeltiye alma fırını ve eski sistem ısıl işlem sepeti yer almaktadır. Ayrıca Şekil 2.7'de yeni tasarım ısıl işlem sepeti yer almaktadır. (Küçükyağlıoğlu ve ark., 2015)



Şekil 2-6. Alüminyum ısıl işlem prosesinde; Yaşlandırma fırını a. Çözeltiye alma fırını b. Eski sistem ısıl işlem sepeti c. (Küçükyağlıoğlu ve ark., 2015)

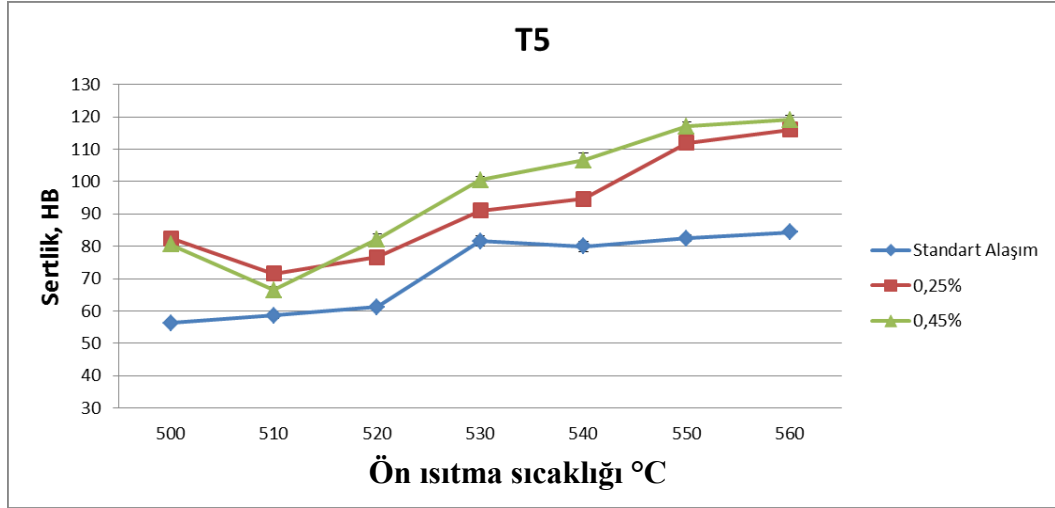


Şekil 2-7. Farklı açılardan yeni tasarım patentli ısıl işlem sepeti; ön görünüş a. Isıl işlem sepetinin fırından çıkışı b. (Küçükyağlıoğlu ve ark., 2015)

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yeni ısıtma işlem sepeti tasarımı ile alüminyum dövme parçalarının T6 ısıtma işlem süresi 12 saatten, 5 saate düşürülmüş, sepetin bir yüklemde aldığı iş parça sayısı 330'dan 600'e çıkartılmıştır. Parçalar asılı halde fırına ve suya girdiği için ısınma ve soğuma hızlı ve homojen olmakta, bununla beraber malzeme kalitesinde yeni sepet tasarımı ile artış gözlenmektedir. Normal uygulamada bir parça üzerinde ölçülen sertlik değeri 90-102 HB aralığında değişirken yeni tasarlanan sepetin kullanımı ile sertlik değeri dağılımı 113-116 HB aralığında gerçekleşmiş, geliştirilen tasarımın ürün kalitesinde de önemli iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Isıtma işlem hattının kapasitesi 2 katına çıkartılmıştır. (Küçükyavaşlıoğlu ve ark., 2015)

EN AW 6082 alaşımının sıcak dövülmesi sürecini incelemiş ve yenilikçi bir üretim yöntemi olarak T5 ısıtma işlem kondisyonunu önermişlerdir. Bu çalışmada kimyasal kompozisyona Cu ilavesi yapılmıştır. 3 farklı Cu ilavesi yapılmış numunenin dövme + T5 sonrası sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. (Gökçil ve ark., 2015c)

Bu çalışmada, daha iyi yorulma dayanımı ve daha uzun servis ömrü sağlayacak, kaba tanelerden eser olmayan homojen kesit tane yapısına sahip süspansiyon bileşenlerinin üretimi amaçlanarak T5 prosesi tanımlanmıştır. (Gökçil ve ark., 2015c) Çözeltiyeye alma ısıtma işlemi olmaksızın üretilen EN AW 6082 alaşımı süspansiyon bileşenlerinin tane yapısında belirgin bir iyileşme görülmüştür. Ancak tane yapısında elde edilen bu iyileşme sertlik değerine fazla katkıda bulunmamıştır. Çalışma kapsamında, standart EN AW 6082 alaşımının yaşlanma kapasitesinin artırılması adına %0,25 ve %0,45 oranlarında Cu ilavesi yapılmıştır. Sonuç olarak, standart EN AW 6082 alaşımı T5 prosesinde 90 HB sertlik seviyesinde kalırken, Cu ilaveli yeni alaşımlar ortalama 110 HB sertlik seviyelerine ulaşmışlardır. Önerilen T5 prosesi ve alaşım optimizasyonu ile otomotiv süspansiyon bileşenlerinin üretim kalitesi artırılırken, bir yüksek sıcaklık ısıtma işleminin ortadan kaldırılmasıyla da aynı zamanda kayda değer bir maliyet tasarrufu sağlanmaktadır. Şekil 2.8'de 3 farklı alaşım için farklı ön ısıtma sıcaklıkları ile elde edilen aynı yaşlandırma süreci sonundaki sertlik değişimi grafiği yer almaktadır. Ön ısıtma sıcaklığındaki artışla birlikte nihai sertlikte de artış gözlenmektedir.



Şekil 2-8. Yaşlandırma işlemi sonucu nihai sertlik değerlerinin, ön ısıtma sıcaklıklarına bağlı değişimi (Gökçil ve ark., 2015c)

Akdı ve ark. yaptıkları çalışmada alüminyum işlem alaşımlarından olan EN AW 6082' nin sıcak plastik şekillendirme prosesinde ön ısıtma sıcaklığının ve deformasyon oranının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. 450°C, 475°C, 500°C ve 525°C olmak üzere 4 farklı ön ısıtma sıcaklığında ve %10, %30 ve %50 olmak üzere 3 farklı deformasyon oranında uygulama yapılmıştır. Numunelere T6 ısıl işlemi uygulanarak deneysel çalışmalar tamamlanmıştır. Malzeme sertlik ölçümü, tane boyutu incelemesi ve çekme testi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. (Akdı ve ark., 2015a)

4 farklı ön ısıtma sıcaklığı ve 3 farklı deformasyon oranında yapılan dövme denemeleri sonuçları şöyle özetlenebilir; ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranına bağlı olarak sertlik değerleri ve çekme testi sonuçlarında belirgin bir fark görülmemektedir. Sertlik değerleri 12 parametreden her biri için en az 5 kez tekrarlanmış olup bu değerlerin ortalamaları alınarak belirtilmiştir. Çizelge 2,2'de sertlik sonuçları yer almaktadır. Çıkan sonuçların farklı ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranına göre tekrar ortalamalarının alınması ile 1-3 HB' lik farkın dikkate alınabileceği bir sonuç çıkmıştır. Sertlik değerlerinin genel ortalaması 111 HB iken %30 deformasyonla dövülen numunelerde 112 HB ve dövme ön ısıtma sıcaklığı 500°C olan numunelerde ise 113 HB' dir. 1-3 HB bir farklılık olarak nitelenebilmektedir. 12 farklı parametrelerde dövülen numunelerin dövme yönüne paralel alınan kesit tane yapıları incelendiğinde ön ısıtma sıcaklığı artıkça tane yapısında görülen iri tane azalmaktadır. Deformasyon oranı artıkça kesit tane yapısında görülen tane irileşmesi artmaktadır. 500 °C ve 525 °C'de %10 ve %30 deformasyonunda tane irileşmesi oldukça düşük oranda

olduğu görülmektedir. Deformasyon oranı arttıkça dinamik yeniden kristalleşmeye bağlı tane irileşmesi görülmektedir. Çekme testi sonuçları incelendiğinde belirgin bir farklılık görülmemekle beraber kesit tane yapısı değişimine bağlı olarak % kopma uzaması ve akma dayanımında farklılık görülmektedir. (Akdı ve ark., 2015a)

Çizelge 2.2. Farklı ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranlarına göre T6 ısıl işlemi sonundaki sertlik değişimi (Akdı ve ark., 2015a)

| | | Deformasyon Oranı | | | |
|---------------------|----------|-------------------|-----------|--------|-----------|
| | | %10 | %30 | %50 | Ortalama |
| Ön Isıtma Sıcaklığı | 450°C | 112 HB | 116 HB | 108 HB | 112 HB |
| | 475°C | 108 HB | 113 HB | 109 HB | 110 HB |
| | 500°C | 114 HB | 112 HB | 114 HB | 113,33 HB |
| | 525°C | 111 HB | 110 HB | 109 HB | 110 HB |
| | Ortalama | 111,25 HB | 112,75 HB | 110 HB | 111,33 HB |







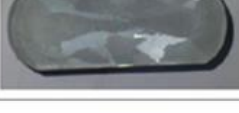

Akdı ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; alüminyum sıcak dövmede ön ısıtma için rezistans ve indüksiyon teknolojileri kullanılmıştır. EN AW 6082 alaşımında bu iki ön ısıtma yöntemi 4 farklı sıcaklık (450°C, 475°C 500°C ve 525°C) için denenmiştir. Bu yöntemlerin denenmesinden elde edilen numunelere T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Bütün parametrelerden elde edilen değerlerin sertlik değişimleri ve kesit tane yapısı gözlenerek optimum ön ısıtma teknolojisi ve ön ısıtma sıcaklığı belirlenmiştir. (Akdı ve ark., 2015b)

Dövme ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla kesit tane yapısındaki tane boyutları küçülmektedir. Dövme ön ısıtma sıcaklığının artması ile çözeltiyeye alma esnasında gerçekleşen dinamik yeniden kristalleşmenin takip eden tane irileşmesinin en aza indiği görülmektedir. Dövme ön ısıtma sıcaklığı çözeltiyeye alma sıcaklığına yaklaştıkça tane irileşmesi de azalmıştır. (Akdı ve ark., 2015b)

İndüksiyonla ön ısıtma teknolojisinde rezistansla yapılan ön ısıtma teknolojisine göre daha ince bir kesit tane yapısı elde edilmektedir. İndüksiyonla ısıtma teknolojisinde ön ısıtma işlemi 17-14 saniye aralığında gerçekleşirken, rezistanslı ön ısıtma teknolojisinde bu süre 45 dakikaya kadar uzamaktadır. Dövme ön ısıtma süresinin uzaması hem tane yapısını etkilemekte hem de parça başı maliyeti etkilemektedir. Çizelge 2.3’de indüksiyon ve rezistanslı ısıtıcılar ile farklı sıcaklıklarda

ısıtılıp dövülen numunelerin dövmeyle paralel kesitteki makro yapıları yer almaktadır. (Akdı ve ark., 2015b)

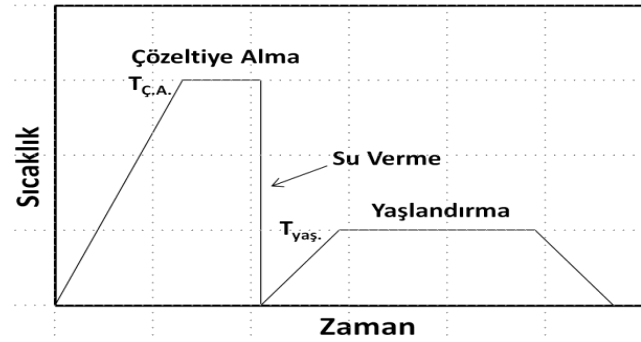
Çizelge 2.3 İndüksiyon ve rezistanslı ısıtıcılar ile farklı sıcaklıklarda ısıtılıp dövülen numunelerin dövmeyle paralel kesitteki makro yapıları yer almaktadır. (Akdı ve ark., 2015b)

| | | Deformasyon oranı | |
|---------------------|-------|---|---|
| | | Rezistans | İndüksiyon |
| Ön Isıtma Sıcaklığı | 450°C |  |  |
| | 475°C |  |  |
| | 500°C |  |  |
| | 525°C |  |  |

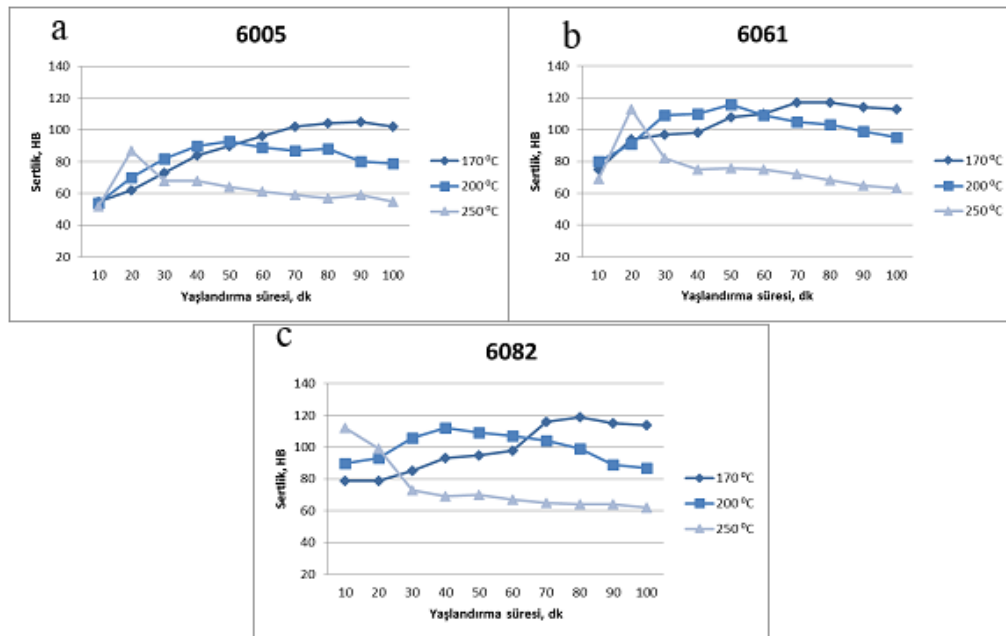
Yapılan çalışmada, alüminyum işlem alaşımlarına uygulanan T6 ısıtma işleminde, çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi sabit tutularak, yapay yaşlandırma sıcaklığı ve sürelerinin metalografik ve mekanik özelliklere etkisi ele alınmıştır. 6005, 6061 ve 6082 alaşımları olmak üzere seçilen 3 farklı alüminyum işlem alaşımı T6 ısıtma işlemine tabi tutularak, her bir alaşım için ayrı ayrı yaşlandırma sıcaklık ve süre eğrileri çıkarılmıştır. Çizelge 2.4.'de bu alaşımların kimyasal kompozisyonu yer almaktadır. T6 ısıtma işlemi Şekil 2.9 da verilmiştir. Yürütülen deneysel çalışmalarda, 3 farklı yaşlandırma sıcaklığı ve 10 farklı yaşlandırma süresinde denemeler gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesinde sertlik ölçümü esas alınmıştır. Yaşlandırma sıcaklığına ve süresine bağlı olarak sertlik değişimi grafikleri Şekil 2.10'da yer almaktadır. (Eser ve ark., 2015)

Çizelge 2.3 6082, 6061 ve 6005 alüminyum alaşımların kimyasal kompozisyonu (Eser ve ark., 2015)

| | Si | Fe | Mn | Mg | Cu | Ti | Cr |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 6082 | 1.00 | 0.20 | 0.55 | 0.80 | 0.04 | 0.02 | 0.18 |
| 6061 | 0.68 | 0.27 | 0.1 | 0.78 | 0.22 | 0.01 | 0.11 |
| 6005 | 0.77 | 0.24 | 0.12 | 0.49 | 0.02 | 0.01 | 0.02 |



Şekil 2-9. T6 ısıl işlem kondisyonu (Eser ve ark., 2015)



Şekil 2-10. Yaşlandırma sıcaklığına ve süresine bağlı olarak sertlik değişimi grafikleri; 6005 alaşımı için a. 6061 alaşımı için b. 6082 alaşımı için c. (Eser ve ark., 2015)

Çalışma sonucunda en yüksek sertliğe, Cu içeren EN AW 6061 alaşımı çıkmıştır. Bu sonucun elde edilmesinde Al-Cu çökeltilerinin Mg_2Si çökeltilerine ilave olarak sertlik artışı sağlaması sebep olmuştur. 6005 alaşımı ile ulaşılabilen en yüksek sertlik değeri (yaşlandırma tav parametrelerinden bağımsız), 6061 ve 6082 alaşımından ortalama 10 HB daha düşüktür. Suni yaşlandırma tav sıcaklığı düşüktüçe ulaşılabilen en yüksek sertlik değeri artmaktadır. Daha kısa sürelerde yaşlandırma tavı yapıldığında sertlikten bir miktar fedakârlık edilmesi gerekmektedir. 3 alaşım da en

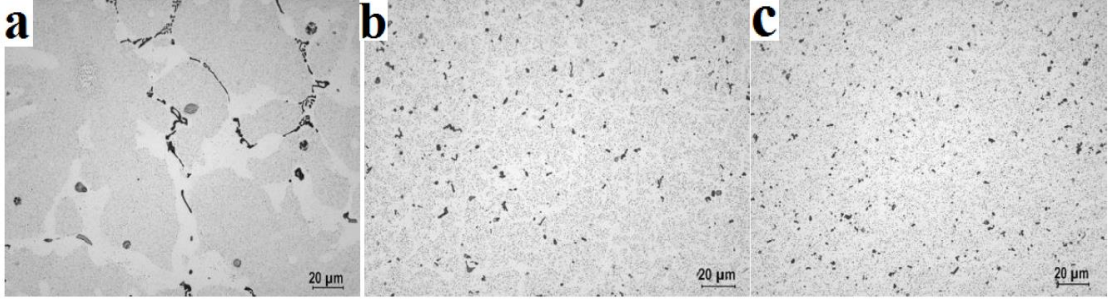
yüksek sertlik değerine 170°C’de ulaşmıştır. Suni yaşlandırma sıcaklığı artıka ulaşıl原因 en yüksek sertlik değeri düşmekte, buna karşın en yüksek sertliğe ulaşma süresi kısalmaktadır. (Eser ve ark., 2015)

Gökçil ve arkadaşları 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada, otomotiv süspansiyon bileşenleri üretiminde kullanılan EN AW 6082 alaşımından dövme, döküm ve ekstrüzyon olmak üzere 3 farklı yöntemle üretilen numunelerde çözeltiye alma sıcaklık ve süre parametrelerinin etkilerini belirlemişlerdir. Döküm, ekstrüzyon ve dövme birbirini takip eden süreçler olduğundan her bir operasyonda yüklenen termomekanik işlemlerin çözeltiye girme trendine etkileri incelenmiştir. (Gökçil ve ark., 2015b)

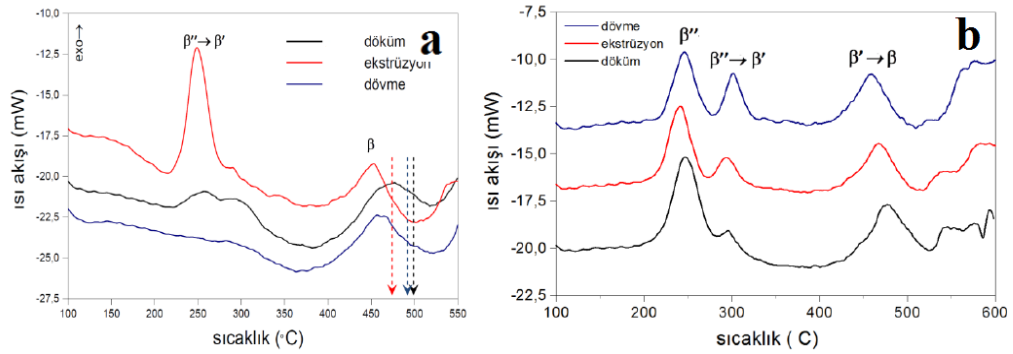
EN AW 6082 alaşımının sıcak dövülmesi süreci ana hatları ile şöyledir:

- Biyet döküm
- Homojenizasyon
- Isıtma ve ekstrüzyon
- Isıtma ve dövme
- T6 ısıl işlemi

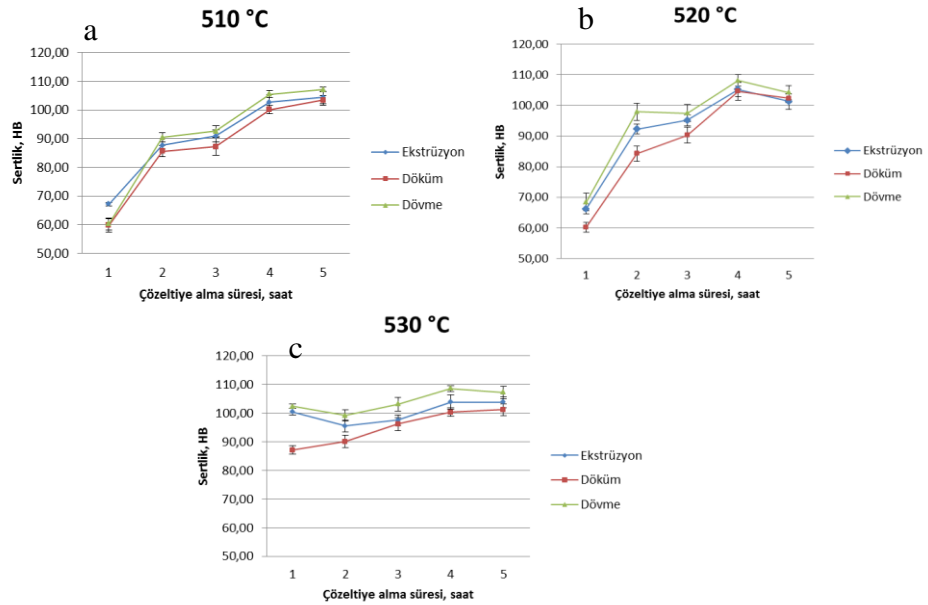
Aynı kimyasal içerikte, homojenizasyon sonrası döküm numunesi, ekstrüzyon sonrası havada soğutulmuş parçadan ekstrüzyon numunesi ve ekstrüzyon ön şekilden dövülmüş havada soğutulmuş dövme numunesi alınmıştır. Bu numunelerin mikro yapıları Şekil 2.11’de yer almaktadır. İlk olarak, farklı yöntemlerle üretilen numunelerin DSC analizleri yapılarak çözeltiye girme trendleri gözlemlenmiştir. Şekil 2.12’de DSC karşılaştırmaları yer almaktadır. Üç farklı üretim yönteminden alınan numuneler 3 farklı sıcaklık ve 5 farklı sürede çözeltiye alınarak numunelerin hepsi aynı koşullarda yapay yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işlemi 185 °C’de 3 saat boyunca uygulanmıştır. Yaşlandırma sonrası sertlik değerleri ölçülmüştür. Belirlenen numunelerde metalografik analizler yapılmıştır. Sertlik sonuçlarının trendi Şekil 2.13’de yer almaktadır (Gökçil ve ark., 2015b).



Şekil 2-11. Çalışmada kullanılan Döküm a. Ekstrüzyon b. ve Dövme c. numunelerin mikro yapıları (Gökçil ve ark., 2015b).



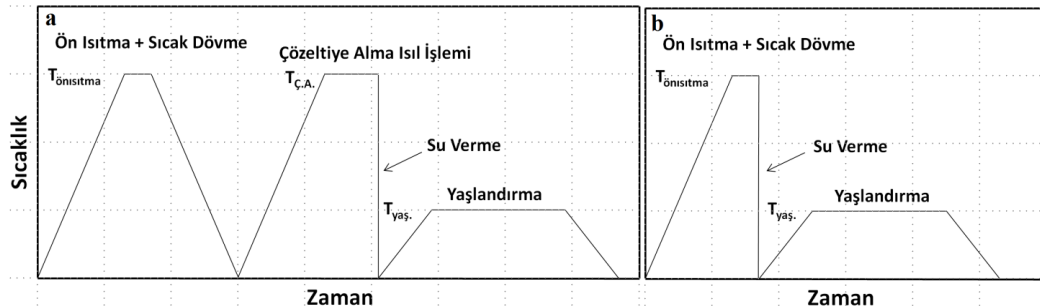
Şekil 2-12. Farklı kondisyonlarda çözeltiye alma endoterminin belirlenmesi amacıyla yapılan a. ve 510 °C sıcaklıkta çözeltiye alındıktan sonra yapılan DSC analizleri b (Gökçil ve ark., 2015b).



