T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİZ MERDANE DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN 6016 ALÜMİNYUM LEVHA ALAŞIMINDA DOĞAL YAŞLANMA SÜRESİNİN OTOMOBİL UYGULAMALARINDAKİ BOYA PİŞİRİMİNE ETKİSİ

Tanya Aycan BAŞER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2004

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİZ MERDANE DÖKÜM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN 6016 ALÜMİNYUM LEVHA ALAŞIMINDA DOĞAL YAŞLANMA SÜRESİNİN OTOMOBİL UYGULAMALARINDAKİ BOYA PİŞİRİMİNE ETKİSİ

Tanya Aycan BAŞER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr. Metin USTA

GEBZE
2004

ÖZET

Hızla gelişmekte olan otomotiv endüstrisinde alüminyum kullanımı her geçen yıl daha da artmaktadır. Bu artışın en önemli nedenleri; alüminyumun hafifliği yanında yüksek mukavemete sahip olması, şekil verilebilirliğinin ve korozyon direncinin yüksek olmasıdır. Alüminyum alaşımları bu özellikleri nedeniyle otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu için gerekli hafif malzeme seçiminde önemli bir kullanım alanına sahiptir. Isıl işlem uygulanabilen 6XXX serisi (Al–Mg–Si) alüminyum alaşımları Avrupa'da otomobil dış panellerinde geniş uygulama alanına sahiptirler. Bu alaşım grubunda en çok tercih edilen AA6016 alaşımlarıdır. AA6016 alaşımları T4 temperinde çok iyi şekillenebilme kabiliyetine, boya pişirimi işleminden sonra ise yüksek mukavemete sahiptirler. Bu koşulların sağlanabilmesi için uygulamada boya pişirimi işlemi çözeltiye alma tavından kısa süre sonra yapılmalıdır. Ancak endüstriyel uygulamada bunu gerçekleştirmek oldukça güçtür, malzemenin doğal yaşlanmaya uğraması kaçınılmazdır. Bu durum boya pişirimi işlemi sonrasında düşük mukavemet elde edilmesine neden olur. Doğal yaşlanma etkisinin boya pişirimi cevabı üzerindeki olumsuz etkisini gidermek için malzemeye düşük sıcaklıklarda ön yaşlandırma tavı uygulanmaktadır. Ön yaşlandırma tavı sadece boya pişirim cevabını iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda mekanik özelliklerin stabilize edilmesini ve oda sıcaklığında bekleme süresince sertleşmenin önlenmesini sağlar. Bu çalışmada mikrosertlik ölçümleri, diferansiyel kalorimetre tekniği, optik ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri ikiz merdane döküm tekniği ile üretilen AA6016 alaşımlı levhada doğal yaşlanmanın pişirim sertleşmesi üzerine etkisini incelemek için kullanılmıştır.

SUMMARY

Aluminium alloys used in automotive applications increase in every year. The reason for that increase is the light weight, high strength, good formability, weldability and corrosion resistance of the aluminium alloys. Because of these properties, aluminium alloys are greatly used in light-weight automotive application for a low fuel consumption. The heat treatable 6xxx series (Al–Mg–Si) aluminium alloys are widely used in Europe for car body outer panel, the most prominent alloy of this system is AA6016. This alloy has a high formability in T4 temper and a high strength after the paint bake cycle. In order to meet these conditions, in the manufacturing process, the paint bake treatment should be performed shortly after the solution heat treatment. It is too difficult to achieve this process industrial application. Therefore, the exposure of the material to natural aging is unavoidable. This results in substantial low strength after the paint bake. The adverse effect of natural aging on the bake hardening response is often circumvented by the application of a low-temperature pre-aging. Such a pre-aging treatment not only improves the bake hardening response but also helps to stabilize the mechanical properties in the as-delivered condition and avoid hardening during storage. Microhardness measurements, differential scanning calorimetry (DSC) technique, optical and scanning electron microscope (SEM) observations were employed in this study to investigate the effect of natural aging on the bake hardening response of a Twin-Roll Cast 6016 sheet.

TEŞEKKÜR

Uzun süreli bir çalışmanın ardından tamamlamış olduğum tez çalışmamda başta Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Öğretim Üyesi, danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Metin Usta'ya zaman ve süre sınırı olmaksızın yanımda olduğu, bilgi ve tecrübesini benimle paylaştığı için çok teşekkür ederim.

Hem çalışıp hem de Yüksek Lisans yapabilme imkanı sağladığı için ve bana verdiği sınırsız desteği için TUBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme ve Kimya Teknolojileri Enstitüsü, Alüminyum Süreçleri Grup Lideri çok değerli hocam sayın Doç. Dr. Yücel Birol'a, çalışmalarım boyunca benden hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen Uzman Teknisyen sayın Osman Çakır ve Teknisyen sayın Fahri Alageyik'e çok teşekkür ederim.

Akademik kariyerime başladığım andan itibaren bana destek olan, beni Araştırma &Geliştirmeye teşvik eden, hayatım boyunca çok saygı ile anacağım çok değerli hocam sayın Prof. Dr. Kerim Allahverdi, sayın Prof. Dr. Levon Çapan ve sayın Dr. Onur Baran'a çok teşekkür ederim.

Beni daima ileriye götüren, hedeflerime ulaşabilmem için onca fedakarlıkta bulunan, hep yanımda kalbi benle olan çok sevdiğim aileme ve sayın Araştırma Görevlisi Özgür Çobanoğlu'na çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLOLAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları	1
1.2 Alüminyum Alaşımlarının Gruplandırılması	2
1.2.1 Isıl İşlem Uygulanabilen Alaşımlar	3
1.2.2 Isıl İşlem Uygulanamayan Alaşımlar	3
1.2.3 Dövme Alaşımları	4
1.2.4 Döküm Alaşımları	7
1.3 Alüminyum Alaşımlarının Otomobil Uygulamalarındaki Avantajları	8
1.4 Taşıtlarda Alüminyum Alaşımlı Levha Uygulamaları	10
1.5 İkiz Merdane Döküm (SDT) Tekniği	15
1.6 AA6016 Alaşımlarının Otomobil Sektöründe Kullanımı	24
1.6.1 Çözeltiye Alma Tavı	25
1.6.2 AA6016 Alaşımının Kimyasal Bileşimi ve Mekanik Özellikleri	27
1.7 Çalışmanın Amacı	28
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
2.1 Deneysel Akım Şeması	31
2.2 Mikrosertlik Ölçümleri	33
2.3 Mekanik Özelliklerin Ölçümleri	33
2.4 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Tekniği	33
2.5 Optik ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları	34
3. SONUÇLAR VE İRDELENMESİ	35
3.1 Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	35
3.2 Mekanik Özelliklerin Ölçüm Sonuçları	36

3.3 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Tekniği Sonuçları 40
3.4 Optik ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları Sonuçları 46
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 58
KAYNAKLAR 60
ÖZGEÇMİŞ 64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Akb	Atomik Kütle Birimi
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
E	Elastik Modülü
G	Kaynama Modülü
λ	Isı İletkenliği
MPa	Mega Paskal
SDT	İkiz Merdane Döküm Tekniği
HV	Vickers Mikrosertlik
PBR	Boya Pişirimi Cevabı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil		Sayfa
1.1.	Alüminyum Ürünün Dünyadaki Bölgesel Dağılım, Ürün Dağılımı ve Nihai Ürün Olarak Sınıflandırılması	13
1.2.	(a) Levha Döküm Teknolojisinin (b) DC Döküm ile Karşılaştırılması	15
1.3.	Hunter İkiz Merdane Döküm Makinasının Şematik Görünümü	17
1.4.	Döküm Merdaneleri ve Sıvı Metal Besleme Sisteminin Şematik Gösterimi	18
1.5.	Sıvı Metalin Tip Ucundan Çıkarak Döküm Merdaneleri Arasında Katılaşmasının Şematik Gösterimi	19
1.6.	Kontrollü bir Biçimde Ezilmiş Alüminyum Profil	21
1.7.	Alcoa-Audi A8 de Kullanılan ‘Space Frame’ Tekniği	22
1.8.	Alcan-Ford da Kullanılan ‘the Conventional Sheet Monocoque’ Tekniği	22
1.9.	Al-Mg_2Si Faz Diyagramı	26
2.1.	Deneysel Akım Şeması	32
3.1.	Doğal Yaşlanma Süresine Bağlı Olarak Sertlik Değerindeki Değişimin Grafik Olarak Gösterimi	36
3.2.	Doğal Yaşlanma Süresinin 6016 Alaşımlı Örneğin Boya Pişiriminden Önce (T4P) ve Sonra (T8X) Mekanik Özelliklere Etkisi Grafik Olarak Gösterimi	39
3.3.	Farklı Doğal Yaşlanma Sürelerinden Elde Edilen AA6016 Alaşımlı Örneklerin DSC Termogramları (Ön Yaşlandırma Tavından Önce!)	43
3.4.	Farklı Doğal Yaşlanma Sürelerinden Elde Edilen AA6016 Alaşımlı Örneklerin DSC Termogramları (Ön Yaşlandırma Tavından Sonra!)	45
3.5.	250°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhanın Aydınlık-Karanlık Alan Mikroyapı Resimleri	48
3.6.	250°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhada SEM Görüntüleri	49
3.7.	300°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhanın Aydınlık-Karanlık Alan Mikroyapı Resimleri	50

3.8. 300°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhanın Nomarski Mikroyapı Resimleri 51
3.9. 300°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhada SEM Görüntüleri 52
3.10. 350°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhanın Aydınlık-Karanlık Alan Mikroyapı Resimleri 54
3.11. 350°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhada SEM Görüntüleri 55
3.12. 400°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhanın Aydınlık-Karanlık Alan Mikroyapı Resimleri 56
3.13. 400°C-30dk İzotermal Tav Uygulanmış AA6016 Alaşımlı Levhada SEM Görüntüleri 57

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo		Sayfa
1.1.	Saf Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	2
1.2.	Alüminyum Alaşımları için Temper Seri Numaraları	5
1.3.	Tipik Dövme Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri	6
1.4.	Tipik Alüminyum Döküm Alaşımlarının Özellikleri	8
1.5.	Otomotiv Sektöründe Levha Ürünlerinin Kendi İçinde Dağılımı	14
1.6.	Otomotiv Sanayinde Kullanılan Başlıca Alüminyum Levha Alaşımlarının Kimyasal Kompozisyonları ve Mekanik Özellikleri	20
1.7.	AA6016 Alaşımlarının Kimyasal Bileşimi	27
1.8.	Temper Değerlerine Karşılık AA6016 Alaşımlarının Mekanik Özellikleri ve Sertlik Değerleri	28
1.9.	Doğal Yaşlanma Süresinin AA6016 Alaşımlı Levhanın Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi	29
2.1.	Bu Çalışmada Kullanılan AA6016 Alüminyum Alaşımlı Levhanın Kimyasal Kompozisyonu	31
3.1.	AA6016 Alaşımlı Levhanın Doğal Yaşlanma Süresine Bağlı Olarak Ölçülen Mikrosertlik Değerleri (On Yaşlandırma Tavından Önce)	35
3.2.	Doğal Yaşlanma Süresinin AA6016 Alaşımlı Örneğin Boya Pişiriminden Önce (T4P) ve Sonra (T8X) Mekanik Özelliklere Etkisi.	37
3.3	AA6016 Alaşımlı Levhada Artan Si Miktarı ve Mg_2Si %leri	42

1. GİRİŞ

Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, demir-çelikten sonra, teknik özelliklerinin üstünlüğü sayesinde, çağımızın en çok kullanılan ikinci metalidir. Demir ve bakırdan daha hafif olması, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, korozyona karşı dayanımı, alaşımlarının sağlamlık ve yumuşaklık açısından son derece çeşitli olması, kolay işlenebilme ve biçimlendirilebilmesi gibi özellikleri, alüminyum kullanımının çok büyük bir hızla yaygınlaşmasına neden olmuş, böylelikle alüminyumu 21.yüzyıla damgasını vuran bir metal yapmıştır [Dündar, 2002].

Alüminyumun sahip olduğu özelliklerin birleşimi onu son derecede faydalı bir mühendislik malzemesi haline getirmiştir. Alüminyum düşük yoğunluğu (2.70 gr/cm^3) nedeni ile özellikle taşıt parçaları yapımında tercih edilir. Saf haldeki alüminyumun düşük dayanımına rağmen, alaşımlandırılarak dayanımı 690 MPa'a kadar çıkarılabilir. Saf alüminyumun özellikleri Tablo1.1'de verilmiştir. Bu özellikler alüminyuma ilave elementlerin etkisi ile değiştirilebilir [Aluselect].

Alüminyumun metal olarak özellikleri bir çok durumda onun ideal ve ekonomik bir malzeme olmasını sağlar. Bu özellikler şunlardır:

1- uygun mekanik özelliklerle birlikte düşük ağırlık,
2- koku ve kimyasallara karşı dayanım ve hijyenik koşullar,
3- yüksek ısı iletkenliği,
4- parlama ve alev almazlık,
5- magnetik nötralite,
6- kolay şekillendirilebilme kabiliyeti,
7- çok farklı yöntemlerle yüzey işlemleri.

Tablo1.1. Saf alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri [Aluselect].

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,98 akb
Kafes yapısı	Yüzey merkezli kübik (YMK)
Yoğunluğu **(20 ºC'de katı)** **(660 ºC'de sıvı)**	 2,6989 gr/cm^3 2,37 gr/cm^3
Elastik Modül (E)	7,2 10^3 kp/mm^2
Kayma Modülü(g)	2,7 10^3 kp/mm^2
Ergime sıcaklığı	660,24 ºC
Elektrik iletkenliği	37,74 m/ohm.mm^2
Isı iletkenliği(λ)	0,55 cal/cm.s. ºC
Akma Mukavemeti (MPa)	10 MPa
Çekme Mukavemeti (MPa)	45 MPa
Uzama değeri (%)	%50

Alüminyumun nispeten düşük fiyatı ve birçok faydalı özellikleri onu sanayi için önemli bir metal haline getirmiştir [Smith, et al, 2001].

1.2. Alüminyum Alaşımlarının Gruplandırılması

Alüminyum alaşımları üretim metodları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılabilir. Bu da imal usüllerinin farklı ihtiyaçları olduğunu gösterir. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımlar, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve kompozisyona sahiptirler. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere, iki alt gruba ayrılabilir. Isıl işlem, alüminyum alaşımlarda istenilen dayanımı elde etmek için uygulanan bir prosestir.

1.2.1 Isıl İşlem Uygulanabilen Alüminyum Alaşımları

Bazı alüminyum alaşımlarında ısıl işlemle çökelme sertleşmesi elde edilebilir. Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarının 3 ana grubu bulunmaktadır.

1) 2xxx alaşımları: Bu grubun ana alaşım elementi Cu olmakla birlikte, çoğunda magnezyum bulunur. Küçük miktarda başka bazı elementler de katılır.

2) 6xxx alaşımları: Bu grup alaşımların başlıca alaşım elementleri, birleşerek Mg_2Si metaller arası bileşiğini yapan magnezyum ve silisyumdur. Mg_2Si çökelti halinde bu alaşım grubunu güçlendirir.

3) 7xxx alaşımları: Bu grup alaşımların başlıca alaşım elementleri Zn, Mg ve Cu dur. Bu alaşım ısıl işlem gördüğünde Zn ve Mg birleşerek güçlendirici temel çökelti olan $MgZn_2$ metaller arası bileşiği oluştururlar. Zn ve Mg ‘un alüminyumdaki yüksek çözünürlüğü, yüksek yoğunlukta çökelti oluşmasına ve bu da çok yüksek dayanımlara ulaşılmasına imkan vermektedir.

1.2.2. Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları

Çökelme ile sertleştirilemez, dayanımlarının arttırılabilmesi sadece soğuk işlenmeyle mümkündür, katı eriyik mukavemetlendirmesi, pekleşme ve dağılım mukavemetlendirmesi ile mukavemetlendirilirler. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının 3 ana grubu bulunmaktadır.

1) 1xxx alaşımları: Bu alaşımlarda alüminyum en az %99.0 olmaktadır ve Fe ile Si temel alaşım elementleridir. Yüksek dayanım için buna ek olarak %0.12 Cu katılır.

2) 3xxx alaşımları: Bu grupta Mn ana alaşım elementidir ve alüminyumun dayanımını katı çözelti güçlendirmesi ile arttırır.

3) 5xxx alaşımları: Bu grupta ana alaşım elementi Mg’dur ve Mg oranı katı çözelti sertleşmesi sağlamak için %5 civarındadır.

Mukavemetlendirme derecesi, alaşımın ısıl işlem görebilir veya pekleştirilebilir olmasına göre temper tanımlaması “T” ve ”H” ile gösterilir (Tablo 1.2). Diğer tanımlamalar alaşımın tavlandığını (O), çözündürme uygulandığını (W) veya üretildiği şekilde kullanıldığını (F) gösterir. “T” ve “H” yi takip eden numaralar pekleşme miktarını, gerçek ısıl işlem tipini veya alaşımın diğer özel üretim işlem durumunu gösterir [Kvande, 1999].

1.2.3. Dövme Alaşımları

1xxx, 3xxx ve 5xxx alaşımlarının çoğu yaşlandırılamaz. Tipik dövme alaşımlarının özellikleri ve kompozisyonları Tablo 1.3’te gösterilmiştir [Metal Handbook, 1979].

1xxx ve 3xxx alaşımları, küçük miktarda inklüzyonlar ve metallerarası bileşiklerin varlığı dışında, tek fazlı alaşımlardır. Bu alaşımların özellikleri; pekleşme, katı eriyik mukavemetlenmesi ve tane boyutu kontrolü ile kontrol edilir. Buna karşın alaşım elementlerinin alüminyumda eriyebilirliği az olduğu için, katı eriyik mukavemetlenmesinin düzeyi sınırlıdır. Örneğin tavlanmış 3003 alaşımı 5000 psi akma dayanımlı ticari saf alüminyumla karşılaştırıldığında, sadece 6000 psi akma dayanımına sahiptir.

5xxx alaşımları oda sıcaklığında iki fazlıdırlar. Bu fazlar, alüminyumda magnezyumun katı α eriği ve sert, gevrek metallerarası Mg_2Al_3 bileşiğidir. Alüminyum-magnezyum alaşımlarının özellikleri Mg_2Al_3 çökeltisinin ince dağılımı, pekleşme, katı eriyik mukavemetlenmesi ve tane boyu kontrolü ile kontrol edilir. Buna karşın Mg_2Al_3 çökeltileri uyumlu olmadığından, yaşlandırma ısıl işlemi mümkün değildir.

2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alaşımları yaşlandırılabilir üç fazlı alaşımlardır. Her alaşımda, son denge fazı oluşmadan önce birkaç uyumlu çökelti oluşur.

2xxx: $\alpha_{ke} \rightarrow \alpha + \text{GP-I} \rightarrow \alpha + \text{GP-II} \rightarrow \alpha + \theta' \rightarrow \alpha + \theta$

6xxx: $\alpha_{ke} \rightarrow$ GP bölgeleri $\rightarrow \beta''$ $(Mg_{X1}Si_{Y1}) \rightarrow \beta'$ $(Mg_{X2}Si_{Y2}) \rightarrow \beta$ $(Mg_{X3}Si_{Y3})$

7xxx: : $\alpha_{ke} \rightarrow \alpha +$ GP bölgeleri $\rightarrow \alpha + \eta'(MgZn_2) \rightarrow \alpha + \eta\ MgZn_2$

Tablo 1.2. Alüminyum alaşımları için temper seri numaraları (Alternatif İngiliz seri numaraları parantez içerisinde gösterilmiştir) [Metal Handbook, 1979].

Temper	Açıklama
F(M)	İmal edildiği şekilde (sıcak şekillendirme, döküm, dövme vs)
0	Tavlanmış (mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	**Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder).**
H12	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar.
H14	Soğuk şekillendirme, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar.
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar.
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar.
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar.
H2X	**Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış.**
H3X	**Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasının önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş.**
W	Çözelti ısıl işlemi görmüş.
T	Yaşlandırılmış.
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış.
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
T3	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T4 (TB)	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T5 (TE)	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış.
T6 (TF)	Çözelti ısıl işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış.
T7	Çözelti ısıl işlemi görmüş ve kararlılaştırılmış.
T8	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış.
T9	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş.
T10	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış yaşlandırılmış.

Tablo 1.3. Tipik dövme alüminyum alaşımlarının özellikleri [Askeland, 1998].

Alaşım	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% uzama	Uygulamalar
Isıl işlem uygulanamayan				
1100-0 D >%99 Al	89,66	34,48	40	Elektirksel parçalar, folyo
1100 H18	165,52	165,52	10	Korozyon direnci
3003-0 %1.2 Mn	110,34	41,38	35	İçecek kutuları, mimari kullanımlar
3003 H18	200,00	186,21	7	
4043-0	144,82	68,97	22	Kaynak için dolgu malzemesi
4043-H18	282,76	268,97	1	
5056-0 %5 Mn	289,66	165,5	35	Konteynerler, denizcilik parçaları
5056 H18	413,79	344,83	15	
Isıl işlem uygulanabilen				
2024-0 %4.4 Cu	186,21	75,86	20	
2024-T4	486,97	324,14	20	
4032-T6 %12 Si %1 Mg	379,31	317,24	9	
6061-0 %1 Mg %1 Si	124,14	56,7	27	Ulaşım, uçak ve diğer yüksek dayanım uygulamaları
6061-T6	310,34	275,85	15	
7075-0 %5.6 Zn %2.5Mg	267,06	103,45	17	
7075-T6	572,41	503,45	11	

1.2.4. Döküm Alaşımları

Tablo 1.4'te gösterilen ve en fazla bilinen alüminyum döküm alaşımlarının pek çoğu ötektik reaksiyona neden olan düşük ergime noktaları, iyi akıcılık ve dökülebilirlik sağlayan yeterince silisyum içerir. Akışkanlık, sıvı metalin bir kalıba doğru erken katılaşma olmadan akma yeteneğidir. Dökülebilirlik ise, alaşımdan iyi bir dökümün yapılabilmesine işaret eder [Metal Handbook, 1979].

