HİPO-ÖTEKTİK Al-Si BAZLI ALAŞIMLARDA YARI-KATI İŞLEMLE (TİKSO KALIPLAMA) YENİ METAL MATRİS KOMPOZİT ÜRETİMİ

Hasan AZTEKİN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalında

Bilim Uzmanlığı Tezi

Olarak Hazırlanmıştır.

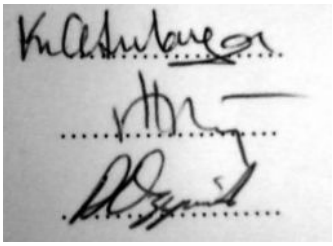
KARABÜK

Ocak 2008

KABUL:

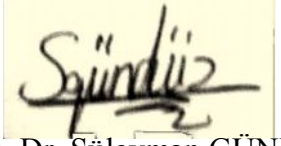
Hasan AZTEKİN tarafından hazırlanan "HİPO-ÖTEKTİK Al-Si BAZLI ALAŞIMLARDA YARI-KATI İŞLEMLE (TİKSO KALIPLAMA) YENİ METAL MATRİS KOMPOZİT ÜRETİMİ" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında Bilim Uzmanlığı Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 17/07/2008

Başkan:	Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA	(KBÜ)
Üye :	Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK	(KBÜ)
Üye :	Yrd. Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK	(KBÜ)



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. 29/01/2008



Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

"Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim."

Hasan AZTEKİN

ÖZET

Bilim Uzmanlığı Tezi

HİPO-ÖTEKTİK Al-Si BAZLI ALAŞIMLARDA YARI-KATI İŞLEMLE (TİKSO KALIPLAMA) YENİ METAL MATRİS KOMPOZİT ÜRETİMİ

Hasan AZTEKİN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA

Ocak 2008, 67 sayfa

Yapılan bu çalışmada, hipoötektik Al-Si bazlı alaşımlarda yarı-katı işlemle (tikso kalıplama) yeni metal matris kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Klasik döküm yöntemiyle üretilen A356 (Al-Si) alaşımı gaz atomizasyon yöntemiyle ≤50 μm seviyesinde toz haline getirilmiştir. Al-Si ana matris içerisine %5, %10, %15 ve %20SiC takviye elemanı katılmıştır. Farklı oranlarda SiC takviyesi yapılan malzemelere mekanik alaşımlama/öğütme cihazında 30 dak. harmanlama işlemi uygulanmıştır. Harmanlanan malzemeler 800 MPa basınç altında soğuk preslenerek şekillendirilmiştir. Ön şekillendirilen kompozit bloklar 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. bekleme süresi ve 590-600°C fırın sıcaklıklarında ve 20 KN yük altında 30 dakika bekletildikten sonra yarı-katı işlemle Al/SiC kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı görüntüleri çekilmiş ve bu görüntüler üzerinden % küresellik, tane boyutu ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda klasik döküm yöntemiyle elde edilen malzemelerin mikroyapıları dentritik yapıda iken yarı-katı işlemle küresel mikroyapıya dönüştüğü görülmüştür. Farklı

ÖZET (devam ediyor)

oranlarda takviye elemanı katılan numunelerin en ideal parametreleri 550°C kalıp ve 590°C fırın sıcaklığı ile 1 dak. presleme süresi olduğu belirlenmiştir. 600°C'de %katı-sıvı oranındaki sıvı miktarının artış göstermesinden dolayı tanelerde irileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir. SiC takviye elemanının artışıyla % küresellik oranında azalma meydana gelirken, tane boyutu ile mikrosertlik değerlerinde artış olduğu tesbit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tikso kalıplama, Kompozit malzemeler, Alüminyum alaşımları

Bilim Kodu **:** 626.08.01

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

PRODUCTION OF NEW METAL MATRİX COMPOSITES IN HYPO-EUTECTIC Al-Si BASED ALLOYS THROUGH SEMI-SOLID PROCESS (THIXO MOULDING)

Hasan AZTEKIN

Karabuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Machine

Thesis Advisor: Prof. Dr. Kerim CETINKAYA
January 2008, 67 pages

In this study, synthesis of new Al-Si based metal matrix composites through semi-solid (thixo moulding) process was investigated. Powders in sizes of ≤ 50 mμ were obtained from ingot metallurgy A356 (Al-Si) alloy by gas atomisation. SiC reinforcement materials were added to the Al-Si main matrix by 5, 10, 15 and 20 % and then blended in a mechanical alloying / milling device for 30 minutes. The blended Al/SiC mixtures were preformed by cold pressing under 800 MPa pressure. These preformed composite blocks were held in a furnace for 30 minutes at the temperatures of 590 and 600°C and then pressed for 1 minutes under 20 KN load. The die temperature was 550°C. Microstuctural analyses of these composites were done. The results showed that the conventionally cast material had dendritic structure while the semi-solid processed material had spherical microstructure. The optimum microstructures were obtained for the specimens obtained at 590°C furnace temperature and 550°C die temperature. At 600°C, grain growth was observed depending on increasing liquid in the %

ABSTRACT (continued)

solid-liquid rate. Increasing SiC reinforcement amount (by volume) was found to lead to decrease in the spheroidising. However, it increased grain size and microhardness.

Key Words: Thixo moulding, composite materials, Aluminum alloys

Science Code: 626.08.01

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmaların her safhasında yardımlarını esirgemeyen katkılarıyla beni sonuna kadar destekleyen ve yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA'ya ve bütün tez çalışmalarımda laboratuar imkânlarını sonuna kadar açan, beni sonuna kadar yönlendiren ve desteğini hiç esirgemeyen bilgilerinden ve tecrübelerinden devamlı yararlandığım saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e, ayrıca SEM ve EDS cihazlarında analiz yapabilmem için destek veren ve laboratuarlarını bana açan değerli hocam Prof. Dr. Süleyman TEKELİ ve Öğr. Gör. Dr. Bülent BOSTAN'a teşekkür ederim. Ayrıca yine çalışmalarımda yardımlarından dolayı yüksek lisans öğrencisi Alper AYTAÇ'a, lisans mezunu Hüseyin YALÇINKAYA'ya ve diğer tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve maddi manevi desteklerini hep yanımda gördüğüm özellikle annem, babam ve kardeşlerime ayrıca sevgili eşim Şerife Hanım AZTEKİN'e ve kızım Müşerref Kübra AZTEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v

ABSTRACT vii

TEŞEKKÜR ix

İÇİNDEKİLER xi

ŞEKİLLER DİZİNİ xv

ÇİZELGELER DİZİNİ xix

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xxi

BÖLÜM 1 GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARI 5

2.1 ALÜMİNYUMUN AVANTAJLARI 5

2.2 ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARI (AL-Sİ) 6

2.2.1 Yapı Kontrolü 7

2.2.2 Dentrit Kolları Aralığı 7

2.2.3 Tane Yapısı 8

2.2.4 Tane İnceltme İşlemi 9

2.3 ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME VE MODİFİKASYON 10

2.3.1 Kimyasal Değiştiriciler 10

2.3.2 Hiperötektik Alüminyum-Silisyum Alaşımlarında Tane İnceltme 12

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 3 ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER 13

BÖLÜM 4 YARI KATI İŞLEMİN GELİŞİMİ 17

4.1 YARI-KATI ÜRETİM TEKNOLOJİSİ 18

4.1.1 Dövme Döküm 19

4.1.2 Tikso Döküm İşlemi 20

4.1.3 Tikso Kalıplama İşlemi 21

4.2 TİKSO KALIPLAMA YÖNTEMİNDE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİ EDEN FAKTÖRLER 25

4.2.1 Malzeme Bileşimi 25

4.2.2 Sıcaklık 26

4.2.3 Basınç 28

4.2.4 Sıkıştırma Hızı 29

4.2.5 Sıkıştırma ve Fırın İçerisinde Bekletme Süresi 31

4.2.6 Kalıp Malzemesi 31

4.3 MEKANİK ÖZELLİKLER 32

4.4 YARI-KATI ÜRETİM YÖNTEMİNİN AVANTAJLARI 33

4.5 YARI-KATI ÜRETİM YÖNTEMİNİN DEZAVANTAJLARı 34

BÖLÜM 5 DENEYSEL MALZEME VE METOT 35

5.1 MATRİS MALZEMESİNİN ATOMİZASYONU 35

5.2 MATRİS MALZEMESİ VE TAKVİYE ELEMANI MİKTARININ BELİRLENMESİ 36

5.3 HAZIRLANAN AL/Sİ TOZLARININ HARMANLANMASI 36

5.4 SOĞUK PRESLEME İŞLEMİ 37

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

5.5 DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN TİKSO KALIPLAMA ÜNİTESİ 37

5.5.1 Pres 38

5.5.2 Fırın 39

5.5.3. Grafit Kalıp 40

5.5.4. Grafit Kalıp Isıtma Sistemi 40

5.5.5 Kalıp Tutucu 41

5.6 NUMUNE HAZIRLAMA VE METALOGRAFİK İŞLEMLER 42

5.6.1 Numune Kesme İşlemi 42

5.6.2 Metalografik İşlemler 42

5.6.3 Optik Mikroskop İşlemleri 42

5.6.4 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri 42

5.6.5 Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) İncelemesi 43

5.6.6 Tane Boyutu ve Küresellik Ölçümleri 43

5.6.7 Sertlik Ölçümleri 43

BÖLÜM 6 DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 45

6.1 BAŞLANGIÇ MALZEMESİNİN İNCELENMESİ 45

6.2 TAKVİYE ELEMANININ MİKROYAPIYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ 47

6.3 FIRIN SICAKLIĞININ MİKROYAPIYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ 55

6.4 TAKVİYE ELEMANININ SERTLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ 56

BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER 59

KAYNAKLAR 61

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ 65

ŞEKİLLER DİZİNİ

No Sayfa

2.1 Alüminyum-silisyum denge diyagramı. 6

2.2 Katılaşma oranına bağlı olarak dentrit oluşumundaki değişim. 8

2.3 Tane yapıları a. kaba sütunsal tane yapısı, b. inceltilmiş tane yapısı. 9

2.4 A'dan F'ye sırayla alüminyum-silisyumun ötektik değişikliğinin farklı oluşumları. 11

2.5 Farklı modifiye elemanı içeren A356 alaşımında modifiye elamanının zaman sıcaklık üzerindeki etkisi. 11

3.1 Kompozit malzemeleri meydana getiren malzeme sınıfları. 14

3.2 Farklı takviye elamanları ile güçlendirilmiş MMK malzemeler a. Sürekli fiber takviyeli boron/Al kompozitler, b. Süreksiz grafit/alüminyum kompozit, c. % 40 SiC parçacık takviyeli 6061 alüminyum alaşımlı matris, d. (% 20 SiC hac.) Wiskers takviyeli alüminyum MMK, e. (% 60 Al_2O_3 hac.) Parçacık takviyeli alüminyum MMK, f. % 81 SiC parçacık takviyeli alüminyum alaşımı. 15

3.3 Metal malzemeler ile iki farklı MMk malzemenin sıcaklık altındaki dayanımları. 16

4.1 Tikso döküm yöntemiyle üretilmiş bazı parçalar. 21

4.2 Tikso kalıplama ünitesinin şematik görüntüsü. 22

4.3 BMW'nin yeni 6 silindirli Alüminyum motoru a. motorun kesiti b. üstte alüminyum silindir gömleği altta aynı parçanın dökme demir tipi. 23

4.4 Yarı-katı haldeki malzemenin şekil değiştirme davranışı. 24

4.5 A356 Alaşımlarının mikroyapıları a. Klasik döküm yöntemiyle üretilmiş b. Tikso kalıplama yöntemiyle üretilmiş. 25

4.6 Farklı sıcaklıklarda, yeniden ısıtılan 7075 Al alaşımının merkez ve tane sınırlarındaki değişik mikroyapılar; a. 720°C tane sınırı; b. 720°C merkez; c. 642°C tane sınırı; d. 642°C merkez; e. 638°C tane sınırı; f. 638°C merkez. 27

4.7 A356 ve Al2024 alaşımının basınca göre % uzama değişimi. 29

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No Sayfa

4.8 Al7075 alaşımının azalan sıkıştırma hızıyla oluşan mikroyapılar; a. 255 mm/dak b. 170 mm/dak c. 120 mm/dak. 29

4.9 Al7075 alaşımının farklı soğuma yoğunluklarında oluşan mikroyapılar; a. İlk soğuma yüksek ve ikinci soğuma düşük, b. İlk soğuma ve ikinci soğuma düşük, c. İlk soğuma düşük ve ikinci soğuma yüksek. 30

4.10 Kaba dökülmüş ve tavlanmış alüminyum alaşımının mikroyapıları a. metal kalıpta, b. yalıtkan kalıpta döküldüğünde oluşan mikroyapılar. 32

4.11 Yarı-katı işlemle üretilmiş numunelerin basınç altındaki dayanımı. 33

5.1 Tozların karıştırılmasında kullanılan titreşimli değirmen. 36

5.2 A356 tozlarının soğuk preslenmesinde kullanılan metal kalıbın şematik görüntüsü. 37

5.3 Yarı-katı işlem ünitesi. 38

5.4 Deneysel çalışmalarda kullanılan boru tipi fırın. 39

5.5 Tasarımı ve üretimi yapılan grafit kalıbın görüntüsü. 40

5.6 Tasarımı ve imalatı yapılan kalıp tutucunun görüntüsü. 41

6.1 A356 külçesinden alınan numunenin optik mikroskop görüntüsü. 45

6.2 a. Mekanik karıştırılmış, fırın sıcaklığı 600ºC, kalıp sıcaklığı 550ºC, 1 dak. presleme süresi a. %5SiC (A2), b. %10SiC (A4), c. %15SiC (A6), d. %20SiC (A8) oranlarında elde edilen mikroyapı görüntüleri. 48

6.3 600°C fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %15 SiC oranına sahip numunenin SEM ve EDS analizi sonuçları. 49

6.4 Mekanik karıştırılmış, 600ºC fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC içeren numunelerin küresellik oranları. 50

6.5 Mekanik karıştırılmış, 600ºC fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. basma süresi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC içeren numunelerin ASTM standartlarına göre tane boyutu oranları. 50

6.6 Mekanik karıştırılmış, fırın sıcaklığı 590ºC, kalıp sıcaklığı 550ºC, 1 dak. presleme süresi a. %5SiC (A1), b. %10SiC (A3), c. %15SiC (A5), d. %20SiC (A7) oranlarında elde edilen mikroyapı görüntüleri. 51

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No Sayfa

6.7 590°C fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %15 SiC oranına sahip numunenin SEM ve EDS analizi sonuçları. 53

6.8 Mekanik karıştırılmış, 590ºC fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC içeren numunelerin küresellik oranları. 54

6.9 Mekanik karıştırılmış, 590ºC fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC içeren numunelerin ASTM standartlarına göre tane boyutu oranları. 55

6.10 590ºC fırın sıcaklığında preslenmiş numunelerin sertlik değerleri. 56

6.11 600ºC fırın sıcaklığında preslenmiş numunelerin sertlik değerleri. 56

6.12 590°C fırın sıcaklığında preslenen numunelerin sertlik ortalamaları. 58

6.13 600°C fırın sıcaklığında preslenen numunelerin sertlik ortalamaları. 58

ÇİZELGELER DİZİNİ

No Sayfa

5.1. Tikso kalıplama yöntemiyle elde edilen Alüminyum matrisli kompozit Malzemelerin üretim şartları. 35

6.1 A356 alüminyum alaşımının %bileşimi. 45

6.2 Tikso kalıplama yöntemiyle üretilen Al/SiC kompozit malzemelerin Numunelerin üretim şartları küresellik(%), tane boyutları (ASTM), Sertlik değerleri (HV 2.5) ve SiC oranı (%). 46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

M.I.T	: Massachusetts Institute of Technology
SEM	: Tarama elektron mikroskobu
EDS	: Elektron saçınım spektrometresi
ASTM	: Amerikan normu
DPT	: Devlet planlama teşkilatı
AMK	: Alüminyum matrisli kompozit
MMK	: Metal matrisli kompozit
ÇM	: Çekme mukavemeti
AM	: Akma mukavemeti
SMK	: Seramik matrisli kompozit
PMK	: Polimer matrisli kompozit
TM	: Toz metalurjisi
BG	: Beygir gücü
SiC	: Silisyum karbür
CAL	: Kalori
GR	: Gram
Mm	: Mikrometre
MP	: Megapaskal
MN	: Meganewton
DDL	: Dökme demir lamel
μm	: Mikrometre

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojik faaliyetler insanlığın ihtiyaçları doğrultusunda sürekli olarak gelişmektedir. Bu gelişim beraberinde endüstriyel sanayinin temeli malzemelerde de yenilikler sunmaktadır. Bu sayede malzeme bilimciler konvansiyonel malzemelerden farklı olarak, üstün niteliklere sahip yeni malzemeler ve üretim metotları geliştirmektedir.

Klasik bir üretim yöntemi olan kum kalıba döküm işlemi, bilinen ilk döküm yöntemidir. Bu yöntemle malzeme üretiminde bir dizi problemle karşılaşılmaktadır. Bu problemler; kalıbın doldurulması sırasında meydana gelen türbülans nedeniyle gaz absorbesi, çekme boşluklarının oluşması ve katılaşma sırasında oluşan sıcak yırtılmalar olarak sıralanabilir. Özellikle sıcak yırtılma problemleri yarı-katı durumdaki alaşımın sünekliliğini olumsuz yönde etkiler ve dentritik yapıya bağlı olarak alaşımın katılaşması sırasında meydana gelmektedir. Çekme boşlukları (mikro poroziteler) ise dentrit kolları (dentritik ağ) arasında kalan sıvı bölgenin beslenememesinden kaynaklanmaktadır. Klasik dökümle üretim yöntemlerinde karşılaşılan bu olumsuzluklar nedeniyle yeni üretim teknikleri geliştirilmektedir. Bu tekniklerden biriside malzemenin %50'sinin sıvı %50'sinin katı olduğu ve kolaylıkla şekillendirilebildiği yarı-katı üretim yöntemidir.