Şekil 2-13. Ekstrüzyon, dövme ve döküm numuneleri için 510°C a. 520°C b. ve 530 °C c. sıcaklıklarında ve farklı çözeltiye alma sürelerinde için aynı yaşlandırma şartları sonundaki sertliklerinin karşılaştırılması (Gökçil ve ark., 2015b).

Sonuç olarak, döküm, ekstrüzyon ve dövme şartlarına göre ideal çökeltme sertleşmesi için çözeltiliye alma sıcaklık ve süreleri karşılaştırılmıştır. Termomekanik etkilere göre çözeltiliye alma sıcaklık ve süresindeki farklılıklar ortaya konmuştur. Çözeltiliye alma sıcaklığı arttıkça çözeltiliye geçme olayının daha kısa sürelerde gerçekleşebildiği görülmüştür. Dövme parçalar aynı ısıl işlem parametrelerinde daha yüksek sertliklere ulaşmış, bunu ekstrüzyon ve döküm süreçleri izlemiştir. Diğer yandan, yapısal hata yoğunluğu dökümden dövmeye doğru arttığından dökümde yaşlanma sertleşmesi zaman alırken, dövme parçada çok daha çabuk gerçekleştiği gözlenmiştir. Ekstrüzyon kondisyonundaki bir numunede mikro yapı çalışması yapılmıştır. Mikro yapı görüntülerinde tane içlerindeki partikül boyut ve sayısal yoğunluğun çözeltiliye alma tavından hemen sonra ve sertliğin pik değerlere ulaştığı yaşlandırmadan sonra yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edilmiştir. Böylece, optik mikroskopta tane içlerinde görülen taneciklerin β'' ve/veya β' sertleştirici partikülleri olmadığı ortaya konmuştur. (Gökçil ve ark., 2015b)

Gökçil ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, alüminyum sıcak dövme sürecinde tane yapısında elde edilen bu iyileşme daha yüksek dayanım ve süneklik sağlamıştır. Önerilen bu özgün proses ile otomotiv süspansiyon bileşenlerinin üretim kalitesi artırılırken, aynı zamanda kayda değer bir maliyet tasarrufu da sağlanmaktadır. İki süreç arasındaki farklılıklar Şekil 2.14'de yer almaktadır. Çözeltiliye alma sürecinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi Çizelge 2.5'de yer almaktadır (Gökçil ve ark., 2015a).



Şekil 2-14. Alüminyum sıcak dövmede çözeltiliye alma süreci a. Alüminyum sıcak dövmede çözeltiliye almanın dövme anında yapılma süreci b (Gökçil ve ark., 2015a).

Çizelge 2.4. Çözeltiyeye alma sürecinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi (Gökçil ve ark., 2015a).

| Proses | σ_{akma} , MPa | $\sigma_{çekme}$, MPa | A ₅₀ , % | Sertlik, HB |
|------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|-------------|
| var / çözeltiyeye alma | 279 ± 18 | 310 ± 23 | 16 ± 4 | 97 ± 0.9 |
| yok / çözeltiyeye alma | 296 ± 10 | 363 ± 7 | 25 ± 3 | 96 ± 0.2 |

Kçktaş ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, EN AW 6082 alaşımlarının kimyasal kompozisyon ve üretim yönteminde yakın zamanda yapılan değişiklik ile tane büyümesine meydan tanımadan daha uniform bir yapıda kesit elde edilmiştir. Bunu sağlamak için standart EN AW 6082 alaşımına bakır ilavesi yapılmış ve bu sayede alaşımın yaşlandırma kabiliyeti herhangi bir çözeltiyeye alma işlemi uygulamadan geliştirilmiştir. Ancak Cu ilavesi ile alaşımın korozyon direnci tane sınırlarında oluşan bakır içerikli intermetalik fazlardan dolayı düşmektedir. Bu çökelti matris fazına göre katodik davranış göstererek taneler arası korozyona sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada Cu ilavesinin EN AW 6082 alaşımına etkisi incelenmiştir ve 0,27- 0,45 ve 0,89 bakır içerikli EN AW 6082 alaşımları korozyon deneylerine tabi tutulup sonuçları raporlanmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçları Çizelge 2.6 ve çizelge 2.7'de yer almaktadır (Köktaş ve ark., 2016).

Çizelge 2.5. Deney alaşımlarının kimyasal kompozisyonu. (Köktaş ve ark., 2016)

| Alloy | Designation | Si | Mn | Cu | Mg | Cr | Fe | Zn | Ti |
|--------------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Standard 6082 | ST | 1.02 | 0.57 | 0.07 | 0.75 | 0.22 | 0.26 | 0.01 | 0.03 |
| Exp. 6082 with 0.27 % Cu | 0.27 | 1.09 | 0.68 | 0.27 | 0.80 | 0.18 | 0.25 | 0.01 | 0.03 |
| Exp. 6082 with 0.45 % Cu | 0.45 | 1.13 | 0.67 | 0.45 | 0.68 | 0.18 | 0.25 | 0.01 | 0.03 |
| Exp. 6082 with 0.89 % Cu | 0.89 | 1.03 | 0.72 | 0.89 | 1.01 | 0.03 | 0.44 | 0.12 | 0.01 |

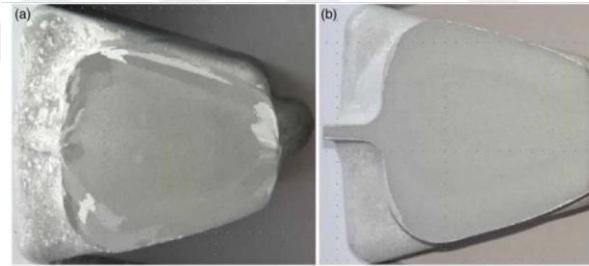
Çizelge 2.6. Deney numunelerinde katodik polarizasyonda özelliklerinin karşılaştırılması. (Köktaş ve ark., 2016)

| | V _{corr} (mV) | I _{corr} (µA) | B _a (mV/onluk) | B _c (mV/onluk) | Korozyon hızı (mpy) |
|------|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| ST | -729 | 208.7x10 ⁻³ | -17.6 | 410.5 | 277.9x10 ⁻³ |
| 0,27 | -708 | 653.1x10 ⁻³ | -17.5 | 351.1 | 869.9x10 ⁻³ |
| 0,42 | -700 | 2.029 | -15.7 | 979.4 | 2.702 |
| 0,89 | -693 | 4.640 | -16.6 | 1,252 | 6.177 |

EN AW 6082 sıcak süspansiyon parçaları dövme süreçlerinde yenilikçi bir yöntem denemişlerdir. Bu yöntemde normal proseste yer alan dövülmüş parçalar sepete dizilerek 530 °C çözeltiliye alıp su verme işlemi ortadan kalkmaktadır. Çözeltiliye alma işlemi ortadan kaldırılarak yapılan çalışmada alüminyum dövme süspansiyon parçalarının hem mekanik özellikleri artmış hem de tane boyutları küçülmüştür. Şekil 2.15’de proje parçası ve Şekil 2.16’da kesit tane yapıları arasındaki farklar görülmektedir (Gokcil ve ark., 2015).



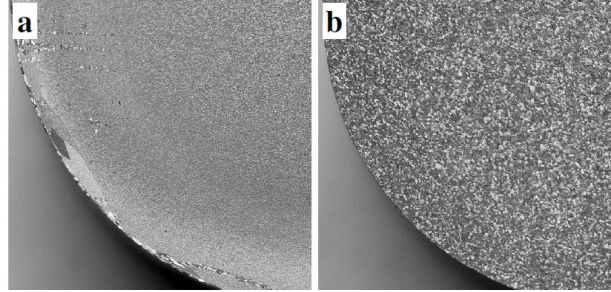
Şekil 2-15. Çalışmada kullanılan alüminyum dövme süspansiyon parçası (Gokcil ve ark., 2015).



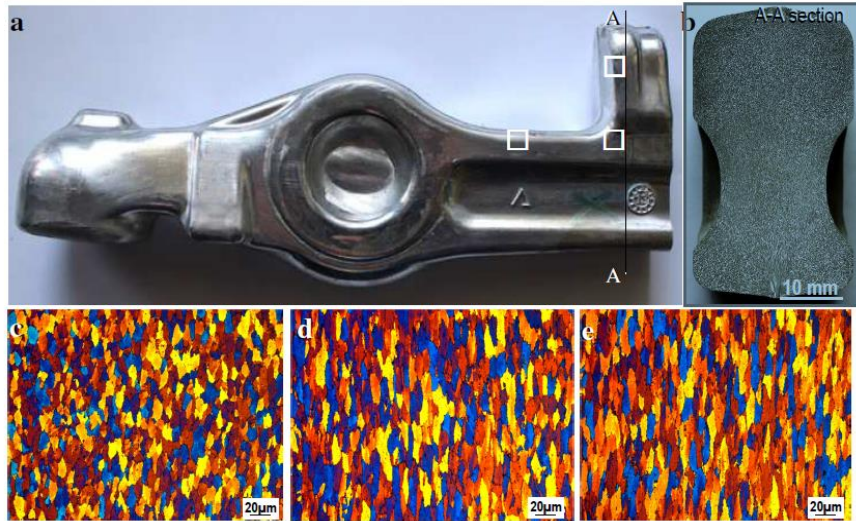
Şekil 2-16. Rutin süreç de dövülen ve T6 ısıt işlemi yapılmış numune kesit tane yapısı a. Özgün süreçte dövülen ve yaşlandırılmış numune kesit tane yapısı b (Gokcil ve ark., 2015).

EN AW 6082 süspansiyon parçalarının üretiminde hammadde olarak kullanılan ekstrüzyon yerine döküm hammadde kullanılarak iki hammadde arasındaki malzeme özellikleri karşılaştırılmıştır. Döküm için homojenizasyon işlemi görmüş biyetler kullanılmıştır. Döküm hammaddesinin kullanıldığı parçalarda ürünler daha ince taneli olduğu görülmüştür. Şekil 2.17’de döküm ve ekstrüzyon hammadeleri makro yapıları yer almaktadır. Rutin alüminyum sıcak dövmede hammadde olarak ekstrüzyon kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada döküm hammadde kullanılarak dövme yapılmış

ve üretilen parçanın bölgesel tane boyutu Barker yöntemi ile karakterize edilerek Şekil 2.18’de verilmiştir (Gokcil ve ark., 2015).

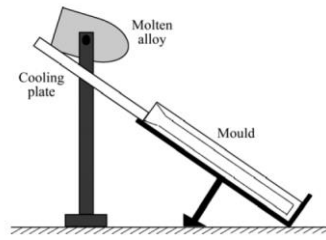


Şekil 2-17. EN AW 6082 ekstrüzyon dövme hammaddesi makro yapısı a. EN AW 6082 ekstrüzyon dövme hammaddesi makro yapısı b. (Gokcil ve ark., 2015)

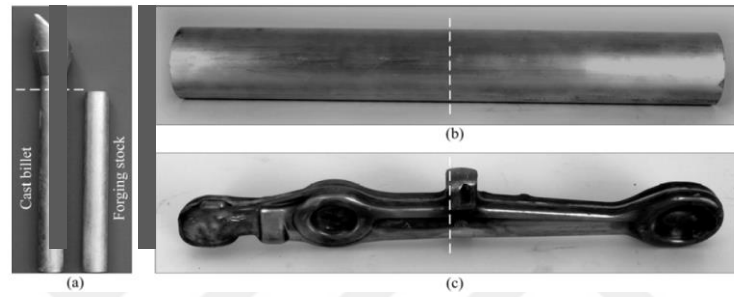


Şekil 2-18. Dövme hammaddesi olarak döküm kullanılan parçanın bölgesel tane boyut analizi barker yöntemi ile gösterilmiştir. Numune alınan parça a. Makro yapı b. birinci bölge c. İkinci bölge d. ve Üçüncü bölge d. (Gokcil ve ark., 2015)

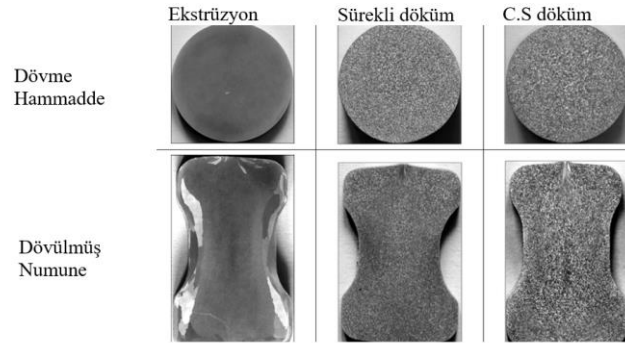
EN AW 6082 alaşımının dövülmesinde kullanılan ekstrüzyon hammaddeye alternatif olarak *cooling slope casting* yöntemi ile döküm yapılması denenmiştir. Sonuçlar her ne kadar olumlu olsa da döküm esnasında meydana gelen oksit tabakası ömür dayanımını olumsuz etkilemiştir. Şekil 2.19’da *cooling slope casting* yönteminin şematik çizimi verilmiştir. Şekil 2.20’de dökülen hammadde ve bu hammaddeden dövülen parça yer almaktadır. Şekil 2.21’de de dövme hammaddesi olarak ekstrüzyon, sürekli döküm ve *cooling slope casting* yöntemi ile üretilen hammaddelerin ve dövülmüş parçaların kesit tane yapıları yer almaktadır (Birol ve Akdi, 2014).



Şekil 2-19. Cooling slope casting yöntemi şematik çizilmi (Biol ve Akdi, 2014).



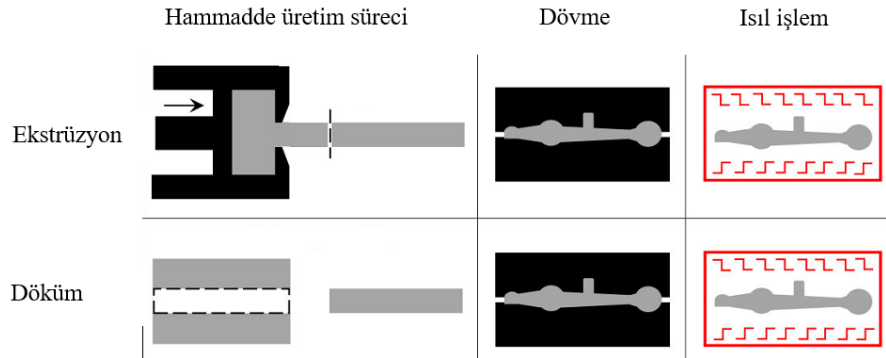
Şekil 2-20. Cooling slope casting yöntemi ile döküm ve dövme hammadesi hazırlama a. Dövmeye hazır hammadde b. ve Dövülmüş taslak parça c (Biol ve Akdi, 2014).



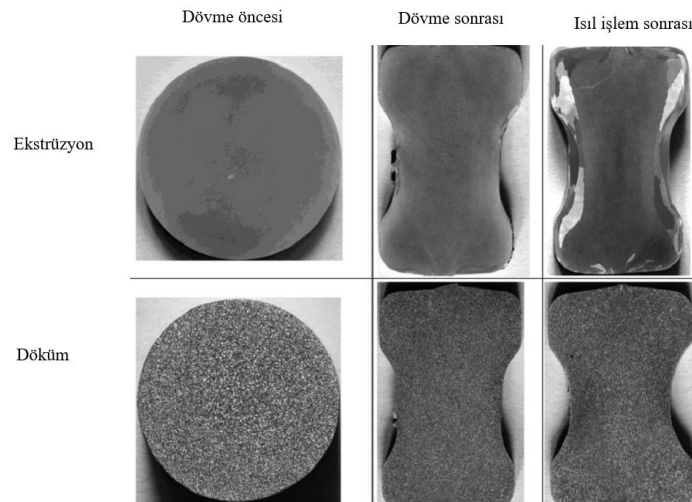
Şekil 2-21. Ekstrüzyon, sürekli döküm ve Cooling slope casting yöntemleri dövme hammaddelerin ve bu hammaddelerden dövülmüş numunelerin kesit tane yapılarını karşılaştırılması (Biol ve Akdi, 2014).

EN AW 6082 dövme malzemesinden süspansiyon parçası üretilerek denemeler yapılmıştır. Bu denemelerde dövme hammaddesi olarak sürekli döküm hammadde ile ekstrüzyon hammadde karşılaştırılmıştır. Hammadde olarak sürekli döküm kullanılması hem malzeme özelliklerini daha iyi hale getirmekte hem de maliyeti %30

azaltabilmektedir. Şekil 2.22’de 2 farklı sürecin karşılaştırması yer almaktadır. Şekil 2.23’de ekstrüzyon ve döküm hammadelerinin dövme öncesi, dövme sonrası ve ısıtma işlem sonrası kesit tane yapıları verilmiştir (Biol ve Ilgaz, 2013).

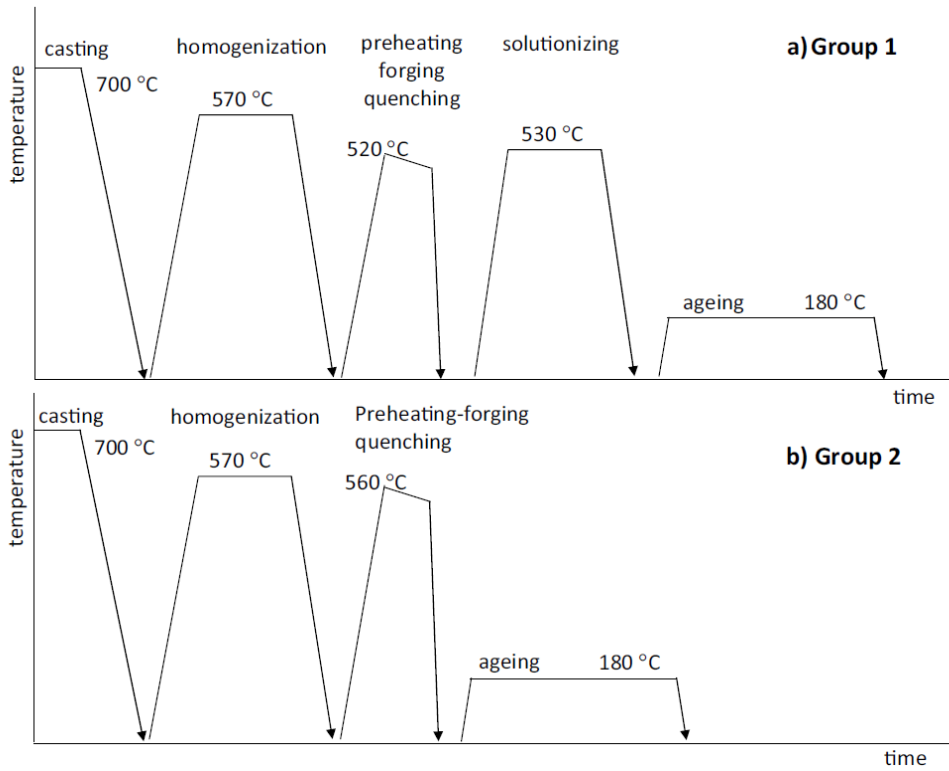


Şekil 2-22. Ekstrüzyon ve döküm hammaddeler ile dövme ve ısıtma işlem prosesi şematik gösterim. (Biol ve Ilgaz, 2013)

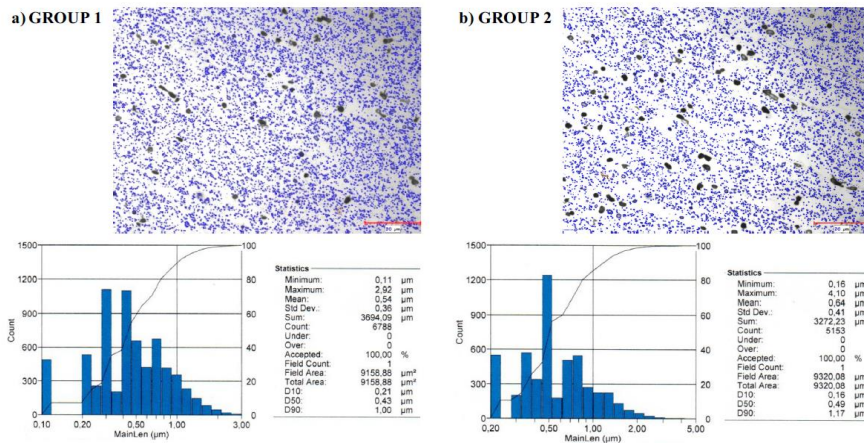


Şekil 2-23. Ekstrüzyon ve döküm hammadelerinin dövme öncesi, dövme sonrası ve ısıtma işlem sonrası kesit tane yapıları verilmiştir. (Biol ve Ilgaz, 2013)

Biol ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada çözeltiye alma sürecinin ortadan kaldırılması ile malzeme özelliklerini ve süreç analizini incelemişlerdir. Çözeltiye alma işlemi ortadan kalkması tane boyutunu incelttiği görülmüştür. Şekil 2.24’de 2 grup deney seti için şematik gösterim yer almaktadır. Şekil 2.25’de 2 grup arasındaki tane boyut dağılımı gösterilmektedir. (Biol ve ark., 2017).



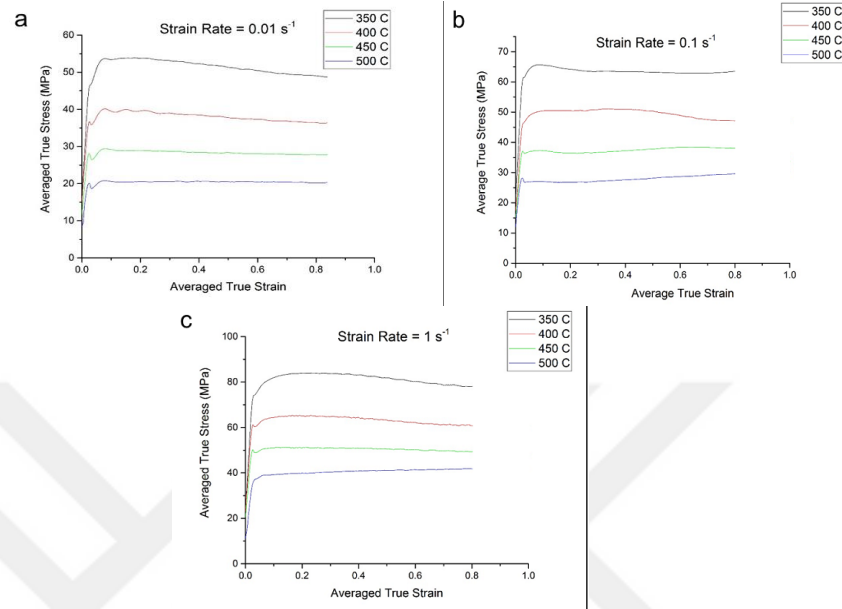
Şekil 2-24. 1. Grupta çözeltiyeye alma işlemi ile alüminyum sıcak dövme süreci a. 2. Grupta çözeltiyeye alma işlemlisiz alüminyum sıcak dövme süreci b (Biol ve ark., 2017).



Şekil 2-25. Çözeltiyeye alma işlemi ile nihai üründe tane boyut dağılımı a. Çözeltiyeye alma işlemi olmadan nihai üründe tane boyut dağılımı b (Biol ve ark., 2017).