Alüminyum-silisyum alaşımlarının özellikler i, α alüminyum matrisin katı eriyik mukavemetlenmesi, β fa zının dağılım mukavemetlenmesi, ilk tane boyutu, şekli ve aynı zamanda ötektik oluşumu tayin eden katılaşmayla kontrol edilir. Kokil veya pres dökümdeki hızlı soğuma, ötektik mikro oluşumu incelterek genellikle dayanımı yükseltir.

Belirli alaşımlarda mikroyapıyı ve bu nedenle de dağılım mukavemetlenmesi düzeyini iyileştirmek amacıyla boron ve titanyum ilaveleri ile tane inceltme, ötektik yapıyı değiştirmek için sodyum veya stronsiyum kullanarak modifikasyon veya birincil silisyumu incelterek mukavemetlenme sağlamak için fosfor ilavesi yapılır.

Tablo 1.4. Tipik Alüminyum Döküm Alaşımlarının Özellikleri [Askeland, 1998].

Alaşım	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% Uzama	Döküm İşlemi
295-T6	248	166	5	Kum
319-F	186	124	2	Kum
380-F	317	159	3,5	Kokil Döküm
356-T6	228	166	3,5	Kum
	262	186	5	Kokil Döküm
384-F	331	166	2,5	Kokil Döküm
390-F	228	241	1	Pres Döküm
443-F	131	55	8	Kum
	159	62	10	Kokil Döküm
	228	110	9	Pres Döküm
413-F	297	145	2,5	Pres Döküm
518-F	310	193	7	Kum
713-T5	207	152	4	Kum
850-T5	159	76	10	Kum

1.3. Alüminyum Alaşımlarının Otomobil Uygulamalarındaki Avantajları

Alüminyum birçok uygulama alanının yanı sıra otomotiv sektöründe de önemli bir yere sahiptir. Düşük yoğunluğu nedeniyle alüminyum otomotiv uygulamaları için son derece cazip bir malzemedir.

Önümüzdeki yüzyılda artarak devam eden ekolojik kaygılar, bütün dünyadaki otomobil üreticilerini yeni arayışlara ve araştırmalara yöneltmiştir. Ekolojik dengeyi bozan atık gazların miktarını azaltmak için, daha düşük yakıt tüketimi sağlayacak teknolojileri üretmek ve geliştirmek, yakıtı daha az zarar verecek şekilde kullanabilme yoluna gidilmiştir.

Hızla gelişmekte olan otomotiv endüstrisinde alüminyum kullanımı her geçen yıl daha da artmaktadır. Bu artışın en önemli nedenleri; alüminyumun hafifliği

yanında yüksek mukavemete sahip olması, şekil verilebilirliğinin ve korozyon direncinin yüksek olmasıdır. Alüminyum alaşımları, otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu için gerekli hafif malzeme seçiminde önemli bir kullanım alanına sahiptir. Otomobil üreticileri bir yandan ekolojik dengenin korunmasını düşünürken, diğer yandan ürettikleri otomobillerin ekonomik olmalarını istemektedirler. Otomotiv endüstrisinde güvenliği ihmal etmeden, konfordan vazgeçmeden büyük ve az yakıt tüketen otomobiller için hafif fakat mukavemeti yüksek malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Alüminyum bu malzemelerin içerisinde kullanım alanı en geniş olanıdır [Zeytin, 2000]. Bunun nedeni; alüminyumun çelik ve demire göre yaklaşık üç kat daha hafif olmasıdır. Daha az yakıt tüketecek, çevre-dostu bir otomobil daha hafif olmalıdır.Tasarım değişiklikleri dışında bunu sağlayabilecek tek yöntem otomobil imalatında daha hafif malzeme kullanmaktır. Otomobil toplam ağırlığındaki her %10'luk azalma %5-10 oranında yakıt tasarrufu sağlamaktadır. 1400 kg ağırlığındaki bir taşıtta geniş kapsamda alüminyum kullanımı taşıtın ağırlığında 300 kg azalmaya neden olmakta, taşıtın toplam ağırlığında %20 lik bir azalma sağlanmaktadır [Light Metal World, 1999].

Alüminyumun en önemli avantajlarından biri *"geri-kazanılabilir"* olmasıdır. Kaliteden ödün vermeksizin alüminyum tekrar tekrar geri kazanılabilmektedir [Zeytin, 2000]. Bu, hem ekonomik hem de ekolojik yönden önemlidir. Alüminyum bir otomobilde hareket sistemi, motor ve viteslerde kullanılır. Bunun dışında yassı ürün olarak kasa ve soğutma sistemi alüminyum alaşımıdır. Bir otomobilde kullanılan parçaların tamamı geri kazanılabilir. Geri kazanma payı %90'ın üzerindedir. Geri kazanım hammadde ve enerji kaynaklarının korunması için çok önemli teknolojik bir parametredir [Schultz, 1998].

Alüminyumun geri kazanımındaki verimin yüksek oluşu 3 nedene dayanmaktadır:

1. Geri kazanabilirlik alüminyumun asal özelliğini bozmaz.
2. Bu geri kazanım, geri kazanım olmaksızın yapılan üretim ile karşılaştırıldığında, %95 daha az enerji gerektirir.
3. Alüminyumun manyetik olmaması, diğer malzemelerden kolaylıkla ayrılabilmesini sağlamaktadır.

Günümüzde bir otomobilin ağırlığının ortalama %6 kadarı alüminyumdur fakat bu oran her geçen gün biraz daha artmaktadır. Otomobillerdeki alüminyum uygulamalarının özellikle son 10 yılda önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. Günümüzün ve geleceğin en önemli metallerinden biri olan alüminyumun otomobil sektörüne ve topluma sağladığı sayısız avantajları vardır. Gelişen teknoloji çoğu alanda çeliğin yerini alüminyuma bırakmasına neden olmuştur. 2000 yılında Avrupa yapımı otomobillerde ortalama 100 kg alüminyum kullanıldığı tespit edilmiştir. 2005 yılı itibariyle bu miktarın 130-150 kg arasında olacağı tahmin edilmektedir [Zeytin, 2000].

Alüminyum, çelik ile karşılaştırıldığında, üç kat daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek mukavemete sahip olması nedeniyle otomobil gövdelerinde kaporta malzemesi olarak kullanıldığında, çeliğe nazaran %50 seviyelerinde bir hafifleme sağlar [Sancakdar, et al, 2002]. Bunun yanı sıra, alüminyum levha ürünlerine uygulanacak imalat, montaj ve geri kazanım pratikleri çelik saclar için bugün uygulanandan farklı olmadığından bu değişiklik otomobil üreticisine ek bir yük de getirmemektedir.

"Üç Litre Araba"(100 km.de 3 litre yakıt tüketen) , bugün binek otomobiller için bir ütopya değildir. Yirmi yıl önce bir arabada 100 kg ağırlık tasarrufunun 100 km' de 1 litre yakıt tasarrufu sağlayacağı tahmin ediliyordu. Ancak bugün bir çok motorda 100 kg ağırlık azalması ile 0.7 litre/100 km yakıt tasarrufu sağlanmış durumdadır [Zeytin, 2000].

Bir otomobilde ciddi oranlarda hafifleme, başta kaporta olmak üzere otomobil ağırlığının önemli bir kısmını teşkil eden yapısal levha uygulamalarında alüminyum alaşımlarının kullanılması ile mümkün olabilecektir.

1.4. Taşıtlarda Alüminyum Alaşımlı Levha Uygulamaları

Avrupa Alüminyum Birliği (EAA) alüminyum üreticileri için en büyük kullanım sektörünün taşıma olduğunu bildirmektedir. Özellikle bu sektörde otomobiller, hava taşıtları ve gemi sektörü en önemli kullanım alanıdır.

Alüminyumun otomotiv endüstrisinde kullanımı çok eski yıllara dayanır. İlk kez lüks otomobillerin dış yüzeyinde kullanılan tahta çerçevelerin yerine alüminyum panellerin kullanıldığı görülür. 1897.de ilk motorlu taşıtların geliştirilmesi ile ilk motor bloğu hafif malzemelerden yapılmıştır. 1924'de Schwabischen Hüttenwerke'de ilk alüminyum kasa teşhir edilmiştir. BMW 1938'de 328 model arabalarında alüminyum kasa kullanmıştır [Oster, et al, 1997]. Otomotiv endüstrisinde alüminyum kullanımında sürekli bir artış söz konusudur.

Bu nedenle taşıt ağırlığından tasarruf konusunda son yıllarda, alüminyum levha uygulamalarına büyük önem verilmiştir. Kaportada çelik sac yerine alüminyum kullanımı ile taşıt ağırlığından 150 kg kadar azalma sağlanabilir [Miller, et al, 2000]. Bunun yanı sıra iç ve dış paneller de alüminyum ile önemli hafifleme sağlayacak ve taşıt hafiflemesine büyük katkıları olabilecek parçalardır. Bugün Kuzey Amerika'da General Motors'un Precept, Ford'un Prodigy ve Daimler-Chrysler'ın ESX3 modelleri, Avrupa'da ise Audi'nin A8 ve A2 modelleri tamamen alüminyum gövdeli olarak üretilmektedir [Brown, et al, 1995]. Alüminyum levha üreticileri tarafından, bu uygulamalar için kritik özellikler olan,

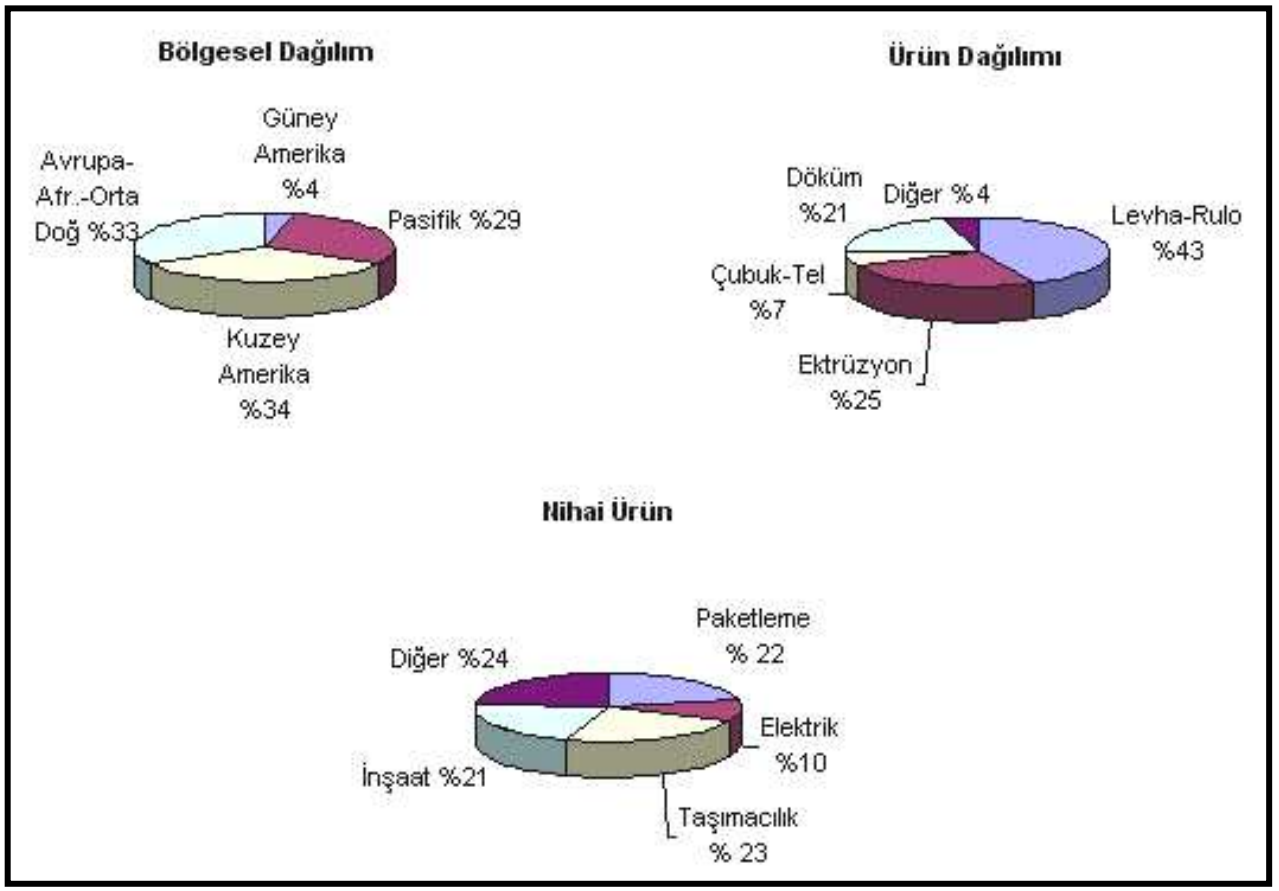
- Geri kazanılabilirlik,
- Düşük malzeme üretim ve uygulama maliyetleri
- Yapısal kararlılık ve dayanıklılık, vuruk ve darbe direnci, çarpışma dayanıklılığı için yeterli mukavemet,
- Gerdirme, bükme ve derin çekme operasyonları için yeterli şekil verilebilirlik,
- Kaynak, lehim ve yapıştırma gibi birleştirme tekniklerine uygunluk,

koşullarını sağlayacak alüminyum alaşımlı levha üretimi ve uygulaması için çok kapsamlı araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır [Green, 1999].

Hadde ürünü Alüminyum, levha rulo ve folyo dünyada kullanılan toplam alüminyumun yaklaşık %50 sini içerir. Şekil 1.1'de ürünün dünyadaki bölgesel tüketim ve nihai ürün olarak sınıflandırıldığında, alüminyum alaşımlarının ve toplam

alüminyum dağılımı verilmiştir. Kuzey Amerika'da levha ürünleri çok geniş olarak inşaat sektöründe çatı uygulamalarında, off-shore platformların inşasında, artan yeni eğilimler için otomotiv sektöründe ve tekne gövdelerinde kullanılmaktadır [Özer, 2002]. Fakat beklentiler, izleyen dönemde otomotiv karkas ve panel uygulamalarındaki artan kullanımla birlikte tüketimin daha da artacağı yönündedir. Alışılageldik uygulamalarda çeliğin yerini almaya başlayan alüminyum, askeri araçlar, köprüler, kriyojenik depolama ve taşıma tanklarında olmak üzere geniş uygulama alanları bulmaktadır [Özer, 2002].

Alüminyumun otomotiv uygulamalarında Avrupa da döküm ve levha ürünlerinin paylaşımı sırasıyla %78 ve %22 dir. Döküm işleminin ham maddesinin %80 ise geri kazanımdan elde edilen malzemedir. Levha ürünleri ve işlem alaşımları kendi içinde farklılıklar göstermektedir. Tablo 1.5'de otomotiv sektöründe levha ürünlerinin kendi içinde dağılımını göstermektedir [Dündar, 2002].



Şekil 1.1. Alüminyum ürünün dünyadaki bölgesel dağılım, ürün dağılımı ve nihai ürün olarak sınıflandırılması [Özer, 2002].

Tablo 1.5. Otomotiv sektöründe levha ürünlerinin kendi içinde dağılımı [eaa.net].

Ekstrüzyon	**6060**	AlMgSi0.5	%35
Dövme	**6082**	AlMgSi1	%11
Hadde Ürünleri	**3003**	AlMn1	%10
	5182	AlMg4.5Mn0.4	%9
	5754	AlMg3	%14
	6016	AlSi1.2Mn0.4	%15
	7020	AlZn5.4Mg1	%6

Taşıt yapısal uygulamaları için alüminyum alaşımları bugüne değin, ingot dökümü ve sıcak hadde teknolojisi ile üretilmiştir. Alüminyum levha üretiminde geleneksel yöntem, su soğutmalı kalıplara ergimiş alüminyumun doğrudan dökülüp katılaşması (Direct Chill Casting, DC) sağlandıktan sonra sıcak haddelenmesidir.

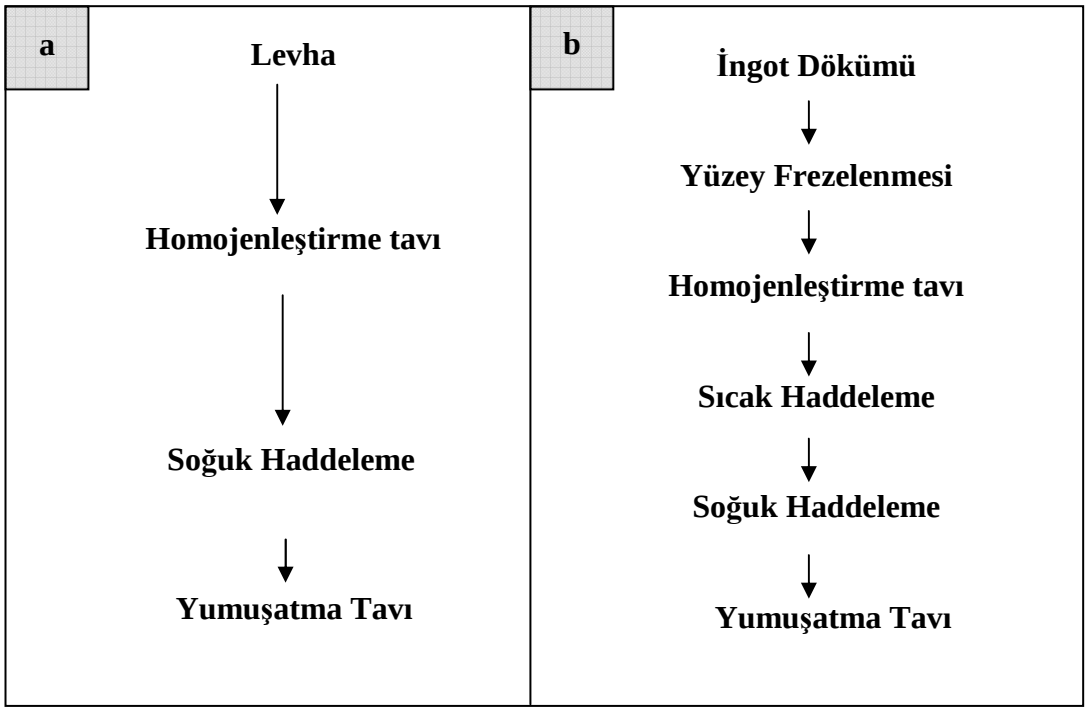
Bu teknoloji ile levha üretiminde soğuk haddelenebilir bir ara ürün elde etmek için, dökülen ingotların yüzeylerinin frezelenmesi, sıcak hadde işlemleri zaman alıcı, zahmetli ve yüksek maliyetli proses aşamalarından geçilmesi gerekmektedir.

Bu şekilde üretilen alüminyum alaşımlı levhalar pahalı olduklarından sadece, performansları üzerinden değerlendirilen, çok az sayıda üretilen, lüks pahalı modellerin imalatında uygulanabilmiştir. Bu yönteme alternatif olarak üretkenliğin arttırılması ve maliyetin düşürülmesi amacıyla sürekli döküm metotları olarak anılan ve geniş bir aileden oluşan yeni alternatif üretim yöntemleri geliştirilmiştir.

DC döküm, frezeleme, ön ısıtma, sıcak haddeleme ve soğuk haddeleme rotasını takip etmektedir. Son 30-40 yılda ise ilk yatırım maliyeti oldukça düşük, soğuk haddelemeye kadar olan adımlara gerek duymayan, döküm ve soğuk haddelemeyle nihai ürün kalınlığına inerek daha düşük üretim maliyeti sunan ikiz merdane döküm (twin-roll casting, SDT) tekniği gelişmeye başlanmıştır. ***Levha Dökümü*** olarak bilinen bu teknolojide, nihai ürün kalınlığına çok yakın bir kalınlıkta dökülen levha sadece birkaç hadde işleminden sonra istenen kalınlıkta elde edilebilmektedir.

Bu nedenle levha döküm teknolojisi, geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında (Şekil 1.2) çok daha ekonomik, verimli ve üretkenliği yüksek bir üretim yöntemi olarak dikkat çekmektedir [Erdoğan, 2002].

Sürekli döküm yöntemi kalitedeki gelişme üretim maliyetlerindeki düşüş ve enerji kazanımı ile büyük ölçüde önem kazanmaktadır. Sürekli döküm yönteminin bir diğer önemli avantajlardan biride büyük çaplı bobinlerin üretilmesi ile bir sonraki operasyon olan soğuk haddelemede proses zamanın ve haddelemenin azalması ile haddeleme verimliliğinin artmasına imkan sağlamaktadır.



Şekil 1.2. (a) Levha döküm teknolojisinin **(b)** DC döküm ile karşılaştırılması.