Bu yöntem klasik döküm yöntemlerine göre bazı avantajlar sağlamaktadır. Üretimi planlanan parçalar, katı-sıvı bölgesinde herhangi bir sıcaklıkta bekletildikten sonra üretim gerçekleştirilmektedir. Bu teknikle üretilen karmaşık şekilli parçalar konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçalarla mukayese edildiğinde elde edilen değerler oldukça şaşırtıcıdır (Bergsma et al., 1997). Ayrıca son şekle yakın parçaların üretimi, uzun kalıp ömrü ve işçilik maliyetlerini de azaltmaktadır. Tikso şekillendirme işlemi hem sıvı metalin dökümü hem de katı metalin şekillendirme avantajlarını bir arada barındıran ve özellikle de son zamanlarda üzerinde yoğunlukla çalışmaların yapıldığı yepyeni bir üretim teknolojisi olarak kabul edilmektedirler (Bergsma et al., 1997; URL-1, 2007). Genel olarak bakıldığında yarı-katı

malzemeler hem katı hem de sıvı davranışı sergiler. Bu teknikte malzeme bir katı özelliği göstererek katının içyapısını verirken, ısıtılan ön şekillendirilmiş metal kütle aynı zamanda sıvı gibi kalıp boşluğunu kolaylıkla doldurabilmektedir. Yarı-katı şekillendirme tekniği, mikroyapının homojen olması ve daha az gözenek içermesinden dolayı, daha iyi mekanik özellikler sağlamaktadır (URL-1, 2007).

Yarı-katı işlem ile üretim tikso döküm (thixo casting), dövme döküm (squeeze casting), reo döküm (rheo casting), tikso kalıplama (thixo molding) gibi farklı teknikler içermektedir. Tüm bu yöntemler birbirine benzer olmakla birlikte aralarında küçük bazı farklılıklar söz konusudur. Bazı tekniklerin uygulaması sıvıdan katıya geçişte yapılırken tikso kalıplama işleminde katıdan sıvıya geçişle gerçekleştirilmektedir. Tikso kalıplama yönteminde, tozlar yarı-katı hale getirildikten sonra belirli bir basınç altında kalıp boşluğu doldurulur.

Yarı-katı üretim teknolojisi, özellikle askeri uygulamalarda, havacılık ve uzay sanayi, yakıt tankları, otomobil ön ve arka aksları, motor parçaları, fren diskleri, kilitlemesiz fren sistemi, süspansiyon parçaları, şasi, jantlar v.s. gibi yüksek nitelikli ve çok iyi bir yüzey kalitesi gerektiren parçaların üretilmesi için idealdir (Eisen et al., 2000).

Alüminyum ve alaşımları düşük yoğunlukları ve yüksek dayanım/ağırlık özelliklerinden dolayı, birçok uygulama alanında başarı ile kullanılan vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. Bugün, bazı özellikleri ile çelik ile karşılaştırılabilir durumdadır. Yeni alaşımların geliştirilmesi ve yeni üretim tekniklerinin (özellikle toz metalurjisi ve tikso kalıplama yöntemleri) geliştirilmesiyle, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılabilir hale getirmiştir. Ülkemizde, otomotiv sektörü sürekli olarak gelişmekte ve yeni ve üstün nitelikli üretimler yapılabilmektedir. Mevcut alaşımların özellikleri ile farklı üretim tekniklerinin bir araya getirilmesi, elde edilen ürününde kalitesini artırmaktadır. Alüminyum hem dünyada hemde ülkemizde çok iyi bilinen ve aynı zamanda üretimi de yapılan bir metaldir. Ancak artık klasik üretim tekniklerinden ziyade gelişen teknolojiler kullanılarak daha nitelikli ürünler elde edilmeli ve yeni teknolojilere yatırım yapılmalıdır. Ülkemiz mevcut teknoloji alt yapısı göz önünde bulundurulduğunda, yeni üretim tekniklerine ayak uydurabilecek durumdadır.

Metal matrisli kompozitler (MMK), sahip oldukları üstün özelliklerden dolayı üzerinde yoğun çalışmalar yapılan malzeme grubunu oluşturmaktadır. Yüksek mukavemet, sertlik, aşınma özelliği ve yüksek çalışma sıcaklıkları gibi üstün özelliklere sahiptir (Salvador et al., 2003).

Kompozit malzemeler farklı özelliklere sahip malzemelerin iyi özelliklerinin makro seviyede kombinasyonuyla elde edilen malzemelerdir. Seramik takviyeli alüminyum kompozitlerde(AMK) ise bu durum, matrisin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılmaktadır (Gomez et al., 2004). Seramik parçacıkların matris içerisindeki dağılımından dolayı bu tip kompozitler parçacık takviyeli alüminyum kompozitler (AMK) olarak da adlandırılır. Günümüzde bu tür malzemelerin endüstriyel kullanımında iki önemli sınırlama söz konusudur. Birincisi yüksek üretim maliyeti ikincisi ise kompozitin üretimi esnasında ve yüksek çalışma sıcaklıklarında takviye elemanı ile matris arasındaki ara yüzey reaksiyonudur (Guo et al., 1995). Yüksek sıcaklıklarda kompoziti oluşturan bileşenlerde meydana gelen arayüzey malzemenin mekanik özelliklerini olmsuz yönde etkilerken, makroskopik seviyede gerçekleşen difüzyon olumlu yönde etkiler (Ernst, 1995; Kouji, 1995).

MMK'lerin mekanik davranışları üzerine yapılan araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Malzeme cinsi, boyutları, şekli, takviye fazının hacimsel oranı, matris içerisindeki dağılımı ve ara yüzey özellikleri, MMK'ların deformasyon ve hasar parametreleri üzerinde etkili olmaktadır (Ernst, 1995). Bu parametrelerden birçoğu büyük oranda kompozitin üretim şartlarına bağlıdır. Ayrıca metaller ve seramikler gibi MMK'ların aşınma davranışları da mikroyapıya, uygulanan yüke ve temas yüzeyi ile ilişkilidir. Kompozit malzemelerin üretiminde farklı takviye elamanları kullanılmaktadır. Bu malzemeler, temelde yapısal şekillerine göre sürekli ve süreksiz olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır. Tipik olarak oksit, nitrit ve karbürler olarak sınıflandırılabilirler. Takviye elemanı olarak kullanılan seramik malzemeler yüksek elastik modüle ve ergime sıcaklığına, düşük yoğunluğa ve termal genleşme katsayısına sahip olmalıdırlar. Bunların yanında yüksek termal kararlılık ve matris malzemesi ile uyumlu olmalıdır.

Bu çalışmada otomotiv ve elektronik endüstrisinde parça üretiminde kullanılan yarı katı işlem (tikso kalıplama) tekniği ile Al matrisli SiC takviyeli kompozit malzeme üretimi hedeflenmiştir. Matris malzemesi olarak otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılan Al-Si (A356) alaşımı ve SiC takviye elemanı tercih edilmiştir. Yapılan literatür analizlerinde metal ve alaşımlarında yarı katı işlem teknikleri ile küresel mikroyapılar elde edilebilirken kompozit malzemelerde istenilen küresel tane yapılarının elde edilemediği belirlenmiştir. Bu nedenle tikso kalıplama işlemi ile metal ve alaşımlarında elde edilebilen küresel tane morfolojisine

sahip Al/SiC kompozit malzemelerin üretimi ve optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi bu çalışmanın temel amacıdır.

BÖLÜM 2

ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum periyodik cetvelin III A gurubunda bulunan ve atom numarası 13, atom ağırlığı 26.89 olan +3 değerlikli bir elementtir. 20ºC'deki yoğunluğu 2,7gr/cm^3, ergime noktası 658°C, ısınma ısısı 0.224Cal/gr (1000°C'de), erime ısısı 400Cal/gr. dır. 20°C'taki elektriksel iletkenliği bakırın %65'i, ısıl iletkenliği 0,5, ışık yansıtılabilirliği %90'dır ve bu özellikler alaşım elementleri ile büyük ölçüde değiştirilebilmektedir.

2.1 ALÜMİNYUMUN AVANTAJLARI

Alüminyumu diğer metallere göre birçok alanda avantajlı kılan en önemli özellikleri;

1. Hafifliği,

2. Hafifliğine karşın alaşımlandırıldığında yeterli mukavemeti,

3. Yüksek korozyon direnci,

4. Tekrar kullanılabilirliği,

5. İşlenebilirliği,

6. Şekillendirilebilirliği,

7. Dövülebilirliği,

8. Çekilebilirliği,

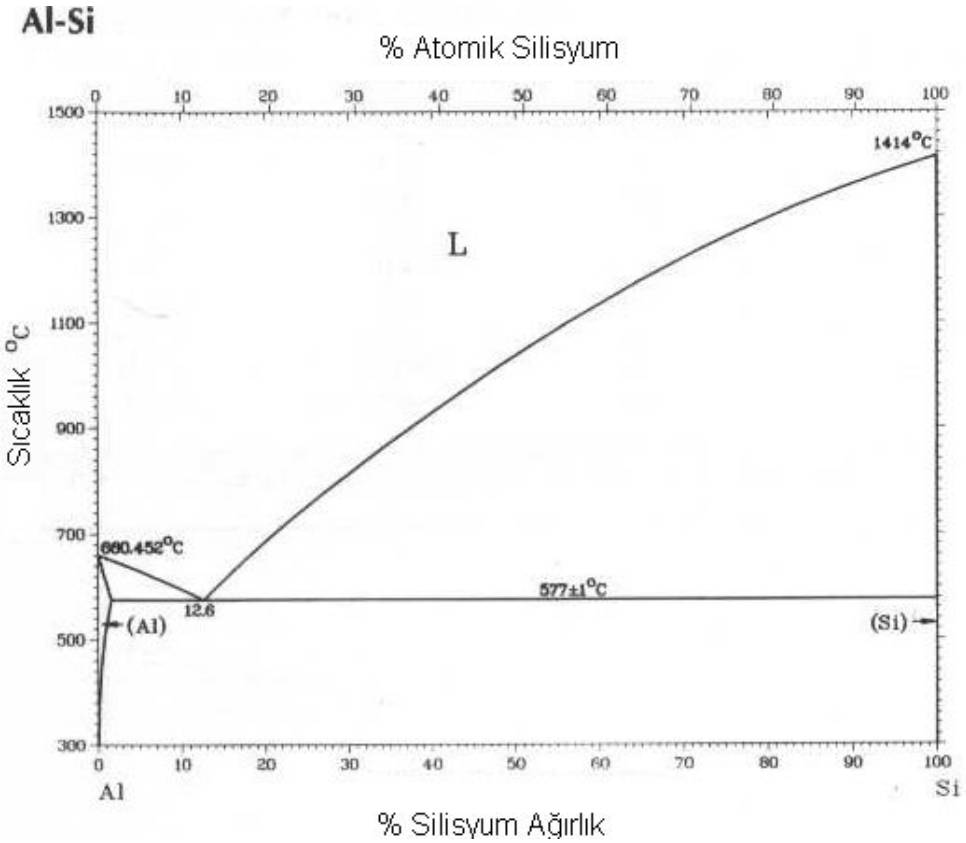
9. Yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği,

10. Işık ve ısı yansıtıcılığı olarak sıralanabilir.

Demirden yaklaşık olarak üç kat daha hafif olan alüminyum, alaşımlandırılarak demire yakın mukavemette bir malzeme olmaktadır. Böylece, alüminyumun otomotiv sektöründe kullanımı, aracın ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini düşürmekte, buna karşılık yük kapasitesini arttırmaktadır. Alüminyum normal atmosferik şartlarda oksijen ile reaksiyona girerek yüzeyinde doğal bir koruyucu film tabakası oluşturur. Ortalama $635x10^{-9}$ cm kalınlığında olan bu alümina tabakası alüminyumu korozyondan korur.

2.2 ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARI (Al-Si)

Ana alaşım elementi Si olan Alüminyum döküm alaşımları, üstün döküm özelliklerinden dolayı en önemli ticari döküm alaşımlarıdır. Al-Si alaşımları yüksek akıcılık değerlerine sahiptir. İkili Al-Si alaşımlarına ısıl işlem uygulanabilir olarak düşünülemez. Çünkü sadece küçük bir miktar silisyum (Max. 1.65 Si) alüminyumda çözünebilir ve çok düşük miktarda sertleşmeye neden olur (Erdoğan, 2001). Şekil 2.1'de Al-Si denge diyagramı verilmektedir.



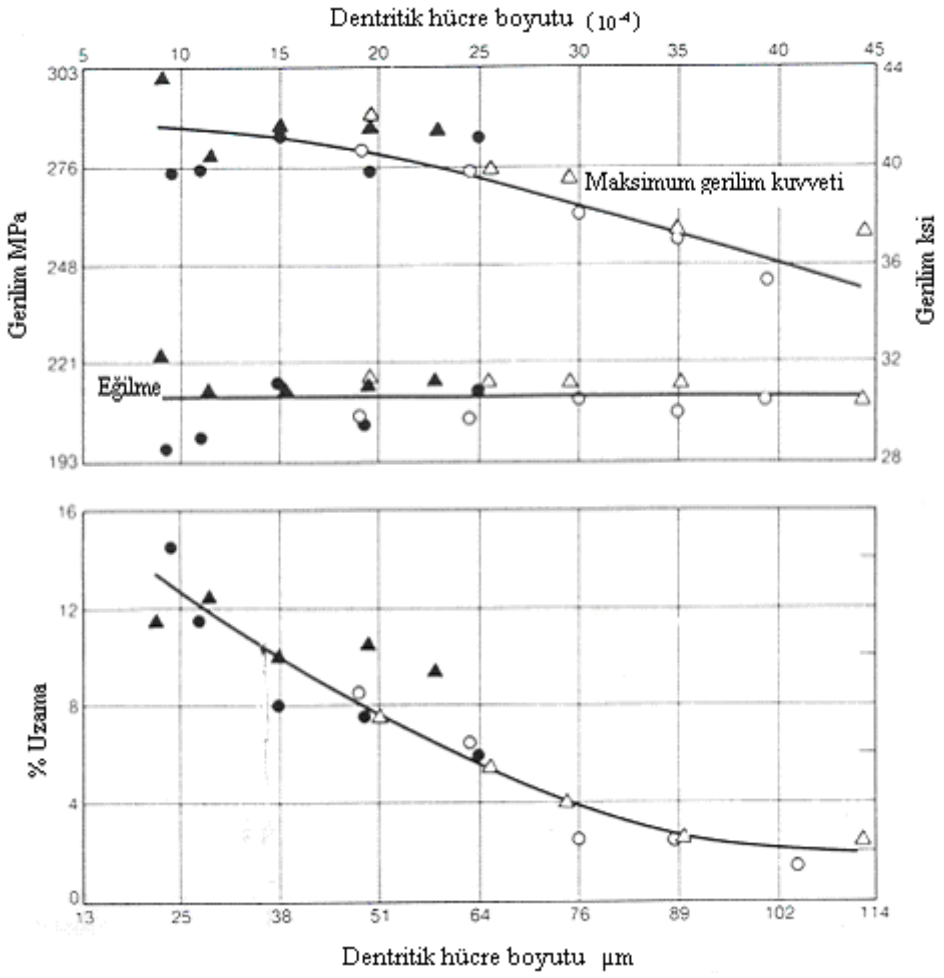
Şekil 2.1 Alüminyum-Silisyum denge diyagramı (Handbook, 1992).

2.2.1 Yapı Kontrolü

Katılaşma sırasında yapıda oluşan intermetalik fazlar, bu fazların dağılımı ve boyutu gibi değişkenlerin, malzemenin mikroyapısal özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bununla beraber kimyasal kontrol, (özellikle impurite elementleri konsantrasyonları) intermetalik fazların kontrolü ve intermetaliklerinin boyut ve dağılımının üniform olarak sağlanması için katılaşma şartlarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan tane incelticiler Al-Si alaşımlarında ötektik ve hiperötektik yapıları etkilemek için ilave edilmektedir. Tane incelticilerin kullanımı döküm işleminde mikroyapının optimize edilebilmesindeki yöntemlere bir örnektir (Handbook, 1988).