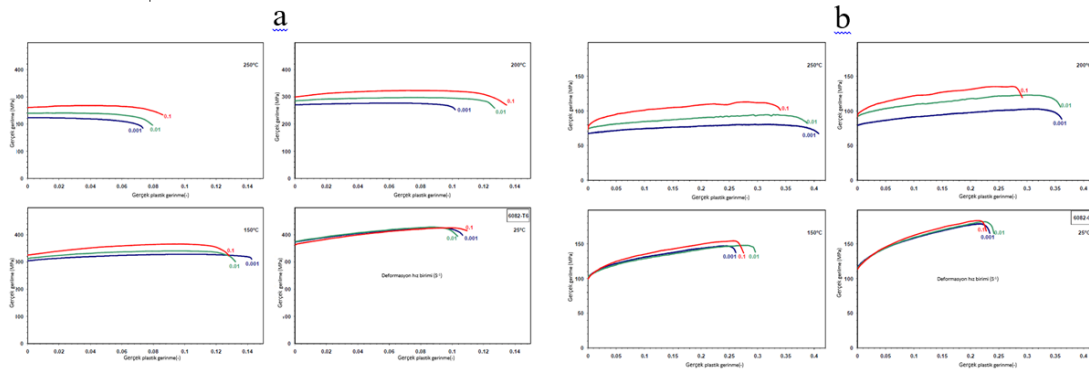
AA 6099 alaşımının sıcak dövülmesinde stres eğrisi belirlenmiş ve mikro yapısı analiz edilmiştir. Bu çalışma jant dövme prosesine göre yapılmıştır. Çalışma sonucunda farklı sıcaklıklar için stres eğrisi ve malzemelerin mikro yapısı elde edilmiştir. Her bir

gerilim oranı bölgesi için mikro yapı çıkartılmıştır. Şekil 2.26'da farklı sıcaklıklarda ve farklı deformasyon hızlarındaki gerçek stres eğrileri verilmiştir (Alamoudi, 2017).



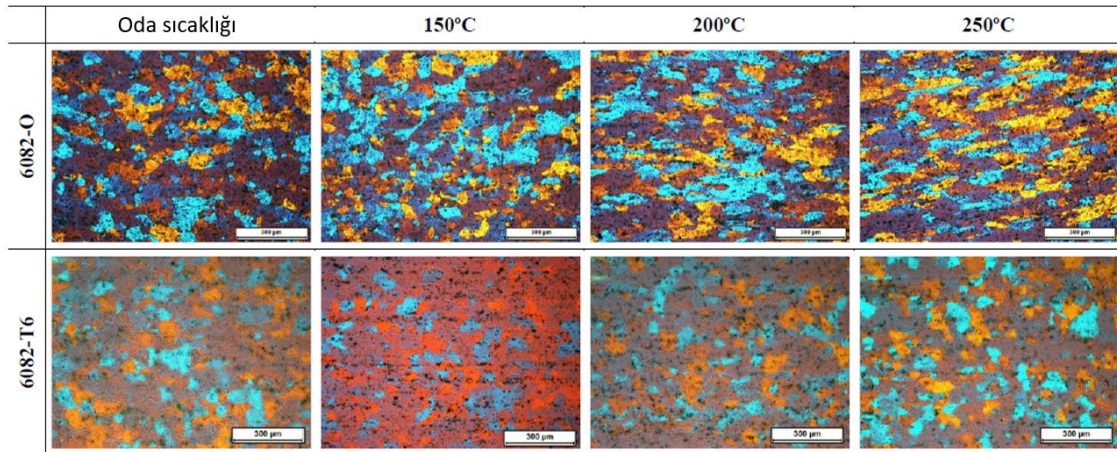
Şekil 2-26. 0,01s⁻¹ hızında ve farklı sıcaklıklardaki gerçek akış eğrileri a, 0,1s⁻¹ hızında ve farklı sıcaklıklardaki gerçek akış eğrileri b, 1s⁻¹ hızında ve farklı sıcaklıklardaki gerçek akış eğrileri verilmiştir c (Alamoudi, 2017).

AA 6082 T6 ve AA 6082 O için deformasyon hızı ve sıcaklığına bağlı olarak malzeme mikro yapısını araştırmışlardır. 25 °C, 150 °C, 200 °C ve 250 °C sıcaklıklarında numuneler farklı hızlarda çekilerek hıza bağlı uzama ve mikro yapı analizleri alınmıştır. EN AW 6082 O numunesi yüksek deforme olabilme özelliği ile öne çıkmaktadır. T6 ise ancak 200 °C ve üzerinde işlevseldir. O değerinde mikro yapı görüntüleri daha iyi elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda T6 ve O ısıl işlem koşullarını için ayrı ayrı grafikler çıkartılmıştır. Şekil 2.27'de bu grafikler yer almaktadır. Her iki durumda da deformasyon hızı gerçek gerilme-gerinim eğrisini yüksek sıcaklıklarda değiştirmiştir. Her iki ısıl işlem koşulu için 4 farklı sıcaklıktaki (oda sıcaklığı, 150, 200 ve 250 °C) mikro yapıları tane boyut dağılımını gösterecek şekilde Barker yöntemi ile hazırlanıp çift polarize mikroskopta incelenmiştir. Mikro yapılar Çizelge 2.8'de yer almaktadır (Torca ve ark., 2009).

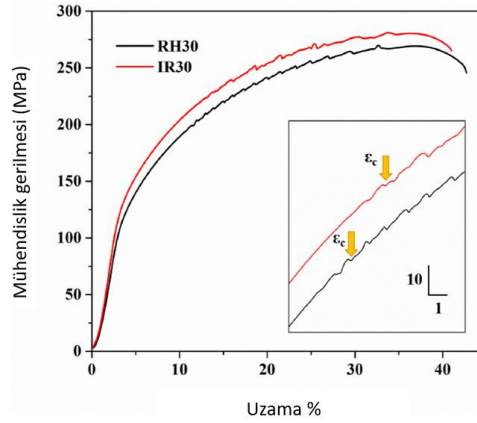


Şekil 2-27. AA 6082 malzeme için farklı deformasyon hızlarında ve sıcaklıklarında gerçek gerilme gerilme eğrileri T6 ısıl işlemi için a. 0 ısıl işlem hali için b. yer almaktadır (Torca ve ark., 2009).

Çizelge 2.7. 6082 T6 ve O hallerindeki numunelerin 4 farklı sıcaklıktaki tane boyut dağılımı (Torca ve ark., 2009).

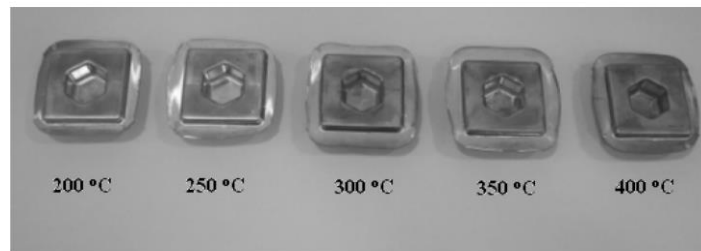


AA 6082 sıcak dövme süspansiyon parçaları için uygulanan T6 ısıl işleminde çözeltiye alma basamağında IR (kızıl ötesi ısıtma) ve RH (rezistans ısıtma) sistemlerinin, nihai parça özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. IR etkisinde ısınan parçaların daha hızlı sürede ısındığı ve yüksek çekme dayanımlarına ulaştığı gösterilmiştir. Şekil 2.28'de AA 6082 dövme süspansiyon parçasının kızıl ötesi ve rezistanslı ısıtmadaki çekme test grafiği yer almaktadır. 560 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış olup çözeltiye alma süreleri 20-30 dk lere kadar inmiştir. Bu çalışma sonuçları mikro yapı EDS ve SEM gibi tekniklerle de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Chang ve ark., 2018).

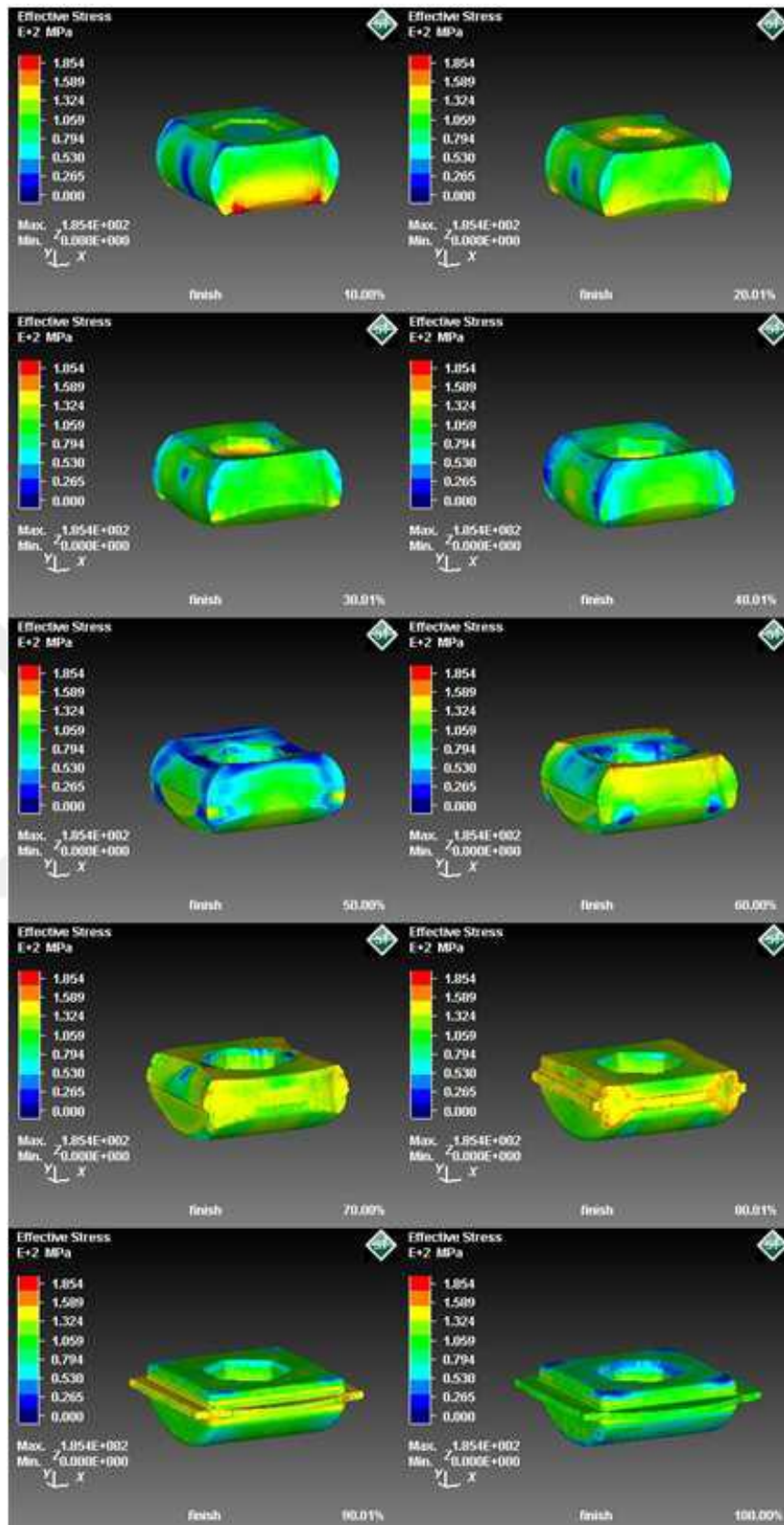


Şekil 2-28. 6082 dövme süspansiyon parçasını infrared ve rezistanslı ısıtmadaki çekme test grafiği (Chang ve ark., 2018).

AA 7075 ve AA 6061 alaşımlarının sıcak dövülmesi ve dövme sürecinin tasarımı ile ilgili olarak bu tez çalışması yapılmıştır. Dövme süreci SIMUFACT sonlu elemanlar analiz programında yapılmış olup dövme ve kalıp tasarımı süreçleri sonlu elemanlar analiz programı ile doğrulanmıştır. Şekil 2.29’da farklı sıcaklıkta dövdüğü numuneler ve Şekil 2.30’da sonlu elemanlar analiz görüntüleri yer almaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan sonlu elemanlar analiz programı aynı zamanda bu çalışmada da kullanılmıştır. Bu çalışmada sadece laboratuvar ortamında bir dövme yapılmış olup ısıtma işlem uygulanmamıştır (Öztürk, 2008).

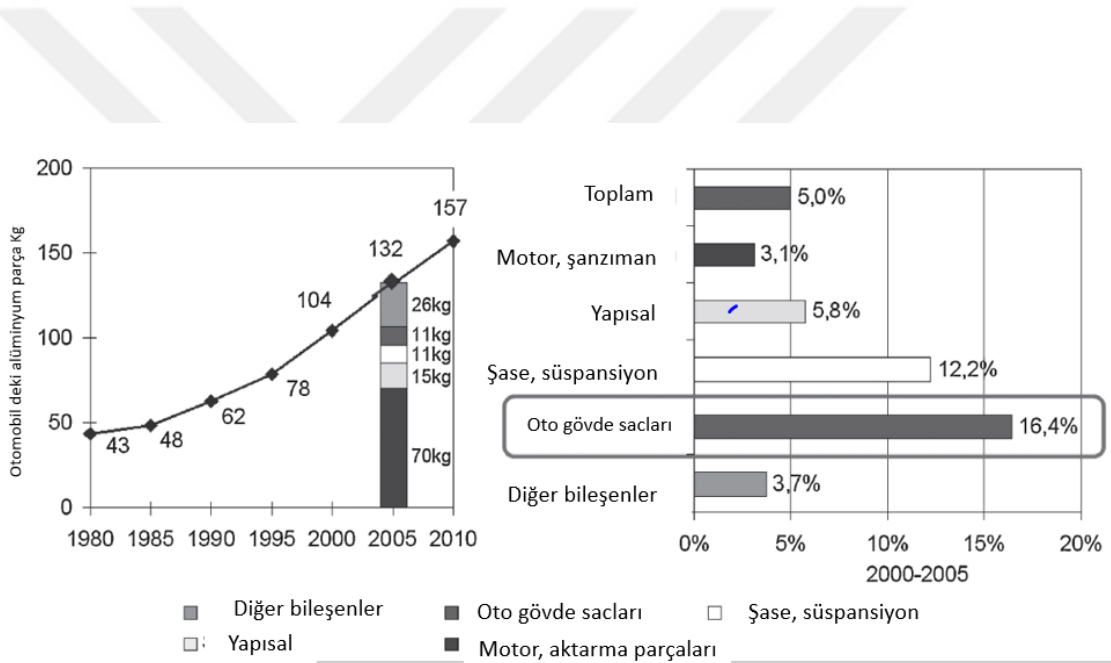


Şekil 2-29. Farklı sıcaklıklarda dövülen alüminyum numuneler (Öztürk, 2008).



Şekil 2-30. SIMUFACT metal forming programında yapılan simülasyon çalışması (Öztürk, 2008).

Hirsch ve arkadaşları yaptıkları çalışmada otomobillerde kullanılan alüminyum miktarını ve özelliklerini araştırmıştır. SLC (süper hafif araba) için bu araştırma yapılmıştır. Çalışmaya konu olan araç VW golf V olup %34 hafifletilmiştir. Kilogram başına 7,8 Euro avantaj sağlanmaktadır. Yeni nesil otomobillerde ağırlık azaltma ön plandadır. Bir otomobilde 1980’de 43 kg iken kullanılan alüminyum miktarı 2010 yılında 160 kg ye yaklaşmıştır. İşlem aşımı olarak otomotivde ekstrüzyon üretimi 6XXX ve 7XXX kullanılırken yassı mamül olarak şasede 5XXX serisi tercih edilmektedir. Bir otomobilde çevreye duyarlılık ve maliyetin gün geçtikçe önem arzemesiyle beraber yeni nesil çelikler, plastikler, kompozitler ve alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Şekil 2.31’de yıllara göre Avrupa menşeyli otomobillerdeki alüminyum kullanımı ve kullanıldığı alanlar yer almaktadır. (Hirsch ve ark., 2011)



Şekil 2-31. Yıllara göre Avrupa otomobillerindeki alüminyum kullanımı ve kullanıldığı alanlar yer almaktadır (Hirsch ve ark., 2011)w.

Otomotivde kullanılan alüminyum parçalar ve özellikle de alüminyum sıcak dövme süspansiyon parçaları ile ilgili detaylı bilgiler bu dökümanda mevcuttur. Ağırlıklı olarak EN AW 6082 alaşımı ve T6 ısıl işlemlenmiş parçalar tercih edilirken bununla beraber EN AW 6066 gibi alaşımlar da kullanılmaktadır. Çelik parça yerine alüminyum parçanın kullanılması %30-50 ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. Süspansiyon parçaları olarak aks taşıyıcı, amortisör, rotilli kol, salıncak ve ön düzen parçaları gibi parçalar kullanılmaktadır. Bu parçalar; sıcak dövme, ekstrüzyon, yarı katı şekillendirme, döküm

ve sac büküm gibi yöntemler ile üretilmektedir. Şekil2. 32’de bazı alüminyum sıcak dövme parçalar yer almaktadır. (Association, 2011)



Şekil 2-32. Alüminyum sıcak dövme süspansiyon parçaları (Association, 2011)

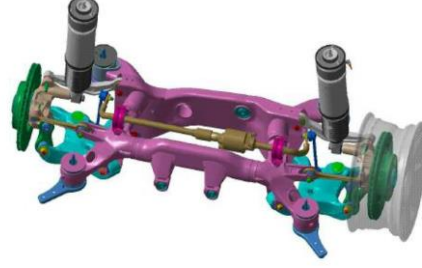
Bouazara’nın yaptığı çalışmada alüminyum üst kol süspansiyon parçası için tasarım geliştirmiştir. Bu tasarımda sonlu elemanlar analiz programı, CAD ve hesaplama sistemleri kullanılmıştır. Şekil 2.33’de alüminyum süspansiyon parça ve tasarım örnekleri yer almaktadır. (Bouazara, 2009)



Şekil 2-33 Alüminyum süspansiyon parça ve tasarım örnekleri (Bouazara, 2009)

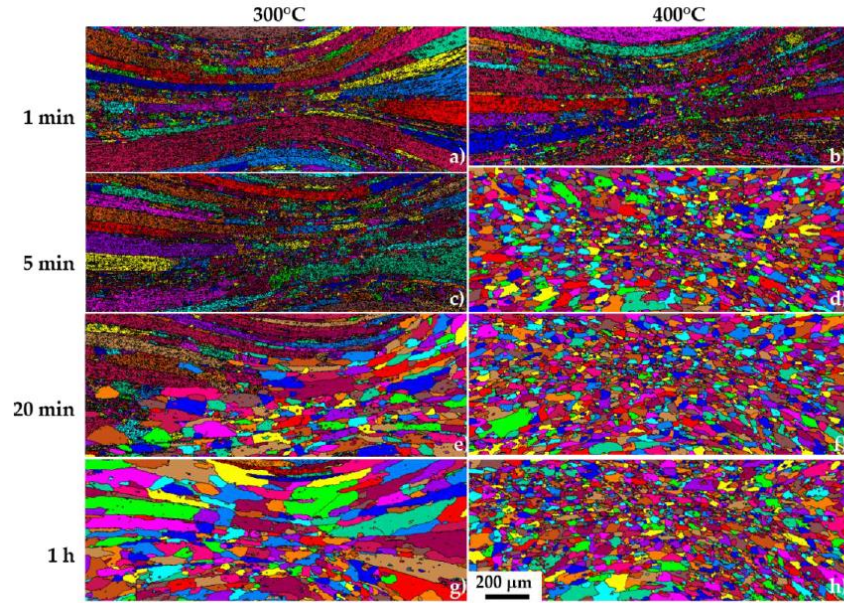
BMW tarafından hazırlanmış katalogda yıllar içindeki süspansiyon sistemlerinde yaptığı geliştirme ve iyileştirmeler verilmektedir. İlk alüminyum sistem E39 da 1997 de

kullanılmaya başlanmıştır. BMW bir çok modelinde alüminyum şasi parçası tercih etmektedir. Şekil 2.34’de BMW nin örnek bir süspansiyon sistemi yer almaktadır (BMW, 2012).



Şekil 2-34. BMW'nin tasarımı örnek bir süspansiyon sistemi. (BMW, 2012)

EN AW 6082 alaşımını termomekanik özelliklerini araştırmışlardır. Alüminyum numunelere kontrollü olarak birbirinden farklı deformasyon hızlarında ve sıcaklıklarında deforme edilerek gerilme-gerinme eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca deforme edilen numuneler farklı süre ve sıcaklıklarda ısıl işlemlere tabi tutularak tane boyutu dağılımları incelenmiştir. Şekil.2.35’de 300° ve 400°C 1 dk, 5dk, 20dk ve 60dk tutularak makro yapı haritalanması yapılmıştır (Poletti ve ark., 2018).



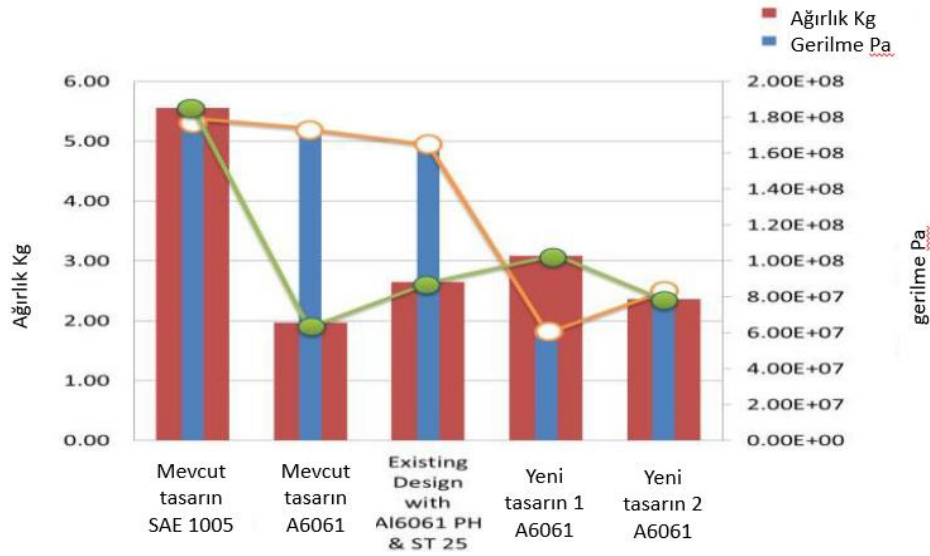
Şekil 2-35. Deformasyon sonrası 300 °C da (a,c,e,g) ve 400 °C da (b,d,f,e) sırası ile 1, 5, 20, 60 dk bekletilerek kesit tane yapısı haritalanmasında tane boyutları incelenmiştir. (Poletti ve ark., 2018)

AA 6082 Al-Si-Mg sistemindeki atomik modeli ve Gp zonları orataya koymuştur. Belirlenen bir kimyasal analizdeki 6082 alaşımının atomik modeli, sıcaklık ve ısıtılma durumlarına göre fazlar incelenmiştir. Al-Mg-Si sistemi için oluşan fazları ve dönüşümlerini elektron mikroskopunda kullanarak ortaya koymuşlardır (Marioara ve ark., 2000).

7A85 alaşımına sahip numunelerin normal ve izotermal dövme işlemi sonrası mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. İzotermal dövme malzemenin mekanik özelliklerini artırmıştır. İzotermal dövmenin normal dövme göre mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediğini ispatlamışlardır (Hu ve ark., 2014).

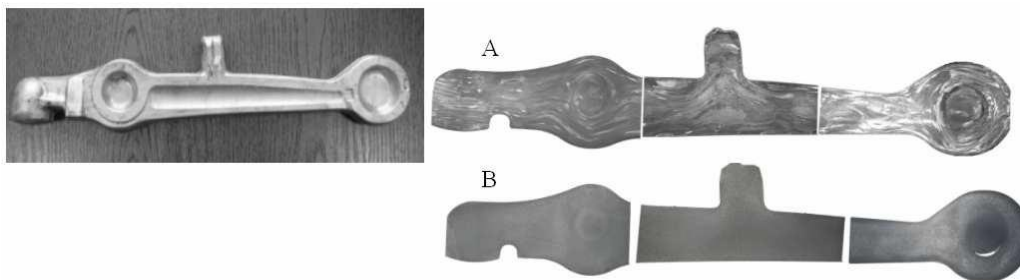
Bu çalışmada alüminyum dövme kalıpları, ısıtılma işlemler, alaşımlar ve alüminyum ısınma süreleri gibi teknik detayları ASM kitaplarından derlemiştir. Alüminyum dövme için ön ısıtıcı olarak gaz ısıtılmalı fırınların kullanılabilmesi belirtilmiştir. Alüminyum dövme hammaddesi olarak döküm ve ekstrüzyon kullanılabilir. Önemli dövme alaşımları 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisidir (Kuhlman, 2005).

TATA SUMO nun aks taşıyıcısının çelik dövmeden alüminyum dövme geçmesi için tersine mühendislik ile optimizasyonu yapılmıştır. Dövme St25 yerine dövme 6061 T6 malzemesi ile optimizasyon yapılmıştır. Şekil 2.36'da aynı servis koşullarında çalışacak parça için farklı malzemeler ile farklı tasarımların ağırlık dayanım grafiği verilmiştir (Kalaiyarasan ve ark., 2017).