1.5. İkiz Merdane Döküm (SDT) Tekniği

İkiz merdane ile döküm tekniğinde dökme levha ergimiş metal ağız açıklığı kontrol edilen seramik tip adı verilen bir besleme ünitesinden su ile soğutulan çelik iki merdane arasına akıtılarak katılaşması ile üretilir. Bazı önemli detaylardaki farklılıkla birlikte ticari ikiz merdane döküm (SDT) makinalarının dizayn ve operasyon ana prensipleri aynıdır. Sürekli döküm hattının ana bileşenleri Şekil 1.3 de verilmektedir. Sabit bir sıcaklık ve bileşimdeki sıvı alüminyum döküm makinasının

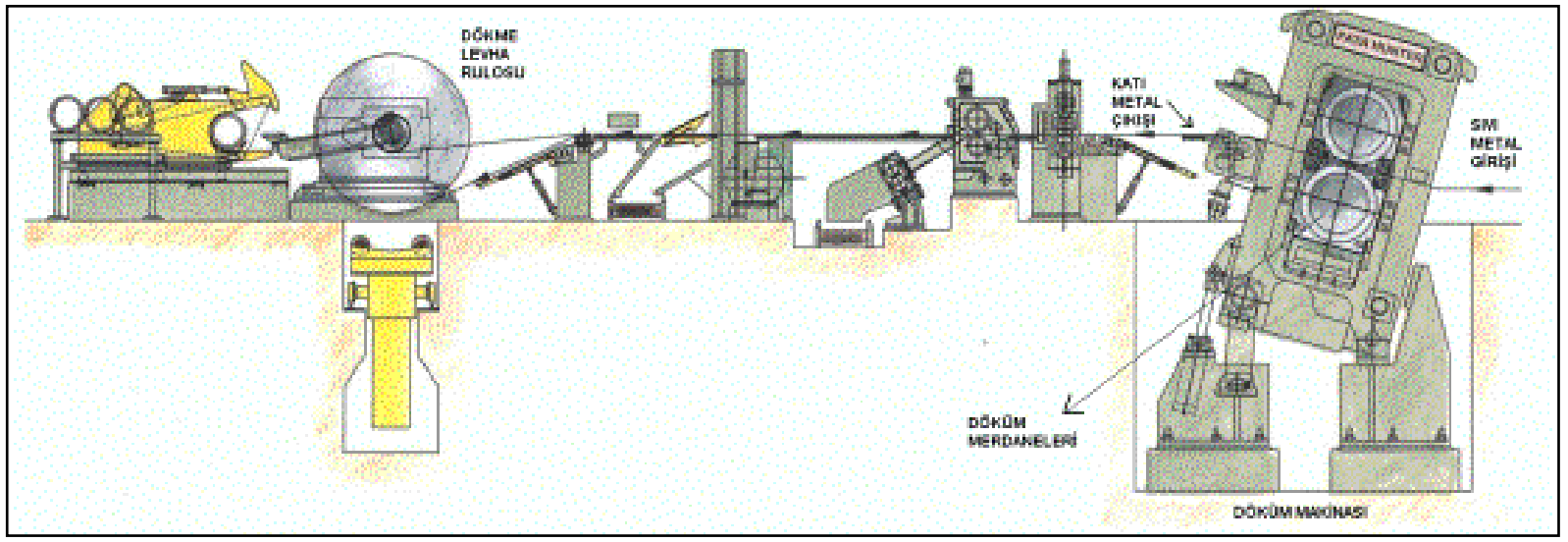
“head-box” ına (tandişine) girmeden önce çözünmüş hidrojen gazından arındırıldığı üniteden geçer ve daha sonra seramik poröz bir filtreyle inklüzyonlarından temizlenir [Erdoğan, 2002].

Head-box sıvı metalin merdaneler arasına düzlemsel olarak yayılıp akmasını sağlayan “tip” (nozül) ile bağlantılıdır (Şekil 1.4). Döküm merdaneleri içten su ile soğutulurlar.

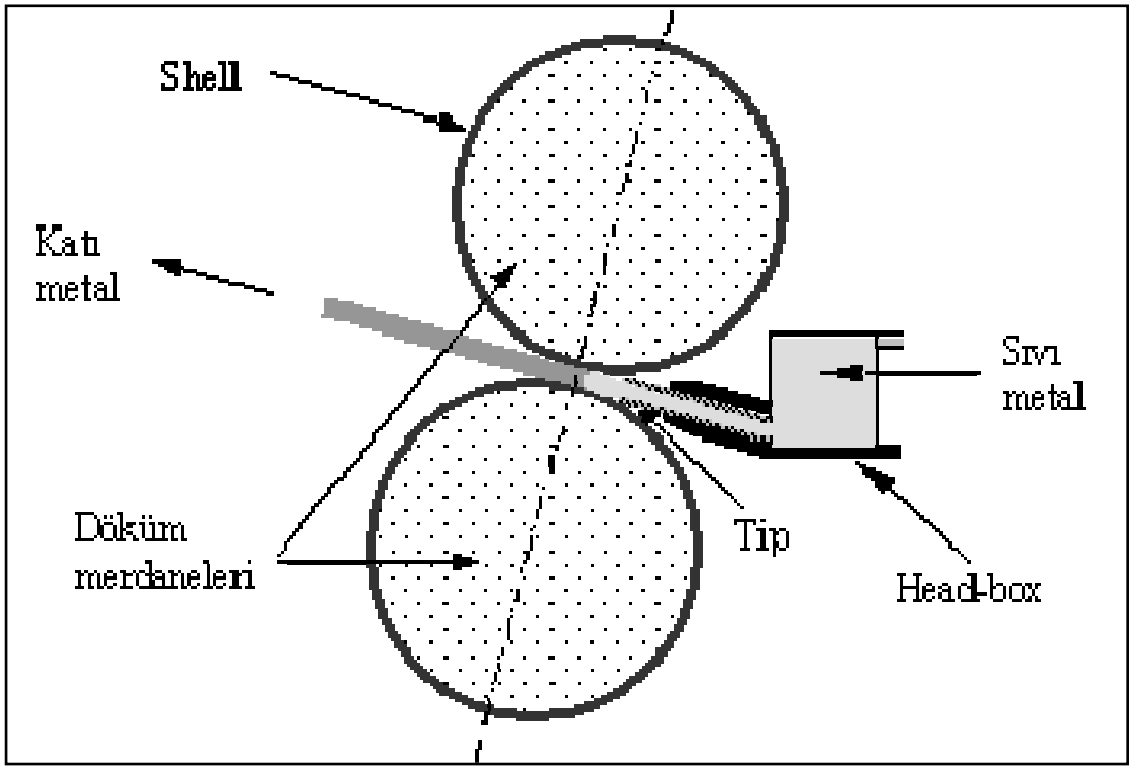
Döküm merdanelerinin yüzeyi döküm esnasındaki yüklere karşı çatlamalara dayanıklı “shell” denilen silindirik bir çelik malzemeyle kaplıdır. İki merdane arasındaki mesafe hidrolik olarak sabit tutulur. Tip merdanelerin merkez hattının biraz gerisinde bulunur ve böylelikle döküm makinası merdaneleri bu proseste sıvı metali katılaştırıp sıcak haddeler (Şekil 1.5).

Tipin çıkışından merdanelerin merkez hattına kadar olan mesafeye “setback” denilir. Katılaşmanın ve sıcak haddelemenin kombinasyonu merdaneleri birbirinden uzaklaştırmaya çalışan ayırma kuvvetini ortaya çıkarır. Merdane yüzeyleri döküm esnasında sıvı metalin yapışmasını engelleyen su-grafit süspansiyonuyla spreyleme yoluyla sürekli olarak kaplanır. Döküm makinasından çıkan ince dökme levha hattın sonunda rulo şeklinde sarılır [Erdoğan, 2002]. Alüminyum levha ürünlerinin otomobil malzeme uygulamalarından daha fazla pay alması, bu levha ürünlerinin daha ekonomik olarak üretilebilmeleri ile mümkündür. Bu alaşımlar çok sayıda üretilen ve yakıt tasarrufunun özellikle önemli olduğu modellerde ancak daha ucuza mal edildiklerinde kullanılabilirler. Sıvı alüminyumun doğrudan levha şeklinde dökülebildiği levha döküm teknolojisi ile alüminyum alaşımlarının üretiminin çok daha ekonomik hale gelmesi ve böylece otomotiv sanayiindeki uygulamalarının artması beklenmektedir.

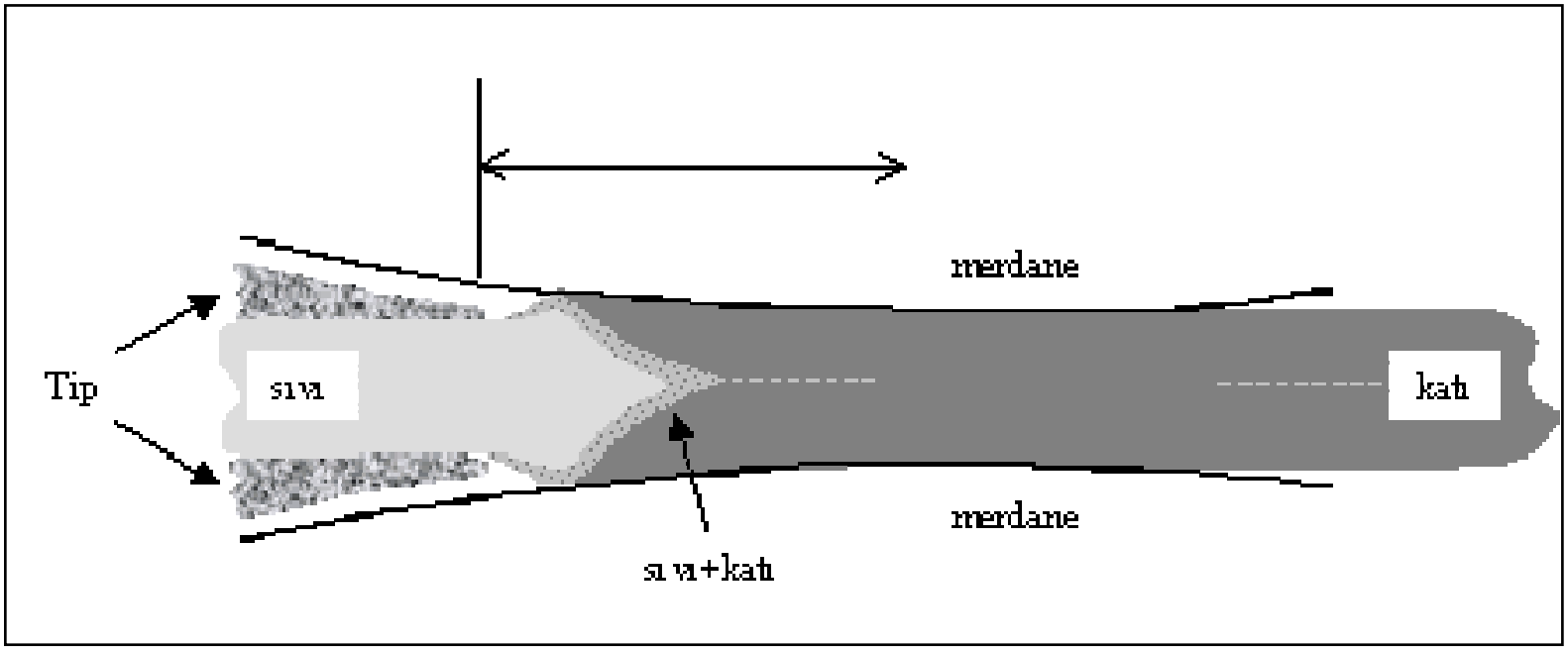
Mekanik özellikler konusunda aranan özelliklerin karşılanabilmesi için, malzeme davranışının ve buna yol açan metalürjik etkilerin çok iyi anlaşılması gerekir. Bir çok levha uygulaması için önemli olan malzemenin mukavemet ve şekil verilebilirlik özellikleri arasında uygun bir denge bulmaktır. Yapısal levha uygulamaları için aranan vasıfları bulundurduğuna inanılan ve bugüne değin kullanılan iki önemli alaşım grubu, deformasyonla sertleştirilebilir Al-Mg (-Mn) ve ısıl işlemle sertleştirilebilir Al-Mg-Si alaşımlarıdır.



Şekil 1.3. Hunter ikiz merdane döküm makinasının şematik görünümü [Erdoğan, 2002].



Şekil 1.4. Döküm merdaneleri ve sıvı metal besleme sisteminin şematik gösterimi [Erdoğan, 2002].



Şekil 1.5. Sıvı metalin tip ucundan çıkarak döküm merdaneleri arasında katılaşmasının şematik gösterimi [Erdoğan, 2002].

Tablo 1.6'da, otomotiv sanayinde kullanılan başlıca alüminyum levha alaşımlarının kimyasal kompozisyonları ve mekanik özellikleri verilmektedir [Zeytin, 2000]. Al-Mg alaşımlarının başlıca avantajı, yüksek mukavemet değerleri ile birlikte optimum "şekil-verilebilirlik" göstermeleridir. Bu özelliklerini, aynı zamanda yüksek deformasyon sertleşmesi karakterine yol açan katı eriyik sertleşmesine borçludurlar. Al-Mg-Si alaşımlarında ise, yaşlanma sertleşmesi karakteri sayesinde yaşlandırma işlemi ile elde edilen yüksek mukavemet ile birlikte, yaşlandırma işlemi öncesinde varolan ısıl kararlılık ve yeterli şekillendirilebilirlik avantajlı olmaktadır.

Tablo 1.6. Otomotiv sanayinde kullanılan başlıca alüminyum levha alaşımlarının kimyasal kompozisyonları ve mekanik özellikleri [Zeytin, 2000].

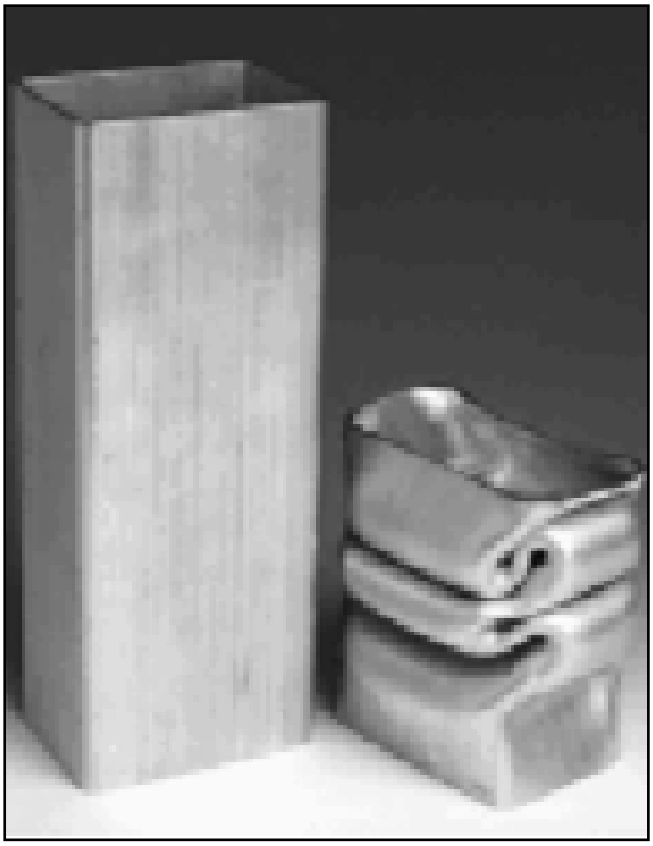
Alaşım Grubu	**Alaşım**	**Kimyasal Kompozisyon, %ağ**				**Mekanik Özellikler**		
		Si	**Cu**	**Mn**	**Mg**	**Çekme (MPa)**	**Akma (MPa)**	**Uzama (%)**
5XXX	AA5754	0,25	0,10	0,50-1,00	2,40-3,00	230	110	26
	AA5182	0,20	0,15	0,20-0,50	4,00-5,00	270	130	30
	AA5030	0,25	0,50	0,20	3,50-5,00	290	140	30
2XXX	AA2002	0,35-0,80	1,50-2,50	0,20	0,50-1,00	330	180	26
	AA2008	0,50-0,80	0,70-1,10	0,30	0,25-0,50	250	140	28
	AA2036	0,50	2,20-3,00	0,10-0,40	0,30-0,60	340	190	24
	AA2038	0,50-1,30	0,80-1,80	0,10-0,40	0,40-1,00	320	170	25
6XXX	AA6009	0,60-1,00	0,15-0,60	0,20-0,80	0,40-0,80	220	125	27
	AA6010	0,80-1,20	0,15-0,60	0,20-0,80	0,60-1,00	290	165	24
	AA6016	1,00-1,50	0,20	0,05-0,20	0,25-0,60	250	120	30
	AA6111	0,70-1,10	0,50-0,90	0,15-0,45	0,50-1,00	290	160	26

Bu iki grup levha alaşımı arasındaki en önemli fark, haddelenmiş parçalarda, otomobil imalatında boya pişirme işleminde olduğu gibi bir ilave ısıl işlem uygulandığında gözlenen mukavemet değerleri değişimleridir. Bu tür bir işlemle Al-

Mg-Si alaşımlarında çökelme sertleşmesinden kaynaklanan bir mukavemet artışı gözlenirken, Al-Mg alaşımlarında ise, bir miktar toparlanma ile birlikte bir mukavemet düşüşü gözlenmektedir [Kleiner, et al, 2001].

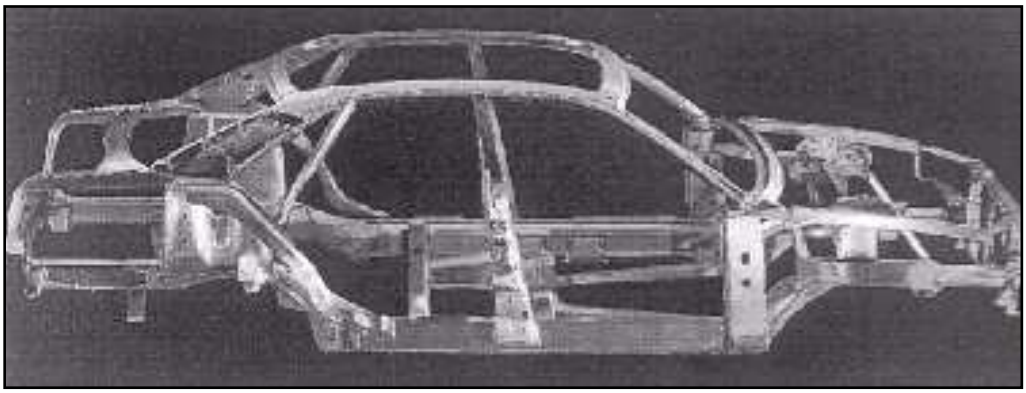
Bir taşıtın güvenliği, temel olarak çarpışma sırasında absorbladığı kinetik enerjiye ve kullanılan malzemenin sağlamlığı (rigidity) ile karakterize edilmektedir. Yapının sağlamlığı sadece kullanılan malzemelere değil, aynı zamanda malzemelerin nasıl bir araya getirildiği ile de bağlantılıdır. Otomobilin gövdesi göz önüne alındığında 0.8 mm kalınlığında çelik levha ile 1.2 mm kalınlığındaki alüminyum levha aynı özellikleri sergilemektedir ve alüminyum yarı yarıya daha hafiftir [eaa.net].

Alüminyum, taşıtlardaki çarpışma etkilerinin azaltılması için kullanılan sistemler için idealdir. Şekil 1.6 da kontrollü bir biçimde ezilmiş alüminyum profil görülmektedir [Bryant, et al, 1998].

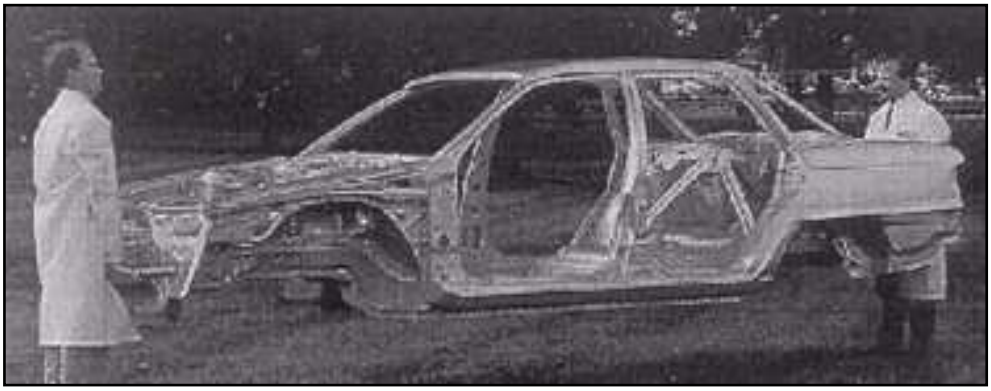


Şekil 1.6. Kontrollü bir biçimde ezilmiş alüminyum profil [Bryant, et al,1997].

Levha üretimi açısından alüminyumun en iyi yanı, fiyatının düşük ve sabit oluşudur [Miller, 2000]. Alüminyum endüstrisi, otomotiv sektörünün gelecekteki gelişimini hedef almıştır. Otomobil iskeletlerinde çelik yerine alüminyum kullanılarak ağırlık %50 oranda azaltılabilmektedir.



Şekil 1.7. Alcoa-Audi A8 de kullanılan ‘space frame’tekniği [Miller, 2000].



Şekil 1.8. Alcan-Ford da kullanılan ‘the conventional sheet monocoque’ tekniği [Miller, 2000].

Alüminyum kullanılan iki tür otomobil iskelet yapısı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi Alcoa-Audi A8 de kullanılan ‘space frame’tekniği (Şekil 1.7) , ikincisi ise Alcan-Ford da kullanılan ‘the conventional sheet monocoque’ tekniğidir (Şekil 1.8).

Bugün 12 ve 8 silindirli motorların hemen tamamı alüminyumdan üretilmektedir. VAW Alüminyum AG'nin bir yan kuruluşu olan EB hassas döküm firması FORD için tamamen alüminyumdan motor üretmektedir. Dillingen'deki fabrikada motor bloğu ve silindir başlığı olarak yaklaşık 40.000

parça/yıl üretim yapılmaktadır. AUDİ bugün kasa üretiminde alüminyumu çok avantajlı görmektedir. AUDİ A8 arabanın kasası Space-Frame tekniği ile üretilmiştir. (Şekil 1.7). AUDİ AG'nin yaptığı hesaplarda primer alüminyum üretmek için gerekli enerji, bir otomobilin 55.000-79.000 km'de sağlanacak toplam yakıt tasarrufu ile amorti edilmektedir. Geri dönen alüminyumun katkısı ile amortisman süresi daha da kısalmaktadır. Öyle ki, daha ilk kilometrelerde enerji blançosu geleneksel çelik malzemelere göre çok daha ekonomik olmaktadır [Zhen, et al, 1997].

Günümüzde kasa üretiminde en ileri tekniklerden biri “space-frame” tekniğidir. Bu teknikle üretilen bir otomobilde gövdenin tamamının alüminyum olması mümkündür. Bu teknikle düz ve eğri profiller ekstrüzyon ile köşe ve bağlantı yerleri basınçlı döküm ile üretilmektedir. Bu tekniğin önemli avantajlarından biri birbirine monte edilecek parça sayısının az olmasıdır. Bu sayede montaj ve imalat süreci pratik ve ekonomiktir. AUDİ A8 toplam 245 parçadan oluşmaktadır. Bunların %63’ü levhalar, %18’i ekstrüzyon profilleri ve %19’u basınçlı ve kokil döküm parçalardan oluşmaktadır. “Space-frame” tekniği ile alüminyumdan üretilen bir kasada bir çelik kasaya göre bağlantı elemanlarından %30 tasarruf edilmektedir [Kang, et al, 1996].