2.2.2 Dentrit Kolları Aralığı

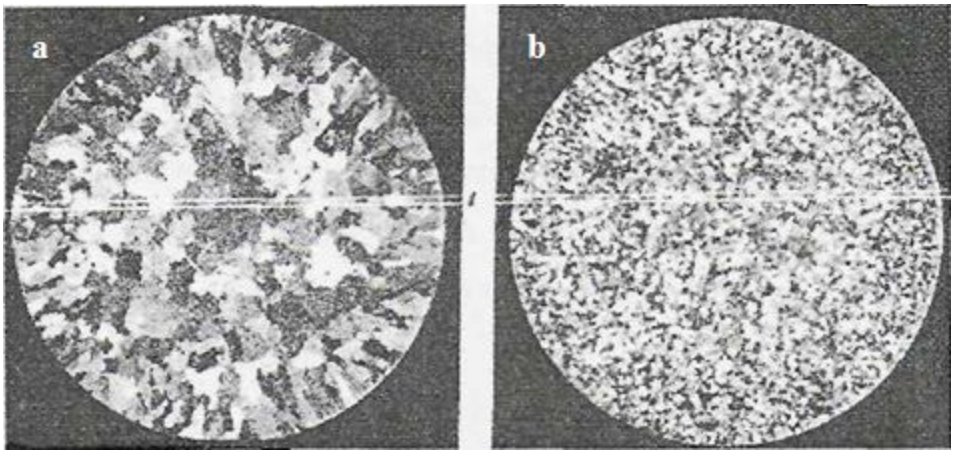
Bütün ticari işlemlerde katılaşma, sıvı çözeltide dentritlerin oluşumuyla gerçekleşmektedir. Birincil dentrit kollarının yönlü ayrışmasına benzeyen ve sadece tek bileşime sahip dentritik yapılı hücreler, katılaşma ile kontrol edilir. Mikroyapısal incelemelerde, farklı döküm yöntemlerinin sınıflandırılmasıyla tek yönlü katılaştırılmış numunelerin kısa katılaşma aralıklarının yeniden verilmesinden, elde edilen verilere kadar bir dökümün verilen bir bölgedeki katılaşma oranını sınırlandırmak mümkündür. Katılaşma oranına bağlı olarak dentrit oluşumunun değişmesiyle ortaya çıkan mekanik özelliklerin artışı Şekil 2.2' de gösterilmektedir. Değerli mühendislik alaşımlarında ve diğer bir çok uygulamalarda bütün dikkat, optimum mekanik özellikleri geliştirmek yerine elde edilen katılaşma oranına verilmektedir.



Şekil 2.2 Katılaşma oranına bağlı olarak dentrit oluşumundaki değişim (Handbook, 1988).

2.2.3 Tane Yapısı

Alüminyum dökümlerde ince eşeksenel tane yapısı tercih edilmektedir. Oluşan tane boyutu ve tipi heterojen tane çekirdeklenmesi için sağlanan bölgelerdeki intermetalik faz parçacıkları içeren master alaşımların ilavesiyle, katılaşma oranıyla ve alaşımın bileşimiyle belirlenir. Eğer tane incelticiler kullanılmazsa alüminyum alaşımlarının normal katılaşmaları sırasında kaba sütunsal veya eşeksenel tane yapıları oluşmaktadır. Kaba sütunsal tane ve inceltilmiş tane yapısı Şekil 2.3 a ve b' de verilmektedir. Şekil 2.3 b' deki görüntüde aynı alaşımın inceltilmiş tane yapısı, katılaşma sonrası soğuma ve katılaşma sırasındaki çatlak direnciyle ilişkilidir. Bu oluşumun yüksek sıcaklıklarda çekme kuvveti dayanımını azalttığından kaba taneli yapılarda tane sınırı oluşumlarının hassasiyetinin bir sonucu olduğu şeklinde değerlendirilebilir (Handbook, 1988).



Şekil 2.3 Tane yapıları a. kaba sütunsal tane yapısı, b. inceltilmiş tane yapısı (Handbook, 1988).

İnce tane yapısı, normalde oluşan intermetaliklerin boyut ve dağılımı ile ilişkilendirilerek, döküm özellikleri üzerindeki etkileri de minimize etmektedir. Yüksek sıcaklık aralığında likidüs ve solidüs arasındaki bölgede beslemenin azalması, geniş ve çözünmemiş intermetalik oluşumuna neden olur. Tane inceltmesi, tane sınırı etkisinin büyüklüğünü azaltarak 2XXX ve 5XXX serileri gibi bazı baskın katı eriyik alaşımların sıcak yırtılma eğilimlerini önemli oranda azaltır. Etkili tane inceltmenin avantajları;

1. Besleme karakteristiklerini geliştirmesi
2. Sıcak yırtılma dayanımını artırması
3. Mekanik özellikleri geliştirmesi
4. Basınç sızdırmazlığını ve ısıl işlemlere tepkiyi geliştirmesidir.

2.2.4 Tane İnceltme İşlemi

Bütün alüminyum alaşımları uygun tane incelticiler kullanılarak, tamamen eşeksenel ve ince taneli yapı elde edilebilir. Alüminyum alaşımlarında en yaygın kullanılan tane incelticiler, titanyum ve bor'dur. Titanyum tane incelticileri alüminyuma genellikle %3-10 arasında ilave edilir. Aynı aralıklardaki Al-Ti-B tane incelticileri olarak %0,2 bor ve yaklaşık %5-50 oranlarında titanyum-bor kullanılır. Bu tip tane incelticilerin master alaşımlar olarak düşünülmüş olmasına rağmen, genel olarak bunlar sadece alaşımlama amaçlı olarak ergiyiğe ilave edilen master alaşımlarından farklıdır. Tane incelticilerin etkili olması için, çekirdeklenme sırasında doğru şekil, boyut ve dağılımda işlevsel miktardaki aluminatlar ve boritler kullanılmalıdır. Çubuk şeklindeki tane incelticiler (başlıca işlemlerde alüminyumun

sürekli işlemi için geliştirilmiş), dökümde belirli uzunluklarda kesilerek kullanılır. Ayrıca, tane inceltici master alaşımlar TiB_2 ve $TiAl_3$ kombinasyonları şeklinde sıvı alüminyuma tuzlar olarak da (genellikle preslenmiş tablet şeklinde) ilave edilebilir (Handbook, 1988).

Tane inceltmenin temel ilkelerinin bilinmesine rağmen, laboratuar ortamındaki teori veya mekanizmalar henüz endüstriyel alanda uygulanamamıştır. $TiAl_3$ görünüşte alüminyumun kristal çekirdeklenmesinde aktif bir faz olarak bilinmektedir. Çünkü kristolografik kafes yapısında benzerlik söz konusudur. $TiAl_3$'da çekirdeklenme, çözündürme veya hızlandırma ve yüksek titanyum konsantrasyonlarındaki peritektik reaksiyon ile meydana gelmektedir. Tane inceltme, önceden tahmin edilen çok düşük titanyum konsantrasyonlarında Al-Ti' un % 0.15 bileşiminin peritektik nokta teorileri ile yapılabilir. Son bulgular Ti-Al-B tipi tane çekirdeklenmesinde çok karmaşık yapılı borların aktif rolünü göstermektedir (Handbook, 1988).

Normal alüminyum dökümlere titanyum ilave edilerek üretilen master alaşımlarda yapı, çoğu zaman eşekseneldir. Bazı bileşimlerin testlerinde (özellikle Al-Si alaşımlarında) alüminyum bor ve titanyum bor içindeki fazla titanyumun, tane inceltmeyi artırdığı belirlenmiştir (Spencer et al., 1972). Titanyum veya daha yüksek oranlı titanyum-bor master alaşımları sadece tane boyutu kontrolü için kullanılmaktadır.

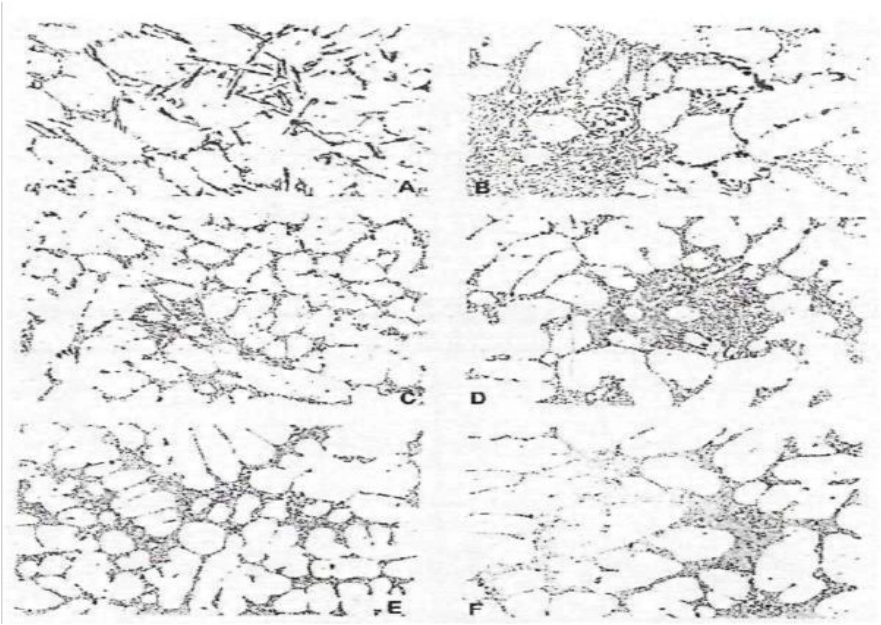
2.3 ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME VE MODİFİKASYON

Hipoötektik Alüminyum-Silisyum alaşımlarında ötektik bulunan bölgeler yapı olarak farklılık göstermekle birlikte yapısal olarak da geliştirilebilmektedir. Genelde %5 silisyum içeren alaşımlarda gelişim kaydedilmektedir.

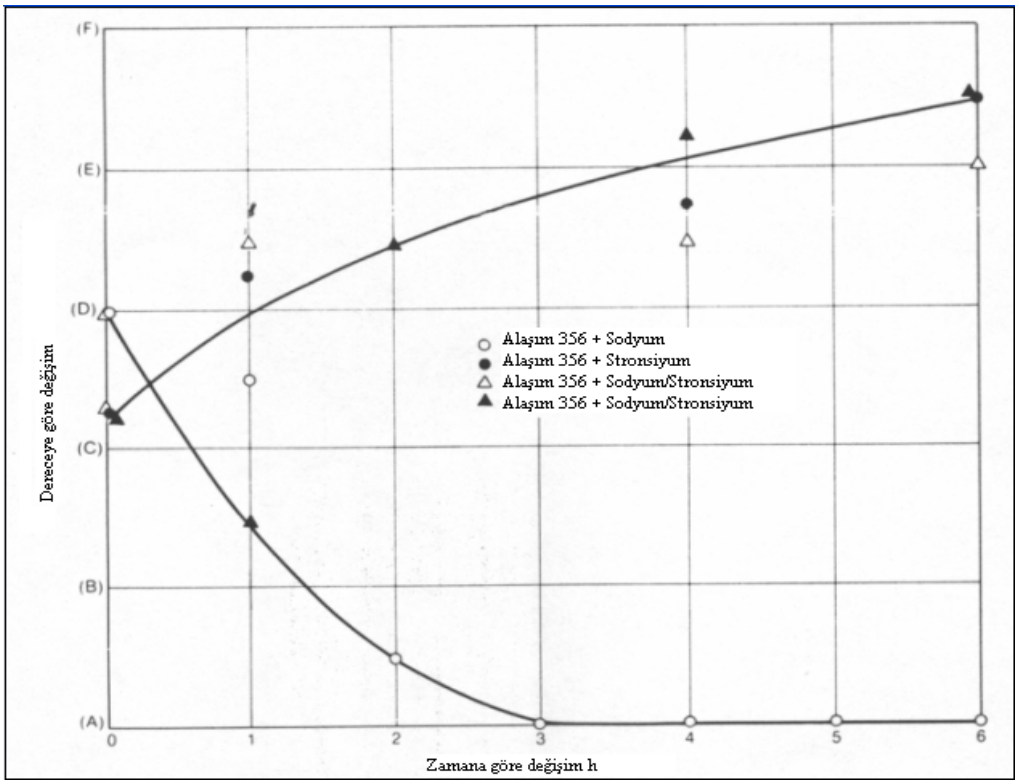
2.3.1 Kimyasal Değiştiriciler

Bazı elementler (kalsiyum, sodyum, stronsiyum ve antimon gibi) hipoötektik alüminyum-silisyum alaşımlarında ötektik ağ içinde çok ince lameller veya lifler halinde bulunurlar. Ayrıca katılaşma oranındaki artışın benzer yapılar içinde yarar sağladığı görülmüştür. Bir

araştırmada silisyum kristallerinin ötektik ile birlikte büyüme gösterdiği ortaya konulmuştur. Ötektiğin gelişmesi, ince lamellerin dengeli dağılımı ile olmaktadır (Spencer et al., 1972). Ötektik değişikliğindeki farklı oluşumlar Şekil 2.4' de verilmektedir.



Şekil 2.4 A'dan F'ye sırayla alüminyum-silisyumun ötektik değişikliğinin farklı oluşumları (Handbook, 1988).



Şekil 2.5 Farklı modifiye elemanı içeren A356 alaşımında modifiye elamanının zaman sıcaklık üzerindeki etkisi (Handbook, 1988).

Modifiye elementlerinin ilavesi, genellikle doygun hidrojen ile birlikte artış gösterir. Bu durumda sodyum ve kalsiyum reaksiyonları, çözeltisi içerisinde kontrol edilememektedir. Stronsiyum kullanıldığında reaksiyonlardaki artış, bileşiklerin oluşmasıyla ve hidrojen seviyelerinin düşmesiyle birlikte olmaktadır. Bu durumda stronsiyumun hidrojen ile yaptığı oluşumlar, yüksek sıcaklıklarda bozulabilir ve metal alaşımlarından sonra hidrojen çözünebilirliğinin artışına dair sayısız belirtiler vardır.

Antimon yapısal değişikliklerdeki ilerlemenin sürekliliğini korur. Bu durumda, farklı yapısal değişiklikler, inceltilmiş ötektikle (iğnemsi) birlikte mikroyapının daha homojen görüntü sergilemesini sağlar. Modifiye elementleri modifikasyon işlemini sağladığında ise ötektikle inceltme gerçekleşir. İlk olarak sıvı malzeme içerisinde serbest fosfor davranışı gösterir ve ikinci aşamada sıvıdan ilk katılaşmanın hızı yaklaşık olarak minimum eşdeğeri aşmak zorundadır. Al-Si alaşımlarının dökme işlemi sürekli döküm kalıplarında gerçekleştirilmelidir.

Kalsiyum ve sodyum ergimiş alüminyuma metalik olarak veya tuz halinde ilave edilebilir. Çoğunlukla vakumlanmış veya paketlenmiş sodyum metali kullanılır. Bazı yerlerde de stronsiyum kullanılabilir ve yaklaşık olarak da % 10-90 arasında stronsyum içeren alüminyum ve stronsiyum master alaşımları, modifiye edilmiş doygun stronsyumun içerisine ilave edilir.

2.3.2 Hiperötektik Alüminyum-Silisyum Alaşımlarında Tane İnceltme

Hiperötektik Al-Si alaşımlarının makine parçalarının dökümü ve imalatında kullanıldığı durumlarda tane inceltme işlemlerinin yapılması önemli bir zorunluluktur. Ergiyik alaşım içerisine fosfor ilavesi, silisyumun ötektik bileşiminden metalik fosfor veya fosfor içeren bileşiklerin oluşmasına neden olur. Yapılan bir çalışmada, %0.005-0.03 arasında düşük fosfor konsantrasyonlarının, inceltilmiş yapı elde etmek için sonuç verici olduğunu ortaya koymaktadır (Handbook, 1988).

BÖLÜM 3

ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Geliştirilmiş mekanik özelliklerinin yanında, malzeme ve enerji kazancı bakımından ve hafif olmaları nedeniyle Metal Matrisli Kompozitler (MMK) yeni malzeme grubu olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca bu malzemelerin iyi sürtünme ve aşınma özellikleri, aşınmaya karşı uygulamalarda sürtünen ve aşınan bölgelerin veya parçanın tamamının bu malzemelerden yapılmasını zorunlu kılmaktadır (Agyekum et al., 1986). Özellikle Havacılık ve Savunma Sanayinde hafif ve dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulması, toz metalürjisi (TM) ile üretilen metal matrisli kompozit malzemelere olan ilginin son on yılda katlanarak artmasına sebep olmuştur (Sanders, 1986).

Kompoziti oluşturan bileşenler, genelde farklı kimyasal bileşime sahiptirler ve birbirleri içerisinde çözünmezler. Yapısal olarak kompozitlerde tek bileşenli alaşımlarla başarılamayan gerekli özellikleri sağlamak üzere bir metal alaşımlı matris içerisine ilave edilen takviye elamanları sürekli veya süreksiz olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır. Takviye elamanları şekline göre beş alt gruba ayrılmaktadır (Huda, et al., 1995).

1. Sürekli fiberler
2. Süreksiz (Kısa) fiberler
3. Wiskers
4. Parçacıklar
5. Teller (Metal)

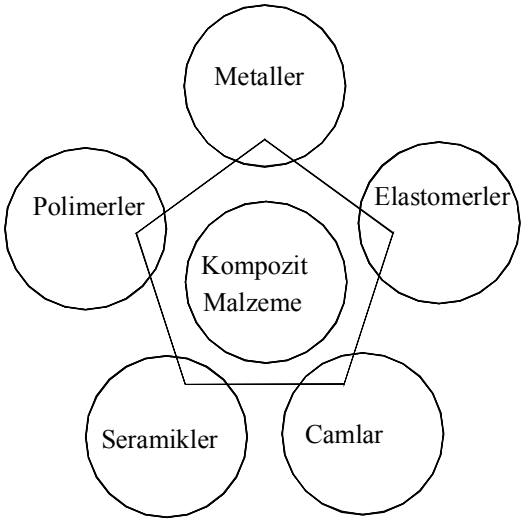
Kompozit malzemeler yapısal bileşenlerin şekline ve matris yapısına göre;

1. Takviye edildikleri yapısal bileşenlerine göre
    - Sürekli fiber takviyeli kompozitler
    - Süreksiz parçacık takviyeli kompozitler
    - Wiskers veya süreksiz fiber takviyeli kompozitler

- Levhasal kompozitler
- Doldurulmuş (veya iskelet) kompozitler
- Tabakalı kompozitler

2. Matris malzemesine göre
   - Seramik matrisli kompozitler (SMK)
   - Polimer matrisli kompozitler (PMK)
   - Metal matrisli kompozitler (MMK)

Şeklinde sınıflandırılmaktadır. Şekil 3.1'de kompozit malzemeleri meydana getiren malzeme sınıfları gösterilmektedir (Ashby, 1993).