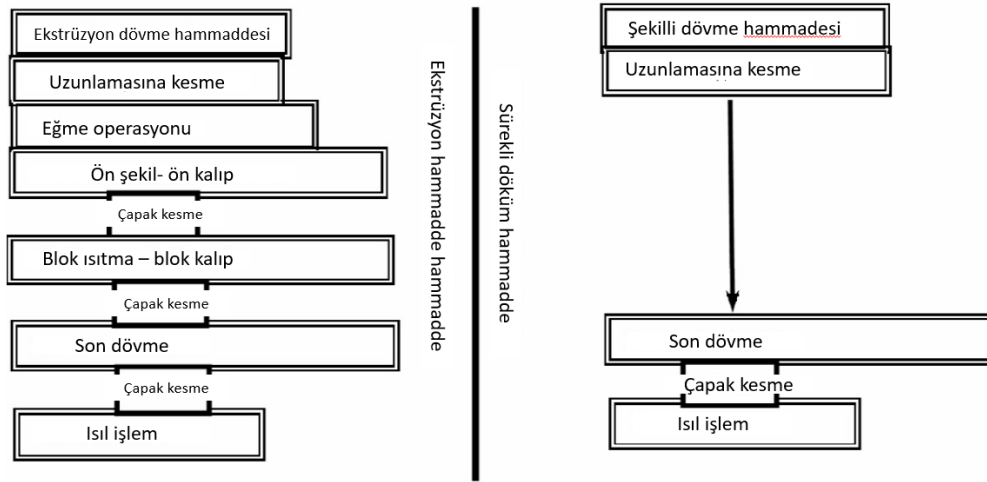


Şekil 2-36. Aynı parçanın farklı malzeme ve tasarımlara karşılık gelen ağırlık ve dayanım grafiği (Kalaiyarasan ve ark., 2017)

Otomotiv endüstrisi için AA 6082 dövme parçalarında ekstrüzyon yerine yatay döküm hammadde kullanımı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu proje parçası EN AW 6082 dövme süspansiyon parçaları ile çalışılmıştır. Yatay döküm hammadde ile oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. Şekil 2.37’de alüminyum rotilli kolun ekstrüzyon ve yatay döküm hammadde kullanılarak dövülmesi sonunda elde edilen parçaların makro yapısı yer almaktadır. Şekil 2.38’ de ise hammadde olarak yatay sürekli döküm ile ekstrüzyon arasındaki süreç farklılıkları göstermektedir (Plonka ve ark., 2008).



Şekil 2-37. Alüminyum sıcak dövme rotilli kolun Ekstrüzyon hammadde ile dövme a. sürekli döküm hammadde ile dövme makro yapıları b. yer almaktadır. (Plonka ve ark., 2008)



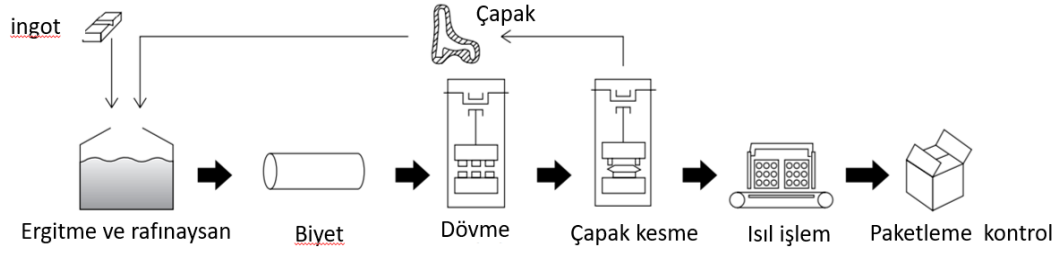
Şekil 2-38. Hammade olarak yatay sürekli döküm ile ekstrüzyon arasındaki süreç farklılıkları (Plonka ve ark., 2008)

Alüminyum dövme süspansiyon parçaları için malzeme ve kalıp tasarımı ile ilgili kritik teknik bilgiler vermektedir. Burada dövme EN AW 6082 nin yorulma, korozyon ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca dövme kalıbı tasarımı için hesaplama metodları da vardır. Kalıp tasarımı, süreç tasarımı ve malzeme özellikleri ile ilgili gerçek parça üzerinden örnekler verilmiştir. (Association, 2002)

Eğmeli yorulma test cihazı ile AA 6082 alaşımını sabit ve değişken eğme testinde ömür dayanımı ölçülmüştür. Alüminyum alaşımlarının en zayıf noktası dinamik ömürlerinin sonlu olması yani çeliklere nazaran daha kısa sürede yorulmasıdır. Bu çalışmada alüminyumun ömür dayanımı formülize edilmiştir (Karolczuk ve ark., 2015).

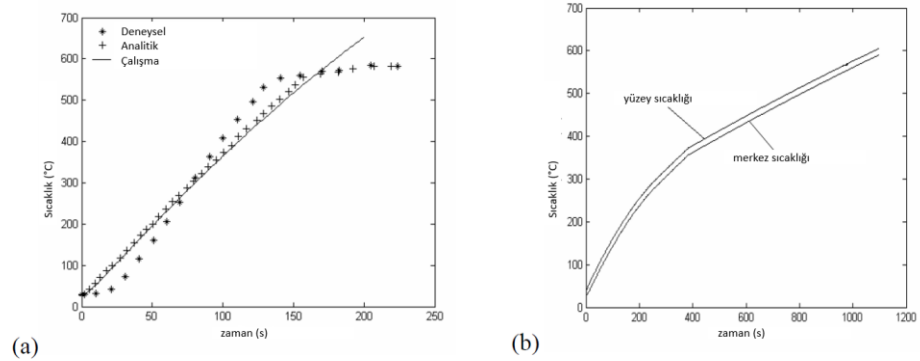
EN AW 6082 alaşımını ECAP yöntemi ile mukavemetlendirilmesini araştırmışlardır. Çözeltiyeye alınan numuneye ECAP uygulanarak mekanik özellikleri artırılmıştır. Çekme dayanımını 385 MPa' dan 418 MPa' a kadar çıkarmışlardır (Fujda ve Kvačkaj, 2007).

Alüminyum süspansiyon parçası üretimi ile ilgili olarak mevcut ürün devreye alma proseslerini yayınlamışlardır. Kobe firması işbirliği ile yapılan çalışma yer almaktadır. Şekil 2.39. da alüminyum dövme süreci yer almaktadır (Fukuda ve Inagak, 2008).



Şekil 2-39. Alüminyum sıcak dövme süreci. (Fukuda ve Inagak, 2008)

75 mm çapında ve 50 mm boyundaki A356 bilet in indüksiyonla ısıtılması nümerik olarak modellenmiştir. Aynı zamanda bu nümerik hesaplama deneysel doğrulama ile karşılaştırılmıştır. Farklı frekanslardaki indüksiyon ısınma süresi ve sıcaklığı grafiklerde karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları Şekil 2.40'da yer almaktadır (Barman ve ark., 2008).



Şekil 2-40. Deneysel ve hesaplamalı indüksiyon ısınma sıcaklık zaman grafiği karşılaştırılması a. indüksiyon ile ısıtma sisteminde yüzey ve merkez arası sıcaklık ölçümü b. (Barman ve ark., 2008)

Tezinde çelik çubukların indüksiyon ile ısıtılması için bir matematiksel metod geliştirmiştir. Bu metod deneysel olarak doğrulanmış ve çelik çubukların indüksiyon ile ısınma süreleri doğru tahmin edilmiştir (Durukan, 2007).

Dövülmüş AA 6061 alaşımının mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Dövme hammaddesi döküm ve T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Farklı dövme hızlarındaki malzemelerin mikroyapıları incelenmiştir (Nakai ve Itoh, 2014).

AA 6061 alaşımını elektirikli fırında ve indüksiyon ısıtıcıda ısıtarak ısıl işlem uygulamıştır. merkez ve yüzey sertlikleri ile makro yapıları karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı parametrelerde indüksiyon ısıtması ile malzeme özellikleri araştırılmıştır (Shang ve ark., 2011).

Blu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada AA 2014 alaşımını sıcak dövme ön ısıtma sürecinde gazlı fırına alternatif olarak infrared ısıtma denemesi yapmışlardır. Sonuçları endüstriyel ve laboratuvar boyutunda incelemişlerdir. Hem mikro yapı özellikleri olarak hem de enerji tasarufu olarak oldukça avantajlı olduğu görölmüştür. Ayrıca bu makale hazırlanmış olan tezin alt yapısını sağlamlaştırmıştır (Blue ve ark., 2008).

Dövme sürecinde infrared ısıtmanın özgün bir yöntemi geliştirmişler ve sonuçlarını detaylı olarak karşılaştırmışlardır. Infrared ısıtmada IR 40 olan özel yöntemde yorulma ve çekme testlerinde iyi sonuçlar elde edilmiştir (Kervick ve ark., 2006).

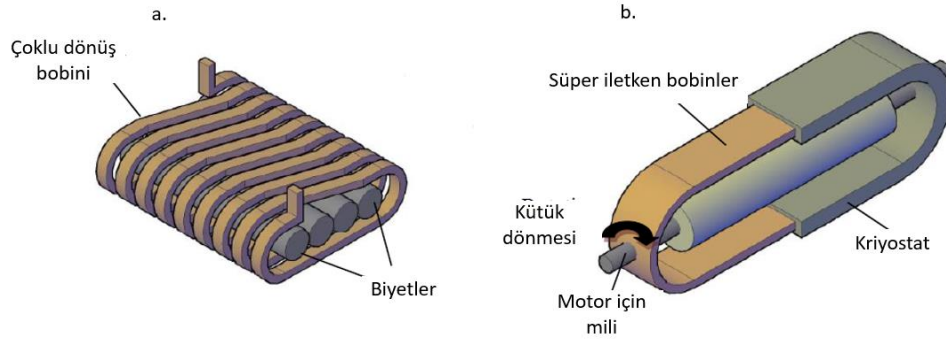
Dövme öncesi indüksiyon ile ısıtma teknolojisinin endüstrideki yeri ve önemi üzerine bir araştırma yapmıştır. Şekil 2.41 'de örnek bir dövme öncesi indüksiyon ısıtma makinası yer almaktadır (Rudnev, 2006).



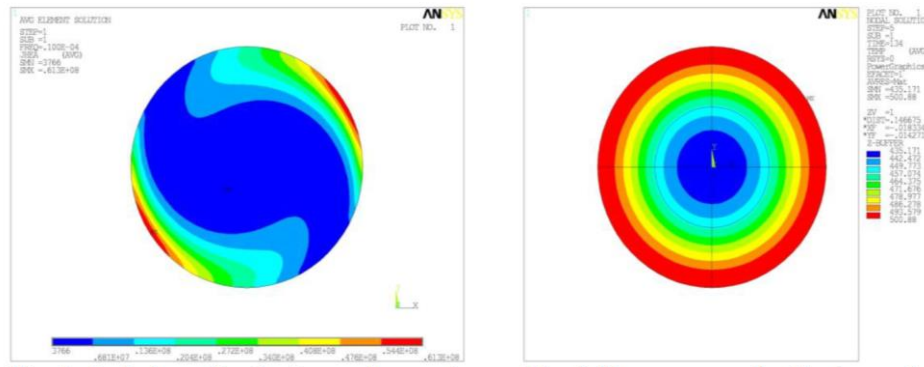
Şekil 2-41. Dövme ön ısıtma indüksiyon makinası (Rudnev, 2006).

Ekstrüzyon öncesi biyetlerin ısıtılması ile ilgili olarak 2 farklı bobin tasarımı yapmıştır. Bu tasarımları sonlu elemanlar analizi programında modelleyerek farklılıklarını görmüştür. Şekil 2.42 'de 2 farklı indüksiyon ısıtma konsepti yer almaktadır. Şekil 2.42' de 2 farklı konsept için ısınma analiz yer almaktadır. Şekil

2.43’de 2 farklı konsept için indüksiyon ısıtma analizi yer almaktadır. (Zlobina ve ark., 2010)

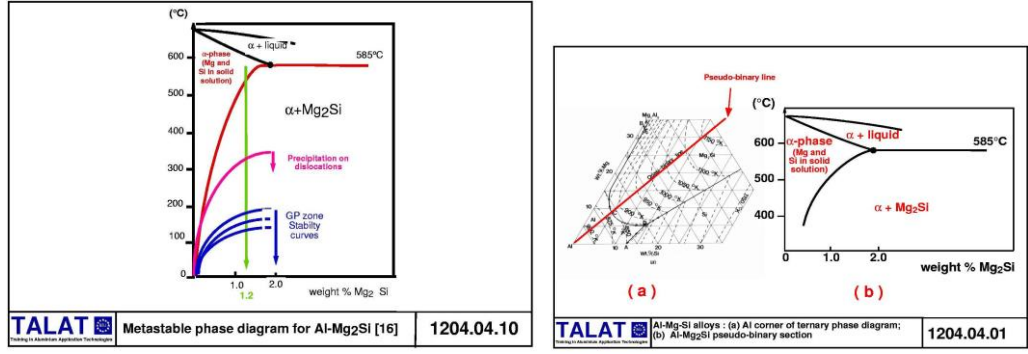


Şekil 2-42. Konveksiyonel biyet ısıtma a. ALUHEAT konsept b. (Zlobina ve ark., 2010)



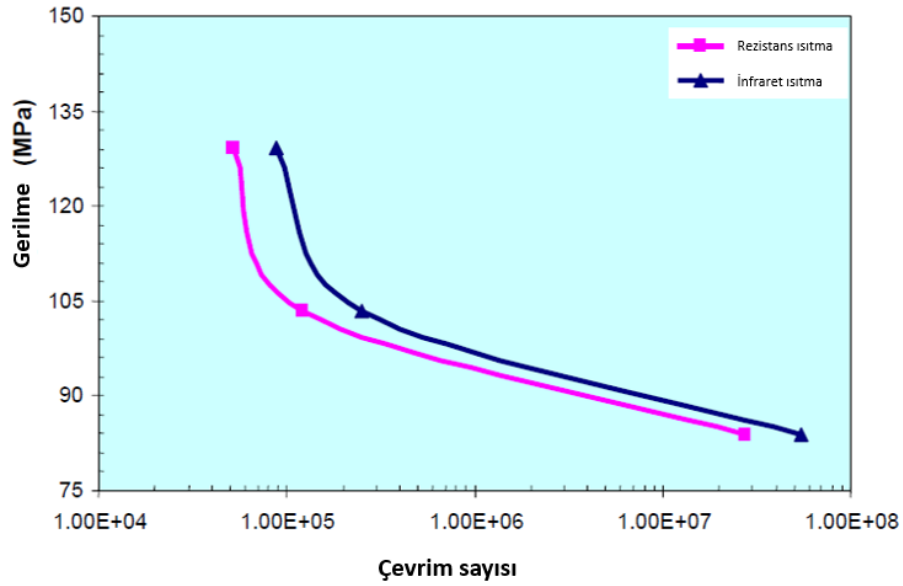
Şekil 2-43. 2 farklı konsept için indüksiyon ısıtma analizi (Zlobina ve ark., 2010)

Talat bildirimlerinde alüminyum alaşımlarının dövme ön ısıtması sıcaklığını belirlemek için faz diyagramı yer almaktadır. Şekil 2.44’de yer alan faz diyagramına göre dövme ön ısıtma sıcaklığı solvüs sıcaklığının üzeri olarak belirlenmektedir. (Jacobs, 1999)



Şekil 2-44 Al-Mg₂Si faz diyagramı (Jacobs, 1999).

AA2618 alaşımını ısıtarak dövmüş ve ısıl işlem uygulamıştır. Konveksiyonel ısıtma ile infrared ısıtma süreçleri hem ön ısıtmada hem de ömür testinde karşılaştırılmıştır. Infrared ısıtma rezistans ısıtmaya göre hem daha hızlı hem daha ucuz hem de üretilen malzemelerin mekanik özellikleri daha iyidir. Şekil 2.45’de farklı ısıtma teknolojilerinde ömür dayanımı karşılaştırması yer almaktadır (Kadolkar ve ark., 2004).



Şekil 2-45. Farklı ısıtma teknolojilerinde ömür dayanımı karşılaştırması (Kadolkar ve ark., 2004).

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışmada kullanılan materyallere yer verilmiştir. Bu çalışmada rezistanslı ısıtıcı, indüksiyon ısıtıcı ve infrared ısıtıcı olmak üzere 3 farklı ısıtma teknolojisi kullanılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında çekme çubuğu numunesi ve farklı deformasyon oranları karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışmalarda eksantrik pres kullanılmıştır. Numune sıcaklıkları temaslı termokulp ile ölçülmüştür. Metalografik numune hazırlama bölümünde kesme cihazı, polisaj ve mikroskop kullanılmıştır. Numunelerin teste hazırlanmasında talaş kaldırma CNC makinası ve testlerin yapılmasında üniversal çekme basma test cihazı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analiz programı olarak SIMUFACT kullanılmış ve iş istasyonu bilgisayarında çözüm yapılmıştır.

3.1 Materyal

Bu kısımda deneysel çalışmalarda kullanılan ekipmanlar tanıtılmıştır. Bu ekipmanların teknik özellik detayları, kullanım şekilleri ve deneysel çalışmalarda hangi amaçla kullanıldığı ile ilgili detaylar verilmiştir.

3.1.1 Isıtma teknolojileri

Alüminyum sıcak dövme süreci ana hatları ile;

- Sürekli dikey dökümden biyetlerin üretilmesi
- Homojenizasyon
- Sıcak ekstrüzyon
- Uygun ölçüde kesme
- **Ön ısıtma**
- Ön şekil verme
- Çapak kesme
- Isıl işlem
- İş parçası taslağı

olarak sıralanmaktadır. Bu çalışmanın ilk kısmında ön ısıtma teknolojileri araştırılarak 3 farklı ısıtma teknolojisi deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Bunlar; rezistans ısıtma, indüksiyon ısıtma ve infrared ısıtması.

3.1.1.1 Rezistans ısıtma

Rezistanslı ön ısıtma tekniği hali hazır üretim hatlarında kullanılan bir tekniktir. Bir iletken üzerinden akım geçirildiğinde geçen akıma karşı bir direnç oluşur. Oluşan bu dirençten dolayı akım karşıya eksik iletilir. Eksilen bu akım iletkenin sıcaklığını artırır. Bu temel prensibe göre rezistanslı fırınlar çalışmaktadır. Rezistanslı ısıtma ile ön ısıtma yapılan örnek bir hat Şekil 3.1’de yer almaktadır. Seri üretim hattında rezistanslı tünel fırın yer almaktadır. Ekstrüzyon profiller kesildikten sonra fırına yerleştirilmektedir. Parçalar çelik bant üzerine yerleştirilir. 14 m uzunluğundaki hat boyunca farklı koşullarda ısıtılmış alanlara girip çıkarak pres önüne istenen sıcaklığa ulaşarak gelmiş olur. Bir parçanın fırının başından sonuna gitmesi 1,5-2,5 saati bulmaktadır.

Rezistanslı tünel fırının iki ucunun da açık olması fırın verimliliğini düşürmektedir. Ayrıca rezistans teknolojisinde, önce fırının ve ortamın ısınması daha sonra taşınım ile parçaların ısınması gerçekleşmektedir. Fırının açık olmasından dolayı fan kullanılmaması da ısınmayı yavaşlatmaktadır.



Şekil 3-1. Üretimde kullanılan tünel fırın

Deneyisel çalışmalar, üretimdeki rezistanslı fırını simüle edebilecek laboratuvarındaki NABERTHERM marka rezistanslı fırında denemeler yapılmıştır. Denemelerin yapıldığı fırın Şekil 3.2’de yer almaktadır.



Şekil 3-2. Deneyisel çalışmalarda kullanılan rezistanslı fırını

Rezistanslı sistemin en büyük dezavantajı parça ısınma süresinin uzun olması ve parçanın yavaş ısınmasıdır. Yavaş ısınan parça üzerinde dinamik yeniden kristallenmeye bağlı tane büyümeleri görülmektedir. Ayrıca ısınmanın yavaş olması enerji verimliliğini de düşürmektedir. Rezistanslı sistemlerde önce rezistans telleri ısınması, fırının ve yalıtım malzemelerinin ısınmasının ardından numuneler ısınmaya başlayacaktır. Fırında sadece parçaların değil tüm fırın iç malzemelerinin istenen sıcaklıkta tutulması gerektiği için rezistanslı sistemin enerji tüketimi oldukça fazladır.

3.1.1.2 İndüksiyonla ısıtma

Michael Faraday tarafından keşfedilen indüksiyon, iletken malzemedan (bakır gibi) yapılmış bir bobinle başlar. Bobinden akım geçtikçe bobin içinde ve etrafında bir manyetik alan oluşur. Manyetik alanın iş yapabilme özelliği, bobin tasarımına ve bobinden geçen akım miktarına bağlıdır.

Manyetik alanın yönü akımın geçiş yönüne bağlıdır; dolayısıyla, bobinden geçen alternatif akım, manyetik alan yönünün alternatif akım frekansıyla aynı hızda

değişmesine yol açacaktır. 60Hz AC akım, manyetik alanın bir saniyede 60 kez yön değiştirmesine sebep olur. 400kHz AC akım ise manyetik alanın bir saniyede 400.000 kez yön değiştirmesine neden olur.

İletken malzemeden bir iş parçası bir değişken manyetik alan (AC ile yaratılan bir alan gibi) içine yerleştirildiğinde, iş parçasında gerilim indüklenmesine sebep olur (Faraday Kanunu). İndüklenen gerilim de elektron akışına, yani akıma yol açar. İş parçasında akan akım, bobindeki akıma ters yönlüdür. Bu da bobindeki akımın frekansını kontrol etmek suretiyle iş parçasındaki akımı kontrol edebileceğimiz anlamına gelir.

Bir malzemeden akım geçtiğinde, elektronların hareketine karşı bir direnç oluşur. Bu direnç kendini ısı olarak gösterir (Joule Isıtma Etkisi). Elektron akışına daha fazla direnç gösteren malzemelerin içlerinden akım geçtiğinde üretecekleri ısı daha yüksek olacaktır. Buna rağmen indüklenmiş akım kullanılarak yüksek iletkenliğe sahip malzemelerin de ısıtılması mümkündür. Bu olgu, indüksiyonla ısıtmada kritik öneme sahiptir. İndüksiyonla ısıtma sistemi düşük enerji gideri ve pratik kullanımından dolayı uzun zamandır çelik dövmeçiler tarafından kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de çelik dövmede indüksiyon ısıtma sisteminin kullanımı görülmektedir. (Durukan, 2007; Barman ve ark., 2008) Literatür taramasında çelik malzemelerin yanında alüminyum barların ısıtılmasında da indüksiyon sisteminin kullanıldığına rastlanmıştır. Bazı alüminyum ekstrüzyon üreticileri 200 mm çapındaki silindirik malzemeleri bile indüksiyonla ısıtabilmektedir. (Zlobina ve ark., 2010)



Şekil 3-3. Çelik dövmede indüksiyon ısıtma sistemi

Alüminyum pre-form parçaların indüksiyonla ısıtılması süreci 40-60 saniye gibi bir sürede gerçekleştiği için toparlanma ve yeniden kristallenme süreçlerine zaman kalmayarak malzemenin tane yapısı ideal boyutlarda kalmaktadır. İndüksiyonla ısıtmanın yapıldığı laboratuvar tipi indüksiyon ısıtıcısı Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3-4 Deneysel çalışmalarda kullanılan indüksiyon ısıtma sistemi

3.1.1.3 İnfrared ısıtma

İnfrared (kıızıl ötesi) ısıtma teknolojisinde numunelerin ısınması yansıma ile gerçekleşmektedir. 1800'lü yıllarda Sir Frederic William Herschel renk tayflarının ne oranda ısı taşıyabildiğini ve bu ısının kullanılabilir olup olmadığını incelerken infrared teknolojisini de keşfetti. Bu ısıtma sisteminin en önemli özelliği ısıyı ışık ile taşıyabiliyor olmasıdır. Aynı zamanda havayı ısıtmadan yani havayı bir aracı olarak kullanmadan direkt olarak sadece objeyi ısıtıyor olması da yine infrared ısıtma sistemlerinin önemli ve fark yaratan özellikleri arasında yer alıyor. Öncelikle bilinmesi gereken husus infrared ısıtma sistemlerinde kullanılan ışıklar diğer ışıklardan daha fazla

ısı taşıyabiliyor. İnfrared ışıkları güneş ışınlarının 0,76 ila 300 mikrometre dalga boyu aralığında olan ışıklardır. Rengi turuncu ve aynı zamanda infrared ışınları sadece güneşin doğuşu ve batışı esnasında net olarak görülebiliyor. Endüstriyel alanda ısıtma sistemlerinde kullanılan bu ışıklar aslında tıp sektöründe tedavi amacıyla ve haberleşme alanlarında da kullanılıyor.