Binek otolarında “space-frame” tekniği ile üretilen kasalarda şu özelliklerin bulunması gereklidir:

- Mümkün olduğunca düşük ağırlık,
- Dayanıklı bir sürücü kabini; küçük kazalar minimum zararla atlatılmalıdır, meydana gelen hasarlar en düşük maliyetle onarılabilmelidir,
- Yüksek statik sarsılma dayanımı (torsiyon dayanımı): hafif yapıya rağmen sürüş güvenliğinden fedakarlık edilemez. Sürüş sırasında aktif güvenlik çok önemlidir.
- Yüksek korozyon direnci: Agrasif çevre koşullarında mümkün olduğunca uzun sürelerle onarıma ihtiyaç olmamalıdır.

AUDİ A8’in kasası “space-frame” tekniği ile tamamen alüminyumdan üretilmiştir [Miller, 2000]. AUDİ, otomobillerinde aluminyum uygulaması ile yukarıda sıralanan koşulların tümünün sağlandığını rapor etmiştir.

- Teknik detaylar ve yapılan çalışmaların sonuçları AUDİ A8'in beklenildiği gibi daha az yakıt tükettiğini göstermiştir,
- Düşük ağırlık çarpma anında güvenliği azaltmamaktadır. Aksine "space-frame" tekniği ile daha yüksek güvenlik sağlanmaktadır,
- Kolay ve süratle onarılabilmektedir. Yapılan çalışmalarda aluminyum kasalarda ortaya çıkan hasarların tamirinin çeliğe göre önemli bir sorun yaratmadığını ortaya koymuştur.

Alüminyum alaşımlarının otomotiv uygulamalarındaki kullanım alanları oldukça geniştir. Araba gövde panellerinde AA6016 ve AA6111 alaşımları tercih edilmektedir. AA6016 alaşımları Avrupa'da araba gövde panellerinde, AA6111 alaşımları ise genellikle Kuzey Amerika'da tercih edilmektedir. AA6111 alaşımı AA6016 alaşımına göre daha fazla Cu ilavesi içermektedir(0.5-0.9%Cu). Deformasyon sertleşmesi ve yaşlanma karakterini olumlu etkileyen Cu ilavesi ile özellikler daha da iyileştirilebilir. Ancak Cu'nun korozyon dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkisi vardır [Uchida, et al, 1996].

Bu çalışmada AA6016 alaşımlı levha incelendiği için ilerleyen bölümlerde AA6016 alaşımlarının otomobil sektöründeki kullanımına yer verilmiştir.

1.6 AA6016 Alaşımlarının Otomobil Sektöründe Kullanımı

AA6016 alaşımları Avrupa'da araba gövde panellerinde, özellikle dış panellerde, Kuzey Amerika'da ise genellikle AA6111 alaşımları tercih edilmektedir. AA6111 alaşımı AA6016 alaşımına göre daha fazla Cu ilavesi içermektedir(0.5-0.9%Cu). Deformasyon sertleşmesi ve yaşlanma karakterini olumlu etkileyen Cu ilavesi ile özellikler daha da iyileştirilebilir. Ancak Cu'nun korozyon dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkisi vardır ve bu nedenle sınırlı tutulmalıdır [Saga, et al, 1996].

Al-Mg alaşımlarında boya pişirme tavındaki mukavemet kaybı ve gerdirme sırasında oluşan *Luders* çizgileri nedeniyle, otomobil gövdesi dış panel uygulamalarında ilk tercih Al-Mg-Si alaşımlarıdır. Bu alaşımlarda levha yüzeyinde

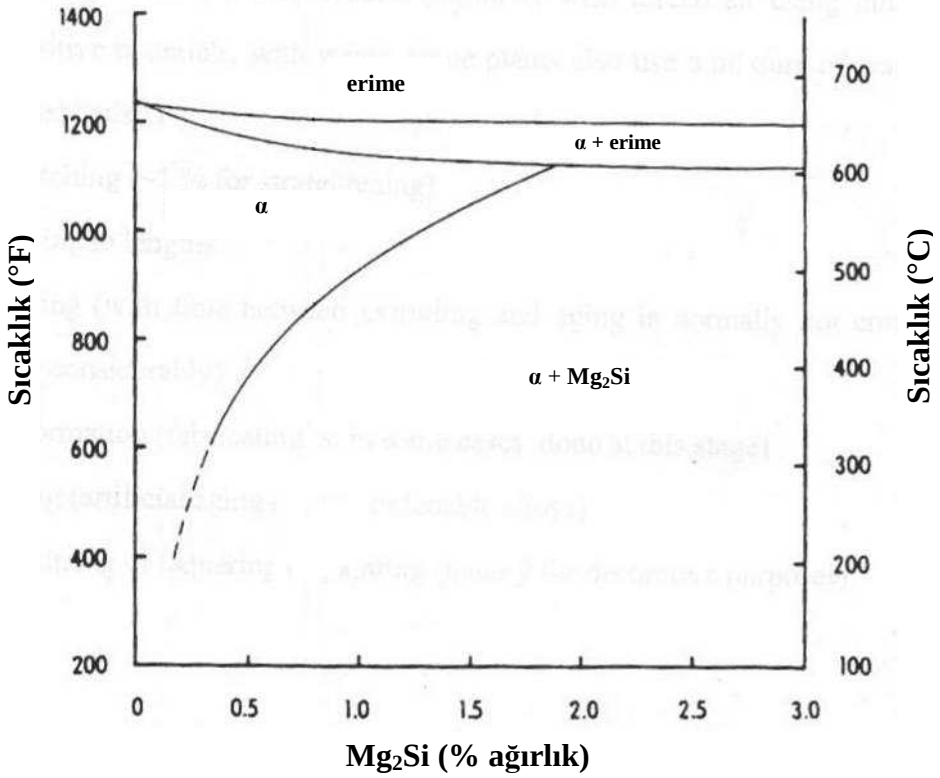
Luders çizgileri oluşmadığı gibi boya pişirme işleminde mukavemet düşmeyip artmaktadır. Alüminyum alaşımlı dış panellerde beklenen özellikler, şekillendirme işlemleri için gerekli görülenlerden oldukça farklıdır. Düşük akma dayanımlı (<130 MPa) ve sünek bir malzeme şekillendirme işleminden sonra kalıcı şekil elde etme yönünden oldukça başarılıdır. Oysa, uygulamada bu tür bir malzemede, düşük levha kalınlıklarında bile yüksek bir darbe direnci elde etmek için, daha yüksek bir akma mukavemeti (<200MPa) istenir. Bu beklentilerin karşılanabilmesi için otomobil üreticileri, Al-Mg-Si alaşımlarının yaşlanma ile sertleşme yeteneğinden yararlanırlar. Bu alaşımlar çözeltiye alma sıcaklığından soğutulduklarında rahatlıkla şekillendirilebilir ve daha sonra uygun bir sıcaklıkta ısıl işlem uygulanarak istenilen mukavemet değerlerine sertleştirilebilirler [Matsuda, 1999].

1.6.1 Çözeltiye Alma Tavı

Çözeltiye alma tavı, çökelme sertleşmesi sürecinde ilk basamaktır. Dövme veya döküm halindeki malzeme, çözen ile çözünen arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve tek biçimli bir katı çözelti elde edilinceye kadar bu sıcaklıkta bekletilir [Smith, 2001].

AA6000 serisinde, Mg ve Si birleşerek Mg_2Si'i fazını oluştururlar. Mg_2Si fazı sertleşmeyi sağlayan fazdır [Usta, 2001]. İç yapıya dağılmış Mg_2Si partikülleri solvusun üzerindeki bir sıcaklığa çıkıldığında, konsantrasyon ve partikül boyutuna bağlı olarak iç yapı içerisinde zamana bağımlı çözünerek Al ile katı çözelti (α) oluştururlar (Şekil 1.9). Solvusun üzerindeki tarif edilen sıcaklık, *çözeltiye alma sıcaklığı*dır.

Üst sıcaklık derecelerinden yavaş soğuma yapılır ise, büyük partiküller çökelir. Solvüs sıcaklığının yukarısından oda sıcaklığına ani soğutma, magnezyum ve silisyumun çözelti içinde kalmasına ve aşırı doymuş bir katı çözelti oluşmasına neden olur. Bu aşırı doymuş katı çözelti, 204°C'nin altındaki bir sıcaklığa çıkarılıp belli süre tutulursa, mikroskobik ölçülerdeki Mg_2Si partikülleri çökelir ve "çökelme sertleşmesi" (precipitation hardening) etkisi ile malzeme sertleşir [Ulucak, 2000].



Şekil 1.9. Al- Mg_2Si faz diyagramı [Usta, 2001].

Isıl işlemle sertleştirilebilir Al-Mg-Si alaşımlarına öncelikle çözeltiye alma tavı uygulanmaktadır. Çözeltiye alma tavı levha mukavemet ve şekil-verilebilirliğini etkileyen en önemli proses aşamasıdır [Ulucak, 2000]. Tav sıcaklığının artması ile çözünürlük sınırları değişeceğinden daha yüksek mukavemet ve sınırlı şekil-verilebilirlik elde edililir. Çözeltiye alma tavı ile çökelmiş olan tüm partiküller tekrar alüminyum matrise alınır. Yine bu nedenle, yaşlanma sertleşmesi davranışı da etkilenecektir. Bir stabilizasyon ısıl işlemi uygulanmamış Al-Mg-Si alaşımları için oda sıcaklığında gerçekleşen doğal yaşlanma da çok önemlidir. Oda sıcaklığındaki doğal yaşlanma süresince "GPI zonu" adı verilen çökeltiler oluşmaktadır. Bu çökeltiler, oda sıcaklığında bekleme sürecinde mukavemetin artmasına, şekil verilebilirliğin düşmesine yol açarlar [Huppert, et al, 1994].

Düşük çözeltiye alma sıcaklıkları uygulandığında, şekil verilebilirlik en üst düzeylerdedir. Ancak bu durumda da Mg_2Si çökelmesi sınırlı kaldığından, yapay yaşlandırma işlemi ile elde edilebilecek mukavemet artışı fazla olmayacaktır.

Isıl işlemle sertleştirilebilen Al-Mg-Si alaşımlarının yüzey kalitesi konusunda kaygı verici bir özellikleri yoktur. Ayrıca, ürün boya pişirme aşamasından önce şekil verilebilir ve tav sonrasında mukavemet artışı göstermektedir. Mukavemet, şekil verilebilirlik ve doğal yaşlanma davranışlarında bir değişkenlik vardır, fakat bu olumsuz özellikleri uygun çözeltiye alma tav işlem parametreleri seçimi ile en aza indirilebilir.

1.6.2 AA6016 Alaşımlarının Kimyasal Bileşimi ve Mekanik Özellikleri

Tablo 1.7'de görüldüğü gibi AA6016 alaşımlarında yüksek miktarda Si bulunmaktadır [eaa.net]. Si ve Mg birleşerek Mg_2Si oluşturur. Mg_2Si alaşımın mukavemetinin artmasını ve daha yüksek bir sertlik değerine sahip olmasını sağlar. Mg'un bağlanması için gerekli olandan daha fazla Si'in (excess Si), yaşlanma sertleşmesi ve şekil verilebilirlik üzerinde olumlu etkisi vardır [Usta, 2001]. Alaşımda açığa çıkan Si miktarı aşağıdaki formül yardımıyla bulunur;

$$Artan_{Si} = Si - (Mg/1.73) - (Fe + Mn)/3$$

Tablo 1.7. AA6016 alaşımlarının kimyasal bileşimi (%ağırlık) [eaa.net].

Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti
1-1,5	0,25-0,6	<0,2	<0,5	<0,2	<0,2	<0,15

Tablo 1.8'de AA6016 alaşımlarının temper değerlerine karşılık mekanik ve sertlik değerleri özellikleri gösterilmektedir [eaa.net].

Tablo 1.8. Temper değerlerine karşılık AA6016 alaşımlarının mekanik özellikleri ve sertlik değerleri [eaa.net].

Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama Değeri (%)	Sertlik (HV)
0	50	100	26	25
T1	90	150	24	45
T4	90	160	20	55
T5	185	220	13	80
T6	215	245	12	90

1.7 Çalışmanın Amacı

AA6016 alaşımı otomobil gövde uygulamalarında tercih edilir. AA6016 alaşımlarının otomobil gövde uygulamalarında tercih edilmesinin nedenleri; şekillenme prosesinden sonra yüzey kalitesinin iyi olması, boya pişirimi sonrasında yüksek termal kararlılık ve boya pişirimi cevabı göstermesidir. Boya pişiriminin kısa süreli ve düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi nedeniyle AA6016 alaşımlı malzeme az miktarda yapay yaşlanmaya uğrar. Boya pişirim sonrası (T8X) ile boya pişiriminden önce(T4/T4P) malzemenin akma mukavemetindeki değişim boya pişirim cevabı (paint bake response) olarak isimlendirilir. Şekillenme prosesi sonrasında, boya pişirimi esnasında mukavemet değerinin artması şekillenme davranışını olumlu yönde etkiler [Dutta, et al, 1991].

Çözeltiye alma tavı sonrası doğal yaşlanma süresi, T4P ve T8X kondisyonları üzerinde önemli rol oynar [Birol, 2003]. T4P, AA6016 alaşımlı levhanın boya pişirimine girmeden önceki kondisyonudur (ön yaşlandırma + doğal yaşlanma). T8X kondisyonu ise tipik boya pişirimi işlemini ifade eder (180°C-30 dk).

AA6016 alaşımları T4P temperinde çok iyi şekillenebilme kabiliyetine, boya pişirimi işleminden sonra ise yüksek mukavemete sahiptirler. Bu koşulların sağlanabilmesi için uygulamada boya pişirimi işlemi çözeltiye alma tavından kısa

süre sonra yapılmalıdır. Ancak endüstriyel uygulamada bunu gerçekleştirmek oldukça güçtür, malzemenin doğal yaşlanmaya uğraması kaçınılmazdır. Bu durum boya pişirimi işlemi sonrasında düşük mukavemet elde edilmesine neden olur. Doğal yaşlanma etkisinin boya pişirimi cevabı üzerindeki olumsuz etkisini gidermek için malzemeye düşük sıcaklıklarda ön yaşlandırma tavı uygulanmaktadır.

Tablo 1.9'da bu çalışmada kullanılan AA6016 alaşımlı levhanın çözeltiye alma tavından hemen sonra ve 1 hafta doğal yaşlanmış örneklerinin mekanik özellikleri yer almaktadır [Birol, 2003].

Tablo 1.9. Doğal yaşlanma süresinin AA6016 alaşımlı levhanın mekanik özellikleri üzerine etkisi [Birol, 2003].

İŞLEM	**Akma Mukavemeti, MPa**	**Çekme Mukavemeti, MPa**	**Uzama Değeri, %**
Çözeltiye alma tavından hemen sonra	81	193	27.0
1 hafta doğal yaşlanma, boya pişiriminden önce, T4	121	237	26.5
Boya pişiriminden sonra,T8X	156	242	23.4
Boya pişirim cevabı (PBR)*	**35**		

* paint-bake response: PBR = Akma Mukavemeti^{T8X} – Akma Mukavemeti^{T4}

AA6016 alaşımlı levhanın akma ve çekme mukavemet değerlerinde 1 hafta doğal yaşlanma süresinden sonra bir hayli artış görülmektedir. Uzama değerindeki değişim ise azdır. 1 hafta doğal yaşlanmaya tabi tutulmuş AA6016 alaşımlı levhanın boya pişirimi işleminden sonraki akma, çekme mukavemet ve uzama değerleri sırasıyla, 156, 242 MPa ve %23.4'tür. Ayrıca doğal yaşlanan numunenin boya pişirim cevabı oldukça düşüktür (35 MPa).

AA6016 otomobil gövde uygulamaları için düşük akma dayanımı (<130 MPa), düşük geriye yaylanma (springback) ve yüksek şekillenebilirlik, boya pişiriminden sonra ise 200 MPa'dan yüksek akma dayanımı istenmektedir [Birol, 2003]. Ancak AA6016 alaşımlı malzeme boya pişiriminden sonra bu özelliklere sahip değildir. Bu nedenle yaşlanma kinetiğini geliştirmek, istenilen mekanik özellikleri sağlamak ve

yüksek boya pişirim cevabı elde etmek için malzemeye ön yaşlandırma tavı uygulanmalıdır. Ön yaşlandırma tavı sadece boya pişirim cevabını iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda mekanik özelliklerin stabilize edilmesini ve oda sıcaklığında bekleme süresince sertleşmenin önlenmesini sağlar [Jacobs, 1972].

Ön yaşlandırma tavı, doğal yaşlanma sırasında oluşan küme ve GPI zonlarının çözünmesini sağlar. 180°C civarında, yani boya pişirimi sıcaklığında gerçekleştirilen ön yaşlandırma işlemi malzemeyi kararlı hale getirir. Aşırı doymuş katı çözelti azaltılır ve GPII çekirdekleri oluşur. Azaltılmış aşırı doymuşluk doğal yaşlanmayı önler ve kararlı çekirdekler boya pişirimi boyunca yaşlanma kinetiğini arttırırlar [Zhen, 1998].

Bu çalışmada, ikiz merdane döküm tekniği (TRC) ile üretilen AA6016 alaşımlı malzemede doğal yaşlanma süresinin pişirim sertleşmesi cevabına etkisi incelenmiştir.

Bu bulgular ışığında;

Doğal yaşlanma süresi malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle yaşlanma kinetiğini geliştirmek, istenilen mekanik özellikleri sağlamak, yüksek boya pişirim cevabı elde etmek ve doğal yaşlanma süresinin boya pişirimi üzerine olumsuz etkisini gidermek için malzemeye ön yaşlandırma tavı uygulanmalıdır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Deneysel Akım Şeması

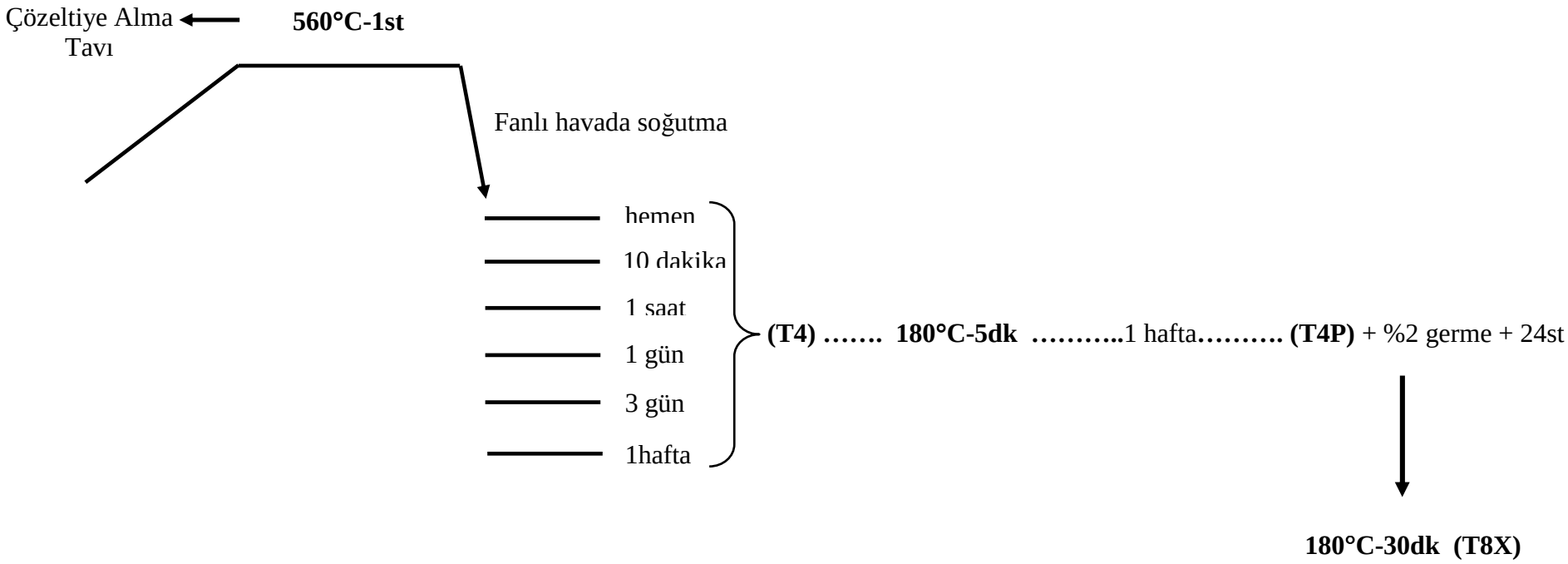
Bu çalışmada Assan Alüminyum tarafından 1mm kalınlığa soğuk haddelenmiş ve ikiz merdaneli döküm tekniği ile üretilen 6016 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşımın kimyasal bileşimi tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Bu çalışmada kullanılan AA6016 alüminyum alaşımlı levhanın kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).

Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Cr	Ti	Al
1.147	0.471	0.269	0.087	0.028	0.002	0.035	97.93

6016 alüminyum alaşımlı levhaya 560°C-1st çözeltiye alma tavı uygulanmış ve fan ile 3 °C/sn hızda oda sıcaklığına soğutulmuştur.

Doğal yaşlanma süresinin pişirim sertleşmesi cevabına (bake hardening response) etkisinin incelenmesi için AA6016 alaşımlı levha örnekleri ön yaşlandırma tavından önce farklı sürelerde oda sıcaklığında doğal yaşlanmaya bırakılmışlardır. Bu numunelerden sadece biri çözeltiye alma tavından hemen sonra 180°C-5dk ön yaşlandırma tavına tabi tutulmuş (doğal yaşlanmaya uğramayan numune), diğerlerine ise 10 dakika, 60 dakika (1 saat), 1440 dakika (1 gün), 4320 dakika (3 gün) ve 10080 dakika (1 hafta) olmak üzere oda sıcaklığında doğal yaşlandıktan sonra 180°C-5dk ön yaşlandırma tavı uygulanmıştır. 180°C-5dk ön yaşlandırma tavından sonra bekleme süresi 1 haftadır (T4P). Numunelere %2 germe uygulandıktan sonra oda sıcaklığında 24 saat beklemiş, son olarak da 180°C-30dk boya pişirimi işlemine tabi tutulmuşlardır (T8X). Numunelere %2 germe uygulanmasının nedeni; numunelerin şekillendirme prosesi sırasında verilen deformasyon miktarı kadar deformasyona uğramasını sağlamaktır. AA6016 alaşımlı levhanın şekillendirme prosesinden 24 saat sonra boya pişirimine alınmasının nedeni ise işletme şartları ile uyumlu olmasını sağlamaktır. Deneysel akım şeması şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Deneysel akım şeması.