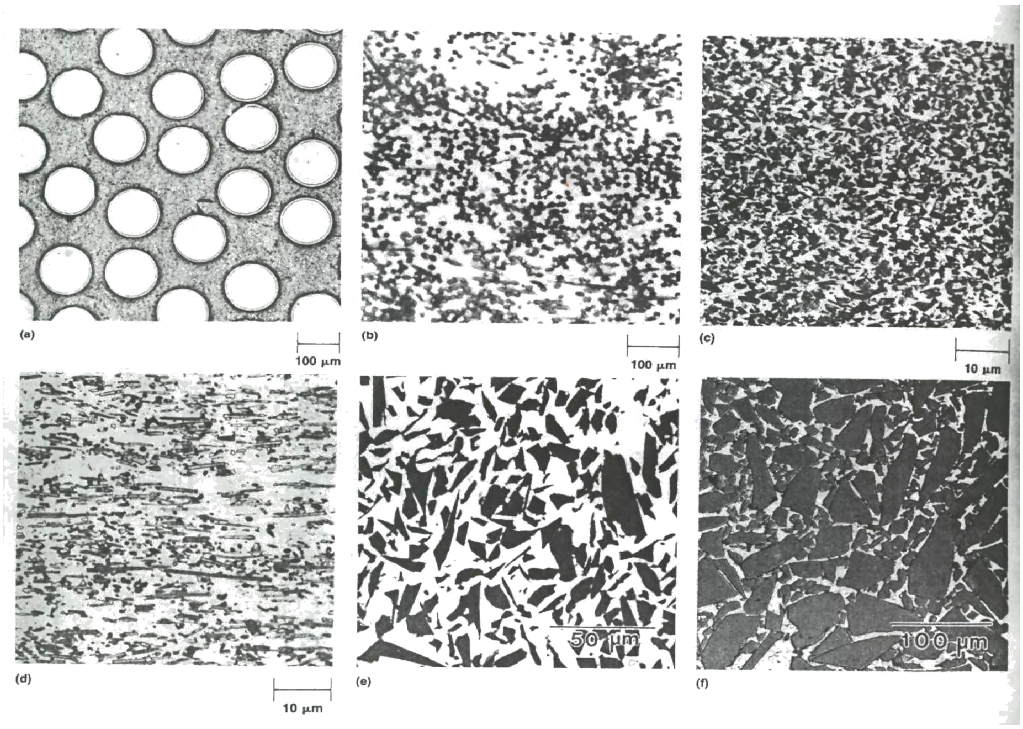
Şekil 3.1 Kompozit malzemeleri meydana getiren malzeme sınıfları (Ashby, 1993).

Bu açıdan, günümüzde elde edilebilen MMK'ler başlıca üç gruptan birinde yer almaktadır:

1. Sertliğin ve çoğunlukla da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bir bağlayıcı matris içine tanecikler şeklindeki takviye elamanlarının ilavesiyle oluşturulan parçacık takviyeli kompozit malzemeler,
2. Yüksek uzunluk/çap (L/D) oranı nedeni ile daha büyük yük taşıma yeteneğine sahip dolayısıyla yüksek dayanımlı wiskers, kısa fiber veya lamel esaslı kompozit malzemeler,
3. Yükün fiberler tarafından taşındığı sürekli fiber esaslı kompozit malzemelerdir.

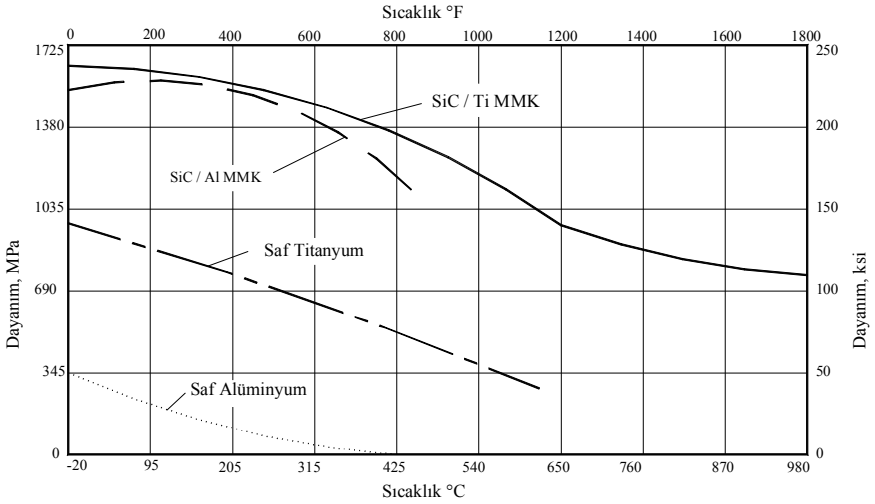
Alüminyumun hafif bir metal olması nedeni ile son yıllarda alüminyum matrisli kompozitler üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda amaç hafif olan ve üstün özelliklere sahip yapılar elde etmektir. Alüminyum içerisine ilave edilen SiC, TiC, Al_2O_3 vb. takviye elemanları çekme dayanımı, elastikiyet modülü, aşınma dayanımı ve özellikle yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri olumlu yönde etkilemektedir (Silcock, 1960).

Metal matris malzemelerin kullanımında alüminyum kompozitlarin ön plana çıkması yüksek dayanım ve mekanik özelliklerin ticari ortama yansımasıyla artmıştır. Birleştirmelerdeki hafifliği, çevre koşullarına direnci de alüminyum kompozitleri çok popüler hale getirmiştir. Ayrıca farklı takviye elemanlarının kullanabilirliği alüminyum kompozitlerin kullanım alanlarını her geçen gün geliştirmektedir. Sürekli fiber takviyeli olan bor, Al_2O_3, SiC ve grafit fiberler ve çeşitli seramik parçacık takviyeli, kısa fiberler ve wiskerslerden üretilen alüminyum MMK'lerin yapıları Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Farklı takviye elamanları ile güçlendirilmiş MMK malzemeler a. Sürekli fiber takviyeli boron/Al kompozitler, b. Süreksiz grafit/alüminyum kompozit, c. % 40 SiC parçacık takviyeli 6061 alüminyum alaşımlı matris, d. (% 20 SiC hac.) Wiskers takviyeli alüminyum MMK, e. (% 60 Al_2O_3 hac.) Parçacık takviyeli alüminyum MMK, f. % 81 SiC parçacık takviyeli alüminyum alaşımı (Handbook, 2001).

Metal malzemeler ile, kompozit malzemelerin sergilemiş olduğu 260°C (500°F) üzerindeki sıcaklıklardaki dayanımı Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Bu malzemelerin uygulama alanlarının arttırılması ve geliştirilmesi üzerinde durulmaktadır (Handbook, 2001).



Şekil 3.3 Metal malzemeler ile iki farklı MMk malzemenin sıcaklık altındaki dayanımları (Handbook, 2001).

BÖLÜM 4

YARI KATI İŞLEMİN GELİŞİMİ

Döküm sektöründe yarı-katı alaşımların basınçlı dökümde şarj malzemesi olarak kullanılması, son yıllarda üzerinde araştırmaların yoğunlaştığı bir konu olmuştur. 1971 yılında, Spencer ve arkadaşları tarafından, yarı katı metaller ve alaşımlarının özellikleri üzerindeki ilk çalışma M.I.T.' de (Massachusetts Institute of Technology) başlamıştır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalar, içerisinde %15 Sn bulunan Sn Pb alaşımları üzerine olmuştur (Spencer, 1972).

Tikso kalıplamanın en önemli avantajlarından birisi de, son şekle yakın bir malzeme üretim olması nedeniyle, bu yöntemle üretilen malzemelerin klasik döküm yöntemiyle üretilmiş olan malzemelerle rekabet edebilmesidir. Yine bu yöntemin çalışma prensibi kolaylıkla anlaşılamamasına rağmen, dövme ve klasik dökümle mukayese edilebilmektedir. Farklı zamanlarda bilim adamlarının yarı-katı işlem ve tikso kalıplama işlemi ile ilgili yapmış olduğu çalışmalar vardır. Örneğin 1971 yılında M.I.T.' de yapılan araştırmalar sonucunda, A380 alaşımının yarı-katı fazda pres döküme elverişliliği araştırılmış ve %40'a kadar katı içerdiği durumda basınçla dökümün yapılabileceği saptanmıştır. Yine bu konuda yapılan diğer bir araştırmada, bulamaç (çamur) halindeki metal ön şekillendirme yapıldıktan sonra, yarı-katı aralığına dek yeniden ısıtılıp basınç altında şekillendirilmiştir Bu parçalar, ısıtıldıkları sıcaklıkta katı davranış göstererek aldıkları şekli muhafaza ederler. Aynı zamanda basıncında etkisiyle birlikte akıcı sıvı özelliği göstererek kalıp boşluğunu doldururlar (Çavuşoğlu, 1992).

1972 yılında yarı-katı işlemle Cu-15 Sn ve Fe, %3 C, %4 Si alaşımları inert bir atmosfer veya vakum ortamında "Reo döküm" yöntemiyle dökümü yapılabilmiştir (Handbook, 1988). Yine yapılan başka bir çalışmada %85 Cu, %5 Pb, %5 Zn, %5 Sn alaşımı ve Cu-%10 Sn, %2 Zn, alaşımları %50 katı oranında Reo ve Tikso kalıplama yöntemleriyle başarılı bir şekilde dökümü yapılabilmiştir (Çavuşoğlu, 1992).

Otomotiv sektörüne yönelik parçaların yarı-katı yöntemle üretiminde, elektromanyetik indüksiyonların kullanılması, ticari üretim uygulamalarında daha verimli ve farklı bir yöntem olduğu saptanmıştır (Ward, 1995).

Kapranos ergime derecesi yüksek olan alaşımların da yarı-katı işlemle dökülebileceğini, 1993 yılında yapmış olduğu bir çalışmayla kanıtlamıştır (Kapranos, 1996). Yine Kapranos, 1996 yılında yapmış olduğu çalışmada ergime derecesi yüksek olan alaşımların elektro manyetik indüksiyonla ısıtma yöntemiyle değişken frekanslarda curufun kısmi ergimesinin de sağlanabileceğini göstermiştir (Kapranos, 2000).

4.1 YARI-KATI ÜRETİM TEKNOLOJİSİ

Bu teknoloji, adından da tahmin edilebileceği gibi, %50 katı ve %50 sıvıdan oluşan yarı-katı metal şekillendirme işlemidir. Dövme işlemi ve dökümün her ikisini de yapısında bulunduran karma bir üretim yöntemidir. Buradaki amaç; yapıda dentritlerin olmadığı küresel bir mikroyapı ve son şekle yakın bir ürün elde etmektir. Bu yöntem özellikle otomotiv, uzay ve havacılık sektörü gibi hafiflik ve aynı zamanda iyi bir mukavemetin bir arada istendiği yüksek kalitedeki parçaların üretiminde kullanılır (Eisen, 2000).

Yarı-katı üretim teknolojisi, özellikle askeri uygulamalarda, uzay ve havacılık sektörü, yakıt tankları, otomobil ön ve arka aksları, motor parçaları, fren diskleri, kilitlemesiz fren sistemi, süspansiyon parçaları, şasi, jantlar v.s. gibi yüksek nitelikli ve çok iyi bir yüzey kalitesi gerektiren parçaların üretilmesi için idealdir. Alüminyum otomobil jantları, yarı-katı üretim teknolojisi ile üretildiğinde diğer yöntemlerle üretilen jantlara nazaran, iyi mekanik özelliklere sahip, daha izotropik ve daha yoğun yapılıdır (Eisen, 2000).

Yarı-katı üretim teknolojisi ile üretilen parçalar, geleneksel yöntemlerle üretilmiş olan parçalarla karşılaştırıldığında daha az gözenek, daha iyi mekanik özellikler ve daha uygun bir fiyat avantajına sahiptirler. Metal ve alaşımlarında kullanılan yarı-katı üretim teknikleri dövme döküm (squeeze casting), tikso döküm(thixo casting), reo döküm (rheo casting) ve tikso kalıplamadır (thixo moulding).

Yarı-katı üretim teknolojisi ile karmaşık şekilli parçalar bile, kolaylıkla üretilebilmektedir. Ayrıca, yarı-katı işlemin elektronik (özellikle cep telefonu ve bilgisayar teknolojileri alanında) ve otomotiv endüstrilerinde uygulaması yoğun bir şekilde devam etmektedir. Çünkü yarı-katı işlem klasik döküm yöntemlerindeki genel işlem aşamalarından daha avantajlıdır. Bu avantajlar; kalıp ömrü, işlemlerin iyileştirilmesi, üretim kusurlarının azaltılması ve son şekle yakın parçaların elde edilmesidir.

Kouji, yapmış olduğu çalışmada; yarı-katı üretim teknolojisi ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini, klasik döküm yöntemleriyle üretilmiş olan malzemelerin mekanik özellikleriyle karşılaştırmış ve katılaşma sırasındaki hızlı soğuma nedeniyle, darbe dayanımında, yorulma dayanımında ve çekme geriliminde kayda değer bir artışın görüldüğünü belirtmiştir (Kouji, 1997).

Kapronos ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ise, yarı-katı üretim teknolojisi ile klasik üretim yöntemlerinin yüksek sıcaklık alaşımlarına göre daha iyi olduğunu ve kısmi ergime aralığındaki dentritsiz yapıların yarı-katı halde dövülebilirliğinin iyileştirildiğini göstermektedirler (Kapranos, et al., 1992).

Witulski ve arkadaşları da, bazı özel niteliklere sahip alaşımlar (A356/357 gibi yarı-katı işlem uygulanılabilen), yüksek sıcaklıklara çıkıldığında çatlamasına rağmen, tikso kalıplama işleminin mükemmel bir şekilde yapılabileceğini belirtmişlerdir (Witulski, et al., 1998).

Tietmann ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yarı-katı üretim teknolojisi ile alüminyum alaşımlarının daha iyi mekanik özelliklerle üretilmesi ve aynı zamanda katılaşma sırasındaki hidrolik basınçla birlikte karmaşık şekilli parçalarında üretilebileceğini söylemektedir (Tietmann, et al., 1992).

4.1.1 Dövme Döküm

Bu yöntem 1950 yılında eski Sovyetler birliğinde ortaya çıkmış ve 1974 de U.S.A.'da ticari olarak demir dışı metal ve alaşımları için kullanılmaya başlanmıştır. Belli miktardaki sıvı metale tek bir dövme vuruşu uygulanarak yüksek kompaktlıkta üretim yapılabilen bir döküm yöntemi olarak tarif edilebilir. Bu yöntemle dövme ve döküm yöntemlerinin getirdiği iyi

özellikler birleştirilmiş ve dövme devamındaki sürekli sıkıştırma ile yapıda bulunan inklüzyonların kırılacak mikro gözeneklerde meydana gelen kaynama ile parçanın daha homojen hale gelmesi sağlanmaktadır. Küçük preste gerçekleştirilen işlem, basıncı direkt olarak etkilemesi sonucu ergimiş metalin tamamının kullanılması, yollukların ortadan kaldırılmış olması, daha az enerji maliyeti ve dolayısıyla mekanik işleme maliyetlerinin düşük olmasından dolayı, diğer döküm yöntemlerinden daha ekonomiktir.

Bu döküm yönteminde elde edilen mikroyapılar, birbirine çok yakın ve küçük tanelerden oluşmaktadır. Küçük tane boyutu, uygun bir çekirdeklenme ve düzenli büyüme hızlarının sonucunda meydana gelmektedir. Çekirdeklenme mekanizması ilk aşamada kalıp cidarlarındaki hızlı soğumuş kısımlarda oluşur. Basıncın etkisiyle metal hareketi sonucunda tekrar ergime ve dentrit kollarında kopma meydana gelir. Gerek hızlı soğuma, gerek karışma ve gerekse uygulanan basınç, çekirdeklenmeyi (katı merkezlerinden katılaşma) artırıcı etki yapar. Böylelikle boşluksuz, homojen ve ince bir mikroyapı elde edilmiş olur. Ayrıca oldukça iyi mekanik özelliklerde elde edilir (Çavuşoğlu, 1992).

4.1.2 Tikso Döküm İşlemi

Tikso döküm yönteminde, yarı-katı (veya bulamaç haldeki) malzeme, belirli bir basınç altında ön şekillendirme yapıldıktan sonra, yeniden yarı-katı sıcaklık aralığına ısıtılarak uygun basınçta son hale şekillendirilmektedir. Isıtılan parçalar bu aralıkta katı şekillerini korurken, basınçla sıkıştırıldıklarında sıvı gibi akıcı özellik göstermektedir. Bulamaç haldeki malzemenin direk uygun basınç altında dökümüne reo döküm, yarı-katı malzemenin ön şekillendirme yaptıktan sonra yeniden yarı-katı hale getirilerek dökümüne ise tikso döküm adı verilir.