Yapılan literatür araştırmalarında 2005-2007 yıllarında alüminyum sıcak dövme teknolojisinde ABD’de infrared ile endüstriyel uygulamaların başladığı görülmektedir. (Kadolkar ve ark., 2004; Blue ve ark., 2008) Şekil 3.5’de alüminyum infrared teknolojisinin endüstriyel uygulamaları görülmektedir.



Şekil 3-5. Alüminyum dövmede infrared ısıtma uygulaması

Projede öngörülen gerçek Pre-form parçaları ısıtabilecek kapasitede tasarlanan makine 42 mm çapında ve 400 mm boyundaki silindir numuneleri ısıtabilmektedir. Cihaz yansıtıcı iç bölüme 120° açı ile yerleştirilmiş 3 infrared lambası ile ısıtma yapmaktadır. Şekil 3.6'da infrared ısıtma cihazı görülmektedir.



Şekil 3-6. Deneysel çalışmalarda kullanılan infrared ısıtma cihazı

İnfrared ısıtma cihazının silindirik kapağında içeri malzemeler yerleştirilmekte ve ısıtmaya başlanmaktadır. Sıcaklık ölçümü 2 termokupl aracılığı ile yapılmaktadır. Bunlardan biri, parça üzerinden sıcaklık ölçerken diğeri de fırın içinden sıcaklık ölçümü yapmaktadır. Fırın parçayı ısıtmaya başladığında zaman sayacı başlamakta ve parça yüzeyinden ölçülen sıcaklık istenen değere geldiğinde zaman durmaktadır. Parça başı

ısınma süresi yaklaşık olarak deneme numunelerinde 3-5 dakika, 25 mm çap 30 mm boy, proje parçasının 42 mm çap ve 400 mm boy ısınma süresi ise 10-15 dakika sürmektedir.

3.1.2 Şekillendirme teknolojisi

Bu çalışmada 2 farklı şekillendirme tekniği kullanılmıştır. Birincisi deformasyon oranını belirlemek için oluşturulan düz iki plaka arasında farklı oranlarda dövme ve ikincisi çekme çubuğu şeklinde numune dövme.

3.1.2.1 Dövme presi

Deneysel çalışmalarda 60 ton kapasiteli eksantrik pres kullanılmıştır. Kullanılan pres Şekil 3.7’de yer almaktadır. Pres tahriklenmesi volana bağlı AC motor tarafından yapılmakta olup pres koçunun hareketi pnömatrik pedal ile olmaktadır. Kama kanalındaki hareketli pimi çevirerek koçu indiren çarka hareketi iletmektedir. Strok ayarı yapılarak koçun inme mesafesi değiştirilebilmektedir.

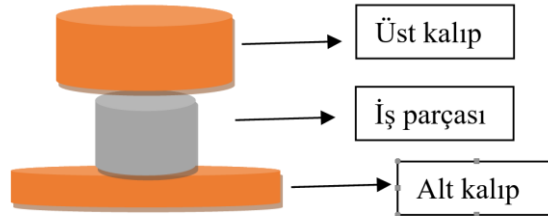


Şekil 3-7. deneysel çalışmalarda kullanılan eksantrik pres

3.1.2.2 Deformasyon oranı için kalıp

Farklı deformasyon oranlarında dövme yapıp bu sonuçların karşılaştırılabilmesi için 2 düz plakadan kalıp tasarlanıp üretilmiştir. 25 mm çapındaki ekstrüzyon profiller

ekstrüzyon yönüne paralel dövülerek denmeler yapılmıştır. Dövme kalıbının şematik gösterimi Şekil 3.8’de yer almaktadır.



Şekil 3-8. Deformasyon oranı için tasarlanan kalıbın şematik gösterimi

3.1.2.3 Çekme çubuğu için kalıp

Dövme denemelerinde malzemenin mekanik özelliklerinin tayini için çekme testleri yapılmıştır. Bu testler için çekme numunesi ölçülerine yakın parçalar dövülmüştür. Şekil 3.9’ da dövme kalıbı ve dövme numunesi yer almaktadır.



Şekil 3-9. Çekme numunesi dövme kalıbı ve dövülmüş numune.

3.1.3 Metalografik numune hazırlama

Numuneler makro ve mikro yapı analizleri için hazırlanması işleminde sırası ile kesme cihazı, polisaj makinası, dağlama işlemi ve mikro yapı için metal mikroskobu kullanılmıştır. Bu cihazlar Şekil 3.10’da yer almaktadır. Ayrıca bu SAN-TEZ çalışmasında alınan polisaj numune hazırlama makinası hali hazırda Selçuk Üniversitesi mühendislik fakültesi metalürji ve malzeme mühendisliği bölümü metalografi laboratuvarında kullanılmaktadır. Bu cihazda Şekil 3.11’de yer almaktadır.



Şekil 3-10 Deneysel çalışmalarda kullanılan metalografik numune hazırlama cihazları; Kesme cihazı a. Polisaj makinası b. Kalıplama cihazı c. Metal mikroskobu d.

Çalışmada kullanılan EN AW 6082 alaşımının kimyasal kompozisyonu Spectromax Optik Emisyon Spektroskopi Ünitesi'nde kontrol edilmiştir. Tane yapısı, karma asitle (H_2O , HCl , HNO_3 ve HF) $50-70\text{ }^\circ C$ 'de dağlanarak yapılmıştır.



Şekil 3-11 SAN-TEZ projesi kapsamında alınan polisaj numune hazırlama cihazı

3.1.4 Çekme testi numunesi hazırlama ve çekme testi

Bu çalışmada özel tasarlanan dövme kalıbı ile alüminyum sıcak dövme yapılmıştır. Kalıp ve numune görseli Şekil 3.9’da yer almaktadır. Bu tez çalışması ile yürütülen SAN-TEZ projesinde alınan talaş kaldırılarak çekme numunesi hazırlama makinası (masa üstü CNC) hali hazırda Selçuk Üniversitesi mühendislik fakültesi metalürji ve malzeme mühendisliği bölümü metalografi laboratuvarında kullanılmaktadır. Bu cihazda Şekil 3.12’de yer almaktadır. Farklı parametrelerde ve ön ısıtma teknolojilerinde dövülen çekme numuneleri masa üstü CNC talaş kaldırma cihazı ile hazırlanmış ve daha sonra Zwick Roell 250 KN cihazı ile çekilerek raporlanmıştır. Deneysel çalışmaların yapıldığı üniversal çekme basma test cihazı Şekil 3.13’de yer almaktadır.



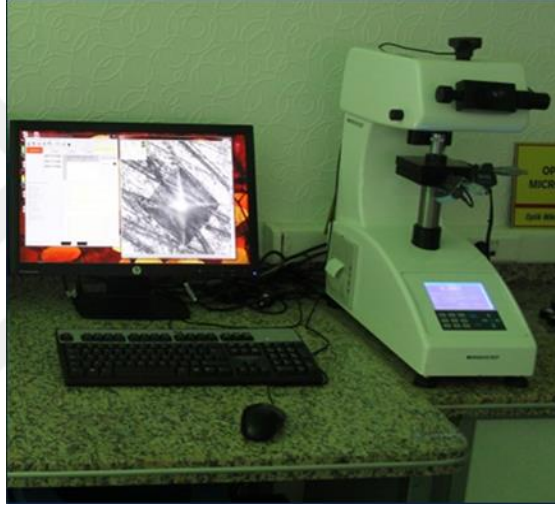
Şekil 3-12. SAN-TEZ projesi kapsamında alınan masa üstü CNC çekme numunesi hazırlama cihazı



Şekil 3-13. Deneysel çalışmaların yapıldığı Zwick Roell 250 KN üniversal çekme basma test cihazı

3.1.5 Sertlik ölçümü

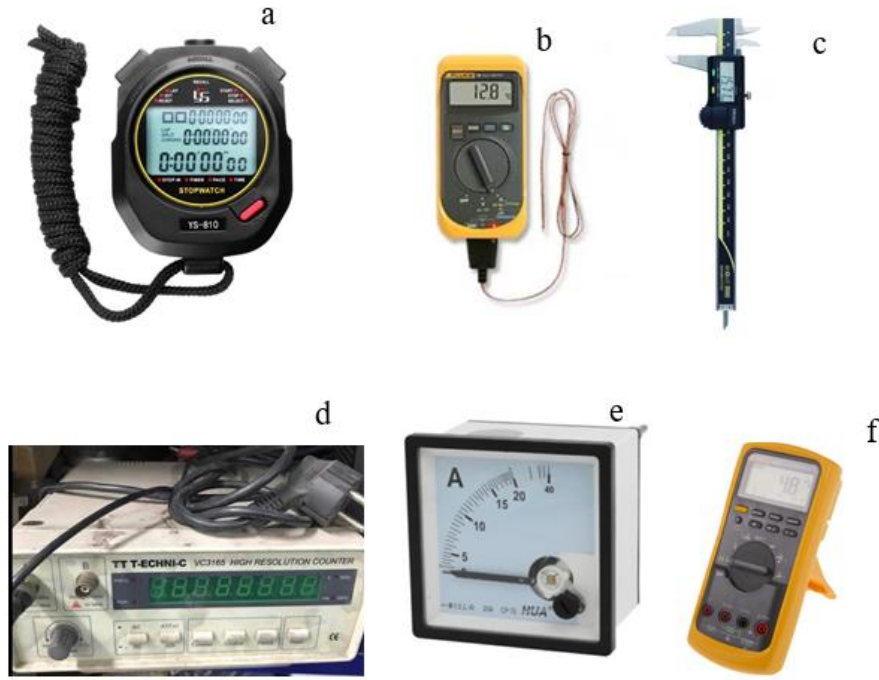
Bu çalışmada farklı dövme sıcaklıklarında ve ön ısıtma teknolojilerinde üretilen alüminyum sıcak dövme parçalarının sertlikleri İNNOTEST marka mikro vickers test cihazı ile ölçülmüştür. Bu çalışmada kullanılan cihaz Şekil 3.14'de yer almaktadır. Ölçümler vickers (HV) olarak yapılmış ve cihaz üzerindeki program aracılığı ile brinell (HB) sertlik değerine çevrilmiştir. Sertlik değerleri, Brinell Sertlik Cihazı'nda 5 mm çapında çelik top kullanılarak, 250 kgf yük altında ve 10 s. uygulama süresinde ölçülmüştür.



Şekil 3-14. Deneysel çalışmalarda kullanılan mikro vickers sertlik ölçüm cihazı

3.1.6 Ölçüm cihazları

Deneysel çalışmalarda süre tutmak için kronometre kullanılmıştır. sıcaklık ölçümleri ve cihaz doğrulamaları için harici termometre kullanılmıştır. Numunelerin boyutlarını ölçmek için kumpas kullanılmıştır. İndüksiyon makinasının frekans değerlerini ölçmek için frekans metre ve enerji tüketimlerini kontrol etmek için multimetre (avometre) ile akım ölçer kullanılmıştır. Bu ölçüm cihazları Şekil 3.15'de yer almaktadır.



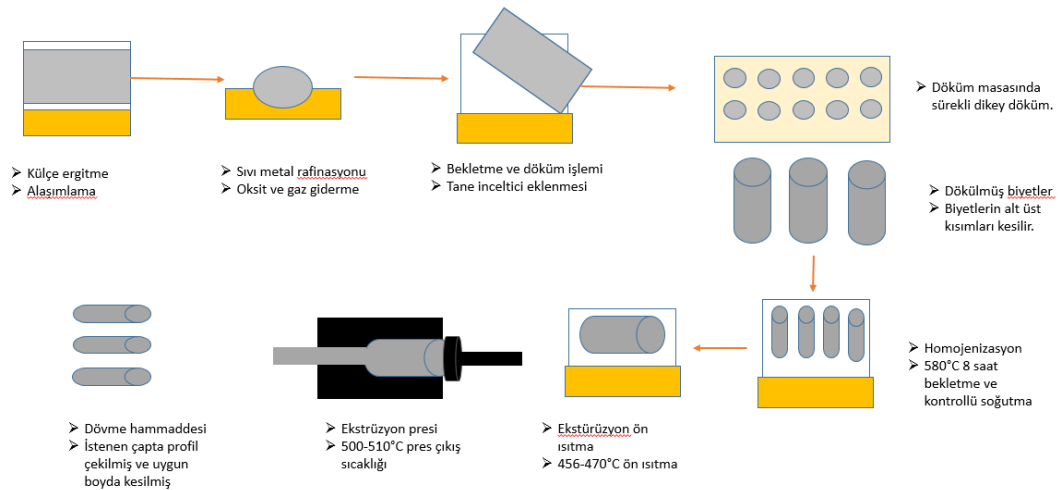
Şekil 3-15 Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm aletleri Kronometre a. Sıcaklık ölçer b. Kumpas c. Frekans metre d. Akım ölçer e. Multimetre (avometre) f.

3.2 Yöntem

Bu tez çalışması kapsamında yürütülen faaliyetlerin nasıl yürütüldüğü ile ilgili detaylı teknik açıklamalar ve bu faaliyetlerin yürütülmesi esnasında yaşanan problemler ve çözümleri ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan hammaddelerin hepsi alüminyum ekstrüzyon ürünüdür. Buradaki süreç şu şekildedir; alüminyum ergitme fırınında EN AW 6082 alaşımı kimyasal içeriğine uygun olarak alaşımlama yapılır ve bekletme fırınında sıvı metal rafinasyonu yapıldıktan sonra alaşım yolluklarla döküm masasına taşınır. Döküm masalarında dikey sürekli döküm yöntemi ile biyetler dökülür. Biyet çapları ekstrüzyon pres zıvana ölçülerine göre inç birimleri ile standart olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada 11 inçlik (279 mm) çap kullanılmıştır. Dökülen biyetlerin baş ve son kısımları döküm parametre farkı ve oksitlenme nedeniyle kesilerek fireye ayrılır. Biyetlerin kalan kısımları, 580°C da 6-8 saat boyunca homojenize edilir. Homojenizasyon sürecinde β AlFeSi, β MgSi ve β'' gibi fazların dönüşmesi gerekmektedir. Bu fazların dönüşümü hem ekstrüzyon sürecini rahatlatır hem de sonraki süreçlerdeki T6 ısıtıl işleminde çözeltiye alma kabiliyetini etkilemektedir. Çözünme ve

çökeltme süreçlerinde bu fazlar birinci dereceden etkindir. Dökülen biyetler homojenizasyon sıcaklığı, süresi ve soğutma hızı uygun parametrelerde yapılır. Daha sonra biyet yüzeyleri temizlenir. Temizlenen biyetler ekstrüzyon sürecine geçerler. Biyetler ekstrüzyon pres zıvana boylarında kesilerek ön ısıtma fırınına alınır burada yaklaşık 430-460°C sıcaklıkta alınarak ekstrüzyon presinin kovanına yerleştirilmektedir. Biyetler ekstrüzyon presinde ekstrüze edilerek profil üretimi tamamlanmaktadır. Bu profiller dövme hammaddesi olarak kullanılacağı için biyet birleşim kısımları tamamen kesilip atılarak üretim yapılmaktadır. Dövme hammaddesi olarak kullanılan ekstrüzyon ürünlerin üretiminde ekstrüzyon oranı minimum (kesit alana göre: biyet yüzey alanı mm² / profil yüzey alanı mm² <18 olmalıdır.) ve ekstrüzyon çıkış sıcaklığı 510 °C civarında olması tane büyümesi problemini minimize etmektedir. Ekstrüzyon kalıplarında malzeme kaynaması ve/veya birleşme olmamaktadır. Ekstrüzyon presine 203 mm çaplı biyet alınarak 25 mm çaplı profil için biyeti 4'e bölünen kalıpta, 32 mm çaplı profil biyeti 2 ye bölen kalıpta çekilmiştir. Bu sürecin şematik gösterimi Şekil 3.16 da yer almaktadır. (Plonka ve ark., 2008; Birol ve ark., 2013; Gokcil ve ark., 2015; Gökçil ve ark., 2015b)



Şekil 3-16. Deneysel numuneler için hammadde üretim süreçlerinin şematik gösterimi

Bu çalışmada kullanılan bütün hammaddeler yukardaki sıralama ile üretilmiştir. Üretilen bu numuneler farklı deformasyon oranı ve farklı ön ısıtma sıcaklıkları

denemesinde 25 mm çaplı profil, çekme numunelerinde ise 32 mm çaplı numune kullanılmıştır.

Bu çalışmalarda kullanılan EN AW 6082 alaşımının kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1’de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Bu çalışmada kullanılan AA 6082 alaşımının kimyasal kompozisyonu

| | %Si | %Fe | %Cu | %Mn | %Mg | %Cr | %Zn | %Ti |
|------------------|---------|------|------|-------|---------|-------|------|------|
| Numune AA 6082 | 0,93 | 0,21 | 0,01 | 0,65 | 0,78 | 0,18 | 0,01 | 0,01 |
| Standart AA 6082 | 0,7-1,3 | >0,5 | >0,1 | 0,4-1 | 0,6-1,2 | >0,25 | >0,2 | >0,1 |

3.2.1 Farklı deformasyon ve sıcaklıklarda numune dövme

25 mm çapındaki ekstrüzyon profiller 20 mm boyunda kesilerek 3 farklı ön ısıtma teknolojisi ile istenen sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır. Numunenin istenen sıcaklığa gelip gelmediği harici sıcaklık ölçerle ölçüldükten sonra düz kalıplarda dövülmüştür. 4 farklı ön ısıtma sıcaklığına kadar ısıtılan numuneler (450°, 475°, 500° ve 525° C) düz kalıplarda eksantrik preste dövülerek şekillendirilmiştir. Kalıp pürüzlülüğünün şekillendirmeye etkisi farklı yüzey özeliğindeki iki kalıpla karşılaştırılmıştır. Aynı kalıp arası açıklığında iki kalıpta da deneme yapılarak deformasyon farklılığı izlenmiştir. Deformasyon oranlarını belirlemek için numuneler ısıtılıp ön deneme ile dövülmüş ve presin koçunun minimum noktası kumpasla ölçülerek ayarlanmıştır. Ayar numuneleri deneysel çalışmalara dahil edilmemiştir. Örneğin %50 deformasyon için 25 mm çaptaki numunenin 12.5 mm çapa kadar ezilecek şekilde presin son kapama noktası ayarlanmıştır. Bu çalışmada (%10, %30, %50 ve %70) oranlarında dövme yapılarak kesit tane yapısı ve sertlikleri ölçülerek karşılaştırma yapılmıştır. 4 farklı deformasyon oranında denemeler yapılmıştır. Deformasyon oranları ve ölçüleri Çizelge 3,2’de yer almaktadır.

Çizelge 3.2. Numunelerin deformasyon oranı karşılığındaki kalınlıkları

| % Deformasyon Oranı | Numune Kalınlığı |
|---------------------|------------------|
| İlk çap | 25 mm |
| % 10 | 22,5 mm |
| % 30 | 17,5 mm |
| % 50 | 12,5 mm |
| % 70 | 7,5 mm |

Farklı deformasyon oranları ve ön ısıtma sıcaklıklarında yapılan denemeler ile ilgili görsel Çizelge 3,3'de yer almaktadır. Bu ön ısıtma sıcaklıkları ve deformasyon oranları 3 farklı ön ısıtma teknolojisi (rezistanslı ısıtma, indüksiyon ısıtma ve infrared (kızıl ötesi) ısıtma) ile yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kalıp yüzey pürüzlülüğünün şekillendirmeye etkisi de 2 farklı kalıp ile incelenmiştir.

Çizelge 3.3. Deneysel çalışmalardaki farklı parametreler indüksiyon, infrared ve rezistanslı ısıtıcılar için yapılmıştır.

| | | Deformasyon oranı | | | |
|---------------------|--------|-------------------|-----|-----|-----|
| | | %10 | %30 | %50 | %70 |
| Ön ısıtma sıcaklığı | 450° C | X | X | X | X |
| | 475° C | X | X | X | X |
| | 500° C | X | X | X | X |
| | 525° C | X | X | X | X |

3.2.2 T6 Isıl işlemi uygulaması

Farklı deformasyon oranları ve ön ısıtma sıcaklıklarında dövülen numunelerin hepsi T6 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Çekme numuneleri de aynı şekilde T6 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Ancak T5 denemelerinin yapıldığı çalışmalar bunun dışındadır. T5 ile ilgili detaylı bilgi ilerleyen bölümlerde verilmiştir. Numunelere uygulanan T6 ısıl işlemi için rezistanslı NABERTHERM marka ısıl işlem fırını kullanılmıştır. Bu işlem için numuneler 530°C'de 4 saat çözeltiye alınarak su verilmiş ve 185°C'de 3 saatte yaşlandırılmıştır.

3.2.3 Dövme denemeleri için numune hazırlama ve çekme testi yapılması

Çekme numuneleri için 3 farklı deformasyon oranı ve 4 farklı ön ısıtma sıcaklığında 25 mm çapındaki ekstrüzyon profiller, 80 mm boyunda kesilerek rezistanslı fırında 45 dakika ısıtılmıştır. Fırından alınan numuneler 60 tonluk eksantrik prese yatay şekilde yerleştirilerek dövülmüş, dövme oranı hesaplanırken numune çapındaki ezilme dikkate alınmıştır. 25 mm kalınlığındaki numune ile %10 deformasyonla gerçekleşen şekil değiştirmede malzemenin 2,5 mm kısılması baz alınmıştır. Çizelge 3.4'de numunelerin deformasyon oranı karşılığındaki kalınlıkları yer almaktadır.

Çizelge 3.4. Numunelerin deformasyon oranı karşılığındaki kalınlıkları

| % Deformasyon Oranı | Numune Kalınlığı |
|---------------------|------------------|
| İlk çap | 25 mm |
| %10 | 22,5 mm |
| %30 | 17,5 mm |
| %50 | 12,5 mm |

Numunelerin dövüldükten sonraki görüntüleri Şekil 3.17’de yer almaktadır. 4 farklı sıcaklıkta ve 3 farklı deformasyon oranında toplam 12 farklı parametre için deneme yapılmıştır. Bu 12 parametrenin her birinden 3’er parça olacak şekilde toplam 36 parça dövülmüştür.



Şekil 3-17 Dövülen numuneler ekstrüzyona dik a. ekstrüzyon paralel b. görselleri yer almaktadır.

Numunelere T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için numuneler 530°C’de 4 saat çözeltiye alınarak su verilmiş ve 185°C’de 3 saat yaşlandırılmıştır. Isıl işlemler, NABERTHERM marka ısıtma fırınında gerçekleştirilmiştir.

Dövülmüş numuneler SAN-TEZ projesi kapsamında alınan laboratuvar tipi masa üstü CNC tezgahında talaş kaldırılarak hazırlanmıştır. Çekme testi Zwick Roell

250 KN üniversal çekme basma test cihazında yapılmıştır.

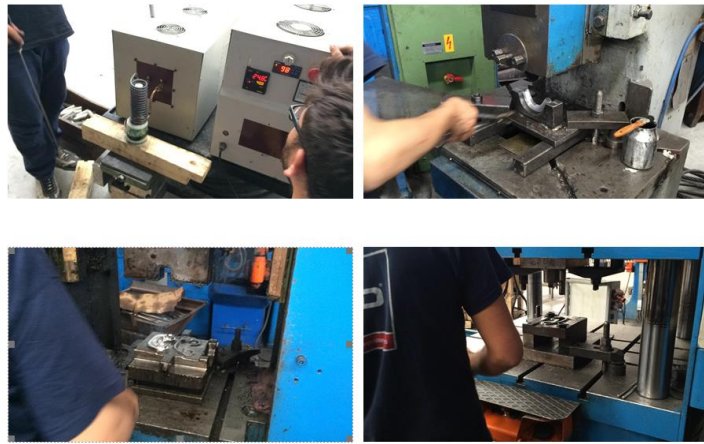
3.2.4 Üretim hattında indüksiyon ve T5 denemesi

T6 ısıl işlemi; sıcak dövme sonrası alüminyum numuneler havada soğuduktan sonra fırına alınarak 530°C 4 saat tutulduktan sonra ani su verilerek çözeltilmeye alınır ve ardından suni yaşlandırma için 185°C yaşlandırma fırınına alınarak fazlar çöktürülerek mukavemetlendirilir.