2.2. Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri doğal yaşlanma süresinin boya pişirimi öncesi ve sonrasına etkisini, küme ve zonların oluşumunu, çökelme ve çözünme aktivitelerini belirlemek için yapılmıştır.

Mikrosertlik ölçümü için FutureTech FM-700E model mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır, yük 500 gram, süre ise 15 saniyedir.

2.3. Mekanik Özellik Ölçümleri

AA6016 alaşımlı levhaların mekanik özellikleri boya pişirimi öncesi ve sonrasında (T4/T4P ve T8X temperlerinde) en yüksek boya pişirim cevabının elde edildiği durumu belirlemek için ölçülmüşlerdir.

Çekme testi için Zwick Z050/TN2A model çekme testi cihazı kullanılmıştır. 50 mm çap uzunluğunda numuneler hadde yönünden alınmışlardır, çekme hızı 10 mm/dk'dır. Numunenin çap uzunluğu (gauge length) ise 50 mm'dir.

2.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Tekniği

DSC tekniği, sıcaklığın belirli bir program çerçevesinde arttırılması ve sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak numunede meydana gelen yapısal dönüşümlerin çevre ile ısısal etkileşimlerinin (ısı alış-verişi) ölçülmesi esasına dayanır. Bu ölçüm, DSC hücresinde numunenin bulunduğu numune kabı ile içi boş olan referans kabın arasında ısı dengesi gözetilerek yapılır. Cihaz, numunedeki ısı değişimlerini numune ve referansın sıcaklıklarını eşit seviyede tutarak kaydeder. Bu iki sıcaklığı eşit tutabilmek için numune veya referans kaba sağlanan ve sürekli kaydedilen ısı akışı gerçekleşen yapısal dönüşümde çevreden alınan veya çevreye verilen ısı enerjisi ile orantılıdır.

DSC tekniği ile AA6016 alaşımlı levhada çözeltiye alma tavından sonra doğal yaşlanma süresinin çökelme ve çözünme davranışlarına etkisi incelenmiştir.

DSC deneyleri için AA6016 alaşımlı levhadan panç işlemi ile 3.5 mm çapında numuneler hazırlanmıştır. Her bir numunenin ağırlığı 23 mg'dır. DSC deneyleri Setaram Labysys model DSC ünitesi ile argon atmosferi altında, 20°C-600°C sıcaklıkları arasında sürekli ısıtma modunda, 10°C/dk tarama hızında yapılmışlardır. Referans krozesinde 6016 alaşımlı örnek ile aynı kütlede saf Al kullanılmıştır. Bu deneyden elde edilen termogramdan, fırından kaynaklanabilecek ısıl etkileri yok etmek için her iki krozenin de boş bırakılarak yapıldığı boş test çıkarılmıştır.

2.5. Optik ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları

Optik ve taramalı elektron mikroskobu çalışmaları DSC termogramlarından elde edilen sonuçlara dayanarak yapılmışlardır. Termogramlardaki ekzotermik piklerin, yani çökelme reaksiyonlarının oluştuğu sıcaklık değerleri belirlenmiştir. AA6016 alaşımlı örneklere belirlenen bu sıcaklık değerlerinde (250ºC, 300ºC, 350ºC ve 400ºC) 30 dakika izotermal tavlar yapılmış, fanlı havada 3 °C/sn hız ile oda sıcaklığına soğutulmuşlardır. İzotermal tav uygulanan 6016 alaşımlı levha örnekleri standart metalografik tekniklerle hazırlanmıştır: SiC ile zımparalama ve 3 mikron elmas pasta ile kaba parlatmadan sonra kolloidal silika ile ince parlatma yapılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler 5%NaOH çözeltisi ile dağlanıp OLYMPUS BX51M model optik mikroskop ile incelenmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu çalışmasının amacı; her bir sıcaklıkta oluşan fazların morfolojilerini inceleyebilmektir. Yapılan incelemeler Jeol 6335F model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. SEM çalışmaları için numuneler %25 HSO_4, %70 H_3PO_4 ve %5 HNO_3 asitlerinin karışımıyla elde edilen çözelti ile dağlanmışlardır.

3. SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

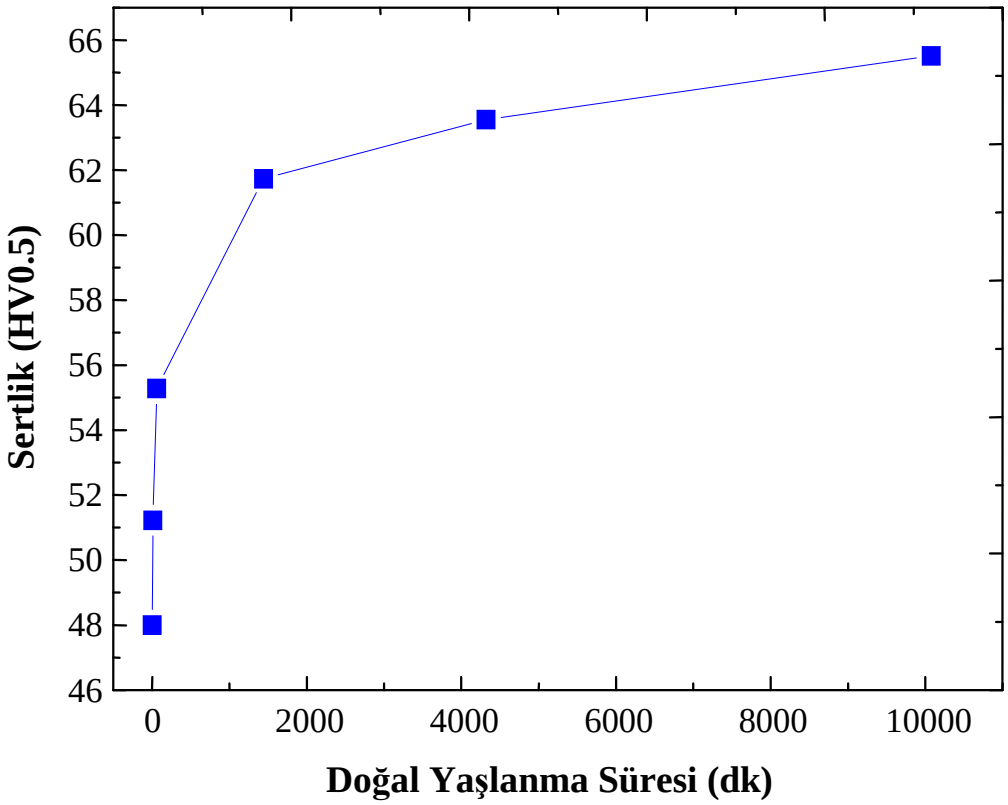
AA6016 alaşımlı levhanın ön yaşlandırma tavından önce doğal yaşlanma süresine bağlı olarak ölçülen mikrosertlik değerleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. AA6016 alaşımlı levhanın doğal yaşlanma süresine bağlı olarak ölçülen mikrosertlik değerleri (On yaşlandırma tavından önce).

Süre (dk)	**Ön yaşlandırma Tavından Önce**
	Sertlik (HV0.5)
0	48,0
10	51,22
60	55,28
1440	61,73
4320	63,55
10080	65,51

Tablo 3.1'e göre AA6016 alaşımlı levhanın sertlik değerlerinde çözeltiye alma tavından sonra doğal yaşlanma süresinin artması ile artış görülmektedir. Bunun nedeni oda sıcaklığındaki bekleme süresinde oluşan çökeltilerdir. Oda sıcaklığındaki doğal yaşlanma sırasında küme ve GP zonları oluşmaktadır. Oluşan küme ve zonlar sertlik değerinin artmasına katkıda bulunurlar. GP zonlarının oluşumu dislokasyon hareketini zorlaştırmaktadır. Bunun nedeni; GP zonlarının ince ve çok küçük çökeltiler olmasıdır. AA6016 alaşımındaki ince çökeltiler, deformasyon sırasında dislokasyonları ya çökeltileri kesmek ya da etrafından dolanmak zorunda bırakarak onların hareketini engeller. Deformasyon sırasında dislokasyonların hareketinin sınırlanmış olmasından dolayı alaşımın sertlik değeri artmaktadır. Şekil 3.1'de doğal

yaşlanma süresine bağlı olarak olarak sertlik değerindeki değişimin grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Doğal yaşlanma süresine bağlı olarak sertlik değerindeki değişimin grafik olarak gösterimi.

Mekanik Özellikler Ölçüm Sonuçları

Tablo 3.2'de doğal yaşlanma süresinin 6016 alaşımlı örneğin boya pişiriminden önce (T4P) ve sonra (T8X) mekanik özelliklerine etkisi yer almaktadır.

Tablo 3.2. Doğal yaşlanma süresinin 6016 alaşımlı örneğin boya pişiriminden önce (T4P) ve sonra (T8X) mekanik özelliklere etkisi.

Doğal Yaşlanma Süresi (dk)	**Boya Pişiriminden önce (T4P)**		**Boya Pişiriminden sonra (T8X)**		**PBR* (MPa)**
	Akma (MPa)	**Çekme (MPa)**	**Akma (MPa)**	**Çekme (MPa)**	
0	125	226	245	299	120
10	110	220	223	284	113
60	110	223	185	256	75
1440	121	232	166	248	45
4320	122	233	160	246	38
10080	123	235	157	247	35

* paint-bake response: PBR = Akma Mukavemeti^{T8X} – Akma Mukavemeti^{T4P}

AA6016 alaşımlarındaki çökelme davranışı;

Aşırı doymuş çözelti → GPI kümeleri→ GPII kümeleri / yarı kararlı β″ (Mg_2Si) fazı→ yarı kararlı β′ (Mg_2Si) fazı→ Si partikülleri → kararlı β (Mg_2Si) fazı

şeklindedir [Haan, et al, 1998]. AA6016 alaşımlarındaki çökelme davranışı bölüm 3.4'te detaylı olarak anlatılmaktadır.

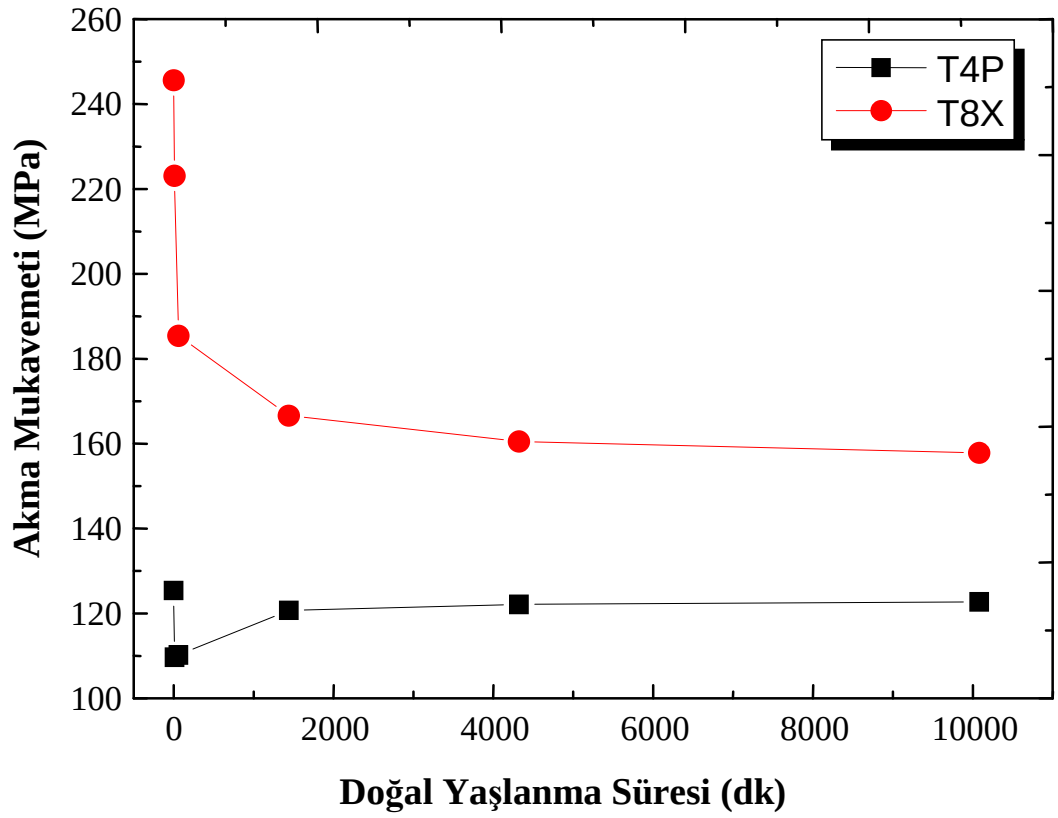
AA6016 alaşımlı levhada 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavından önceki doğal yaşlanma süresinin T4P ve T8X kondisyonlarındaki akma mukavemetine etkisi Şekil 3.2'de grafik olarak gösterilmektedir. Çözeltiye alma tavından hemen sonra 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavı yapıldığında, sadece β″ çekirdekleri oluşmuştur. β" ın oluşma kinetiği yüksektir. Bunun nedeni; çözeltiye alma tavı sıcaklığında (560°C) oluşan boşluk (vacancy) sayısı ani soğutmadan dolayı yarı kararlı olarak oda sıcaklığında korunmaktadır. Oluşan boşluk (vacancy) sayısı difüzyonun kolaylaşmasını sağlamaktadır. AA6016 alaşımlı levhada çözeltiye alma tavından hemen sonra ön yaşlandırma tavı uygulandığı durumda β″ çekirdeklerinin oluşması sonucunda T4P kondisyonundaki akma mukavemeti (125 MPa) doğal yaşlanmış numunelere nazaran

yüksek değere sahiptir. Bu durumda T8X kondisyonunda da en yüksek akma mukavemeti (245 MPa) ve en yüksek boya pişirim cevabı (120 MPa) elde edilmektedir. Ancak bu durum uygulamada tercih edilmemektedir. Nedeni; boya pişirimi öncesindeki (T4P) akma dayanımı değeri, pres formu sırasında malzemenin şekillenebilirliği açısından oldukça yüksektir (125 MPa).

10 dakika doğal yaşlanmış AA6016 alaşımlı numunede T4P ve T8X kondisyonlarının her ikisinde de akma mukavemet değerleri düşmektedir (Şekil 3.2). 10 dakika doğal yaşlanmış AA6016 alaşımlı numuneye uygulanan 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavında, doğal yaşlanma sırasında oluşan küme ve zonlar (GPI) çözünmektedirler. Bu durum T4P ve T8X kondisyonlarındaki akma mukavemet değerlerinin düşmesinin nedenidir. 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavından önce 10 dakika doğal yaşlanmış numunedeki T4P ve T8X kondisyonlarındaki mukavemet değerleri sırasıyla 110 MPa ve 223 MPa'dır.

Doğal yaşlanma süresinin 60 dakikadan 1440 dakikaya çıkması ile akma mukavemet değerinde belirgin bir artış görülmektedir (Tablo 3.2). Oda sıcaklığında oluşan küme ve zonlar (GPI) doğal yaşlanma süresinin artması ile belirli bir kritik boyuta ulaşmaktadırlar, böylelikle 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavında çözeltiye geçmeleri zorlaşmaktadır. Bu durum akma mukavemet değerindeki artışın nedenidir. 1440 dakikadan itibaren doğal yaşlanma süresinin artması ile AA6016 alaşımlı malzemenin mukavemet değerinde doğal yaşlanma süresine bağlı olarak az artış gözlenmiştir. Doğal yaşlanma süresinin 1440 dakikadan fazla olduğu durumlarda AA6016 malzemenin akma mukavemet değeri stabilize olmaktadır. (Tablo3.2).

Ön yaşlandırma tavından önce doğal yaşlanma süresinin artması ile T8X kondisyonunda akma mukavemetinde azalma gözlenmektedir (Tablo3.2). Doğal yaşlanma süresinde oda sıcaklığında oluşan küme ve zonlar (GPI) ön yaşlandırma tavı ile çözünemedikleri için boya pişirimini olumsuz etkiler, malzemenin boya pişirimi sonrasında yumuşamasına neden olurlar.



Şekil 3.2. Doğal yaşlanma süresinin 6016 alaşımlı örneğin boya pişiriminden önce (T4P) ve sonra (T8X) mekanik özelliklere etkisi grafik olarak gösterimi.

Boya pişiriminden sonra (T8X) AA6016 alaşımlı levhanın akma ve çekme dayanımı 60 dakika doğal yaşlanmaya kadar keskin bir düşüş göstermektedir. 1440 dakikaya doğru akma mukavemetindeki düşüş azalır ve 1440 dakikadan sonra stabilize olur. Ön yaşlanmış numunede doğal yaşlanma süresine bağlı olarak oda sıcaklığında oluşan küme ve zonlar (GPI) boya pişirim cevabını olumsuz yönde etki eder. Boya pişirimi sırasında β'' fazının oluşumundan önce doğal yaşlanma sırasında oluşan küme ve zonların çözeltiye alınmış olması gerekmektedir. Doğal yaşlanma süresinin artması ile oda sıcaklığında oluşan küme ve zon oluşumu artar. Bu durum boya pişirimi sonrası akma ve çekme mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır.

Çözeltiye alma tavından sonra hemen ön yaşlandırma yapılan AA6016 alaşımlı örneğin boya pişirim öncesindeki (T4P) ve sonrasındaki (T8X) akma dayanımları en yüksek değere sahiptirler. Doğal yaşlanma gerçekleşmeden ön yaşlandırma tavı uygulandığı için oda sıcaklığında kümelenme ve zon (GPI) oluşumu olmamıştır. Ön yaşlandırma tavında sadece kararlı β″ fazı oluşumu sağlanmıştır.

Doğal yaşlanma süresinin T4P ve T8X kondisyonlarında mekanik özelliklerine etkisi önemlidir. Doğal yaşlanmaya uğramayan AA6016 alaşımlı numunede T4P (125 MPa) ve T8X (245 MPa) kondisyonlarının her birinde en yüksek akma mukavemet dayanımı elde edilmiştir. Doğal yaşlanmanın olmadığı numunede boya pişirim cevabı en yüksek değere sahiptir (120 MPa). Ancak T4P kondisyonundaki akma mukavemeti pres formu sırasında malzemenin şekillenebilirliği açısından oldukça yüksek değere sahiptir

Doğal yaşlanma süresinin artması ile T8X kondisyonundaki akma mukavemet değerleri düşmektedir. Doğal yaşlanma süresinin artması ile boya pişiriminden sonra (T8X) AA6016 alaşımlı malzemede meydana gelen bu yumuşama nedeni ile 60 dakikadan fazla doğal yaşlanma süreleri tercih edilmemelidir.

Sonuç olarak, pres formu sırasında AA6016 alaşımlı malzemenin şekillenebilirliği ve boya pişirimi sonrası malzemenin mukavemet değeri göz önüne alındığında en iyi mekanik özellikler doğal yaşlanma süresinin 10 dakika olduğu durumda elde edilmektedir. Doğal yaşlanma süresinin 10 dakika olduğu durumda AA6016 malzemenin T4P ve T8X kondisyonlarındaki akma dayanımları sırası ile 110 MPa ve 223 MPa’dır.

3.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Tekniği Sonuçları

DSC tekniği ile AA6016 alaşımlı levhada çözeltiye alma tavından hemen ve doğal yaşlanma sürelerinden sonra çökelme ve çözünme davranışları incelenmiştir.

Bir çok çalışmada Al-Mg-Si alüminyum alaşımlarındaki çökelme davranışı geniş kapsamlı olarak araştırılmaktadır. Genelde Al-Mg-Si alaşımlarındaki çökelme davranışı;

Aşırı doymuş katı çözelti (SSSS)→ GPI kümeleri→ GPII kümeleri /yarı kararlı β"(Mg_2Si) fazı→ yarı kararlı β' (Mg_2Si) fazı→ kararlı β (Mg_2Si) fazı

şeklindedir [Zhen, et al, 1998]. Mg-Si kümeleri ile başlayan çökelme reaksiyonu daha yüksek sıcaklık ve sürelerde alüminyum matrisle uyumu değişen yarı kararlı ve kararlı Mg_2Si çökeltilerinin oluşması ile devam eder [Gupta, et al, 1992].

Aşırı doymuş katı çözelti, çözeltiye alma tavından sonra elde edilmektedir. Çözeltiye alma tavından hemen sonra Mg ve Si kümelerinin oluşumu görülmektedir. Mg ve Si kümeleri oda sıcaklığında doğal yaşlanma etkisi ile GP zonlarına dönüşmektedir [Haan, et al, 1998]. GP zonları, GPI ve GPII olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. GPI zonları küresel kümelerdir, belirli bir iç düzende değildirler. GPII zonları ise iğnesel morfolojidedir, belirli bir iç düzene sahiptirler. Bazı araştırmacılar β" fazı ile GPII zonlarını eşit saymaktadır [Gupta, et al, 1995]. Sıcaklık arttığında yarı kararlı iğnesel β" fazı, yarı kararlı çubuksu β' fazına dönüşmektedir. Daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında ise β' çubuklar, eş eksenli kararlı denge fazı β ya dönüşmektedir [Matsuda, et al, 1997].

Standart AA6016 alaşımda Si ve Mg miktarları sırasıyla %1-1,5 ve %0.25-0.6 arasındadır. Mg_2Si çökeltilerinin oluşumu için çözeltideki %Si miktarının küçük bir kısmı kullanılmaktadır. Bunun sonucu olarak açığa çıkan artan (excess) Si miktarı fazladır. Dolayısıyla Mg_2Si dışında Si partikülleri de çökelmektedir. Çözeltideki artan Si şekillenebilme kabiliyetini ve boya pişirim cevabını olumlu yönde etkilemektedir [Gupta, et al, 1995].