Diğer yöntemlerle üretilemeyen yüksek mukavemetli ve aşınma dayanımlı bileşimlerdeki malzemelerin bu yöntemle üretilmesi mümkündür. Bu parçaların üretiminde kullanılan alaşımların yapısal davranışı, kısmen sıvı haldeki metal alaşımlarının özelliklerine dayalıdır. En temel fark mukavemet ve gerinim özelliklerinde ortaya çıkar. Düşük miktardaki gözenek oranı ve küçük taneli yapı, bu yöntemin tipik özelliğidir.

Katılaşmanın belli bir safhasından sonra irileşen dentritler, yarı-katı bölgesinde sürekli bir kafes oluştururlar. Bir noktaya kadar tane boyutuna bağlı olarak mukavemet artar. Örneğin bir alüminyum alaşımında %50 katı oranında mukavemet 1MN/m^2'ye kadar ulaşılabilir. Alaşım katılaşma esnasında karıştırıldığında kesme gerilimleri uygulanırsa, sürekli bir katı oluşması engellenmiş olur (Çavuşoğlu, 1992).

Özel yapı olarak düşey sürekli dökümde elektromanyetik motorlarla çubuk ekseninde radyal bir karıştırma işlemi dentritik yapının kırılmasına sebep olur. Bu tür yarı-katı ürünlerin işlenmesi için geleneksel basınçlı döküm makineleri kullanılabilir.

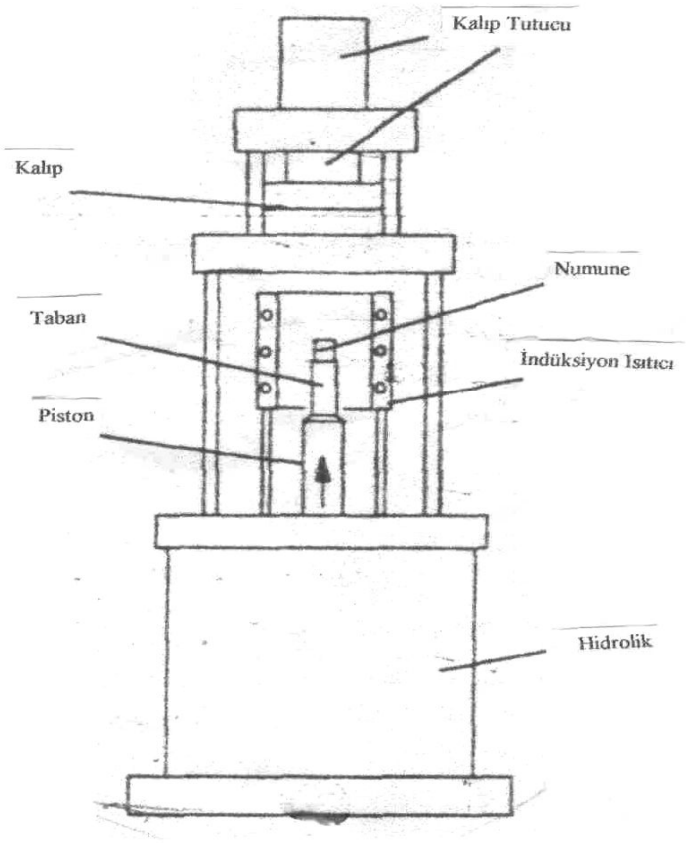
Bu yöntemle ince kesitli ve kompakt (vitesler, direksiyon kolu ve frenler) üretilebilir. Şekil 4.1'de tikso döküm yöntemiyle elde edilmiş parçalar görülmektedir (Röhrle, 1996).

Şekil 4.1 Tikso döküm yöntemiyle üretilmiş bazı parçalar (Röfrle, 1996).

4.1.3 Tikso Kalıplama İşlemi

Tikso kalıplama işlemi özellikle alüminyum ve magnezyum gibi hafif metallerin farklı takviye elemanlarıyla kompozit malzeme üretilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, son şekil veya son şekle yakın malzeme üretimi mümkündür. Tikso kalıplama işleminde yarı-katı haldeki külçelerin alçak basınçla kalıp boşluğuna (genellikle grafit kalıp) doldurulması ile şekillendirme yapılır. Mikroyapı incelendiğinde sıvı matris içerisinde α-fazı

küreleri veya katı metal içermektedir. Şekil 4.2'de tikso kalıplama ünitesinin şematik görüntüsü verilmektedir (Çavuşoğlu, 1992).

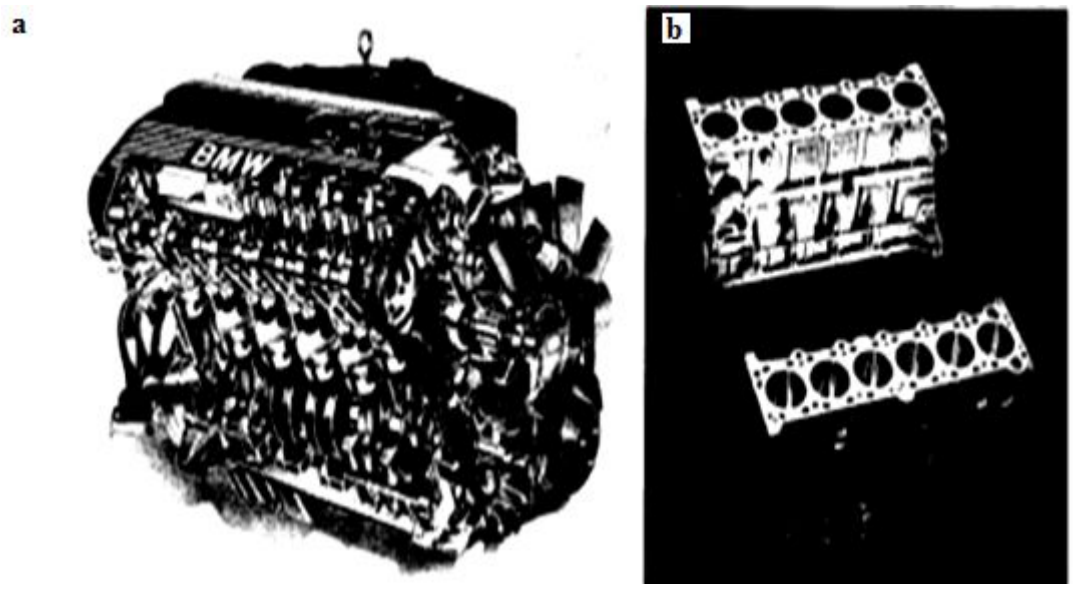


Şekil 4.2 Tikso kalıplama ünitesinin şematik görüntüsü.

Tikso kalıplama ile üretilen malzeme sıvı ötektikle çevrili katı kürelerden oluştuğundan, tiksotropik bir davranış sergiler. Genel olarak malzeme yarı-katı halde şeklini korur. Bunun da sebebi katı fazdaki dentritlerin kenetlenmesidir. Kalıplama (basınç altında şekillendirme) sırasında bu dentrit kolları basıncın etkisi ile kırılarak yapı küresel bir hal alır (Sukimoto, 1986). Alaşımların tiksotropik özelliklerinden faydalanarak, yarı-katı sıcaklığına ısıtılmış malzemelerin şekillendirilmesidir. Tikso kalıplama yönteminde klasik döküm teknolojisinin yanında, plastik enjeksiyon kalıbın şekil verme kabiliyetini birleştirmek suretiyle geometrisi karmaşık ve yüksek yoğunluklu malzemelerin üretimi sağlanmaktadır.

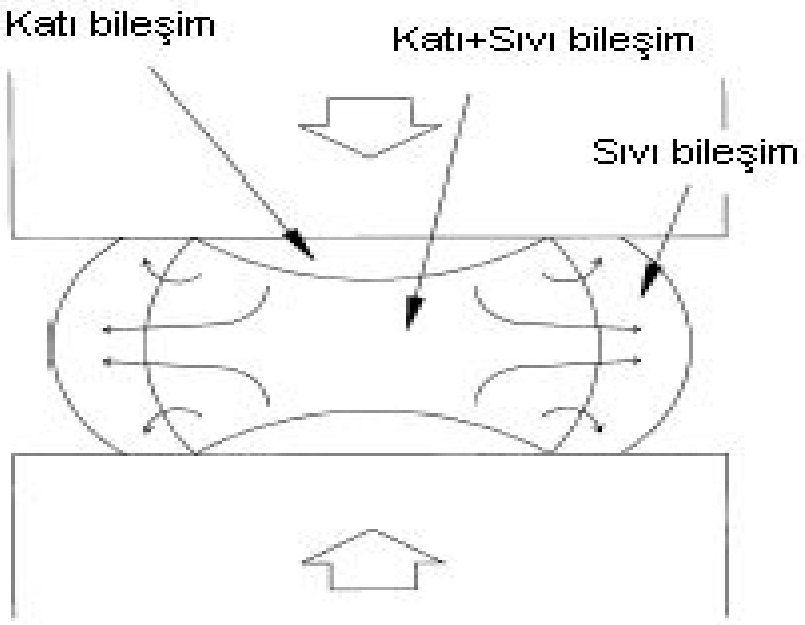
Tikso kalıplama ile üretilen parçalar genellikle otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Bu sektörde öncü bazı ülkelerde (Amerika, Avrupa ve Japonya gibi) alüminyum parça üretimi, bu

yöntemle yapılmaktadır. Tikso kalıplama ile üretilmiş olan parçalar özellikle dayanımlarının diğer yöntemlere göre daha iyi olmasından dolayı tercih edilmektedir. Özellikle lüks otomobillerde (BMW, Audi, Mercedes, Porsche, Ferrari, v.s.) hafiflik çok önemlidir. Bu nedenle firmalar motor parçaları, fren diskleri, ön ve arka akslar, jant, v.s. gibi parçaları tikso kalıplama yöntemiyle yapmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 BMW'nin yeni 6 silindirli Alüminyum motoru a. motorun kesiti b. üstte alüminyum silindir gömleği altta aynı parçanın dökme demir tipi (Koewius, 1996).

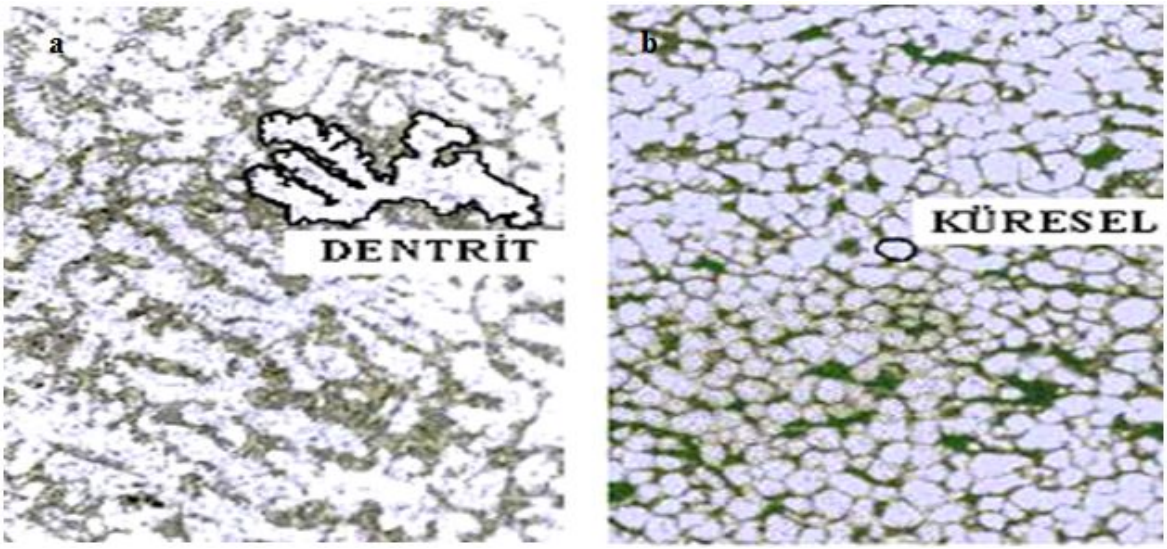
Yüksek vizkosite ve yarı-katı alaşımların sıvı içeriğinin düşük olması halinde malzemelerin şekillendirilmesinde daha yüksek bir basınca gerek duyulmaktadır. Bu da malzemeleri daha kullanışlı hale getirir. Tikso kalıplamada, mekanik özellikleri artırmak ve mikroyapının incelenmesine yardımcı olmak için tiksotropik davranışın veya malzemenin yarı-katı halinden yararlanılmaktadır. Şekil 4.4'de yarı-katı haldeki malzemenin şekil değiştirme davranışı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.4 Yarı-katı haldeki malzemenin şekil değiştirme davranışı (Kang, et al., 1999).

Tikso kalıplama ile üretilen parçalar kokil kalıba dökümle üretilen parçalarla karşılaştırıldığında tolerans kabiliyetinin daha yüksek olduğu ve daha iyi özelliklere sahip mikroyapılı malzemeler elde edilmektedir. Diğer döküm yöntemleri ile şekillendirilmesi zor olan parçalar tikso kalıplama ile son şekle yakın halde elde edilebilir. Ayrıca temiz, pratik ve güvenli bir yöntemdir. Bununla birlikte, düşük ısıl genleşme, yüksek mukavemet, aşınma direnci ve yüksek sertlik değerlerine ulaşılabilir. İşlem sıcaklığının düşük olması sebebiyle, minimum çekme ve çatlama hatasının yanında, kalıpta daha az aşınma gözlenir.

Klasik döküm yöntemlerinde görünen dentritik yapının tersine, tikso döküm yönteminde küresel bir mikroyapı elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntemle üretilmiş parçaların dayanımları, klasik döküm yöntemi ile üretilmiş parçalardan daha yüksektir. Çünkü tikso kalıplama yöntemiyle üretilmiş parçalar küresel bir mikroyapı sahiptir. Klasik döküm yöntemiyle elde edilen parçaların yapısındaki dentritler malzemeye uygulanan kuvveti kendi içyapısında biriktirerek malzemenin deforme olmasına neden olur. Darbe dayanımı, basma dayanımı, sürünme ve çekme dayanımlarının iyi olması nedeniyle, tikso kalıplama yöntemi ile üretilmiş malzemelerin mekanik özellikleri daha iyidir. Şekil 4.5'de klasik döküm yöntemiyle üretilmiş ve tikso kalıplama yöntemiyle üretilmiş parçaların mikroyapıları verilmiştir (Kang, et al., 1999).



Şekil 4.5 A356 Alaşımlarının mikroyapıları a. Klasik döküm yöntemiyle üretilmiş b. Tikso kalıplama yöntemiyle üretilmiş (Kang, et al., 1999).

4.2 TİKSO KALIPLAMA YÖNTEMİNDE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Tikso kalıplama yöntemiyle üretilmiş parçaların mikroyapısına etki eden faktörler; malzemenin bileşimi, sıcaklık, basınç, sıkıştırma hızı, sıkıştırma süresi ve soğuma hızıdır. Mikroyapı ve mekanik özelliklerin optimum seviyede olması yukarıdaki parametrelerin optimum seviyede olmasına bağlıdır. Bu parametrelerin az veya fazla olması gerek mikroyapı gerekse mekanik özelliklerin farklılaşmasına neden olur.

4.2.1 Malzeme Bileşimi

Tikso kalıplama işleminde malzeme bileşimi çok önemli bir parametredir. Bu yöntem sadece yarı-katı metaller için geçerli olduğundan dolayı saf metaller ve ötektik alaşımlar gibi ergime derecesi sabit olan alaşımlara uygulanamamaktadır. Tikso kalıplama yöntemi, özelliği gereği ötektik altı ve ötektik üstü alaşımlara uygulanabilir.

Chul ve arkadaşları, bileşim içerisindeki dengeli silisyum miktarının hesaplanmasının, katı veya sıvı durum içerisindeki reaksiyonların oluşup oluşmayacağına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Gibbs serbest enerji değişimi yarı-katı, katı ve sıvı bölgelerdeki alüminyum ve

silisyum bileşimi ile belirlenmiştir. Hesaplamalar, termodinamik ve temel bilgi kullanılarak yapılmıştır (Chul, et al., 1999).

Burada dengeli silisyum bileşiminin belirlenmesi için yapılan hesaplamalar deneysel çalışmalarla da kanıtlanmıştır. Sıvı sıcaklığının azalmasıyla birlikte ara yüzey reaksiyonu gerçekleşerek şekillenmiş silisyum miktarının (hiper ötektik alaşımlarda) artışı tutma süresi ve sıcaklıkla beraber artar. Bu noktada sıvı sıcaklığının ölçülmesine silisyum miktarı yardımcı olur (Chul, et al., 1999).