T5 ısıl işlemi; sıcak dövme ardından ani su verilerek çözeltilmeye alınır ve ardından suni yaşlandırma için 185°C yaşlandırma fırınına alınarak fazlar çöktürülerek mukavemetlendirilir. Bu işlem hem arada çözeltilmeye alma işlemi olmadığı için hem de sıcaklığa bağlı tane irileşmesi olmadığı için malzeme özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra süreç maliyetinde de tasarruf sağlamaktadır.

T5 denemeleri bu tez kapsamında temin edilen indüksiyon ısıtma teknolojisi ile denenmiş ve iyi sonuçlar alınmıştır. İndüksiyon ısıtmanın teknik anlamda sağladığı avantajlar T5 sürecini kolaylaştırmıştır. İlk önce T5 denemeleri laboratuvar ortamında denenmiştir. Bunun ardından üretim hattında denemeler yapılmıştır.

İndüksiyon denemesi için hazırlanan ekstrüzyon profiller indüksiyon makinasında belirlenmiş süre ve frekansta ısıtılarak ardından sırası ile; eğme, dövme ve çapak kesmesi yapıldıktan sonra su verilerek yapay yaşlandırılmıştır. Üretim hattında yapılan denemeler ile ilgili görseller Şekil 3.18'de yer almaktadır.



Şekil 3-18. Üretim hattında indüksiyon ısıtma ile yapılan T5 denemeleri

3.2.5 İndüksiyon ön ısıtma sıcaklığının T5 sürecinde sertlik değerine etkisi

İndüksiyon ısıtma teknolojisi ile bu tez çalışmasında T5 denemesi yapılmıştır. İndüksiyonla ısıtılan ekstrüzyon profiller indüksiyon makinasının çevrim süresi artırılarak maksimum sıcaklık değeri yükseltilmiştir. Sıcaklıklar harici temaslı termokulp ile ölçülmüştür. Dövülen parçalar numune boyutunda olup dövmeden sonra su verilmiş ve ardından yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Dövme ön ısıtma sıcaklık farklılığına göre yapay yaşlandırma sonrası sertlikleri mikro vickers sertlik cihazında ölçülerek ön ısıtma sıcaklığı- sertlik değişimi grafiği oluşturulmuştur.

3.2.6 T5 sürecinde ön ısıtma ile %Cu oranının sertlik değerine etkisi

EN AW 6082 alaşım ile indüksiyon ön ısıtmada T5 denemesi yapılmıştır. Buna ek olarak EN AW 6082'den daha yüksek mekanik dayanımlara sahip ve içerisinde Cu (Bakır) içeren EN AW 6066 alaşımı incelenmiştir. Bu alaşımda sertlik sağlayan β (Mg_2Si) fazları yanında θ (Al-Cu) fazı da mevcuttur. (Jacobs, 1999) bundan dolayı EN AW 6082 ye Cu ilavesi yapılmıştır. Cu ilavesinde çözünen ve çökelen fazlara etkisi ile mukavemet artışı olduğu bilinmektedir. Bunun deneysel araştırılması için üreticilerde 2 farklı kompozisyonda %Cu ilave edilerek standart alaşımla karşılaştırılmıştır. %0,27 ve %0,45 Cu içeren alaşım ile standart EN AW 6082 alaşımı üretimi için biyet dökümü sırasında alaşımlama yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri Çizelge 3,5'de yer almaktadır.

Çizelge 3.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan farklı % Cu içerikli alaşımlar

| | %Si | %Mn | %Cu | %Mg | %Cr | %Fe | %Zn | %Ti |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|-------|------|-------|-------|
| EN AW 6082 (%Cu yok) | 1.02 | 0,57 | 0,07 | 0,75 | 0,22 | 0,26 | 0,01 | 0,03 |
| EN AW 6066 (standart) | 0,9-1,1 | 0,6-1,1 | 0,7-1,2 | 0,8-1,4 | > 0,4 | >0,5 | >0,25 | > 0,2 |
| EN AW 6082 (%Cu: 0,27) | 1.09 | 0,68 | 0,27 | 0,80 | 0,18 | 0,25 | 0,01 | 0,03 |
| EN AW 6082 (%Cu: 0,45) | 1.13 | 0,67 | 0,45 | 0,68 | 0,18 | 0,25 | 0,01 | 0,03 |

42 mm çapında üretilen profillerden numune çıkartılarak indüksiyon ile ısıtılmış ekstrüzyon profiller indüksiyon makinasının çevrim süresi artırılarak maksimum sıcaklık değeri yükseltilmiştir. Sıcaklıklar harici temaslı termokulp ile ölçülmüştür. Dövülen parçalar numune boyutunda olup dövmeden sonra su verilmiş ve ardından yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Dövme ön ısıtma sıcaklık farklılığına göre yapay

yaşlandırma sonrası sertlikleri mikro vickers sertlik cihazında ölçülerek ön ısıtma sıcaklığı- sertlik değişimi grafiği oluşturulmuştur.

3.2.7 Simülasyon çalışması

Deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlar ile alüminyum sıcak dövme simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında SIMUFACT sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. CAD dataları simülasyon programına alındıktan sonra sonlu hacim yöntemi ile ağ örgüsü (mesh) yapılmıştır. Simülasyonda kullanılan malzemenin gerçek gerilme- gerinim eğrilerine göre çözüm yapıldığından bu eğri incelenmiş ve gerçek bir iş parçası farklı ön ısıtma sıcaklıklarında dövme yapılmıştır.

3.2.8 Enerji tüketim ölçümü

Alüminyum sıcak dövme sürecinde farklı ön ısıtma teknolojileri denenmiş ve enerji tüketimleri ölçülerek tasarruf sağlanmaya çalışılmıştır. Enerji tüketimini ölçmek için multimetre ile voltaj ölçülmüş ve cihazlara sabit şebeke geriliminin geldiği tespit edilmiştir. Tüketilen enerji farklılıklarını cihazlarda bulunan akım ölçerler ile ölçülüp hesaplanmıştır.

Preslerin harcamış olduğu enerji ön ısıtma sıcaklığı ve kalıp pürüzlülüğü gibi parametrelere bağlı olduğu görülmüştür ancak alüminyum sıcak dövme süreçlerinde mekanik presler kullanıldığı için enerji tüketimi sabit kalmaktadır. Bu nedenle preslerin enerji ölçümü deneysel olarak incelenmemiştir.

3 farklı ön ısıtma teknolojisini denendiği deneysel çalışmalarda ise 380-400 Volt gerilim altında cihazlar üzerinde bulunan akımölçerlerin çektiği amper miktarı ve süresine göre harcanan enerji miktarları belirlenmiştir. Şekil 3.19 da indüksiyon ısıtma üzerindeki akımölçer gösterilmiştir. Aynı şekilde rezistanslı fırında da analog akımölçer yer almaktadır. Proje sürecinde yaptırılan infrared cihaz üzerinde ise dijital bir akımölçer yer almaktadır.



Şekil 3-19. İndüksiyon ön ısıtma ve rezistanslı fırın ön ısıtma cihazında akımölçer gösterimi

4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan araştırma ve deneysel çalışmalar sonucunda ön ısıtma sıcaklığının ve deformasyon oranının malzeme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ön ısıtma teknolojisini farklılıkları değerlendirilmiştir. T5 ısıl işlem uygulamaları yapılmış bu uygulamada ön ısıtma sıcaklıkları ve alaşım farklılıklarının nihai sertlik üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Enerji tüketim maliyetleri ve kalıp yüzey kaliteleri karşılaştırılmıştır. Simülasyon hesaplama yöntemleri araştırılarak analizler yapılmıştır.

4.1 Ön Isıtma Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Alüminyum sıcak dövme sürecinde dövme öncesinde ekstrüzyon profillerin dövme sıcaklığı olan 450°-525°C aralığına kadar ısıtılması gerekmektedir. Dövme ön ısıtma sıcaklığının yüksek olmasının; dövme kuvvetinin düşmesi, tane irileşmesinin kontrol edilmesi, kalıp ömrünü uzaması ve şekillendirilmenin kolaylaştırılması gibi olumlu etkileri vardır. Bunun yanında yüksek sıcaklıkta dövülen parçalarda iç sürtünmeye bağlı ısınmalar kaynaklı iş parçalarında deformasyona ve hasara neden olabilmektedir.







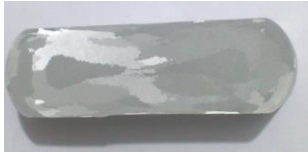
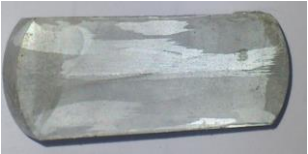



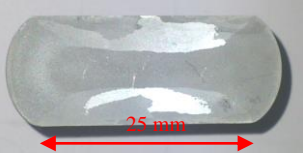
Ön ısıtma teknolojisi olarak rutin üretim hatlarında rezistanslı tünel fırın kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise SAN-TEZ projesi kapsamında indüksiyon ve İnfrared ısıtma cihazları temin edilerek geliştirilmiştir. Bu cihazlarda kullanılarak aynı sıcaklıkta farklı ısıtma teknolojileri ile numuneler ısıtılarak dövme yapılmıştır. Şekil 4.1'de deneysel çalışmaların yapıldığı rezistans ısıtma fırını, İnfrared ısıtma ve indüksiyon ısıtma cihazları yer almaktadır.



Şekil 4-1. Deneysel çalışmaların yapıldığı rezistans ısıtma fırını a. İnfrared ısıtma b. İndüksiyon ısıtma c. cihazları

Isıtılan parçalar harici termokulp ile sıcaklıkları ölçülmüş ve ısıtılan kalıplarla dövme yapılmıştır. Bu çalışmada literatür araştırmaları ve endüstriyel uygulamalar ışığında 4 farklı dövme sıcaklığı belirlenmiştir. 450°, 475°, 500° ve 525° sıcaklıklarına kadar rezistanslı fırında, indüksiyon ısıtıcısında ve infrared ısıtıcısında ısıtılarak %50 deformasyon oranına kadar dövülmüştür. Denemelerde 3 er adet numune kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de bu denemeler sonucundaki kesit tane yapısı Çizelge 4.2’de ise sertlik dağılımları yer almaktadır. Farklı dövme sıcaklıklarında ve farklı ön ısıtma teknolojileri kullanılarak şekillendirilen numuneler T6 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Önce çözeltiye alınan ardından da yapay yaşlandırılan numunelerin sertlik değerleri ve kesit tane yapıları incelenmiştir.

Çizelge 4.1. %50 deformasyon oranında 4 farklı sıcaklıkta üç farklı ön ısıtma teknolojisinin kesit tane yapısı yer almaktadır.

| | Rezistans | İnfrared | İndüksiyon |
|-------|---|--|---|
| 450°C |  |  |  |
| 475°C |  |  |  |
| 500°C |  |  |  |
| 525°C |  |  |  |

Çizelge 4.2. %50 deformasyon oranında 4 farklı sıcaklıkta üç farklı ön ısıtma teknolojisinin Brinell sertlik değerleri yer almaktadır.

| | Rezistans | İnfrared | İndüksiyon |
|-------|-----------|----------|------------|
| 450°C | 116 HB | 115 HB | 108 HB |
| 475°C | 109 HB | 111 HB | 110 HB |
| 500°C | 118 HB | 113 HB | 109 HB |
| 525°C | 114 HB | 112 HB | 114 HB |

Malzemelerin mekanik özelliklerini karşılaştırmak için sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ancak sertlik değerleri arasında önemli bir fark görülmemiştir.

Yapılan kesit tane yapısı incelemelerinde de T6 ısıl işleminde çözeltiye alma anında dövme sıcaklığının üstünde bir sıcaklığa çıkıldığı için yeniden kristallenme sonrasında tane irileşmesi görülmektedir. Bu nedenle çoğu denemede yapıda iri tane görülmüştür.

Ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranı çekme testi sonuçları üzerinde önemli bir etkisi olmadığı ve sertlik sonuçlarını doğrular nitelikte olduğu görülmüştür. Üç farklı ön ısıtma teknolojisi, 4 farklı deformasyon oranı ve 4 farklı sıcaklıkta 25 mm çapındaki malzemeler dövülerek parçaların kesit tane yapıları ve sertlik karşılaştırmaları yapılmıştır. Sertlik ölçüm sonuçlarına göre her parametrede malzeme dövme karakteristiğini korumaktadır, ancak yapay yaşlanma pratiğinde yaşanan küçük değişiklikler sonucu büyük oranda etkilemektedir. Aşağıdaki tablolarda farklı dövme ön ısıtma sıcaklığına göre kesit tane yapıları yer almaktadır. Aşağıdaki tablolarda 3 farklı ön ısıtma teknolojisi ve 4 farklı deformasyon oranına göre kesit tane yapıları yer almaktadır. Çizelge 4.3'de 450°C kesit tane yapısına göre farklı deformasyon oranı 3 farklı ön ısıtma teknolojisi ile karşılaştırması, Çizelge 4.4'de 475°C kesit tane yapısına göre farklı deformasyon oranı 3 farklı ön ısıtma teknolojisi ile karşılaştırması, Çizelge 4.5'de 500°C kesit tane yapısına göre farklı deformasyon oranı 3 farklı ön ısıtma teknolojisi ile karşılaştırması ve Çizelge 4.6'de 525°C kesit tane yapısına göre farklı deformasyon oranı 3 farklı ön ısıtma teknolojisi ile karşılaştırması yer almaktadır.

İndüksiyonla yapılan ön ısıtmada tane irileşmesi her zaman daha az olmaktadır. İndüksiyonla yapılan ısınma 50 saniye civarında iken rezistanslı ısıtmada bu süre 45

dakikaya ulaşmaktadır. İnfrared ısıtmada ise bu süre 20 dakika civarındadır. Rezistanslı fırında uzun sürede ısınması ekstrüzyon hammaddelerde biriken termomekanikal enerjini yeniden kristallenme ve tane irileşmesi olarak açığa çıkmasına neden olmaktadır. Dövülen numuneler 530°C çözeltiye alındığında yeniden kristallenme ve tane irileşmesi ortaya çıktığı için %50 ve %70 deformasyona uğramış numunelerin hemen hepsinde tane yeniden kristallenme tamamlanarak tane irileşmesine geçilmiştir. infrared ve rezistanslı ısıtmada dış etken kaynaklı bir ısı kaynağı malzemeyi ısıtmaktadır.

Çizelge 4.3 de yer alan makro yapı görüntüleri 25 mm çapında ve 20 mm boyundaki EN AW 6082 numuneler şekil 3.8 de gösterildiği gibi 2 plaka arasında dövülmüştür. Bu denemede rezistanslı ısıtma, infrared ısıtma ve indüksiyon ısıtmada 450 °C a kadar ısıtılıp %10, %30, %50 ve %70 deformasyonlarda dövülmüştür. Numuneler dövme yönüne dik kesilerek karma asitle dağlanmıştır. Her numunede yeniden kristalleşme bölgesi görülmektedir. %50 ve %70 deformasyonun hepsinde tane irileşmesi görülmektedir. Rezistansla ısıtılan numuneler %10 ve %30 deformasyon olanlarında da tane irileşmesi görülmektedir. İnfrared ile ısıtılan numunede %30 deformasyondan sonra tane irileşmesi görülürken indüksiyon ısıtmada %10 ve %30 deformasyonlarda tane irileşmesi görülmemektedir.

%10 deformasyondaki rezistanslı ısıtma ve indüksiyon ısıtma hariç diğer numunede yeniden kristalleşme bölgesi görülmektedir. %50 ve %70 deformasyonun hepsinde tane irileşmesi görülmektedir. İndüksiyonla ısıtılan ve %50 deforme edilen numunede tane büyümesi henüz başlangıç aşamasındadır. Rezistanslı ısıtma %30 deformasyonda ciddi bir tane irileşmesi görülmektedir.

Çizelge 4.3. 450°C ön ısıtma sıcaklığında farklı deformasyon oranına ve farklı ön ısıtma teknolojilerine göre dövülen numunelerin kesit makro yapıları

| Deformasyon oranı | Rezistanslı ısıtma | İndüksiyonlu ısıtma | İnfrared ısıtma |
|-------------------|---|--|---|
| %10 |  |  |  |
| %30 |  |  |  |
| %50 |  |  |  |
| %70 |  |  |  |

%50 ve %70 deformasyonun hepsinde tane irileşmesi görülmektedir. Rezistansla ısıtılan numuneler %10 ve %30 deformasyon olanlarında da tane irileşmesi görülmektedir. İnfrared ile ısıtılan numunede %30 deformasyondan sonra tane irileşmesi görülürken indüksiyon ısıtmada %10 ve %30 deformasyonlarda tane irileşmesi görülmemektedir.

Çizelge 4.4. 475°C ön ısıtma sıcaklığında farklı deformasyon oranına ve farklı ön ısıtma teknolojilerine göre dövülen numunelerin kesit makro yapıları

| Deformasyon oranı | Rezistanslı ısıtma | İndüksiyonlu ısıtma | İnfrared ısıtma |
|-------------------|---|--|---|
| %10 |  |  |  |
| %30 |  |  |  |
| %50 |  |  |  |
| %70 |  |  |  |

Çizelge 4.5 de yer alan makro yapı görüntüleri 25 mm çapında ve 20 mm boyundaki EN AW 6082 numuneler Şekil 3.8 de gösterildiği gibi 2 plaka arasında dövülmüştür. Bu denemede rezistanslı ısıtma, infrared ısıtma ve indüksiyon ısıtmada 500 °C a kadar ısıtılıp %10, %30, %50 ve %70 deformasyonlarda dövülmüştür. Numuneler dövme yönüne dik kesilerek karma asitle dağlanmıştır. 475°C ve 500°C arasında ciddi bir farklılık görülmemekle beraber özellikle %50 deformasyonlu

indüksiyon ısıtmada tane irileşmesi daha da azalmıştır. İnfrared ısıtmada da %50 deformasyonda tane irileşmesi sınırlı düzeyde kalmıştır.

Çizelge 4.5. 500°C ön ısıtma sıcaklığında farklı deformasyon oranına ve farklı ön ısıtma teknolojilerine göre dövülen numunelerin kesit makro yapıları

| Deformasyon oranı | Rezistanslı ısıtma | İndüksiyonlu ısıtma | İnfrared ısıtma |
|-------------------|---|--|---|
| %10 |  |  |  |
| %30 |  |  |  |
| %50 |  |  |  |
| %70 |  |  |  |

Çizelge 4.6 de yer alan makro yapı görüntüleri 25 mm çapında ve 20 mm boyundaki EN AW 6082 numuneler Şekil 3.8 de gösterildiği gibi 2 plaka arasında dövülmüştür. Bu denemede rezistanslı ısıtma, infrared ısıtma ve indüksiyon ısıtmada

525°C a kadar ısıtılıp %10, %30, %50 ve %70 deformasyonlarda dövülmüştür. Numuneler dövme yönüne dik kesilerek karma asitle dağlanmıştır. 525°Cyapılan denemelerde her üç ön ısıtma teknolojisi içinde tane yeniden kristalleşme ve tane irileşmesi sorunu %10 ve %30 deformasyonlarda ortadan kalmıştır. %50 deformasyonda indüksiyon ısıtma sisteminde sadece bölgesel yeniden kristalleşme alanları kalmıştır. Bu alanlar infrared ısıtmada biraz daha fazla iken rezistanslı ısıtmada tamamen tane irileşmesine dönmüştür.



Çizelge 4.6. 525°C ön ısıtma sıcaklığında farklı deformasyon oranına ve farklı ön ısıtma teknolojilerine göre dövülen numunelerin kesit makro yapıları

| Deformasyon oranı | Rezistanslı ısıtma | İndüksiyonlu ısıtma | İnfrared ısıtma |
|-------------------|---|--|---|
| %10 |  |  |  |
| %30 |  |  |  |
| %50 |  |  |  |
| %70 |  |  |  |

İndüksiyon ısıtma sisteminde ise ısı kaynağı numunenin kendisi olduğu için numunenin hem homojen ısınma gerçekleşmekte hem de malzemenin ısıtıcından dövme kalıbına taşıyıp dövme kadar gerçekleşen ısı kaybı en az olmaktadır. İndüksiyon ısıtma süresi diğer sistemlere göre 50 saniye gibi çok kısa olmaktadır. Rezistanslı ve infrared ısıtıcılarda aynı anda birden fazla parça ısınabilirken indüksiyon sisteminde parçalar bir

bir ısıtılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda en etkili yöntem induksiyon ısıtma olmuştur. Alüminyum malzemeyi induksiyon ile ısıtabilmek için çelik parçaları ısıtan cihazlarda yenilenme yapılması gerekmektedir. Tez çalışmasında alınan induksiyon ısıtıcının trafo sarımlarından bobin tasarımlarına kadar birçok geliştirme yapılmıştır.

4.2 Ön Isıtma Sıcaklığı ve Deformasyon Oranının Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında deformasyon oranının ve dövme ön ısıtma sıcaklığının nihai malzeme özellikleri üzerindeki etkisi araştırılarak minimum enerji ile dövme pratiği deneysel olarak araştırılmıştır. Çizelge 4.3'de 450°C, Çizelge 4.4'de 475°C, Çizelge 4.5'de 500°C ve Çizelge 4.6'de 525°C ön ısıtma sıcaklıklarında kesit tane yapısına göre farklı deformasyon oranı 3 farklı ön ısıtma teknolojisi ile karşılaştırılmıştır. %50 ve %70 deformasyonda tane irileşmesi görülmektedir. 525°C da yapılan dövmelelerde ise çok belirgin farklılıklar olmamasına rağmen diğerlerine göre daha iyi durumdadır.

Farklı sıcaklık ve deformasyon oranlarında dövülen parçaların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Öncelikle sertlik karşılaştırılmasında önemli farklılık olmadığı görülmüştür. Bununla beraber aynı parametrelerde 3 er numune çekme çubuğu kalıbı ile dövülerek çekme testine tabi tutulmuştur. Dövme parametreleri ve kesit tane yapısı arasında farklılıklar olmasına rağmen mekanik özellikler arasında önemli bir farklılık görülmemiştir.

Farklı ön ısıtma sıcaklıkları ve dövme oranlarına göre sertlik dağılımı Çizelge 4.7'de yer almaktadır. Sertlik değerlerinde ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranına göre değişimi yer almaktadır. Sertlik dağılımı ortalamalarına bakıldığında kabul edilebilir bir fark görülmemekle beraber 500°C ön ısıtma sıcaklığında yapılan denemelerde ve %30 deformasyonunda dövmelelerde en yüksek ortalamalara ulaşılmıştır. Ancak bu fark 1-2 HB olduğundan sağlıklı bir yorum yapılamamaktadır. Numunelerin sertlik ölçümü; 5 değerinin ortalaması alınarak oluşturulmuştur.













Çizelge 4.7. Ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranına göre sertlik değerleri

| | | Deformasyon Oranı | | | |
|---------------------|----------|-------------------|-----------|--------|-----------|
| | | %10 | %30 | %50 | Ortalama |
| Ön Isıtma Sıcaklığı | 450°C | 112 HB | 116 HB | 108 HB | 112 HB |
| | 475°C | 108 HB | 113 HB | 109 HB | 110 HB |
| | 500°C | 114 HB | 112 HB | 114 HB | 113,33 HB |
| | 525°C | 111 HB | 110 HB | 109 HB | 110 HB |
| | Ortalama | 111,25 HB | 112,75 HB | 110 HB | 111,33 HB |

Dövme ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranının sertlik dağılımında önemli bir etkisinin olmadığı sonucu çıkmıştır. EN AW 6082'nin deformasyon oranına bağlı sertlik değişimi oldukça sınırlı düzeyde kalmaktadır.

Dövme ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranına bağlı olarak tane boyutundaki değişimi Çizelge 4.8'de yer almaktadır. 4 farklı dövme ön ısıtma sıcaklığı ve 3 farklı deformasyon oranına göre dövülen parçaların T6 ısıl işlemi sonrası alınan kesit tane yapısı incelendiğinde ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla dinamik yeniden kristalleşmeye bağlı tane irileşmesi azalmaktadır.