Tablo 3.3'de bu çalışmada kullanılan AA6016 alaşımlı levhada artan Si miktarı ve Mg_2Si %leri verilmektedir.

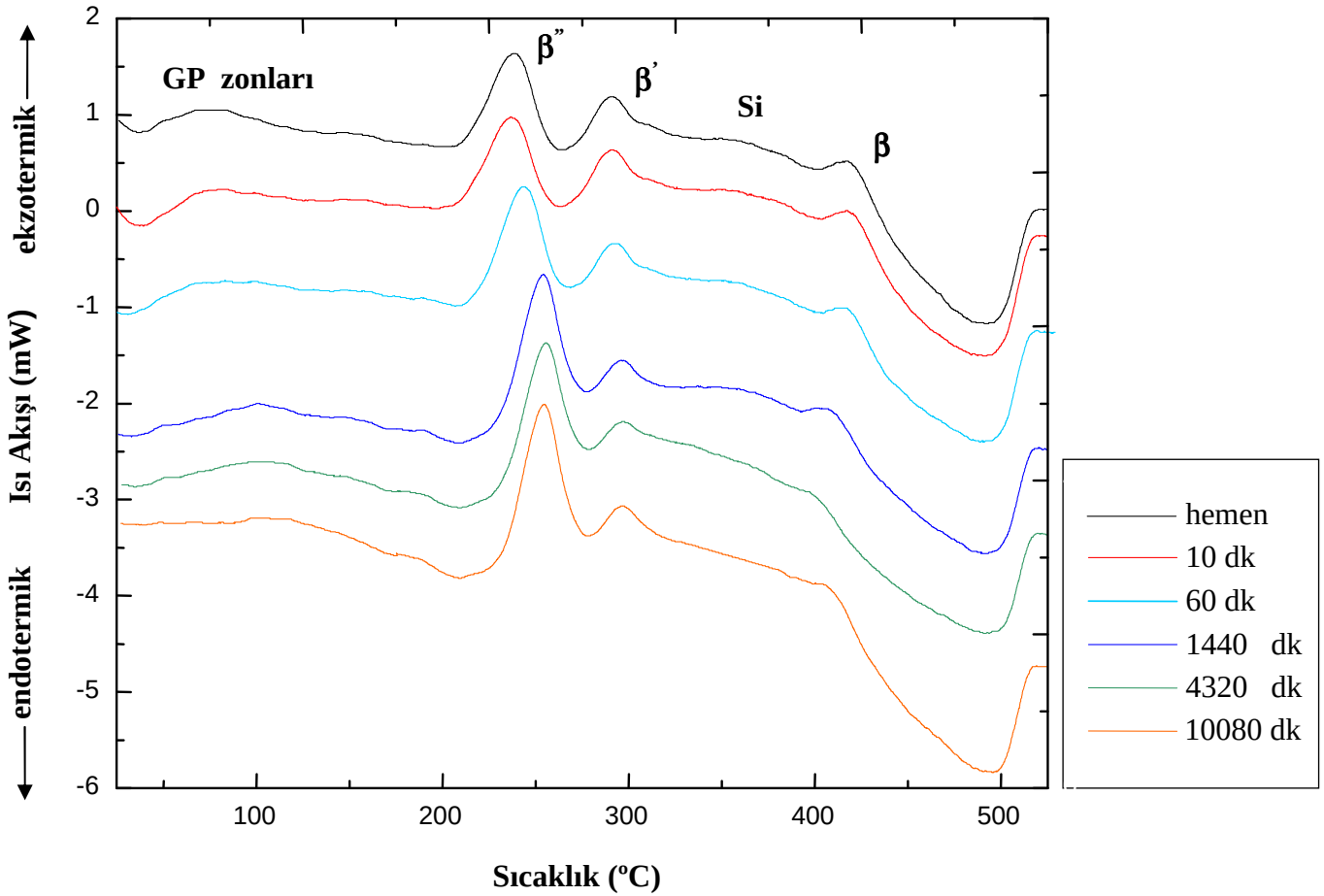
Tablo 3.3. AA6016 alaşımlı levhada artan Si miktarı ve Mg_2Si %leri (% ağırlık).

Si	Mg	Fe	Mn	Al	$Artan_{Si}$	$\%Mg_2Si$
1.147	0.471	0.269	0.087	97.93	0,757	0,739

AA6016 alaşımında kalıntı Si miktarının fazla olmasından dolayı Si partikülleri çökelmektedir. Bu nedenle AA6016 alaşımlarındaki çökelme davranışı;

Aşırı doymuş çözelti → GPI kümeleri→ GPII kümeleri / yarı kararlı β″ (Mg_2Si) fazı→ yarı kararlı β′ (Mg_2Si) fazı→ Si partikülleri → kararlı β (Mg_2Si) fazı şeklindedir [Haan, et al, 1998].

Şekil 3.3'te ön yaşlandırma tavından önce farklı doğal yaşlanma sürelerinde elde edilen AA6016 alaşımlı örneklerin DSC termogramları gösterilmektedir. Çözeltiye alma tavından hemen sonraki örneğe ait termogramda 5 ekzotermik pik (çökelme) ile 1 endotermik pik (çözünme) görülmektedir. 40-110°C aralığındaki ilk ekzotermik pik küme ve zonların oluşumunu göstermektedir. Oda sıcaklığında doğal yaşlanma olmadığı için DSC'de sürekli ısıtma sırasında bu bölgedeki çökelme reaksiyonu şiddetlidir. İkinci ekzotermik pik yarı kararlı β″ fazına aittir (230°C). β″ fazı 6XXX serisi alüminyum alaşımlarında sertleşme fazıdır. β″ fazını izleyen üçüncü ekzotermik pik ise yarı kararlı β' fazıdır. Dördüncü ekzotermik pik Si partiküllerinin çökelmesi ile oluşmaktadır. Besinci ve son ekzotermik pik ise denge β fazıdır. β fazını tüm bu oluşumların çözünmesi ile oluşan endotermik pik izler.



Şekil 3.3. Farklı doğal yaşlanma sürelerinde elde edilen AA6016 alaşımlı örneklerin DSC termogramları (Ön yaşlandırma tavından önce!).

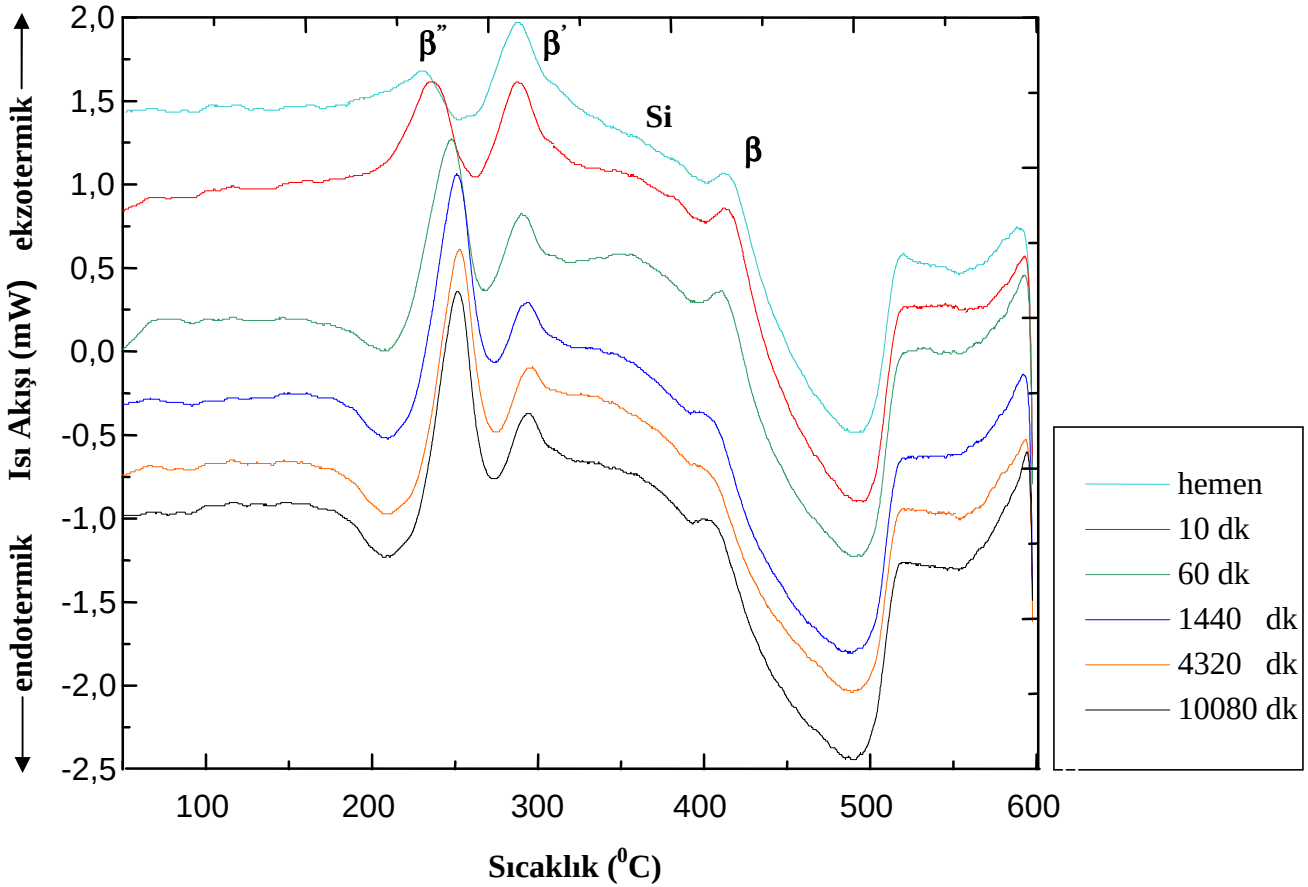
Doğal yaşlanmanın gerçekleşmediği hemen numunesinde düşük sıcaklık bölgesinde görülen ilk ekzotermik pik (80°C civarında) doğal yaşlanma süresinin artması ile gittikçe daralmakta, doğal yaşlanma süresinin 10080 dakika olduğu numunede ise gözlenememektedir. Bunun nedeni; doğal yaşlanma süresince oda sıcaklığında küme ve zonların oluşumu gerçekleşmiş, DSC' de sürekli ısıtma sırasında bu sıcaklık bölgesinde gerçekleşecek reaksiyon tamamlanmıştır. Düşük sıcaklık bölgesindeki endotermik pik (235°C civarı) hemen numunesinde oda sıcaklığında herhangi bir çökelme yaşanmadığı için gözlenememiştir. Doğal yaşlanma süresinin artması ile oda sıcaklığında daha çok çökelme yaşanacağından, düşük sıcaklık bölgesindeki endotermik pik şiddeti doğal yaşlanma süresinin artması ile artmaktadır.

Çözeltiye alma tavından sonra elde edilen aşırı doymuş çözelti, doğal yaşlanma sırasındaki küme ve zon oluşumu ile hafifler, bu durum ekzotermik pikin (GP zonları) zayıflamasına neden olur (80°C civarında). Bu koşullar altında β″ fazı küme ve zonların çözünmesinden sonra oluşmaktadır. Doğal yaşlanma süresinin artması ile 235°C civarı düşük sıcaklık bölgesinde endotermik (çözünme) pik gözlenmektedir ve bu endotermik pik doğal yaşlanma süresinin artması ile kuvvetlenmektedir. β″ fazı, çözünme pikinden sonra oluştuğu için çözünme pikinin şiddetlenmesi β″ pikinin oluşumunu geciktirir, yüksek sıcaklıklara kaymasına neden olur.

Şekil 3.4'te ön yaşlandırma tavından sonra (T4P) farklı doğal yaşlanma sürelerinde elde edilen AA6016 alaşımlı örneklerin DSC termogramları gösterilmektedir.

Çözeltiye alma tavından hemen sonra 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavı yapıldığında, sadece β″ çekirdekleri oluşmuştur. Bu nedenle DSC ile sürekli ısıtma sırasında β″ piki zayıf gözlenmiştir.

10 dakika doğal yaşlanmış numunede β″ doğal yaşlanmayan numuneye nazaran daha şiddetlidir. Tablo 3.2'deki mukavemet değerleri bu durumu doğrulamaktadır.



Şekil 3.4. Farklı doğal yaşlanma sürelerinde elde edilen AA6016 alaşımlı örneklerin DSC termogramları (Ön yaşlandırma tavından sonra!).

Çünkü 10 dakika doğal yaşlanan numuneye uygulanan 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavında, doğal yaşlanma sırasında oluşan küme ve zonlar (GP) çözünmektedirler. β'' pikinin DSC ile sürekli ısıtma sırasında daha şiddetli gözlenmesinin nedeni; doğal yaşlanmış numunede β'' çekirdeklerinin yoğunluğunun düşük olmasıdır.

Ön yaşlandırma tavından önce 60 dakika ve daha fazla doğal yaşlanmaya bırakılan AA6016 alaşımlı levhada, doğal yaşlanma sırasında oluşan küme ve zonların tamamı belirli bir kritik boyuta ulaşırlar. Bu nedenle küme ve zonların ön yaşlandırmadan sonra çözeltiye geçmeleri zorlaşmaktadır. Bu durum Şekil 3.4'deki DSC termogramlarında açıkça görülmektedir. 60 dakikadan daha fazla doğal yaşlanmaya bırakılan AA6016 alaşımlı levhada, doğal yaşlanma süresinin artması ile DSC termogramlarında gözlenen ortak özellik; düşük sıcaklıklarda gerçekleşen çözünme(endotermik) pikinden sonra oluşan β'' yüksek sıcaklıklara kaymasıdır. Bunun nedeni; doğal yaşlanma süresinin artması ile oda sıcaklığında oluşan küme ve zon oluşumunun artması ve düşük sıcaklık bölgesindeki çözünme pikinin şiddetlenmesidir.

DSC termogramlarında da gözlendiği gibi 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavı oda sıcaklığında oluşan ve doğal yaşlanma süresinin artması ile belirli bir kritik boyuta ulaşan küme ve zonların tekrar çözeltiye alınmasına yeterli olmamaktadır. Doğal yaşlanma süresinin artması ile β'' pikinin yüksek sıcaklıklara kayması küme ve zonların daha yüksek sıcaklık değerinde çözeltiye alındığını göstermektedir. Bu durumda ön yaşlandırma tavından önce doğal yaşlanma süresinin artması ile akma mukavemetinde artış gözlenmektedir (Tablo 3.2). Akma mukavemetindeki bu artış pres formu sırasında malzemenin şekillenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir

3.4 Optik ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları Sonuçları

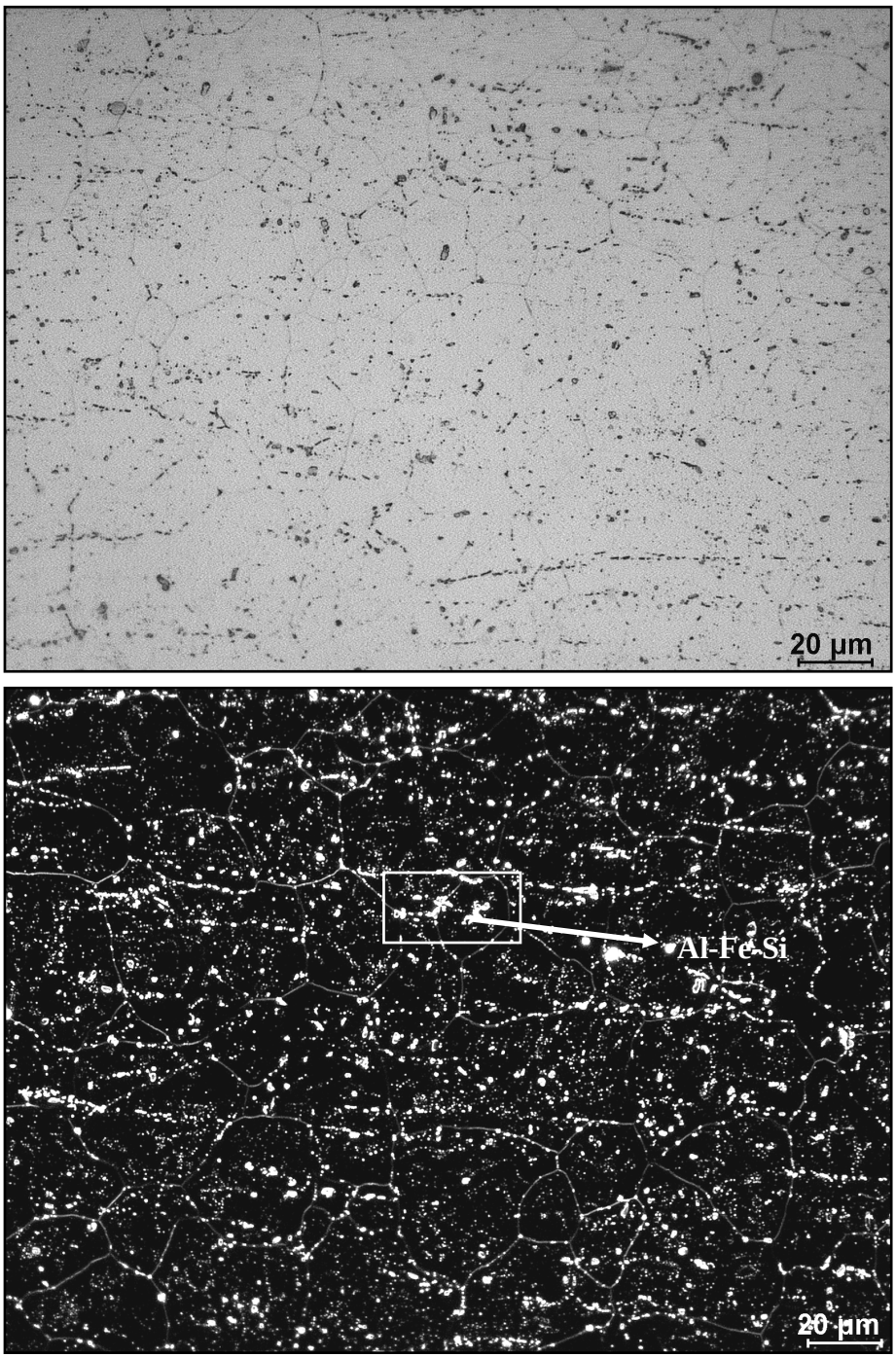
DSC termogramlarında ekzotermik piklere karşılık gelen herbir sıcaklık değerinde AA6016 levha örneklerine 30 dakika izotermal tavlar uygulanmış, bu sıcaklıklarda çökelen partiküllerin morfolojileri optik ve taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir.

250°C, 300°C, 350°C ve 400°C sırasıyla β'', β', Si ve β fazlarını temsil etmektedir. 250°C de oluşan β'' fazının boyutu çok küçük ve matrisle uyumlu olduğundan gözlenebilmesi için yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle SEM çözünürlüğü yeterli olmamış, 250°C sıcaklık değerinde β'' fazı görülememiştir. Şekil 3.5'te 250°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhanın aydınlık-karanlık alan mikroyapı resimleri, Şekil 3.6'da ise SEM görüntüleri yer almaktadır.

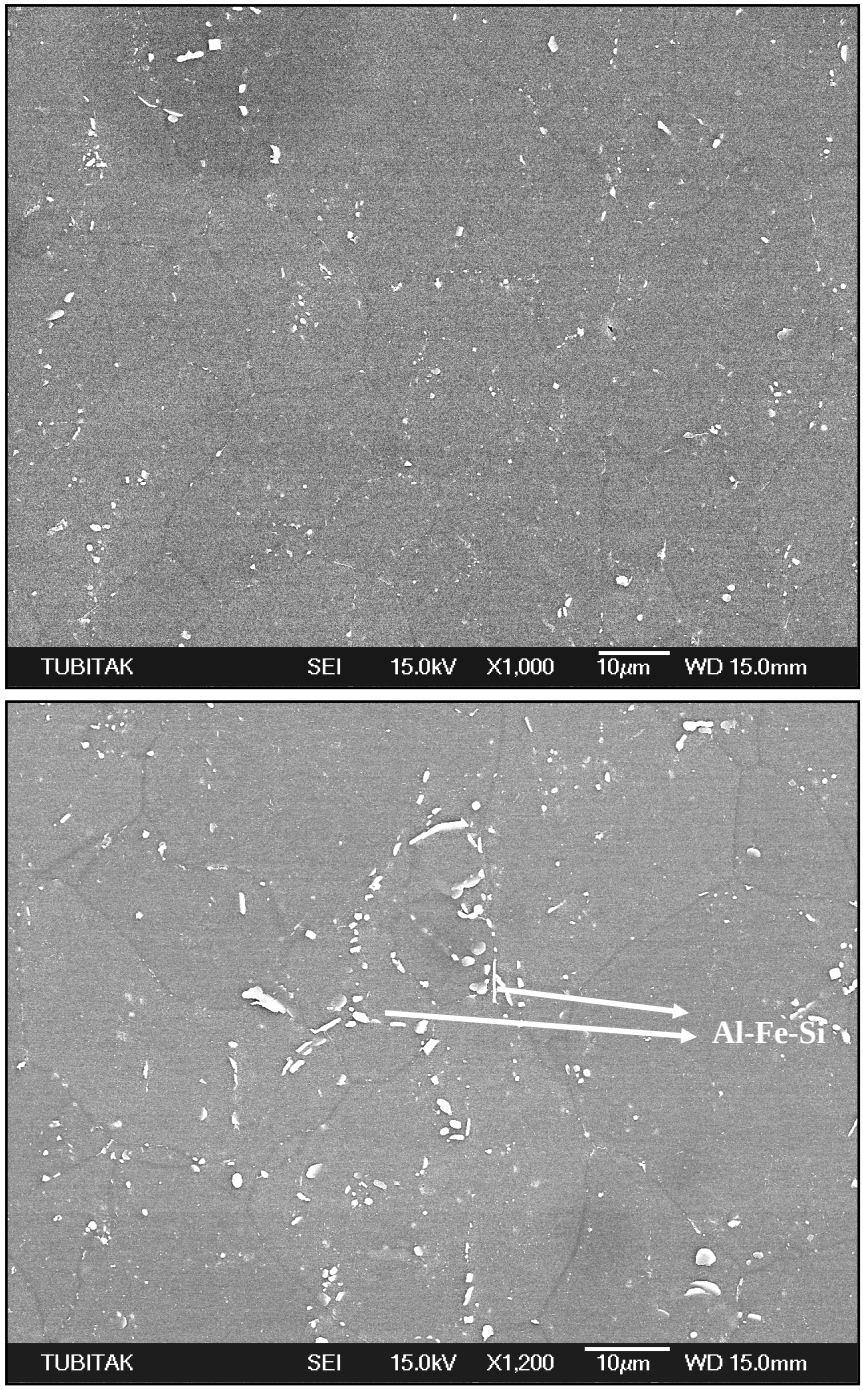
DSC termogramlarında 300°C civarında gözlenen pik β' fazına aittir [22]. Şekil 3.7'de 300°C-30 dk izotermal tav uygulanan AA6016 alaşımlı levhanın aydınlık-karanlık alan mikroyapı resimleri, Şekil 3.8'de ise nomarski tekniği ile elde edilen mikroyapı resimleri yer almaktadır. Optik mikroskopta gözlenen β' fazı SEM çalışmalarında yüksek büyütmelerde daha detaylı olarak incelenmiştir. β' fazı çubuksu(rod) morfolojiye sahiptir (Şekil 3.9).