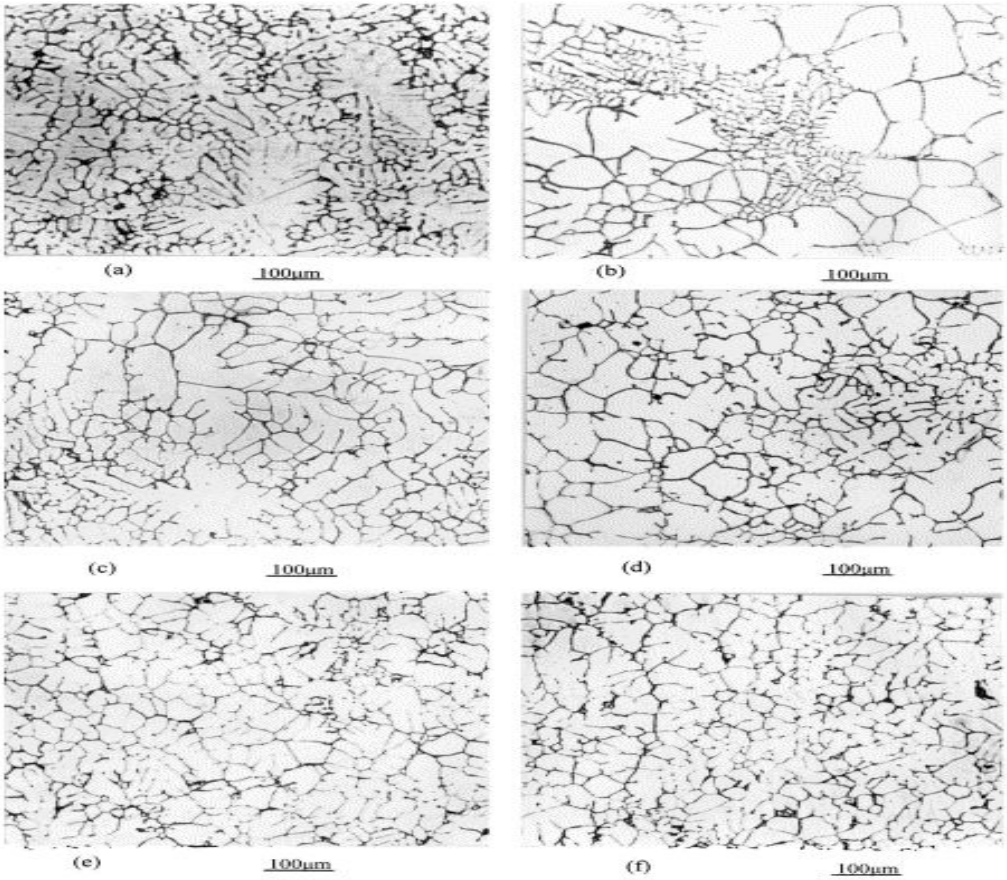
Bileşime %2 oranında Mg(magnezyum) ilavesi ile Al-25Si-5Cu ve Al-30Si-5Cu gibi üçlü alaşımlarda silisyumun incelmesine neden olur ki bu durumda yarı-katı haldeki malzemenin akışkanlığını artırır (Sukimoto, 1986).

Kapranos ve arkadaşları, 7000 serisi Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında Zn/Mg ve Zn+Mg+Cu oranının, tikso kalıplanabilirliği ve dengedeki faz oranlarını etkilediğini belirtmektedirler. Yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda Zn/Mg oranının ağırlık olarak %2,5' den düşük ve Zn+Mg+Cu oranının %7' den fazla olduğu durumlarda optimum şartların elde edildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca Zn+Mg+Cu oranının arttığı ve Zn/Mg oranın azaldığı durumlarda tikso kalıplanabilirliğin arttığını ve Zn+Mg+Cu oranının%7 den az olduğu durumlarda tiksolanabilirliğinin azaldığını belirtmişlerdir (Kapranos, et al., 2003).

4.2.2 Sıcaklık

Tikso kalıplama işleminde, mikroyapı ve mekanik özelliklere etki eden parametrelerden biride sıcaklıktır. Malzeme bileşimine göre kalıp sıcaklığının da sınırlandırılması gereklidir. Özellikle kalıp sıcaklığının düşük olduğu durumlarda en son katılaşan bölgede sıvı faz oranının yüksek olmasından dolayı, porozite ve mikroyapı hatalarının oluştuğu gözlenmiştir. Örnek verilecek olursa Al2024 alaşımlarında kalıp sıcaklığı 350°C ve A356 alaşımında 300°C ile sınırlıdır. Bu sıcaklıkların altına inildiğinde malzemenin katılaşma hızı artacak ve bu nedenle katı ve sıvı fazın dağılımı daha dengeli hale gelecektir (Idegomori, et al., 1998).

Dong ve arkadaşları, ergime derecesi 635°C olan 7075 dövme alüminyum alaşımlarının (Al-5.95 Zn-2.22 Mg-1.67 Cu-0.30 Mn-0.35 Fe-0.20 Si) 720°C, 642°C ve 638°C' ye yeniden ısıtıldığında oluşan mikroyapıları incelemişlerdir (Dong, et al., 1996). Ayrıca alaşım 720°C ye yeniden ısıtıldığında tane sınırlarında kaba ve dentritik bir yapının oluştuğunu ve merkeze yaklaştıkça bu yapının azaldığını gözlemişlerdir. Parça 642°C ye yeniden ısıtıldığında ise yapının daha az dentritsiz ve dolayısıyla gerek tane sınırlarında, gerekse merkezde küreselleşme eğiliminin olduğu gözlenmiştir. Taneler merkezde küçük yaprakçık şeklinde iken tane sınırlarında büyük yaprak şekillidir. Son olarak parça, 638°C sıcaklığa kadar yeniden ısıtıldığında ise uniform bir tane yapısı elde edilirken, merkez ve tane sınırları arasında herhangi bir farkın olmadığını gözlenmiştir. Şekil 4.6'da alüminyum 7075 alaşımının farklı sıcaklıkta, tane sınırı ve merkezindeki mikroyapı görüntüleri verilmiştir (Dong, et al., 1996).



Şekil 4.6 Farklı sıcaklıklarda, yeniden ısıtılan 7075 Al alaşımının merkez ve tane sınırlarındaki değişik mikroyapılar; a. 720°C tane sınırı; b. 720°C merkez; c. 642°C tane sınırı; d. 642°C merkez; e. 638°C tane sınırı; f. 638°C merkez (Dong, et al., 2002).

4.2.3 Basınç

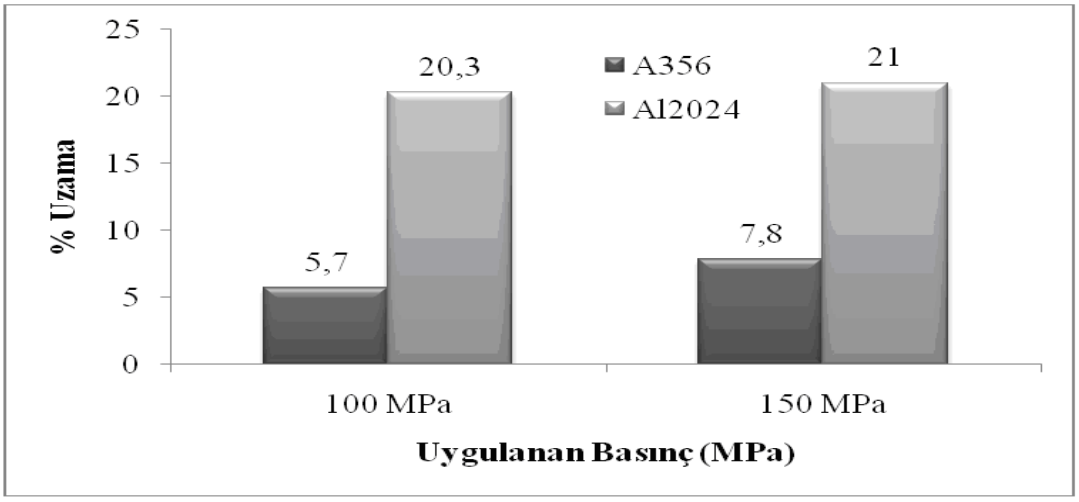
Tikso kalıplama yönteminde etkili parametrelerden bir diğeri de basınçtır. Basınç, özellikle mekanik özellikleri büyük oranda etkilemektedir. Basıncın artırılmasıyla beraber katı ve sıvı fazların yoğunlukları artacaktır. Dolayısı ile küreselleşme eğilimi de artar. Küreselleşme aynı zamanda akma dayanımı, kopma dayanımı ve %uzama gibi mekanik özelliklere de olumlu katkı sağlamaktadır.

Basıncın artırılması metalin kalıp duvarlarıyla temasını artıracaktır. böylece ısı alış verişinin artması daha hızlı bir katılaşmaya neden olur. Idegomeri ve arkadaşları, basıncın özellikle mekanik özelliklerde çok etkili olduğunu söyleyerek, en iyi mekanik özellikler için yüksek basınç gerektiğini görmüşlerdir. Ayrıca yapmış oldukları sertlik ölçümlerinde (mikro vickers) yüksek basıncın etkisiyle sıvı fazın yüksek olduğu kenar bölgelerde, merkeze nazaran daha yüksek sertlik değerlerine ulaştığını belirlemişlerdir (Idegomori, et al., 1998).

Pinsky ve arkadaşları, yüksek basınç nedeniyle yarı-katı işlem esnasında, kalıp ve parça arasındaki sürtünmenin de etkisiyle sıvı segregasyonların arttığını belirmişlerdir (Pinsky, et al., 1984).

Cho ve Kang, yarı-katı işlemle elde edilmiş olan A356 ve Al2024 alüminyum alaşımlı numuneler üzerinde yapmış olduğu araştırmalar sonucunda uygulanan basıncın mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin çok önemli olduğunu belirtmektedir. 100 MPa ve 150 MPa gibi yüksek basınçlarda mikroyapının daha yoğun olduğu ve gözenek gibi içyapı hatalarının en aza indiğini belirterek, çekme ve akma dayanımlarının da arttığını belirtmişlerdir (Cho, et al., 2000).

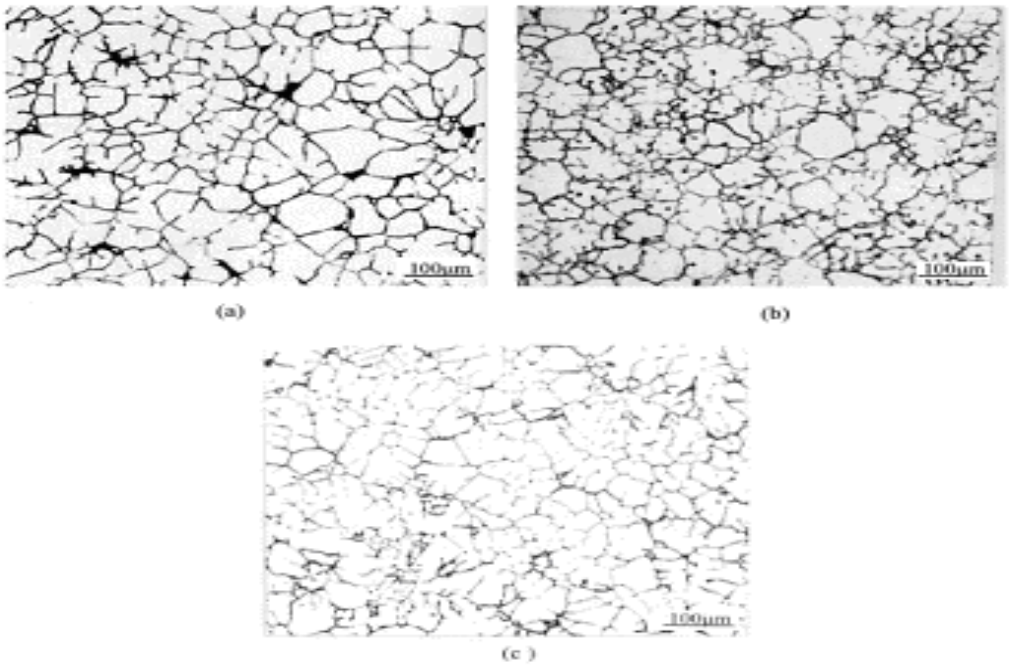
Kang ve Jung, A356/390 ve Al2024 alaşımlarında, katı oranı ve sıvı segregasyonların, basınç oranın kontrolü ile kontrol altına alınabileceğini belirtmişler (Kang, et al., 2001). Bu alaşımlara uygulanan basınç, 100 MPa'dan 150 MPa'a çıkarıldığında % uzamalarının arttığını ispatlamışlardır. Şekil 4.7' de uygulanan yüke bağlı olarak % uzama değerindeki değişimler görülmektedir.



Şekil 4.7 A356 ve Al2024 alaşımının basınca göre % uzama değişimi (Kang, et al., 2001).

4.2.4 Sıkıştırma Hızı

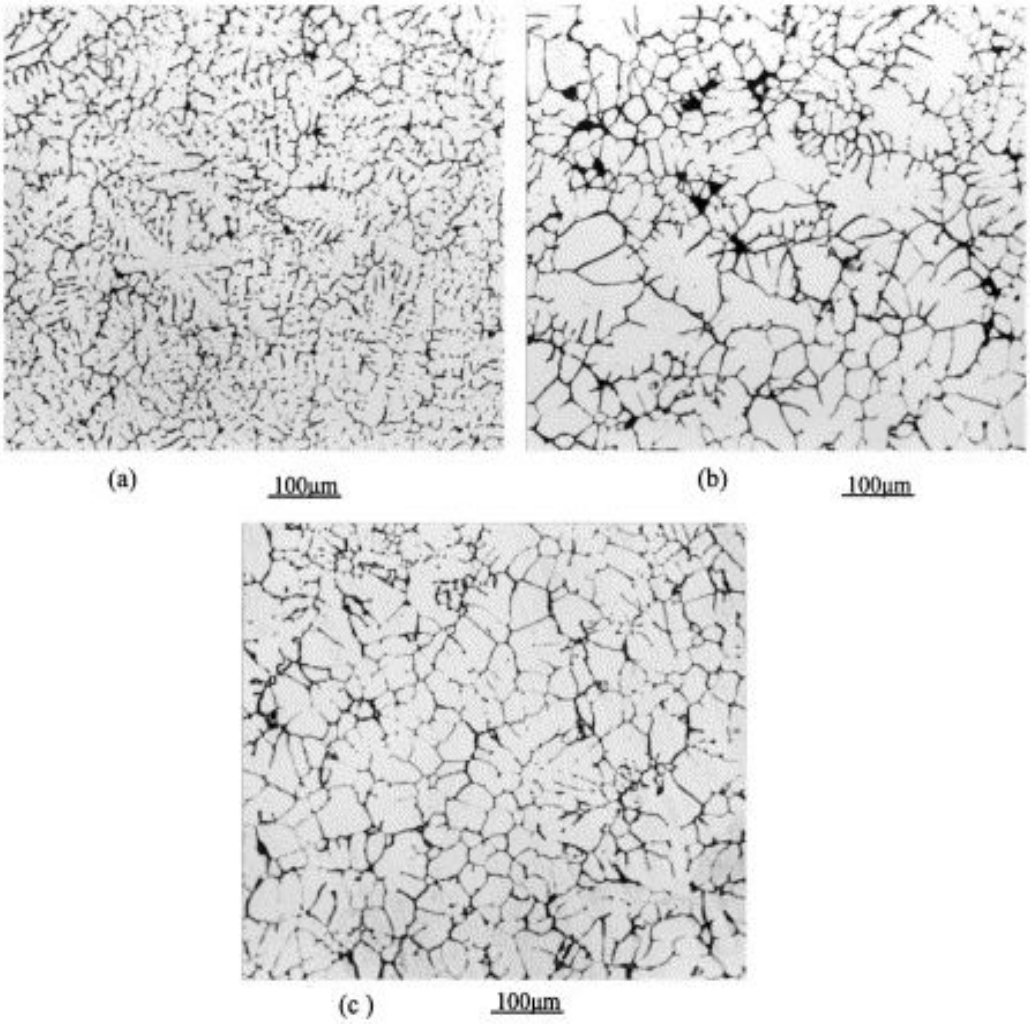
Sıkıştırma hızı da basınç gibi mikroyapı ve mekanik özelliklere etki etmektedir. Sıkıştırma hızına bağlı olarak, mikroyapı giderek daha uniform bir hal alır ve taneler daha küresel olur. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi sıkıştırma hızı azaldıkça mikroyapıdaki değişimde gözlenmektedir (Lee, et al., 2004).



Şekil 4.8 Al7075 alaşımının azalan sıkıştırma hızıyla oluşan mikroyapılar; a. 255 mm/dak b. 170 mm/dak c. 120 mm/dak (Dong, et al., 2002).

Yoshida ve arkadaşları ise, Al-%4,5 Cu alaşımında, sıvı segregasyon miktarındaki artışın piston hızının azalmasından dolayı oluştuğunu görmüşler ve piston hızındaki azalmaya bağlı olarak segregasyonların arttığını ifade etmişlerdir (Yoshida, et al., 1992).

Dong ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada sıkıştırma hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisini incelemişler ve sonuç olarak sıkıştırma hızının düşmesiyle daha küresel bir mikroyapı elde edilebileceğini ve bu durumda mekanik özelliklerinde daha iyi olacağını belirtmektedirler. Şekil 4.8'de Al7075 alaşımının farklı sıkıştırma hızlarında mikroyapı görüntüleri görülmektedir (Dong, et al., 2002). Şekil 4.9'da ise Al7075 alaşımının farklı soğuma yoğunluklarında meydana gelen mikroyapılar verilmektedir.



Şekil 4.9 Al7075 alaşımının farklı soğuma yoğunluklarında oluşan mikroyapılar; a. İlk soğuma yüksek ve ikinci soğuma düşük, b. İlk soğuma ve ikinci soğuma düşük, c. İlk soğuma düşük ve ikinci soğuma yüksek (Dong, et al., 2002).