Çizelge 4.8. Ön ısıtma sıcaklığı ve deformasyon oranına göre tane boyutundaki değişim

| | | Deformasyon oranı | | |
|---------------------|-------|---|--|---|
| | | %10 | %30 | %50 |
| Ön Isıtma Sıcaklığı | 450°C |  |  |  |
| | 475°C |  |  |  |
| | 500°C |  |  |  |
| | 25°C |  |  |  |

Dövme ön ısıtma sıcaklığının artması ile çözültüye alma esnasında gerçekleşen dinamik yeniden kristalleşmeyi takip eden tane irileşmesinin en aza indiği

görülmektedir. Dövme ön ısıtma sıcaklığı çözeltiliye alma sıcaklığına yaklaştıkça tane irileşmesi de azalmıştır.

Malzemelerin akma dayanımları hall- petch denklemi ile tane boyutu il bağlantılı olduğu ispatlanmıştır. Bu çalışmada görülen aşırı iri tanelerin akma dayanımına ciddi bir etkisinin olmadığı görüldüğü için bu konu araştırılmıştır.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_a}{d^{1/2}} \quad (4.1.)$$

Bu denklemde σ_y : akma dayanımı d: tane boyutu σ_0 ve k_a : malzeme sabitleridir. Alüminyum malzeme sabiti olan k değeri diğer malzemelere göre oldukça küçük bir değerdir. Örneğin: k_a değeri düşük karbonlu çeliklerde 0,307 iken alüminyumda 0,068 dir. Bu düşük malzeme sabiti değerinden dolayı büyük tane boyutundan akma dayanımı değeri az bir miktar etkilenmektedir.

Çekme testleri sonuçlarına göre Çizelge 4.9’da akma değerleri, Çizelge 4.10’da çekme dayanımı değerleri ve Çizelge 4.11’de % kopma uzamaları yer almaktadır. Çekme testleri için 2 numune dövülmüştür. Sonuçlar karşılaştırıldığında sertlik değerlerinde olduğu gibi önemli bir fark görülmemektedir. Dinamik yeniden kristalleşme ardından gerçekleşen tane büyümesinin akma dayanımı, çekme dayanımı ve % kopma uzaması üzerinde belirgin bir etkisi görülmemektedir. Ancak % kopma uzamasının Çizelge 4.8’de görülen kesit tane yapısına bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmüştür. Dövme ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla % kopma uzaması da artmıştır.

Çizelge 4.9. Akma değerleri (MPa)

| | | Deformasyon oranı | | |
|---------------------|-------|-------------------|------|------|
| | | % 10 | % 30 | % 50 |
| Ön ısıtma sıcaklığı | 450°C | 260 | 250 | 265 |
| | 475°C | 268 | 252 | 272 |
| | 500°C | 262 | 227 | 256 |
| | 525°C | 264 | 254 | 285 |

Çizelge 4.10. Çekme dayanımı değerleri (MPa)

| | | Deformasyon oranı | | |
|---------------------|-------|-------------------|------|------|
| | | % 10 | % 30 | % 50 |
| Ön ısıtma sıcaklığı | 450°C | 371 | 350 | 356 |
| | 475°C | 365 | 370 | 322 |
| | 500°C | 380 | 368 | 376 |
| | 525°C | 386 | 380 | 328 |

Çizelge 4.11. % Kopma uzamaları

| | | Deformasyon oranı | | |
|---------------------|-------|-------------------|------|------|
| | | % 10 | % 30 | % 50 |
| Ön ısıtma sıcaklığı | 450°C | 12,3 | 12,5 | 10,7 |
| | 475°C | 12,7 | 12,9 | 11,2 |
| | 500°C | 13,0 | 13,9 | 13,3 |
| | 525°C | 14,6 | 13,8 | 14,9 |

Sertlik ölçüm sonuçlarına göre her parametrede malzeme dövme karakteristiğini korumaktadır, ancak yapay yaşlanma pratiğinde yaşanan küçük değişiklikler sonucu büyük oranda etkilemektedir. %50 deformasyon oranında % uzama ve çekme dayanımı düşerken akma dayanımı ciddi oranda değişmemiştir. Ancak 525°C da %50 deformasyonda % uzama ve çekme dayanımı çok fazla değişmemiştir. Düşük sıcaklık ve yüksek deformasyon nihai malzeme özellikleri üzerinde az da olsa etki göstermiş % uzama ile çekme dayanımını düşürmüştür.

4.3 Enerji Sarfıyatı Ölçümü ve Karşılaştırılması

Farklı ön ısıtma teknolojilerinin enerji tüketimi ve verimliliğinin karşılaştırılması ve en ideal olanın bulunması bu projenin en önemli çalışmalarından birisidir. Aynı geometrik ölçülere sahip numuneler rezistanslı fırın, indüksiyon ısıtıcısı ve infrared ısıtma sisteminde aynı sıcaklığa ısıtılarak harcanan enerjiler karşılaştırılmıştır. Enerji tüketiminin ölçümü için proje önerisinde dijital elektrik sayacı kullanılması ön görülmüştür. Akım ve voltaj değerleri ölçülerek enerji tüketimi hesaplanmıştır. Voltaj multimetre ile ölçülmüştür ve şebeke voltajı sabit gelmektedir. Enerji tüketimini

cihazlar üzerinde yer alan akımölçerler ile ölçülmüştür. Isıtma cihazları ısıtma süresince indüksiyon ısıtması hariç %100 süre ile çalışmamaktadır. Sistemin ısı kaybına göre ısıtıcı devreye girip çıkmaktadır. Çizelge 4.12’de farklı ön ısıtma teknolojilerinin enerji tüketim karşılaştırma tablosu yer almaktadır.

Çizelge 4.12. Enerji tüketim karşılaştırması

| Ön ısıtma teknolojisi | Akım | Isınma süresi | Harcanan güç |
|-----------------------|---------|---------------|--------------|
| Rezistans | 30-50 A | 27 dakika | 10 kWh |
| İndüksiyon | 40 A | 55 saniye | 1,6 kWh |
| İnfrared | 25-40 A | 7 dakika | 4 kWh |

Bu hesaplama ile en önemli çıktı olan düşük enerji maliyetinde dövme mekanik özelliklerin kazandırılması en ideal indüksiyon ısıtma teknolojisi olduğu görülmüştür.

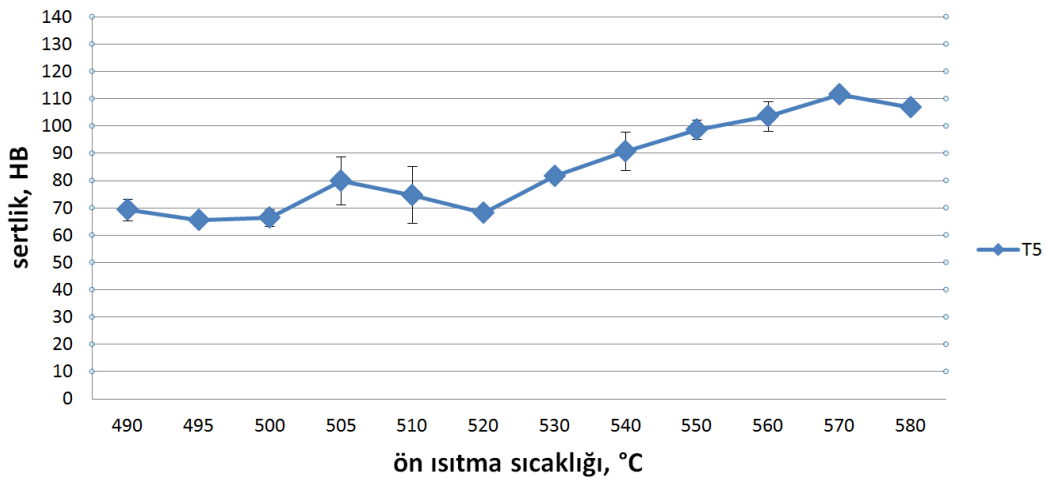
Mekanik preslerde tahrik kuvvetini veren elektrik motoru sürekli çalışmaktadır. Motorun oluşturduğu enerji büyük bir volanda toplanarak presin dövme esnasında harcadığı enerji stabil hale getirilir bu nedenle mekanik preste dövme anında oluşan aşırı kuvvet harcaması veya düşük kuvvet gereksinimi motorun harcadığı gücü en az şekilde etkilemektedir. Dövme presinde enerji tasarrufu sağlayabilmek için pres seçimi önemlidir. Ancak dövme ön ısıtma sıcaklığı ve kalıp yüzey hassasiyeti presin harcadığı enerjiyi değiştirmektedir.

4.4 T5 Isıl İşlem Denemesi ve Ön Isıtma Sıcaklığı Karşılaştırması

Yapılan deneysel çalışmalar ve araştırmalarda alüminyum sıcak dövmede dövme sonrası parça mukavemetini artırmak için yapılan T6 ısıl işlemi yerine T5 ısıl işlemi uygulanması araştırılmıştır. Alüminyum alaşımlarına, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek için çökeltme sertleşmesi uygulanmaktadır. Bu işlem çözeltiye alma ve yaşlandırma olmak üzere iki adımda gerçekleşmektedir. Birinci adımda katı, katı içerisinde çözdürülür yani çözeltiye alma ve ardından ani su vererek soğutulur ve aşırı doymun çözelti elde edilir. İkinci aşamada aşırı doymun katı katı çözeltisi çöktürülerek

malzemenin mukavemeti artırılır. Çökeltiler genellikle Mg_2Si (6XXX serisi) veya Al_2Cu (2XXX serisi) bileşikleri gibi oluşturur. Oluşan bileşikler tane sınırı ve dislokasyon bölgeleri gibi düşük enerjili kristolografik hataların olduğu bölgelerde oluşarak hareketli mekanizmaları kilitler ve malzemenin mukavemetini artırır. Çökeltme sertleşmesi esnasında atomların hareketi ile difüzyon mekanizması çalışmaktadır. Difüzyon teorisine göre sıcaklık ve zaman atom hareketinin temel mantığını oluşturmaktadır. T6 işlemi malzemenin çözeltiliye alınması, su verilmesi ve yapay yaşlandırmasını kapsar. T5 işlemi ise sıcak plastik deformasyon esnasında çözeltiliye alma, su verme ve ardından yapay yaşlandırmayı kapsar. T6 ısıl işlem sürecinde, T5 den farklı olarak çözeltiliye alma işlemi yer almaktadır. Bu işlemde oda sıcaklığındaki malzeme 500-530°C civarına ısıtılıp suda su verilmektedir. Haliyle bu işlem oldukça enerji tüketmektedir. T5 ısıl işlemine geçilmesi ile parça başına 530°C kadar ısıtıp soğutmaya harcanan enerjiden tasarruf sağlanacaktır. Üretim hattında SAN-TEZ projesi ile temin edilen indüksiyon ısıtma cihazı ile üretim hattında T5 denemesi gerçek parçalar ile yapılmıştır. İndüksiyon ısıtma sistemi ile farklı sıcaklıklarda üretim hattında yapılan denemeler Şekil 4.2’de farklı dövme sıcaklıklarında yaşlanma sonrası sertlik karşılaştırması yer almaktadır.

Sertlik- ön ısıtma sıcaklığı grafiği



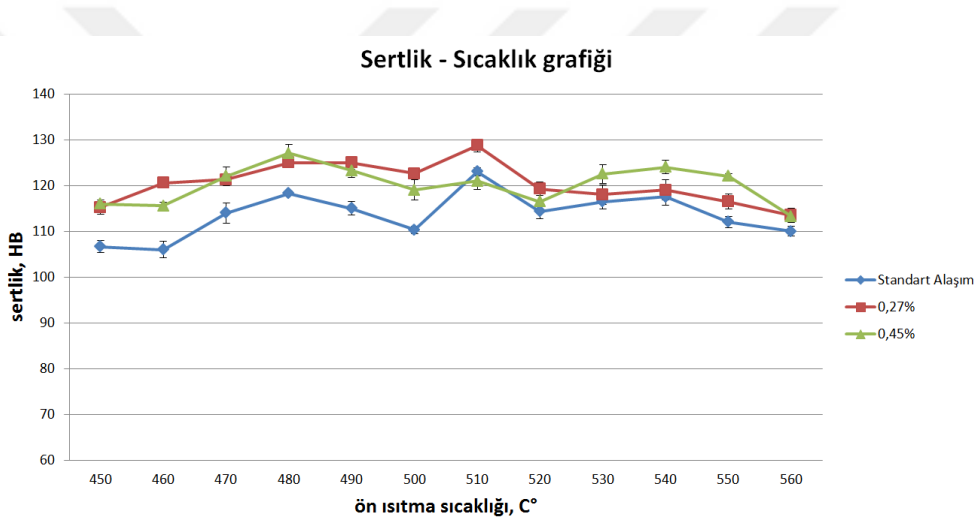
Şekil 4-2. İndüksiyonla ön ısıtma sıcaklığı ve sertlik değişim grafiği

Üretim hattında T5 prosesi ile 110 HB sertliğe kadar çıkılabilmektedir. Bu değer literatür araştırmalarında rastlanmayan bir sertlik değeridir. Çözünen ve çökelen faz değerlerine göre farklı sıcaklık değerlerinde sertlik dağılımı lineer değil, dalgalı bir

şekilde değişim göstermiştir. Üretim koşullarında T5 prosesi için kritik olan süre kontrolü zor olmasına rağmen sonuçlar oldukça tatminkârdır. Dövme ön ısıtma sıcaklığı 520°C üzerinde gayet olumlu sonuçlar alınmıştır. Ön ısıtma sıcaklığının artmasıyla nihai sertlikte artmaktadır.

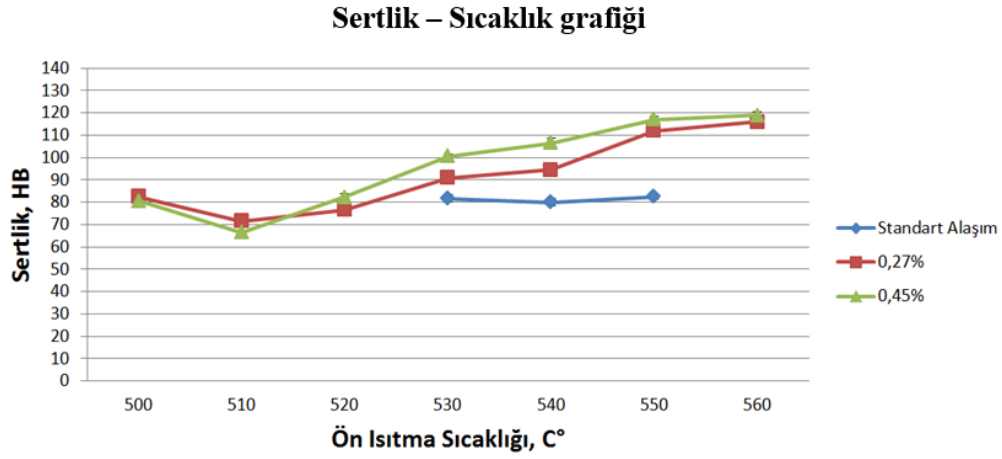
4.5 T5 Isıl İşlem Denemesi ve Alaşım Karşılaştırması

Üretim hattında indüksiyon ön ısıtma ile yapılan T5 çalışmalarının başarılı olmasının ardından, sertlik değerini biraz daha artırabilmek adına alaşıma bakır (Cu) takviyesi de yapılarak sertliği daha da artırmak istenmiştir. Şekil 4.3’de indüksiyonun laboratuvar ortamında yapılan çalışmasında Cu takviyesi ile etkisi incelenmiştir. Dövme denemesi yapılan alaşımların kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.5’de yer almaktadır.



Şekil 4-3. Laboratuvar ortamında indüksiyonla T5 denemesi ve Cu takviyesinin etkisi

Laboratuvar ortamında yapılan rezistanslı T5 denemelerinde ise indüksiyonlu denemede olduğu gibi ön ısıtma sıcaklığı ve Cu takviyesine göre sertlik dağılımı incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4-4. Laboratuvar ortamında rezistansla T5 denemesi ve Cu takviyesinin etkisi.

Laboratuvar ortamında numune ile yapılan T5 denemelerindeki sertlik değerleri üretim hattında yapılan denemelere göre çok daha iyi sonuç vermiştir. İndüksiyon ısıtmada 450°C da istene sertliğe ulaşılmıştır. Bunu sebebi laboratuvar ortamında yapılan denemelerde numuneler tek operasyonda dövölüp hızlı su verilirken üretim hattında daha fazla operasyonda şekil verilmekte ve su verme işlemi gecikmektedir.

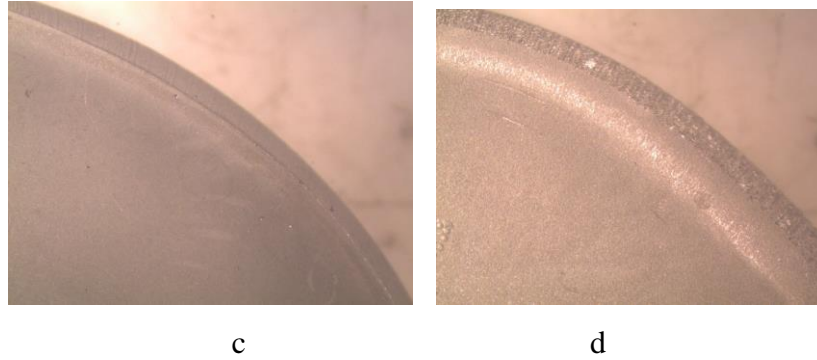
İndüksiyon ısıtma sistemi rezistanslı sisteme göre daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca %Cu oranını artması da malzemenin nihai sertliğini etkilemiştir. Standart alaşım ile %45 Cu ilaveli alaşım 10 HB kadar fark etmektedir.

Yapılan denemeler sonucunda makro yapı ile tane boyutları incelenmiştir. Alüminyum sıcak dövmede en büyük problemlerden biri olan ve parçanın yorulma dayanımını düşüren iri tane Şekil 4.5’de görölmektedir.



a

b



Şekil 4-5. Rezistans T5 denemesi a, Rezistans T6 denemesi b, indüksiyon T5 denemesi c. İndüksiyon T6 denemesi d.

Tane irileşmesi T5 sürecinde her iki durum içinde sınırlı düzeyde kalmaktadır. Bununla beraber gerçek parça üzerinde istenen sertlikler sağlanamamış olsa da makro yapıda tane irileşmesi gözlemlenmemiştir. Ancak rezistanslı T6 sürecinde tane boyutu oldukça iridir.

4.6 Dövme Kalıp Özelliklerinin Araştırılması ve Deneysel Karşılaştırılması

Sürtünme kuvvetini ve kalıp yüzey kalitesinin etkisini görebilmek için yüzey kalitesi değiştirilmiş farklı kalıplarda aynı dövme parametreleri ile dövme gerçekleştirilerek deformasyon oranları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile ilgili bilgiler Çizelge 4.13’de yer almaktadır. Kalıp malzemesi olarak 2714 kalite sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Kalıplar yaklaşık 350-400°C a kadar ısıtılmıştır.

Bu çalışmada ilk çap 25 mm olan numuneler aynı dövme sıcaklığı, aynı pres deplasmanı ve aynı kalıp sıcaklığında dövülerek son şeklin kalınlığı ve yayılma genişliği ölçülerek farklılıklar incelenmiştir.

Çizelge 4.13.Yüzey kalitesine göre deformasyon oranındaki değişim.

| | Son kalınlık | Son genişlik | % deformasyon |
|----------------|--------------|--------------|---------------|
| Pürüzlü kalıp | 7,62 | 51,21 | %70,5 |
| Pürüzsüz kalıp | 7,45 | 52,65 | %71,2 |

4.7 Simülasyon Analizleri

Deneysel çalışmalarda elde edilen çıktıların teyit edilmesi için hali hazırda üretimi yapılan bir parçanın simülasyon programında dövme analizi yapılmıştır. Alüminyum

sıcak dövme simülasyonunda nihai parçaya ve dövme enerjisine dövme parametrelerini etkisi araştırılmıştır.

Yapılan çalışmada incelenen parametreler ve etkileri şöyledir;

CAD geometrisi: CAD (bilgisayar destekli geometrik tasarım) geometrisinin düzgün ve hatasız olması çok önemli ayrıca simülasyon programının termal gerilmeler ve geri yaylanmalar gibi kısımları da hesapladığı için kalıplarda en az %2 çıkma açısının olması gerekir. Sıcak dövmede çapak havuzunun ve kalıplar arası mesafenin doğru belirlenmesi gerekir. Kalıpların programda gerçek prosetekinin aynısı olacak şekilde konumlandırılmış olması da önemlidir.

Sürtünme katsayısı: Belirlenmesi en zor parametrelerinde birisi de sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısı, kalıp yüzeyi, malzeme özellikleri ve malzeme yüzeyine bağlıdır. Kalıpların yüzey ısı işleme ve yüzey yağlamaları bu değeri değiştirmektedir. Deneysel çalışmalarda da yapılmış olduğu gibi yüzey pürüzlülüğüne bağlı sürtünme katsayısını değişimi aynı parametrelerde dövülen parçanın geometrisi üzerinde değişikliğe neden olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısının doğru belirlenmiş olması simülasyonun doğrulanması açısından çok önemlidir. Simülasyon ortamında da parçanın sürtünme katsayısı değiştirilerek nihai şekil üzerinde değişimler olduğu gözlemlenmiştir.

Dövme presi: Dövme simülasyonunda mekanik pres kullanılmaktadır. Simülasyon parametrelerinden parça sıcaklığı ve sürtünme katsayısı gibi değerleri değiştirdiğimizde presin harcamış olduğu enerji ve parçanın şekillendirilmesi için gerekli olan kuvvet grafiksel olarak çıkmaktadır. Preslerin volan enerjisi ile sabit AC motor tahriki ile çalıştığından dolayı pres enerjisinde tasarruf sağlanamamaktadır.

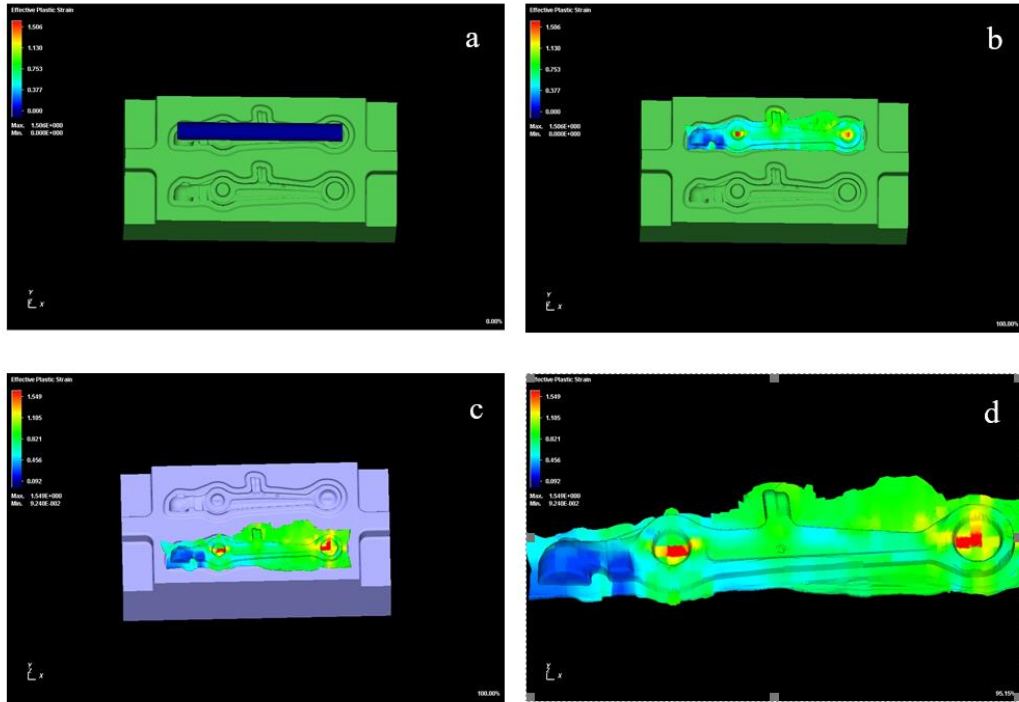
Mesh: Simülasyon çalışmasında CAD datasını birilere bölerek çözüm yapan sistem için iş parçası belirli birimlere bölünür. Meshlerin geometrisi ve boyutları çözüm hassasiyetini etkilemektedir. Meshlerin küçülmesi ile simülasyon doğruluğu artarken çözüm süresi artmaktadır. Pres yükü ve nihai şekilde değişimler gözlenir.