DSC termogramlarında 350°C civarında gözlenen pik Si partiküllerine aittir [Gupta, et al, 1995]. 350°C-30 dk izotermal tav uygulanan AA6016 alaşımlı levhanın aydınlık-karanlık alan mikroyapı resimleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Optik mikroskopta özellikle karanlık alanda yoğun olarak gözlenen küçük eş eksenli partiküller SEM çalışmalarında yüksek büyütmelerde detaylı olarak incelenmişlerdir (Şekil 3.12).

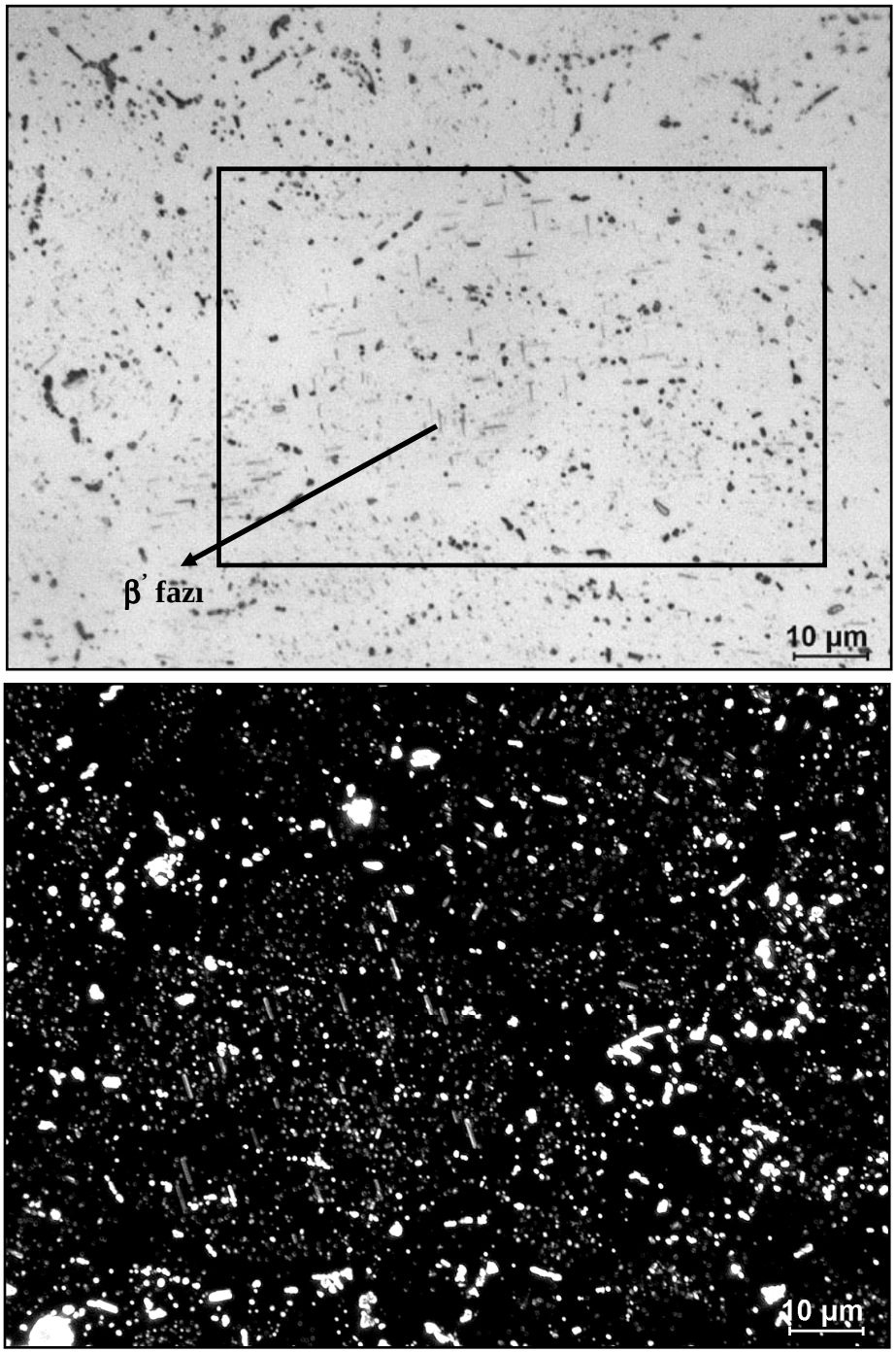
DSC termogramlarında 400°C civarında gözlenen pik β fazına aittir [Gupta, et al, 1995]. 400°C-30 dk izotermal tav uygulanan AA6016 alaşımlı levhanın aydınlık-karanlık alan mikroyapı resimleri Şekil 3.14'te gösterilmektedir. SEM çalışmalarında incelenen β fazı (Şekil 3.15) eş eksenli (plate-like) morfolojiye sahiptir.



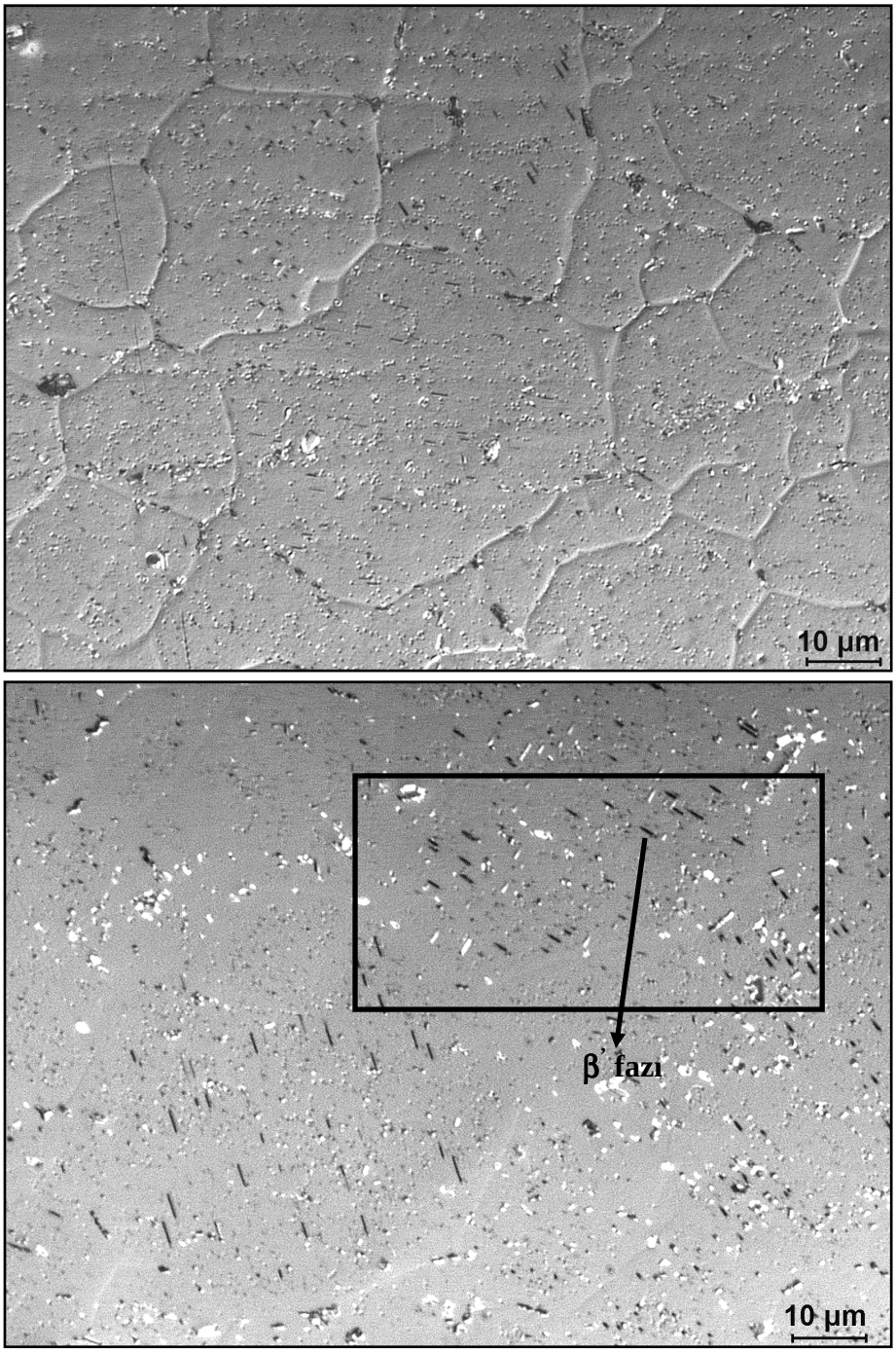
Şekil 3.5. 250°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhanın aydınlık-karanlık alan mikroyapı resimleri.



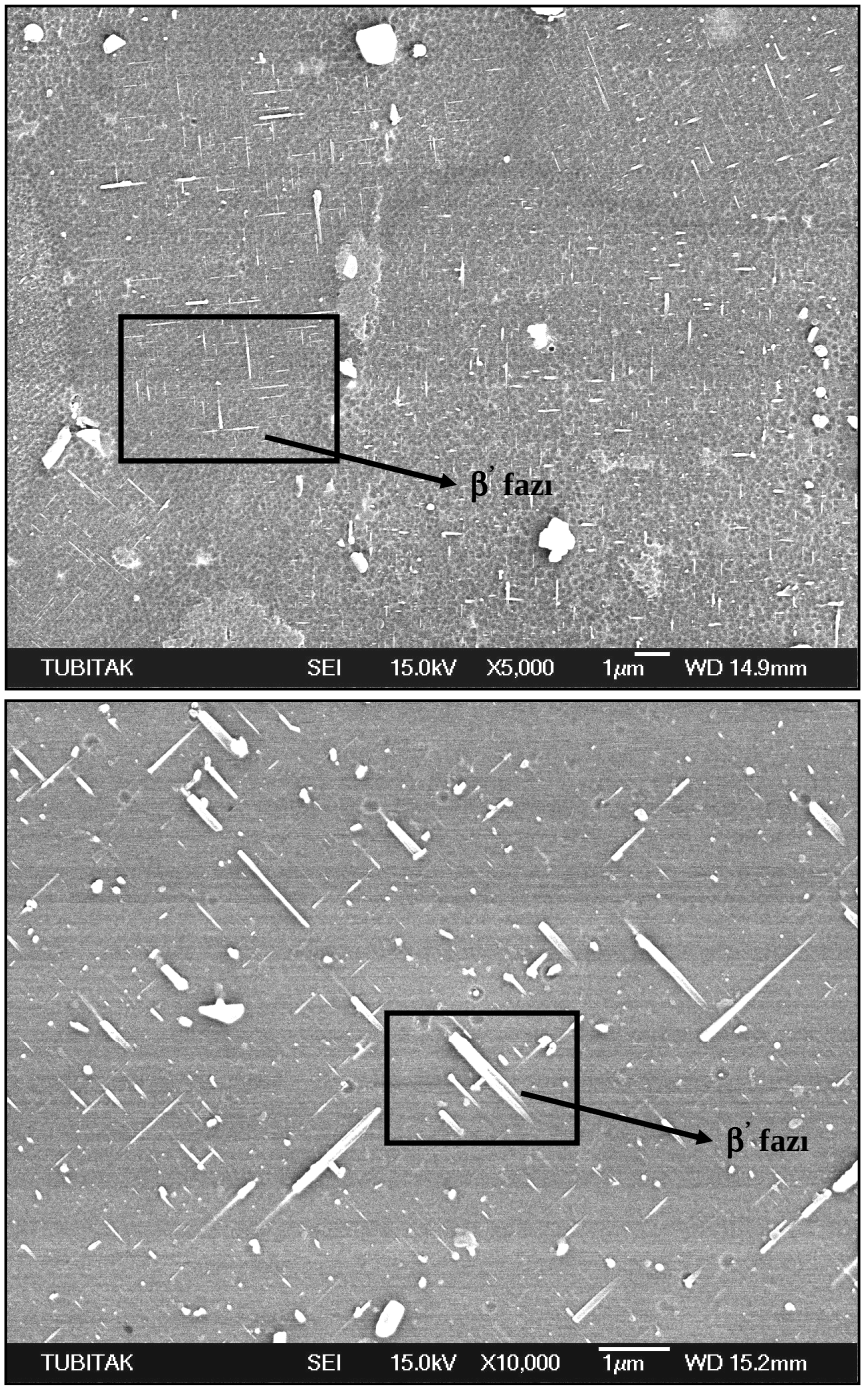
Şekil 3.6. 250°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhada SEM görüntüleri.



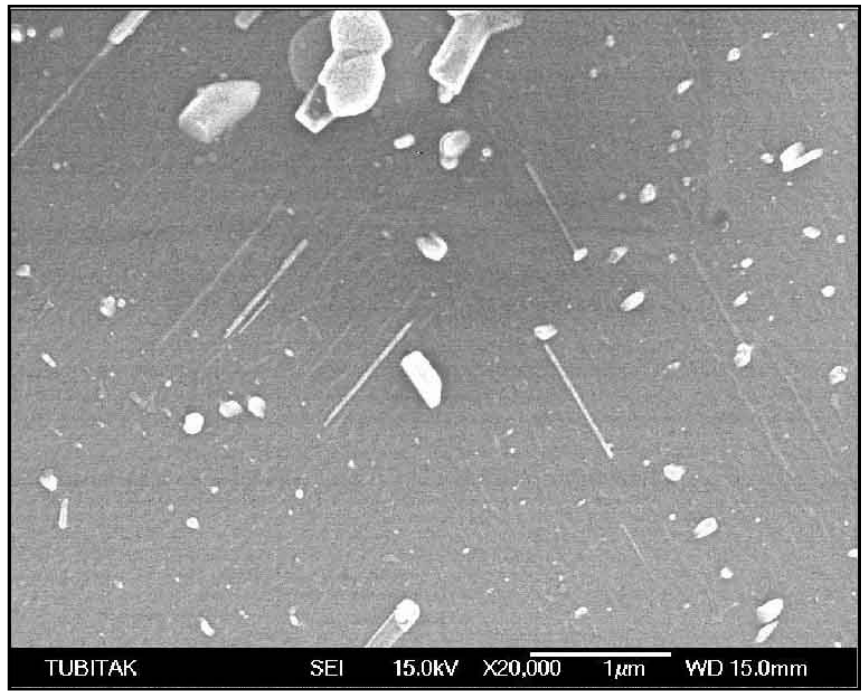
Şekil 3.7. 300°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhanın aydınlık-karanlık alan mikroyapı resimleri.

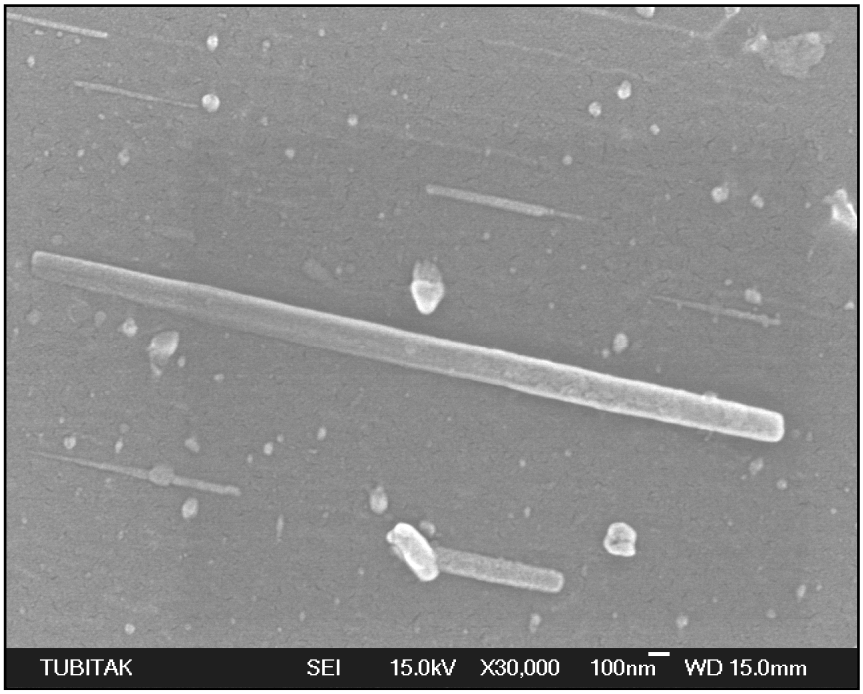


Şekil 3.8. 300°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhanın nomarski mikroyapı resimleri.

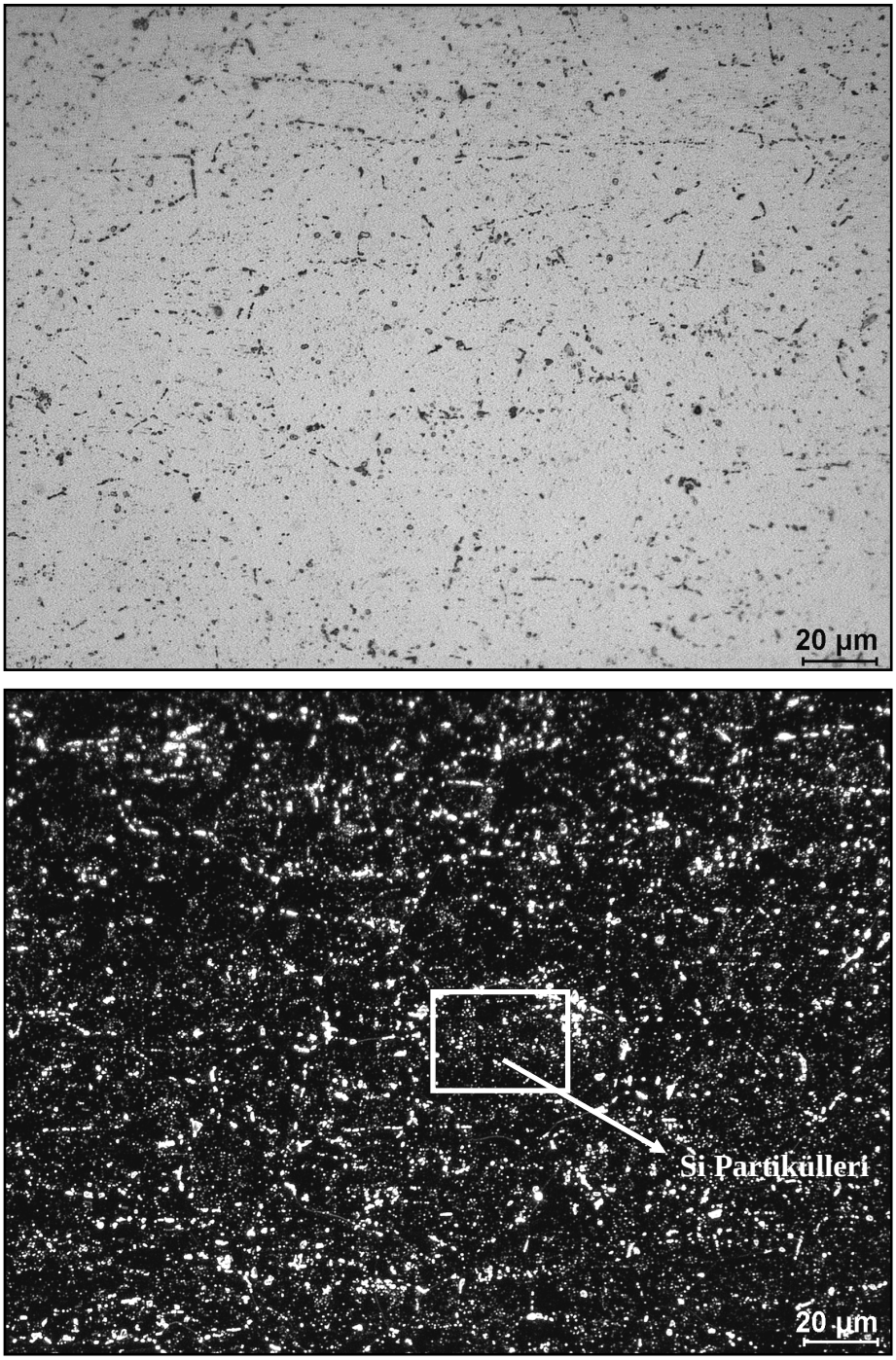


Şekil 3.9. 300°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhada SEM görüntüleri.