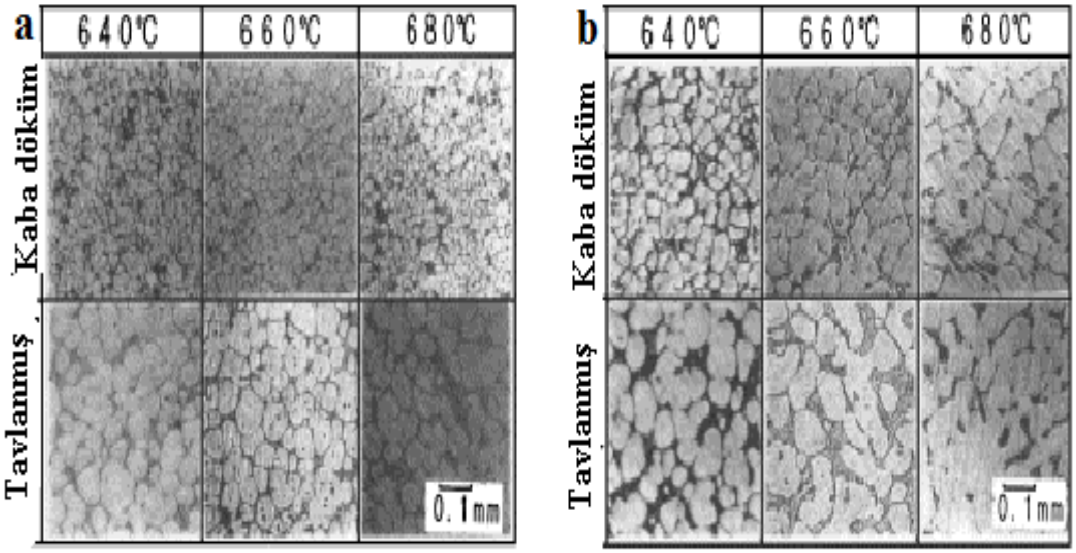
4.2.5 Sıkıştırma ve Fırın İçerisinde Bekletme Süresi

Tikso kalıplama yönteminde, istenen katı-sıvı oranına ve ideal tane boyutuna ulaşmak için fırın içinde bekletme süresinin iyi belirlenmesi gerekir. Yarı-katı işlem sırasında 7075 dövme alaşımlarından üretilen sıkıştırılmış toz kütlesi 600°C' ye yeniden ısıtıldığında ve 5-15 dakika zaman aralığında tutulduğunda sıvı oranı yaklaşık 0,3 artmış ve ortalama tane çapı 40-55 µm olarak ölçülmüştür. Ayrıca küresel bir mikroyapı elde edilmiştir (Dong, et al., 2002).

Junk yaptığı bir çalışmada tikso kalıplama yönteminde yarı-katı halde bulunan alüminyum alaşımlarını indüksiyonla ısıtılarak mikroyapılarda meydana gelen değişimleri incelemiştir. Çalışma sonucunda, üç aşamadan oluşan yeniden ısıtma kısmında, fırında tutma süresinin 2 dak. olması durumunda daha küresel bir mikroyapı elde edildiği görülmüştür. Bu sıcaklıkta tutma süresi azaltıldığında, küreselleşmenin yetersiz kaldığı, tersi durumda ise tanelerin irileştiği gözlenmiştir (Jung, 2000).

4.2.6 Kalıp Malzemesi

Kalıp malzemesi özellikle ilk kristal boyutunda değişikliklere sebebiyet verir. Bu noktada kalıp malzemesinin, tikso kalıplamada önemli bir yeri vardır. Yine mikroyapı ve mekanik özelliklerde kalıp malzemesine göre değişiklik gösterir. Metal kalıp kullanıldığı durumlarda tane ebatları daha küçük olmaktadır. Çünkü metal kalıp ısıyı daha iyi ilettiği için hızlı soğuma gerçekleşir ve tanelerin küçülmesinde etkili olur. Metal kalıp kullanıldığında; 640°C, 660°C ve 680°C' de sıcaklığa kadar ısıtılmış olan alaşımın ilk kristalleri küresel olmaktadır (Idegomori, et al., 1998). Ancak yalıtkan kalıp kullanıldığı durumda yalnızca 640°C' de küresel taneler elde edilmiş 660°C ve 680°C' de oluşan ilk kristallerin küresel olmadığı gözlenmiştir (Şekil 4.10).



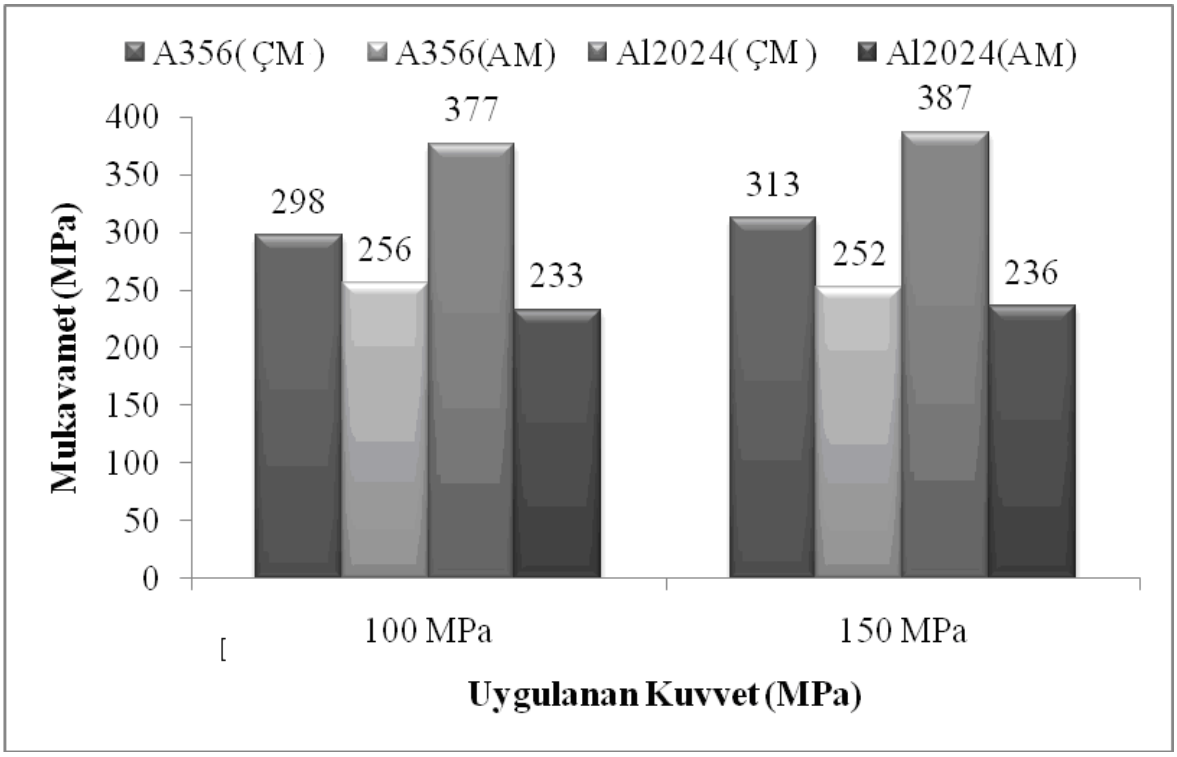
Şekil 4.10 Kaba dökülmüş ve tavlanmış alüminyum alaşımının mikroyapıları a. metal kalıpta, b. yalıtkan kalıpta döküldüğünde oluşan mikroyapılar (Suzuki, et al., 2001).

S. Suzuki ve arkadaşları, Al7075 alaşımıyla yapmış oldukları çalışmalarda, kalıp malzemesi olarak metal kalıp da, döküm parçanın hızlı soğuma nedeniyle, ince taneli bir yapı elde edilmiştir. İnce taneli yapı dayanımın da artmasına sebep olmuştur. Kalıp malzemesi olarak yalıtkan kalıp kullanıldığı durumlarda ise kalıbın yalıtkanlığından dolayı yavaş soğumanın gerçekleştiği, bununla birlikte tanelerin irileştiği dayanımın nispeten daha düşük olduğu görülmüştür (Suzuki, et al., 2001).

4.3 MEKANİK ÖZELLİKLER

Üretilecek olan parça karmaşık şekilli olsa da, bunu yarı-katı işlem metoduyla üretmek mümkündür. Otomotiv sektöründe kullanılan parçaların ve elektronik parçaların üretiminde yoğun çalışmalar devam etmektedir. Çünkü yarı-katı yöntemle üretim, klasik yöntemlerle üretime göre oldukça avantajlıdır.

Kapranos ve arkadaşları yüksek sıcaklık alaşımlarına göre yarı-katı işlem ile üretilen bir parçanın, diğer döküm yöntemleriyle üretilmiş olandan daha nitelikli olduğunu göstermiştir (Kapranos, et al., 1992). Şekil 4.11'de yarı-katı işlem ile üretilmiş numunelerin basınç altındaki dayanımı verilmiştir.



Şekil 4.11 Yarı-katı işlemle üretilmiş numunelerin basınç altındaki dayanımı (Cho, et al., 2000).

Kouji ve arkadaşları, yarı-katı işlem yönteminin mekanik özellikleri test ederek katılaşmadan sonraki, mekanik özelliklerin yorulma dayanımında, gerilme kuvvetinde ve çarpma etkisinde, katılaşmanın hızlı bir şekilde olmasından dolayı, olağan üstü bir artış olduğunu belirtmişlerdir (Kouji, 1997).

4.4 YARI-KATI ÜRETİM YÖNTEMİNİN AVANTAJLARI

Yarı-katı üretim yönteminin en önemli avantajlarından birisi son şekle yakın bir malzeme üretimdir. Ayrıca ince kesitli parçalarda şekillendirebilme fırsatı ile birlikte mükemmel bir malzeme yüzeyi elde edilmektedir. Bununla birlikte işlem sıcaklığının da düşük olması birçok yönden avantaj sağlamaktadır. Yarı-katı işlem klasik döküm yöntemleriyle karşılaştırıldığında, klasik yöntemlerde malzemenin %100' lük kısmının sıvı olması kalıplama işlemi sırasında gaz absorbe etmesine neden olmaktadır. Yarı-katı üretim yönteminde böylesi bir durum yok denebilecek kadar minimum seviyelerdedir. Ayrıca işlem sıcaklığı düşük olduğu için çekme azdır. Bununla birlikte çekme boşlukları ve sıcak yırtılma gibi hatalarda minimum seviyelerdedir (URL-2, 2007).

Bir alaşımın yarı-katı halde şekillendirilebilmesi için ince küresel tane yapısına sahip olması gerekmektedir. Eşeksenel mikroyapıya sahip alaşımlar tiksotropik özellik gösterir. Yani yarı-katı halde dentritik mikroyapılı alaşımlara göre yüksek akışkanlık özelliğine sahiptir. Mikroyapılarının üniform olması, üretilen parça özelliklerinin iyi olmasını sağlar.

Yöntemin başlıca avantajları:

1. Pres döküm pratiği açısından kalıp problemleri azalmaktadır.
2. Kalıp ömrü artmaktadır.
3. Klasik dökümde parça, metalin ergime derecesinin üzerindeki bir sıcaklıkta dökülür. Yüksek sıcaklık kalıbın termal olarak aşınmasını artırır. Yarı-katı döküm yönteminde yüksek sıcaklık yoktur ve ergime ısısının %40-50 kadarı şarjdan önce dışarı alındığından kalıp aşınımı, büyük ölçüde azalır.
4. Katılaşma için gerekli süre kısalacağından döküm süresi kısalır ve üretim hızı artar.
5. Üretim kalitesi de daha yüksek olmaktadır. Çünkü

   a) Alaşım kalıba kısmen katılaşmış(%50 katı) halde girdiğinden daha az çekme porozitesi oluşur ve mevcut olan porozite de parça geneline üniform olarak yayılır.

   b) Yarı-katı haldeki alaşım, sıvıdan daha vizkos olduğundan kalıp boşluğuna girmesi sırasında çok daha az saçılma olur. Dolayısı ile üretilen malzeme içerisinde daha az miktarda hava olur. Yani gaz boşluğu sorunu büyük ölçekte çözülmüş olur.

4.5 YARI-KATI ÜRETİM YÖNTEMİNİN DEZAVANTAJLARI

Tüm döküm yöntemlerinin olduğu gibi yarı-katı üretim yönteminin de bir takım dezavantajları vardır. Bunlar:

1. Yatırım maliyeti yüksek bir üretim yöntemidir.
2. Besleme stoku nispeten pahalıdır ve arz talep miktarı düşüktür.
3. Tikso kalıplama teçhizatı klasik işlemlerden daha fazladır.
4. Ayrıca her yeni uygulamayı yerine getirmek, mevcut bir işlem bilgisi gerektirir (Çavuşoğlu, 1992)

BÖLÜM 5

DENEYSEL MALZEME VE METOT

Bu çalışmada matris malzemesi olarak alüminyum silisyum alaşımı (A356) ve takviye elemanı olarakta SiC seramik toz parçacıkları kullanılarak Al/Si kompozit malzeme üretilmiştir. Tikso kalıplama yöntemi ile üretilen alüminyum kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak %5, %10, %15 ve %20 (hacim bazında) SiC ilave edilmiştir. Yarı-katı işlem parametrelerinde sabit sıkıştırma hızı, süresi ve presleme basıncı kullanılmıştır. Çizelge 5.1'de Al/SiC kompozit malzemelerin üretim şartları belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. Tikso kalıplama yöntemiyle elde edilen Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretim şartları.

Numune No	Mekanik Karışım	Fırın Sıcaklığı	Presleme Süresi	Kalıp Sıcaklığı	SiC Oranı
A1	Karıştırılmış	590 ºC	1 dak	550 ºC	% 5
A2	Karıştırılmış	600 ºC	1 dak	550 ºC	% 5
A3	Karıştırılmış	590 ºC	1 dak	550 ºC	% 10
A4	Karıştırılmış	600 ºC	1 dak	550 ºC	% 10
A5	Karıştırılmış	590 ºC	1 dak	550 ºC	% 15
A6	Karıştırılmış	600 ºC	1 dak	550 ºC	% 15
A7	Karıştırılmış	590 ºC	1 dak	550 ºC	% 20
A8	Karıştırılmış	600 ºC	1 dak	550 ºC	% 20

5.1 MATRİS MALZEMESİNİN ATOMİZASYONU

Deneysel çalışmalarda İzmir CMS Jant Makine Sanayinden temin edilen A356 külçelerinden elde edilen toz malzemeler kullanılmıştır. Külçeler Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

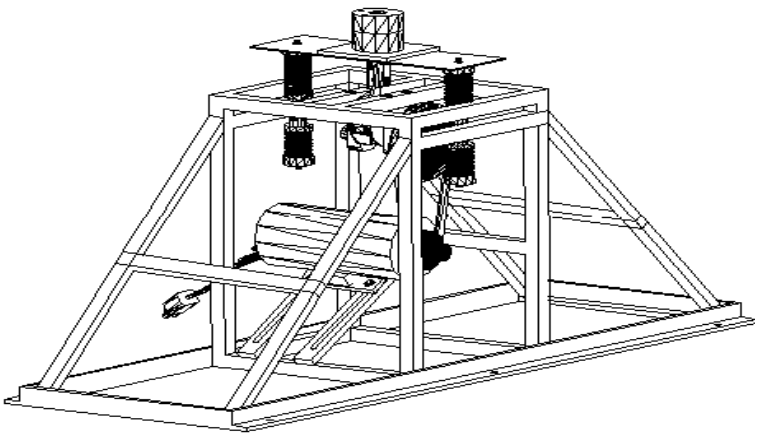
Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan toz metalürjisi laboratuarlarındaki bulunan gaz atomizasyon ünitesinde atomize edilerek toz haline getirilmiştir. A356 alaşımı toz haline getirilirken ortama soygaz olarak argon gazı kullanılmıştır. Nozullardan geçen gaz basıncı 32 atmosferdir. Üretilen tozların ortalama toz boyutu ≤ 50 μm civarındadır.

5.2 MATRİS MALZEMESİ VE TAKVİYE ELEMANI MİKTARININ BELİRLENMESİ

Gaz atomize edilerek toz haline getirilen A356 Al-Si alaşımına takviye elemanı (SiC) %5, %10, %15 ve %20 (hacim bazında) olmak üzere dört farklı oranda ilave edilmiştir. Hacim bazında hesaplanan matris malzemesi ve takviye fazı Teknik Eğitim Fakültesi döküm laboratuarında bulunan Precisa XB200h marka 1/10.000 hassasiyetteki hassas terazide tartılarak hazırlanmıştır.

5.3 HAZIRLANAN AL/Sİ TOZLARININ HARMANLANMASI

Tikso kalıplama ile üretilecek olan dört farklı orandaki Al/SiC kompozit tozlar, titreşimli mekanik alaşımlama/öğütme cihazında 30 dak. bilyasız olarak atmosferik ortamda harmanlama işlemine tabi tutuldu. Şekil 5.1'de harmanlama işlemlerinde kullanılan titreşimli mekanik alaşımlama değirmeninin şematik görüntüsü verilmiştir.

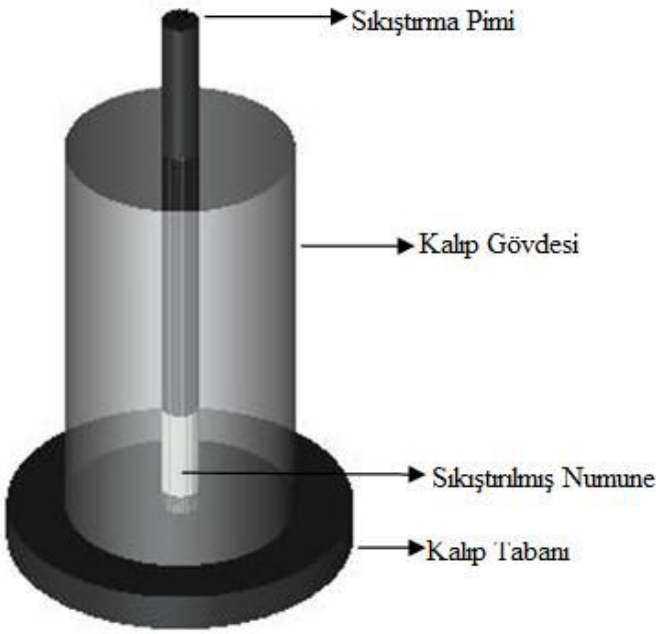


Şekil 5.1 Tozların karıştırılmasında kullanılan titreşimli değirmen.