Parça ve kalıp sıcaklığı: Simülasyon parametrelerinden ön önemlisi de sıcaklıklardır. Dövme kalıpları ve iş parçası ısıtılarak dövme yapılmaktadır. Yapılan

deneysel çalışmalarda 525°C da iyi sonuçlar alınmıştır ancak simülasyonda tanımlı maksimum sıcaklık ve şekillendirme hızı deneysel çalışmadaki üst sınırı aşmaktadır.

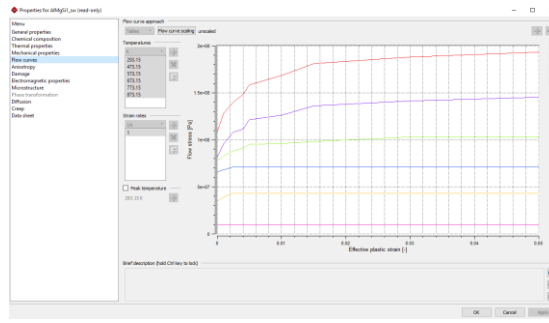
Malzeme özellikleri: Simufact sonlu elemanlar programının kütüphanesinde EN AW 6082 malzemenin gerçek gerilme gerinme eğrileri yer almaktadır. Bu eğriler simülasyon yazılımının çözüm motorunda çalışarak deformasyon yeteneği ve gerilim dağılımını hesaplamaktadır. Simülasyon çözümlerinde en önemli girdi malzeme özeliğidir. Hammadde ve kalıp özelliklerine göre malzeme akış eğrileri hesaplanmaktadır. Her hammadde için laboratuvar da akış eğrileri çıkartılması simülasyon sonucunun doğruluğunu güçlendirmektedir.

Doğru girdiler ile metal deformasyon simülasyonu %90 üzerinde doğruluk sağlamaktadır. Şekil 4.6 da örnek bir simülasyon süreci yer almaktadır. Ekstrüzyon hammadde birinci ve ikinci paso dövmele ile dövülmüş parçalar yer almaktadır.

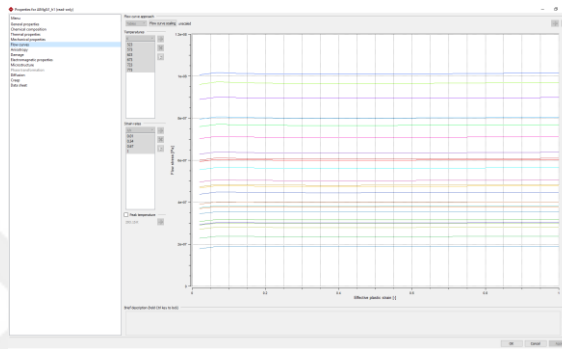


Şekil 4-6. Dövme simülasyon görselleri ön şekil kalıba kondu a. İlk dövme sonrası b. İkinci paso dövme sonrası c. ve nihai parça d.

Simülasyon programında malzemelerin akış eğrileri ile ilgili görseller Şekil 4.7’de 20°C ve 600°C arasındaki akış eğrileri ve Şekil 4.8’de 250°C ve 500°C arasındaki akış eğrileri yer almaktadır.



Şekil 4-7. 20°C ve 600°C arasındaki simülasyon programında tanımlı akış eğrileri



Şekil 4-8. 250°C ve 500°C arasındaki simülasyon programında tanımlı akış eğrileri

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Dövme ön ısıtma teknolojisi olarak, rezistanslı ısıtıcı, indüksiyon ısıtıcı ve infrared ısıtıcı karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda literatüre paralel olarak en az enerji tüketen ve en iyi malzeme özelliklerini sağlayan sistem indüksiyon ısıtma olarak belirlenmiştir. Kesit tane yapıları incelendiğinde indüksiyon ısıtmanın %10, %30 ve %50 deformasyon oranlarında 500°C ve 525°C da tane irileşmesi görülmemiştir. Bölgesel dinamik yeniden kristallenmeler görülmüş olsa da tane irileşmesine dönüşmemiştir. Yapılan sertlik ölçümü ve çekme testinde ciddi farklılıklar olmasa da darbe dayanımı ve yorulma testlerinde farklılıklar olduğu yapılan diğer çalışmalar ile görülmüştür. Hall- petch bağıntısına göre iri tane yapısının akma dayanımına etkisi matematiksel model olarak kanıtlandığı bilinmektedir ancak alüminyum alaşımlarının malzeme sabitinin düşük değerde olması sonuçları çok az etkilemektedir.

Dövme hammaddesi olarak ekstrüzyon profiller kullanılmaktadır. Bu profillerin üretim parametreleri belirlenmiş standartlar ile üretilmektedir. Dünya çapında kabul görmüş en önemli ve geçerli standart ASTM dir. Dövme ön ısıtma sıcaklığı belirlenirken Al-Mg₂Si faz diyagramına göre solvüs eğrisinin üzerine çıkması ile katı/katı çözünme sıcaklığına ulaşması gerekir. Bu sıcaklık aralığını test etmek için 475-525 °C aralığında deneme yapılmıştır. 490°-520°C arasında en ideal ön ısıtma sıcaklığı olduğu yapılan deneysel çalışmalar ile görülmüştür. Yapılan düşük sıcaklık denemelerinde tane irileşmesi görülmüştür. Aynı zamanda düşük sıcaklıkta dövülen parçaların çekme testinde çekme dayanımları ve % uzamlarının düşük olduğu tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıkta dövülen parçalar aynı pres ve kalıp kullanılan ve daha yüksek sıcaklıkta dövülen parçalara göre daha az şekil almaktadır. Malzeme akışının güçleşmesi kalıp ömrünü kısaltmakta ve dövme yapmak için daha yüksek kuvvetlerde çalışan preslere ihtiyaç oluşturmaktadır.

Deformasyon oranı iş parçalarında geometriye bağlı olarak yer yer farklılık göstermektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda %50 ve %70 oranında deforme edilen parçalardan tane irileşmesi olduğunu göstermiştir. Bunun için dövme ön şeklini parça

geometrisine en yakın hale getirmek uygun olacaktır. Dövme hatlarında kullanılan gerek haddeleme presi ve düzgün kalıp tasarımı hem deformasyon oranını azaltarak malzeme özelliklerini iyileştirecek hem de çapak hurdası olan fireyi azaltarak malzeme maliyetlerini düşürecektir. Parça geometrisine göre deformasyon oranı %50 nin üzerine çıkmaması uygun bir seçimdir. Bu değer plastik şekil verme simülasyon programları ile kontrol edilebilir.

Alüminyum sıcak dövmede dövme sürecinde kalıp malzemesi, kalıp yüzey pürüzlülüğü ve kalıp tasarımının nihai ürün özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Kalıp tasarımında maksimum deformasyon oranının %50 nin altında olması gerekmektedir. Kalıp yüzey özellikleri ise ne kadar pürüzsüz ve düzgün olursa sürtünme katsayısı düşeceği için şekillendirme kabiliyeti artmaktadır.

Sıcak dövmede pres seçimi incelendiğinde Mekanik presler sabit enerjide çalıştığı için harcanan enerji değişmemekte ancak pres seçimi değiştirilebilmektedir. Şekillendirme için hidrolik pres daha uygun olacaktır.

Dövme ön ısıtma teknolojisi araştırılırken rutin T6 sürecinden farklı olarak çözeltiye alma işlemi ortadan kaldırılarak T5 denemesi yapılmıştır. Sıcak dövülen parçalar havada soğutulularak harici T6 ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır. T6 ısıtma işleminde parçalar sepete dizilerek 530°C da çözeltiye alınır ve su verilir ardından yapay yaşlandırma için 185°C da 8 saat yaşlandırılarak nihai mukavemete ulaşılır. T5 ısıtma işleminde ise sıcak dövme sonrasında su verilerek yapay yaşlandırma için 185°C da 8 saat yaşlandırılarak nihai mukavemete ulaşılır. Bu denemelerde indüksiyon ısıtma sistemi ile iyi sonuç elde edilmiştir. 520°C da ısıtılan numunelerde T6 ısıtma işlemi ile aynı sertliğe ulaşılmıştır. Rezistanslı sistemde aynı değer yakalanamamıştır. İndüksiyon ısıtmalı T5 ısıtma işlem sürecinde otomasyon olması gerekmektedir çünkü dövme ve soğuma hızı oldukça kritiktir.

T5 ısıtma işleminde mukavemet değerini artırmak için standart alaşıma %0,27 ve %0,45 Cu ilave ederek deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda bakırın (Cu) ilavesi olumlu sonuç vermiştir. Bu deneysel çalışmada sertlik değeri 130 HB ye kadar çıkmıştır. Rutin EN AW 6082'nin sertliği 110 HB ler de kalmaktadır.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre ve ilerde yapılacak çalışmalarda aşağıdaki konular ele alınabilir.

Metal şekillendirme simülasyon programlarında kullanılabilecek tane dinamik yeniden kristallenme ve tane irileşmesi matematiksel modeli oluşturulabilir.

EN AW 6082 alaşımının T5 sürecinde Cr ve Zr ilavesi araştırılabilir. Bu alaşım elementlerinin nihai malzeme özellikleri üzerindeki etkisi incelenebilir.

Homojenizasyon sürecinde çözünen ve morfolojik değişikliklere uğrayan fazların analizi yapılarak nihai malzeme özelliklerine etkisi araştırılabilir.

Alüminyum sıcak dövme sürecinde T5 ve T6 ısıl işlem kondisyonuna ek olarak T651 ısıl işlem süreci karşılaştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Akdı, S., Ilgaz, O., Ünüvar, E. ve Birol, Y., 2013, 6082 alaşımlı dövme parçaların üretiminde plastik deformasyonun ve sıcaklığın dinamik yeniden kristalleşme reaksiyonuna etkisi.
- Akdı, S., Uludağ, M., Çetin, R. ve Tarakçıoğlu, N., 2015a, Alüminyum dövme sıcaklığının ve deformasyon oranının tane yapısı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi.
- Akdı, S., Uludağ, M., Çetin, R. ve Tarakçıoğlu, N., 2015b, Alüminyum sıcak dövmede ön ısıtma teknolojisinin yaşlandırma parametrelerine etkisi.
- Alamoudi, M. T., 2017, Flow Stress and Microstructure Evolution During Hot Forging of AA6099, *Lehigh University*, Lehigh Preserve.
- Association, E. A., 2002, Products – Forged products. manuel, t. a. a.
- Association, E. A., 2011. Applications – Chassis & Suspension – Suspension parts. The Aluminum Automotive manuel. Erişim Adresi.
- Barman, N., Mukherjee, J. ve Dutta, P., 2008, Numerical Simulation of Induction Heating of Aluminum Alloy Billets, *Solid State Phenomena*, 141-143, 133-138.
- Birol, Y., Ilgaz, O., Akdı, S. ve Ünüvar, E., 2013, 6082 alaşımlı profillerin kesit tane yapısına pres çıkış sıcaklığının etkisi.
- Birol, Y. ve Ilgaz, O., 2013, Effect of cast and extruded stock on grain structure of EN AW 6082 alloy forgings, *Materials Science and Technology*, 30 (7), 860-866.
- Birol, Y. ve Akdı, S., 2014, Cooling slope casting to produce EN AW 6082 forging stock for manufacture of suspension components, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24 (6), 1674-1682.
- Birol, Y., Gokcil, E., Guvenc, M. A. ve Akdı, S., 2016, Processing of high strength EN AW 6082 forgings without a solution heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 674, 25-32.
- Birol, Y., Gokcil, E. ve Akdı, S., 2017, Potential of horizontal direct chill cast EN AW 6082 rods as forging stock in the manufacture of light weight suspension components, *Metallurgical Research & Technology*, 114 (2).
- Blue, C. A., Sikka, V. K., Ohriner, E. K. ve Engleman, P. G., 2008. Infrared Heating Of Forging Billets And Dies. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. Erişim Adresi.
- BMW, 2012, Chassis Dynamics. BMW of North America, LLC. BMW.
- Bouazara, M., 2009, Improvement in the Design of Automobile Upper Suspension Control Arms Using Aluminum Alloys, *Springer Science + Business Media B.V.*
- Chang, Y.-L., Hung, F.-Y. ve Lui, T.-S., 2018, Enhancement of Mechanical Properties of Hot-Forged 6082 Suspension Parts via Rapid IR Heat Treatment, *Metals*, 8 (7).
- Durukan, İ., 2007, Effects Of Induction Heating Parameters On Forging Billet Temperature, *MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY*, ankara.
- Eser, A. A., Gökçil, E., Akdı, S. ve Birol, Y., 2015, Alüminyum işlem alaşımlarının T6 ısıtma işlemiyle yaşlandırma sıcaklık ve sürelerinin incelenmesi.
- Fujda, M. ve Kvačkaj, T., 2007, Microstructure and Mechanical Properties of EN AW 6082 Aluminium Alloy Prepared by Equal-Channel Angular Pressing, *Journal of Metals Materials and Minerals.*, 17.
- Fukuda, A. ve Inagak, Y., 2008, New Applications of Forged Aluminum Suspension Arms, *Castings & Forging Research Section*.

- Gokcil, E., Akdi, S. ve Birol, Y., 2015, A novel processing route for the manufacture of EN AW 6082 forged components, *Materials Research Innovations*, 19 (sup10), S10-311-S310-314.
- Gökçil, E., Eser, A. A., Akdı, S. ve Birol, Y., 2015a, Özgün Bir Proses İle En Aw 6082 Dövme Bileşenlerin Üretilmesi.
- Gökçil, E., Eser, A. A., Akdı, S. ve Birol, Y., 2015b, Döküm, ekstrüzyon ve dövme durumundaki 6082 alaşımının çökelme sertleşmesinde çözeltiye alma sıcaklık ve sürelerinin incelenmesi.
- Gökçil, E., Yakışan, B. U., Akdı, S. ve Birol, Y., 2015c, Alaşım bileşimi optimizasyonu içeren EN AW 6082-T5 dövme bileşenlerin üretilmesi.
- Hirsch, J., uuml ve rgen, 2011, Aluminium in Innovative Light-Weight Car Design, *Materials Transactions*, 52 (5), 818-824.
- Hu, J.-l., Yi, Y.-p. ve Huang, S.-q., 2014, Analysis of isothermal forging process and mechanical properties of complex aluminum forging for aviation, *Journal of Central South University*, 21 (7), 2612-2616.
- Jacobs, M. H., 1999. Precipitation Hardening. Interdisciplinary Research Centre in Materials, 47. Erişim Adresi.
- Kadolkar, P. B., Lu, H., Blue, C. A., Ando, T. ve Maye, R., 2004. Application of rapid infrared heating to aluminum forgings. 25th Forging Industry Technical Conference. Erişim Adresi.
- Kalaiyarasan, A., Palanisamy, S., Ramesh, R. ve Sundaram, D. S., 2017, Re-engineering of Suspension Control Arm using Aluminium Alloy (al6065) and Validation using FEA/FEM, *International Journal of Mechanical Engineering Research*.
- Karolczuk, A., Kurek, M. ve Łagoda, T., 2015, Fatigue Life of Aluminium Alloy 6082 T6 under Constant and Variable Amplitude Bending with Torsion, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*.
- Kervick, R., Blue, C. A., Kadolkar, P. B., Ando, T., Lu, H., Nakazawa, K., Mayer, H. ve Mochnal, G., 2006, Enhancement of Aluminum Alloy Forgings through Rapid Billet Heating.
- Köktaş, S., Gökçil, E., Akdı, S., Birol, Y. ve Çakır, A., 2016. Effect of copper addition on corrosion properties of EN AW 6082 alloy. Erişim Adresi.
- Kuhlman, G. W., 2005, ASM Handbook. Forging of Aluminum Alloys: 300-314.
- Küçükyağlıoğlu, G., Akdı, S. ve Birol, Y., 2015, Alüminyum T6 ısıtım işlemi için geliştirilen sepet tasarımı ile zaman ve enerji tasarrufu sağlanması, *verimlilik kongresi*.
- Marioara, C. D., Andersen, S. J., Jansen, J. ve Zandbergen, H. W., 2000, Atomic model for gp-zones in A 6082 Al-Mg-Si system, *acta mater*.
- Nakai, M. ve Itoh, G., 2014, The Effect of Microstructure on Mechanical Properties of Forged 6061 Aluminum Alloy, *Materials Transactions*, 55 (1), 114-119.
- Öztürk, H., 2008, Analysis and design for aluminum forging process, *MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY*, Ankara.
- Plonka, B., Klyszewski, A., Senderski, J. ve Lech-Grega, M., 2008, Application of Al alloys, in the form of cast billet, as stock material for the die forging in automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8 (2), 149-156.
- Poletti, C., Bureau, R., Loidolt, P., Simon, P., Mitsche, S. ve Spuller, M., 2018, Microstructure Evolution in a 6082 Aluminium Alloy during Thermomechanical Treatment, *Materials (Basel)*, 11 (8).

- Rudnev, V., 2006. Induction Heating Serves Today's Forging Industry. See discussions, stats, and author profiles for this publication. Erişim Adresi.
- Shang, F.-n., Sekiya, E. ve Nakayama, Y., 2011, Application of High-Frequency Induction Heating Apparatus to Heat Treatment of 6061 Aluminum Alloy, *Materials Transactions*, 52 (11), 2052-2060.
- Torca, I., Aginagalde, A., Esnaola, J. A., Galdos, L., Azpilgain, Z. ve Garcia, C., 2009, Tensile Behaviour of 6082 Aluminium Alloy Sheet under Different Conditions of Heat Treatment, Temperature and Strain Rate, *Key Engineering Materials*, 423, 105-112.
- Zlobina, M., Nacke, B., Galunin, S., Blinov, Y. ve Nikanorov, A., 2010, Induction Heating for Aluminum Extrusion Process: Concepts, Simulation, Design, *International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing*.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Seracettin AKDI
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya/ Cihanbeyli 1987
Telefon : 0554 692 71 87
E-mail : seracettinakdi@gmail.com

EĞİTİM

| Eğitim Durumu | Okul Adı- Bölüm Adı | Bitirme Yılı |
|---------------|---|--------------|
| Yüksek Lisans | Konya Teknik Üniversitesi- Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | 2019 |
| Üniversite | Afyon Kocatepe Üniversitesi- Malzeme Bilimi ve Mühendisliği | 2009 |
| Lise | Cihanbeyli Anadolu Lisesi | 2005 |

İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|------------|----------------------|--|
| 2019-... | AKDI Mühendislik | İşletme Sahibi |
| 2019- 2012 | Aydınlar Yedek Parça | Ar Ge Merkezi Yöneticisi |
| 2012-2011 | Arkoç Vana | Dökümhane ve Kalite Sorumlusu |
| 2011-2010 | Salina | Üretim- Lojistik |
| 2010-2009 | Solimpeks Enerji | Kalite Güvence ve Kalite Kontrol Sorumlusu |

UZMANLIK ALANI

Malzeme karakterizasyonu, alüminyum metalurjisi, dökme demir, ısıl işlem teknolojisi, ürün tasarımı, süreç tasarımı, solidcast, solidworks, simufact, PLC, otomasyon sistemleri, hidrolik sistemler, otomotiv yedek parça, otomotiv test sistemleri, TS 16949, alüminyum sürekli döküm, sac şekillendirme

YABANCI DİLLER

İngilizce iyi

KULLANILAN YAZILIMLAR

- * Microsoft Windows
- * Word, Excel, Power point, Project, Note,
- * Google uygulamaları, Keep, Form, Takvim, Finans, Documents,
- * Solidworks
- * AutoCAD
- * SIMUFACT
- * Solid CAST
- * ESPRİT
- * DopSOFT
- * WPLSOFT
- * FESTO PLC ve FCT
- * LSIS PLC
- * Step 7
- * ALTair
- * LMS dataloger

YAYINLAR

1. Isıl işlem sepeti 2015 / 05080
2. Akdı S., Ilgaz O., Ünüvar E.,ve Birol Y., (2013,Ekim). 6082 alaşımlı dövme parçaların üretiminde plastik deformasyonun ve sıcaklığın dinamik yeniden kristalleşme reaksiyonuna etkisi, 6. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
3. Birol Y., Ilgaz O., Akdı S., Ünüvar E.,(2013,Ekim). 6082 alaşımlı profillerin kesit tane yapısına pres çıkış sıcaklığının etkisi, 6. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
4. Ilgaz O., Akdı S., Ünüvar E.,ve Birol Y., (2013,Ekim). EN AW 6082 alaşımının dövme ürünlerindeki T4, T6 ısıl işlem süreçlerinin kıyaslanması ve optimizasyonu, 6. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
5. Güvenç M.A., Gürel E.G., Akdı S., Birol Y., (2014 Ekim). Otomotiv Süspansiyon Sistemlerinde Kullanılan Küresel Mafsalların Dinamik Yük Altında Kırılmalarına Isıl İşlem Tekniklerinin Etkisi, 15. Uluslararası Malzeme Konferansı, Denizli.
6. Gökçil E., Yakışan U., Eser A., Akdı S., Birol Y., (2015 Nisan). Küresel grafitli dökme demirden mamul süspansiyon parçalarında yüzde uzama değerinin iyileştirilmesi, Uluslararası Demir-Çelik Sempozyumu, Karabük.
7. Eser A.A., Gökçil E., Akdı S., Birol Y., (2015 Ekim). Alüminyum işlem alaşımlarının T6 ısıl işleminde yaşlandırma sıcaklık ve sürelerinin incelenmesi, 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul
8. Gökçil E., Yakışan U., Akdı S., Birol Y., (2015 Ekim). Alaşım bileşimi optimizasyonu içeren EN AW 6082-T5 dövme bileşenlerin üretilmesi, 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.

9. Gökçil E., Eser A.A., Akdı S., Birol Y., (2015 Ekim). Özgün bir proses ile EN AW 6082 dövme bileşenlerin üretilmesi, 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
10. Gökçil E., Eser A.A., Akdı S., Birol Y., (2015 Ekim). Döküm, ekstrüzyon ve dövme durumundaki 6082 alaşımının çökeltme sertleşmesinde çözeltiye alma sıcaklık ve sürelerinin incelenmesi, 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
11. Akdı S., Uludağ M., Çetin R., Tarakçıoğlu N., (2015 Ekim). Alüminyum dövme sıcaklığının ve deformasyon oranının tane yapısı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi, 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
12. Akdı S., Uludağ M., Çetin R., Tarakçıoğlu N., (2015 Ekim). Alüminyum sıcak dövmede ön ısıtma teknolojisinin yaşlandırma parametrelerine etkisi, 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
13. Yakışan U., Gökçil E., Akdı S., Acarer M., (2015 Ekim). 1050 ve 5005 serisi Alüminyum alaşımlarının elektrik direnç kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantı özelliklerine etkisi, 7. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
14. Küçükyağlıoğlu G., Akdı S., Birol Y., (2015 Ekim). Alüminyum T6 ısıtma işlemi için geliştirilen sepet tasarımı ile zaman ve enerji tasarrufu sağlanması, 5. Verimlilik Kongresi, Ankara.
15. Birol, Y., Ilgaz, O., Akdi, S., & Unuvar, E. Comparison of cast and extruded stock for the forging of AA6082 alloy suspension parts. *Advanced Materials Research Volume 939, Sayfa No; 299-304 (May 2014)*
16. Birol, Y., Akdi, S. Cooling slope casting to produce EN AW 6082 forging stock for manufacture of suspension components. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24(6). (2014)*
17. Birol, Y., Ilgaz, O. Effect of cast and extruded stock on grain structure of EN AW 6082 alloy forgings. *Gokcil E., Akdi S., Birol Y., A Novel Processing Route For The Manufacture Of EN AW 6082 Forged Components. Materials Research Innovationas. (2015)*

PATENTLER

- Isıl işlem sepeti 2015 / 05080
- Ayarlanabilir hareket iletim elemanı 2015 / 12885
- Küresel saplama elemanı 2016 / 02422
- Montaj makinası 2016 / 18930
- Sıvama presi 2017 / 04254