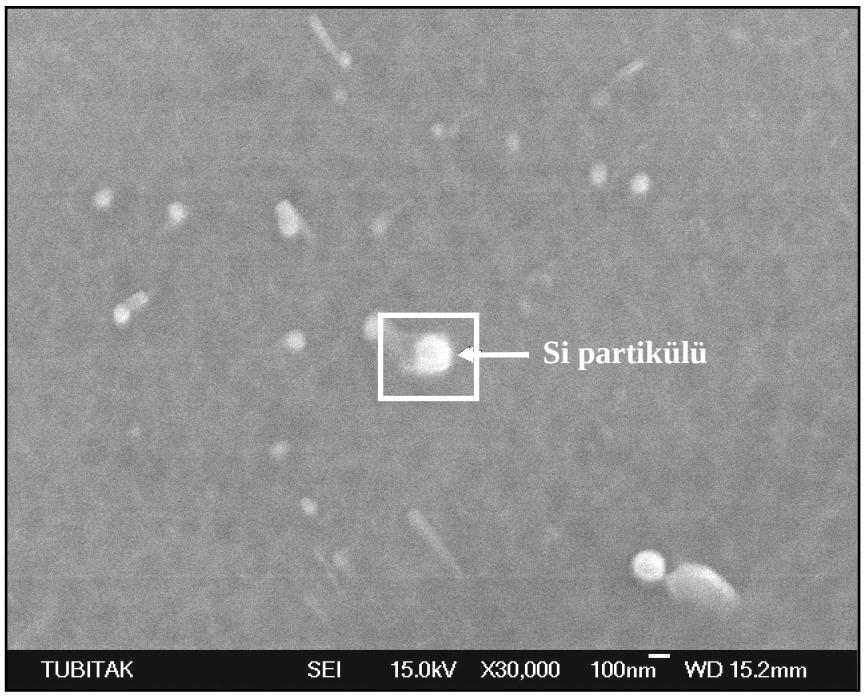




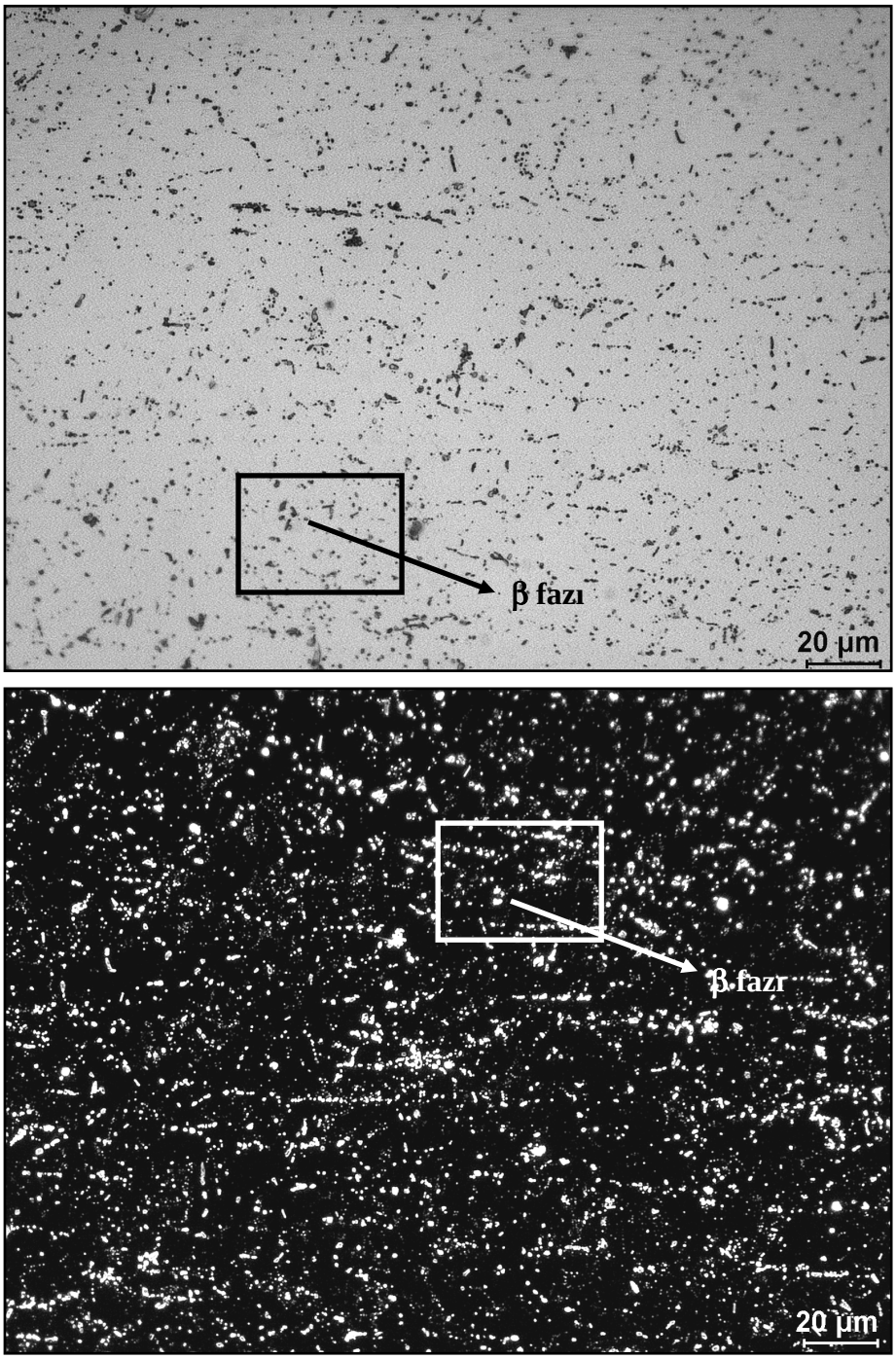
Şekil 3.9. devam.



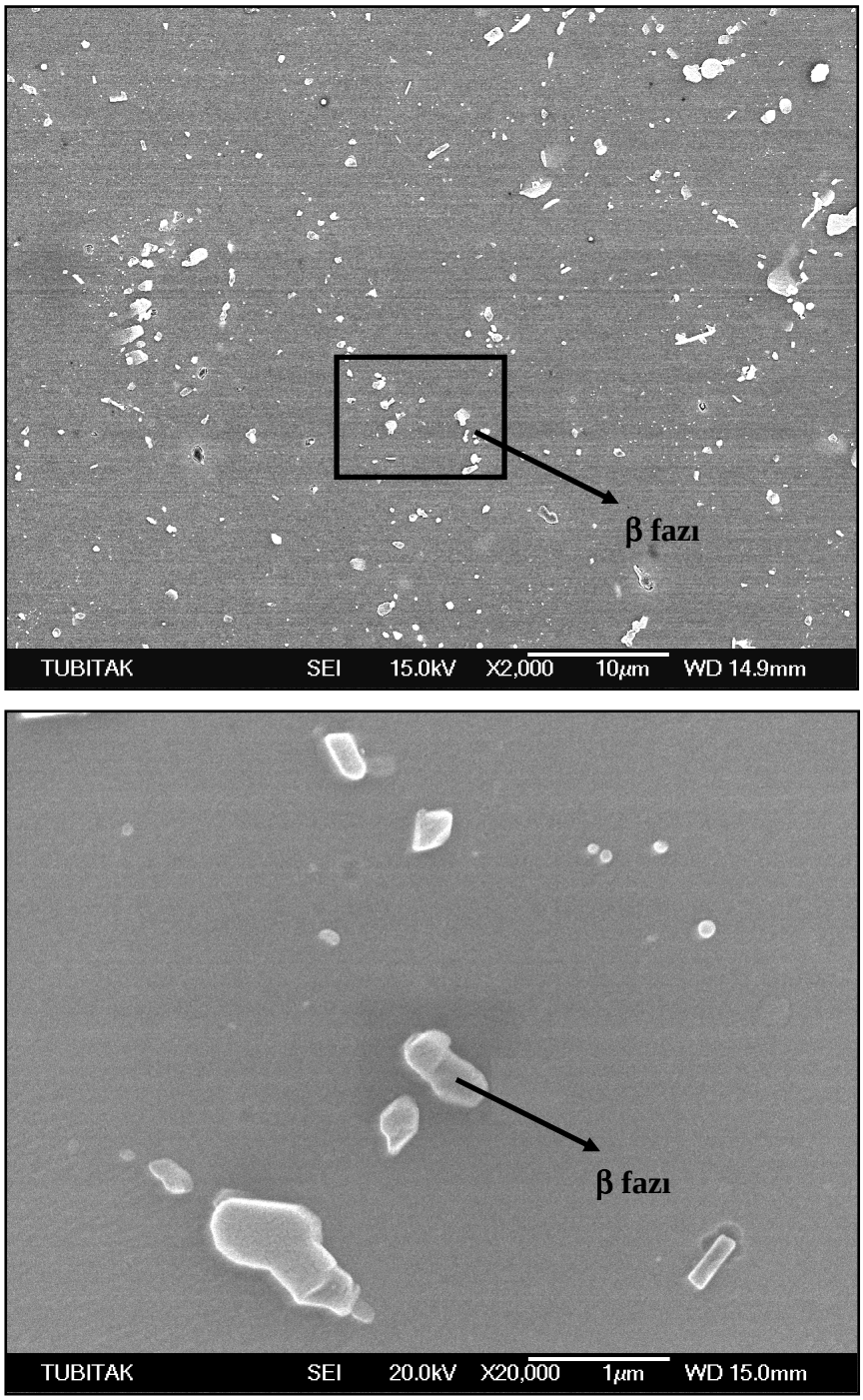
Şekil 3.10. 350°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhanın aydınlık-karanlık alan mikroyapı resimleri.



Şekil 3.11. 350°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhada SEM görüntüsü.



Şekil 3.12. 400°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhanın aydınlık-karanlık alan mikroyapı resimleri.



Şekil 3.13. 400°C-30dk izotermal tav uygulanmış AA6016 alaşımlı levhada SEM görüntüsü.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

AA6016 alaşımlı levhanın sertlik değerlerinde çözeltiye alma tavından sonra doğal yaşlanma süresinin artması ile artış görülmektedir. Bunun nedeni oda sıcaklığındaki bekleme süresinde oluşan çökeltilerdir. Oda sıcaklığındaki doğal yaşlanma sırasında küme ve GP zonları oluşmaktadır. Oluşan küme ve zonlar sertlik değerinin artmasına katkıda bulunurlar. GP zonlarının oluşumu dislokasyon hareketini zorlaştırmaktadır. Bunun nedeni; GP zonlarının ince ve çok küçük çökeltiler olmasıdır. AA6016 alaşımındaki ince çökeltiler, biçim değiştirme sırasında dislokasyonları ya çökeltileri kesmek ya da etrafından dolanmak zorunda bırakarak onların hareketini engeller. Biçim değiştirme sırasında dislokasyonların hareketinin sınırlanmış olmasından dolayı alaşımın sertlik değeri artmaktadır.

AA6016 alaşımlı levhada çözeltiye alma tavından hemen sonra ön yaşlandırma tavı uygulandığı durumda β″ çekirdeklerinin oluşması sonucunda T4P (125 MPa) ve T8X (245 MPa) kondisyonlarındaki akma mukavemet değerleri doğal yaşlanmış numunelere nazaran yüksek değere sahiptirler ve en yüksek boya pişirim cevabı (120 MPa) elde edilmektedir. Ancak bu durum uygulamada tercih edilmemektedir. Nedeni; boya pişirimi öncesindeki (T4P) akma dayanımı değeri, pres formu sırasında malzemenin şekillenebilirliği açısından oldukça yüksektir (125 MPa).

10 dakika doğal yaşlanmış AA6016 alaşımlı numunede T4P ve T8X kondisyonlarının her ikisinde de akma mukavemet değerleri düşmektedir (Şekil 3.2). 10 dakika doğal yaşlanmış AA6016 alaşımlı numuneye uygulanan 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavında, doğal yaşlanma sırasında oluşan küme ve zonlar (GPI) çözünmektedirler. Bu durum T4P ve T8X kondisyonlarındaki akma mukavemet değerlerinin düşmesinin nedenidir. 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavından önce 10 dakika doğal yaşlanmış numunedeki T4P ve T8X kondisyonlarındaki akma mukavemet değerleri sırasıyla 110 MPa ve 223 MPa'dır. Çözeltiye alma tavından sonra 10 dakika doğal yaşlanma süresi AA6016 alaşımlı levhanın şekillenebilme kabiliyeti açısından daha uygundur.

Boya pişiriminden sonra (T8X) AA6016 alaşımlı levhanın akma ve çekme dayanımı 60 dakika doğal yaşlanmaya kadar keskin bir düşüş göstermektedir. 24

saate doğru akma mukavemetindeki düşüş azalır ve 24 saatten sonra stabilize olur. Ön yaşlanmış numunede doğal yaşlanma süresine bağlı olarak oda sıcaklığında oluşan küme ve zonlar (GPI) boya pişirim cevabını olumsuz yönde etki eder. Boya pişirimi sırasında β″ fazının oluşumundan önce doğal yaşlanma sırasında oluşan küme ve zonların çözeltiye alınmış olması gerekmektedir. Doğal yaşlanma süresinin artması ile oda sıcaklığında oluşan küme ve zon oluşumu artar. Bu durum boya pişirimi sonrası akma ve çekme mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır.

Ön yaşlandırma tavından önce doğal yaşlanma süresinin artması ile T8X kondisyonunda akma mukavemetinde azalma gözlenmektedir (Tablo3.2). Doğal yaşlanma süresinde oda sıcaklığında oluşan küme ve zonlar (GPI) ön yaşlandırma tavı ile çözünemedikleri için boya pişirimini olumsuz etkiler, malzemenin boya pişirimi sonrasında yumuşamasına neden olurlar.

Doğal yaşlanma süresinin artması ile T8X kondisyonundaki akma mukavemet değerleri düşmektedir. Doğal yaşlanma süresinin artması ile boya pişiriminden sonra (T8X) AA6016 alaşımlı malzemede meydana gelen bu yumuşama nedeni ile 60 dakikadan fazla doğal yaşlanma süreleri tercih edilmemelidir.

DSC termogramlarında da gözlendiği gibi 180°C-5 dk ön yaşlandırma tavı oda sıcaklığında oluşan ve doğal yaşlanma süresinin artması ile belirli bir kritik boyuta ulaşan küme ve zonların tekrar çözeltiye alınmasına yeterli olmamaktadır. Doğal yaşlanma süresinin artması ile β″ pikinin yüksek sıcaklıklara kayması küme ve zonların daha yüksek sıcaklık değerinde çözeltiye alındığını göstermektedir. Bu durumda ön yaşlandırma tavından önce doğal yaşlanma süresinin artması ile akma mukavemetinde artış gözlenmektedir (Tablo 3.2). Akma mukavemetindeki bu artış pres formu sırasında malzemenin şekillenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Sonuç olarak, pres formu sırasında malzemenin şekillenebilirliği ve boya pişirimi sonrası malzemenin mukavemeti göz önüne alındığında en iyi mekanik özellikler doğal yaşlanma süresinin 10 dakika olduğu durumda elde edilmektedir. Doğal yaşlanma süresinin 10 dakika olduğu durumda AA6016 malzemenin T4P ve T8X kondisyonlarındaki akma dayanımları sırası ile 110 MPa ve 223 MPa'dır.

KAYNAKLAR

1. Alüminyumun Yaygın Kullanımı İçin Potansiyel Uygulamalar, Murat Dündar, Assan Alüminyum, İstanbul, Seydişehir 2. Alüminyum Sempozyumu, 2002.

2. Aluselect, www.aluselect.com

3. Material Science& Engineering Ders Kitabı, William F. Smith, University of Central Florida, 2001.

4. Metal Handbook, Vol. 2,9th Ed. American Society for metal 1979.

5. Science & Engineering of Materials Ders Kitabı, Donald R. Askeland, University of Missouri-Rolla, 1998.

6. 10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, Cilt 1, Zeytin H. K, Otomobil Endüstrisinde Alüminyum Kullanımı, Mayıs 2000.

7. Ekstrüzyon Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Profillerin Otomobillerde Kullanımı, Vedat SANCAKDAR ve Erdoğan BENGÜ ASAŞ Alüminyum San. ve Tic. A.Ş. Sakarya, Seydişehir 2. Alüminyum Sempozyumu, 2002.

8. Development and Prototyping of an All-Aluminum Body Structure, H.Oster and R.S.Long,International Body Engineering Conference'97, Stuttgart, Germany, 1997.

9. Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry W.S. Miller A., L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet , A. Haszler, A. Vieregge, 2000.

10. K.R.Brown, M.S.Venie and R.A.Woods, JOM, July 1995, pp:20.

11. J.Green, Journal of Metals, November 1999, p: 2.

12. Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum Pazarı ve Ticareti, Bahadır Özer, Volkan Güven, Mehmet Mustafaoğlu, Assan Alüminyum, İstanbul, Seydişehir 2. Alüminyum Sempozyumu, 2002.

13. European Aluminium Association, Aluminium in Automotive Industry, www.eaa.net

14. Sürekli Döküm Teknolojisinin ve Yüksek Magnezyumlu Alaşımların Üretilebilirliği, Rasim ERDOĞAN, Necmi DOĞAN ve Mehmet ALTUNTAŞ Assan Alüminyum., İstanbul, Seydişehir 2. Alüminyum Sempozyumu, 2002.

15. Paint Bake Response of Aluminum 6016 Alloy, S. Kleiner, Zürich, Ch. Henkel, P. Schulz, Ranshofen and P. J. Uggowitzer, Zürich, 2001.

16. K.Matsuda, S.Tada, S.Ikeno, Proc. 4th Int.Conf.Aluminium Alloys, eds. T.H.Sanders, E.A.Starke, Vol.1. p: 605, 1999.

17. The Influence of Thermal Treatment on the Cast Structure of 6XXX Aluminum Alloys, Metin Usta, Ph.D. Thesis, November 2001.

18. Timur Ulucak-web sitesi

19. Y.Birol, Improvement in Bake Hardening Response of a Twin-roll Cast Al-Mg-Si Sheet, 2003.

20. DSC Analyses of the Precipitation Behavior of two Al–Mg–Si Alloys Naturally Aged for Different Times, L. Zhen, S.B. Kang, Materials Letters 37 1998 349–353, 1998.

21. Differential Scanning Calorimetry Study on AA6016 Alloy, R. De Haan, L. Zhuang, P. De Smet, J. Bottema, W.S. Miller, ICAA Aluminum Alloys, Vol2., p: 817, 1998.

22. Precipitation Processes in Long Term Naturally Aged AA6016 Material, A. K. Gupta, D. J. Lloyd,Proc. of the International Symposium, p: 243, 1995

23. Environmental Improvements in Aluminum Production Technology, Kvande, H., Light Metal Age, p:44-53, Feb. 1999.

24. Light Metal World, Metal Age, p:124, Feb. 1999.

25. Trends in Aluminum Use for Passenger Cars and Light Trucks in North America, Schultz RA Hauptrich, Light Metal Age, p:108-103, Feb. 1998.

26. Proceeding of the 4th International Conference on Aluminum Alloys, G. Huppert and E. Hornbogen, Atlanta, USA, p:628, September 1994.

27. I. Dutta, M. Allen ibid. 10, 1991.

28. G. Thomas, J. Ins. Metals, p:57, 1992.

29. M. H. Jacobs, Philos. May, p:26, 1972.

30. A. Gupta, D.J. Lloyd, Proceedings of the 3rd International Conference on Aluminum Alloys, Norway, p:21, June 1992.

31. K. Matsuda, Y. Uetani, H. Anada, ibid, p: 272.

32. Mater. Sci. Technol., L. Zhen, B. Kang and H. Kim.

33. Science and Engineering of Light Metals, K. Matsuda, S. Tada, I. Susuma, p: 899, 1991.

34. Acta Materia, M. H. Jacobs, J. P. Lynch, p:1389, 1982.

35. Materials Science and Engineering, W. S. Miller, L. Zhuang, p:37, 2000.

36. Materials Science and Technology, L. Zhen, S. B. Kang, p:905, 1997.

37. Mater. Sci. Forum S. B. Kang, L. Zhen, p:827, 1996.

38. Aluminium 77 , S. Kleiner, CH. Henkel, p:185, 2001.

39. Aluminum and Magnesium for Automotive Applicatioms, The Menerals, Metals&Materials Society, H. Uchida, H. Yoshida, p:97, 1996.

40. Automotive Alloys, The Minerals, Metals&Materials Society, J. D. Bryant, p:19, 1997.

41. Acta. Mater 47, M. Murayama, K. Hono, p:1537, 1999.

42. Materials Science Forum, L. Zhuang, H. De Haan, p:1309, 2000.

43. Scripta Mater. L. Zhen, S. B. Kang, p:1089, 1997.

44. Mater. Sci. Forum 217-222, M. Saga, Y. Sasaki, p:821, 1996.

45. Tensile and Fatique Fracture Behavior of Spot Welded Aluminum Sheet Alloys for Auto Body Application, Aluminum Alloys, Their ,Physical and Mechanical Properties, S. B. Kang, T. Sato, p:1331, 1998.

46. Improvement in Paint Bake Response of an Al-Mg-Si Alloy by Reversion, H. Uchida, J. D. Bryant Aluminum and Magnesium Automotive Applications, , p:97, 1996.

47. Effect of Naturel Aging and Pre-aging on Subsequent Precipitation Process of an Al-Mg-Si Alloy with high Excess Silicon, L. Zhen, S. B. Kang, Materials Science and Technology, p:905, 1997.

48. Effect of Pre-aging Temperature on the Behavior in the Early Stage of Aging at High Temperatures for Al-Mg-Si Alloy, M. Saga, Materials Science Forum, p:821, 1996.

49. Effect of Pre-aging of Microstructure and Tensile Properties of Al-Mg-Si Alloys, Scripta Materiala, L. Zhen, S. B. Kang, p:1089, 1997.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Bursa'da doğdum. Bursa Çelebi Mehmet Süper Lisesi'nden mezun olduktan sonra eğitimime İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü'nde devam ettim. Üniversite eğitimimi tamamladıktan sonra 2001 yılında TUBİTAK, MAM, Malzeme ve Kimya Teknolojileri Bölümü'nde araştırmacı olarak çalışmaya başladım. Yine aynı tarihte Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bilimleri ve Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans Programı'na kayıt oldum. Şu an hala TUBİTAK, MAM, Malzeme ve Kimya Teknolojileri Enstitüsü'nde çalışmaktayım.