5.4 SOĞUK PRESLEME İŞLEMİ

30 dakika harmanlanan Al/SiC kompozit toz karışımları, tikso kalıplama ile şekillendirme işlemi öncesi soğuk presleme ile ön şekillendirilmiştir. Bu ön şekillendirme işleminde Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Laboratuarında bulunan 40 tonluk "Hidrolik San" marka tek yönlü hidrolik pres kullanılmıştır.

Al/SiC kompozit tozları soğuk presleme ön şekillendirilmesinde 12 mm iç çapında 40 mm dış çapında ve 120 mm yüksekliğinde takım çeliğinden yapılmış bir metal kalıp kullanılmıştır. Tozların kolay şekillendirilebilmesi ve kalıp içerisinden şekillendirilen toz kütlelerinin kolay çıkarılabilmesi için %1 çinko stearat kullanılmıştır. Tozların ön şekillendirilmesi işlemlerinde 800 MPa yük kullanılmıştır. Şekil 5.2'de Al/SiC kompozit tozların soğuk presleme işleminde kullanılan metal kalıbın şematik görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.2 A356 tozlarının soğuk preslenmesinde kullanılan metal kalıbın şematik görüntüsü.

5.5 DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN TİKSO KALIPLAMA ÜNİTESİ

Yarı-katı işlemle Al/SiC kompozit malzemelerin üretim işlemlerinde tamamen Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi imkânlarıyla tasarımı ve imalatı yapılan ve daha sonra " Hipo-Ötektik Al-Si bazlı alaşımlarda yarı-katı (Tikso Kalıplama) yeni metal matris kompozit

üretimi" konulu DPT Projesi kapsamında tekrar modifiye edilen yarı-katı işlem ünitesi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan bu ünitenin görüntüsü Şekil 5.3.'te verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi Yarı-Katı işlem çalışmalarında kullanılan bu ünite 5 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; pres, fırın, kalıp, kalıp ısıtıcısı ve kalıp tutucusudur.

Şekil 5.3 Yarı-katı işlem ünitesi.

5.5.1 Pres

Deneysel çalışmalarda kullanılan Hidroliksan markalı pres; 660mm x 500mm x 1850mm boyutlarında çelik konstrüksiyondan yapılmıştır. Yarı-katı işlemin daha kolay yapılabilmesi için piyasada kullanılan preslere nazaran sıkıştırma yönü yukarıya doğru sıkıştırma yapacak

şekilde tasarımı yapılmıştır. Sıkıştırma pistonu ve hidrolik sistem, presin alt kısmında olduğu için tavan plakasını tutacak şekilde 90 mm çapında ve 900 mm yüksekliğinde çelik malzemeden yapılmış dört sütun kullanılmıştır. Yarı-Katı işlemde ısıtılmış numuneleri kalıba sıkıştıran piston 100 mm çapında ve 1000 mm boyundadır. Numunenin sıvı-katı bölgeye ısıtılması süresinde fırın içerisinde kalan pistonun aşırı ısınması ve bundan dolayı aşırı ısınan pistonun, piston yatağına alınması aşamasında hidroliğin sızdırmazlığını olumsuz yönde etkilemesi söz konusudur. Bu olumsuzluğu gidermek için presin hidrolik pistonu fırının tam altında kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu hidrolik pistonun üzerine fırının en sıcak bölgelerine gelecek şekilde paslanmaz çelikten yapılmış 80 mm çapında ve 105 mm yüksekliğinde bir ek parça kaynatılmıştır. Bu sayede pistonun ısıdan fazla etkilenmesi ve ısınan bölgelerin yağ keçelerini aşındırması önlenmiştir. Isıtılan numuneler 143 mm/sn lik bir hızla kalıp içerisine sıkıştırılmıştır. Yeterli basınç verebilmek için 2.2 BG'de, 1420 dev/dak'lık ve 380 voltluk bir elektrik motoru kullanılmıştır.

5.5.2 Fırın

Deneysel çalışmalarda AMK tozlarının belirlenen sıcaklıklara çıkması için kullanılan fırın "PROTHERM" marka, 330 mm dış çap, 140 mm iç çap, 365 mm yüksekliğindedir. Bu fırın içerisinde ısıtma işlemi heating reziztanslarla sağlanmakta ve max. 1200°C'ye çıkabilmektedir (Şekil 5.4).

Şekil 5.4 Deneysel çalışmalarda kullanılan boru tipi fırın.

5.5.3. Grafit Kalıp

Yarı-Katı bölgeye ısıtılarak tikso kalıplama yöntemiyle Al/SiC kompozit üretiminde, bir grafit kalıp tasarımı yapılmıştır. Daha sonra 160 mm çapında ve 70 mm yüksekliğinde üretimi gerçekleştirilmiştir. Tikso kalıplama ile üretimleri yapılan numune boyutları 12.5 mm üst çap, 15mm alt çap ve 23 mm yüksekliğindedir. Numunenin üst çapına gelecek şekilde 12 mm çapında boydan boya delik açılmıştır. Açılan bu deliğe, numunenin üst kısmına temas edecek şekilde M12 cıvata konulmuştur. Ayrıca numunenin ortasına gelecek şekilde 6 mm çapında termokupol kanalı açılmıştır. Grafit kalıbın deforme olmaması için 32 µm boyutunda SiC tozlarıyla kollaidal silika karıştırılarak kalıp yüzeyleri boyanmıştır. Şekil 5.5'te üretimi gerçekleştirilen grafit kalıbın görüntüsü verilmiştir.

Şekil 5.5 Tasarımı ve üretimi yapılan grafit kalıbın görüntüsü.

5.5.4. Grafit Kalıp Isıtma Sistemi

Tikso-kalıplama sisteminin başarılı bir şekilde çalışması ve istenilen numunelerin üretilmesi için sıkıştırılmış toz kütlelerinin ve kalıp sıcaklığının iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle hem fırının hem de kalıbın ısı ölçümlerinde termokopullar kullanılmıştır. Fırın içerisindeki sıcaklık ile kalıp sıcaklığını sabitleyebilmek amacıyla kalıp ısıtıcı bir sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Kalıp ısıtma ünitesinin iç çapı 170 mm, dış çapı 210 mm ve yüksekliği 70 mm ebatlarında refrakter malzemeden yapılmıştır. Refrakter malzemeden istenilen ölçülerde hazırlanan blok üzerine ısıtıcı rezistansların yerleştirilmesi için helezonik kanallar açılmış ve açılan bu kanallara 0.3 mm kalınlığında krom-nikel ısıtıcı teller yerleştirilmiştir.

Daha önce grafitten hazırlanan kalıp ve refrakter malzemeden yapılan grafit kalıp ısıtma sistemi kalıp tutucuya monte edilmiştir.

5.5.5 Kalıp Tutucu

Grafit kalıp ve kalıp ısıtma sistemini bir arada tutması için tasarımı ve üretimi yapılan kalıp tutucu, 340 mm x 340 mm x 110 mm boyutlarında DDL20 malzemesinden yapılmıştır. Daha sonra parçanın iç kısmı 220 mm çapında ve 85 mm derinliğinde işlenmiştir. Şekil 5.6'da imalatı yapılan kalıp tutucusunun görüntüsü verilmektedir. İşlenen bu kısma kalıp ısıtma sistemi ve grafit kalıp yerleştirilmiş ve aradaki boşluklar izolasyon malzemesi (taş yünü) kullanılarak yalıtkanlık sağlanmıştır. Kalıp tutucu, presin tavanında bulunan pres üst plakasına 8 adet M12 civata ile sabitlenmiştir. Daha önce grafit kalıbın merkezine delinen M12 deliğin kalıp tutucusunun da merkezine gelecek şekilde delinmiş ve bu iki delik birbiri üzerine getirilerek kalıp tutucu presin üst plakasına monte edilmiştir.

Şekil 5.6 Tasarımı ve imalatı yapılan kalıp tutucunun görüntüsü.

5.6 NUMUNE HAZIRLAMA VE METALOGRAFİK İŞLEMLER

5.6.1 Numune Kesme İşlemi

Yarı-katı işlem ile üretimi gerçekleştirilen Al/SiC kompozit malzemelerin metalografik işlemlerini yapabilmek için bu malzemelerden birer adet numune kesilerek alınmıştır. Numune kesme işlemleri sırasında ısı nedeniyle mikroyapıda herhangi bir değişme olmaması için kesme işlemleri su soğutma ortamında yapılmıştır.

5.6.2 Metalografik İşlemler

Metalografik işlemler için kesilen numuneler, soğuk gömme ile polyestere alınmıştır. Zımparalama ve polisaj işlemlerinde Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Döküm laboratuarında bulunan PRESI MECAPOL P 262 model polisaj cihazı kullanılmıştır. Standart metalografik işlemlere tabi tutulan numuneler hazırlandıktan sonra optik mikroskop incelemeleri için dağlanmıştır. Dağlama işlemi; 90 ml H_2O, 5 ml HNO_3, 3 ml HCI ve 2 ml HF solüsyonunda 30 s süre ile yapılmıştır.

5.6.3 Optik Mikroskop İşlemleri

Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm laboratuarında bulunan MEIJI ML 7100 marka mikroskop ve BOSH DINION XF CAMERA ile mikroyapı görüntüleri alınmıştır.

5.6.4 Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

Üretimi gerçekleştirilen numunelerin mikroyapısında bulunan SiC tanelerini görebilmek amacıyla, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi bünyesindeki “JEOL JSM-6060” tarama elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir.

5.6.5 Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) İncelemesi

Yapı içerisindeki elementleri ve oranlarını belirlemek amacıyla Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi bünyesinde bulunan EDS analiz cihazı kullanılmıştır.

5.6.6 Tane Boyutu ve Küresellik Ölçümleri

Tane boyutu ve % küresellik oranları Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm laboratuarında bulunan "MSQ PLUS 6,5" analiz programında ölçümleri ASTM E112 standartlarına göre hesaplanmıştır.

5.6.7 Sertlik Ölçümleri

Mikroyapı görüntüleri alınan numunelerin sertlik değerleri Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Bölümünü Laboratuarında "AFFRİ VRSD251" markalı sertlik cihazında HV (2,5) uç ile numunenin dış kısmından başlayarak merkeze kadar sertlik ölçümü yapılmıştır.

BÖLÜM 6

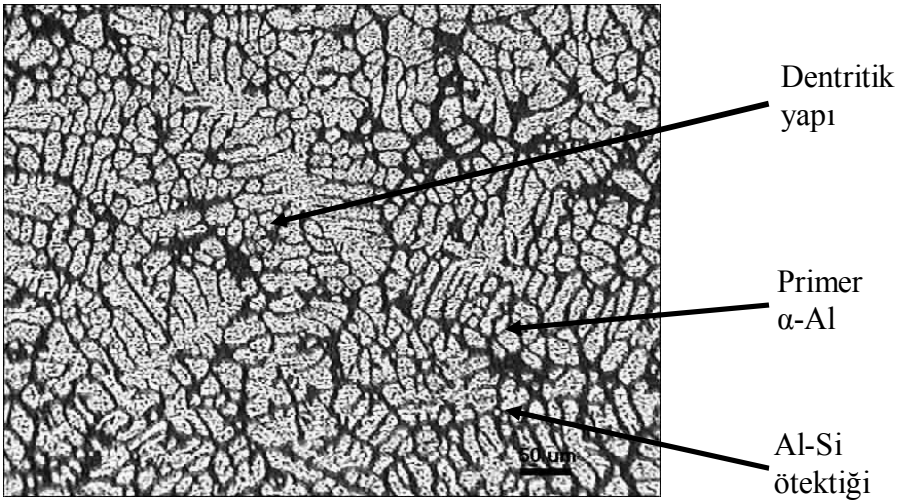
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1 BAŞLANGIÇ MALZEMESİNİN İNCELENMESİ

Başlangıç malzemesi olarak kullanılan ve CMS Jant Makine Sanayi A.Ş.'den temin edilen A356 alaşım külçelerinin kimyasal bileşimi Çizelge 6.1'de verilmiştir. Başlangıç malzemesi olarak kullanılan A356 alaşımının kimyasal bileşiminde sodyum ve antimon gibi modifiye elementlerine rastlanmamıştır. Bu külçeler daha sonra gaz atomizasyon yöntemiyle ≤50 µm boyutunda toz haline getirilmiştir. Külçeden alınan numunenin optik mikroskop görüntüsü Şekil 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 A356 alüminyum alaşımının %bileşimi.

Malzeme	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Al
A356	6,5	0,15	0,03	0,03	0,4	0,05	0,2	0.03	kalan



Şekil 6.1 A356 külçesinden alınan numunenin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 6.1'den de görüleceği gibi başlangıç malzemesi olarak kullanılan A356 Al-Si alaşımı dentritik mikroyapıdadır. Bu yapı bilinen klasik bir döküm yapısıdır. Malzemenin dayanım ve mekanik özellikleri üzerinde mikroyapı oluşumları her zaman etkili olmaktadır. Eşeksenel ve kolonsal mikroyapılı Al-Si alaşımlarında tane boyutunun, dentritik mikroyapıya sahip malzemelerde de dentrit kollarının ve dentrit kolları arasında kalan mikro boşlukların mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Katılaşma sırasında oluşan inklüzyonların boyutu ve dağılımı, hatta ikinci faz partiküllerinin dağılımı malzeme dayanımına etki etmektedir ve daha ince dağılımlar malzemenin dayanımını iyileştirmektedir. Büyük oksitler veya intermetalik oluşumlar mekanik özellikleri olumsuz etkilemekte ve kırılganlığı arttırmaktadır. Bu nedenle Al-Si alaşımlarının tane boyutu ve şekli kontrol edilerek malzemenin özellikleri geliştirilebilmektedir. Bu kontrol genellikle kimyasal olarak (özellikle elementlerin konsantrasyonlarının kontrolü ile) yapılmaktadır. Diğer bir kontrol mekanizması ise kullanılan üretim teknikleridir. Tikso kalıplama tekniği de bu tekniklerden biridir. Çizelge 6.2'de tikso kalıplama tekniği ile üretilen Al/SiC kompozit malzemelerin üretim parametreleri ve elde edilen sonuçlar verilmektedir.

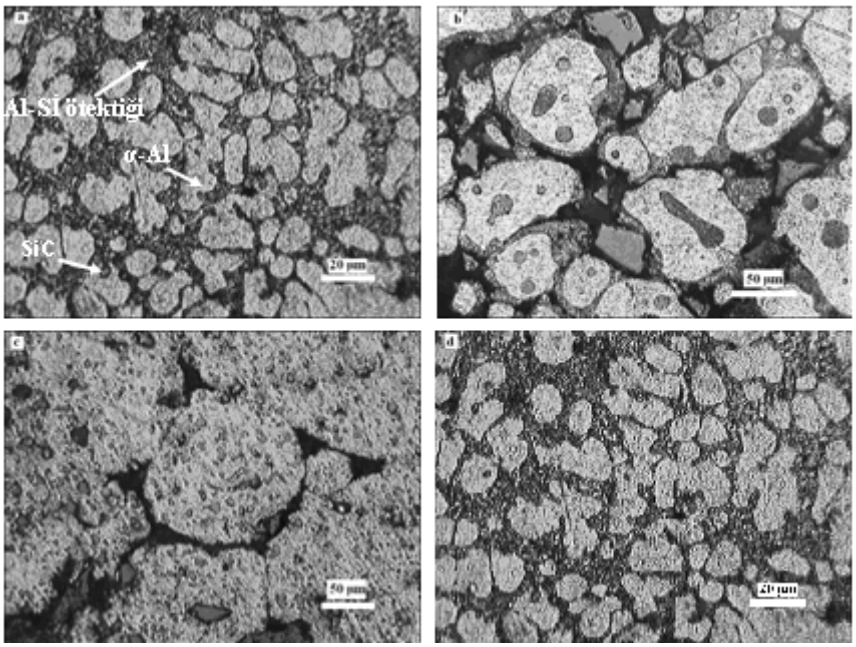
Çizelge 6.2'de tikso kalıplama işlemi ile üretimi gerçekleştirilen Al/SiC kompozit malzemelerin üretim parametreleri ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 6.2 Tikso kalıplama yöntemiyle üretilen Al/SiC kompozit malzemelerin numunelerin üretim şartları küresellik(%), tane boyutları (ASTM), sertlik değerleri (HV 2.5) ve SiC oranı (%).

SiC(%)					
Numune No	Numune	Küresellik oranı(%)	Tane Boyutu(ASTM)	Sertlik Değerleri (HV 2.5)	SiC Oranı(%)
A1	590ºC fırın 550ºC kalıp sıc. 1dak. Preslenmiş	82	8,1	58-53	5
A2	600ºC fırın 550ºC kalıp sıc. 1dak.preslenmiş	79	8,4	54-49	5
A3	590ºC fırın 550ºC kalıp sıc.1dak. preslenmiş	79	8,4	64-58	10
A4	600ºC fırın 550ºC kalıp sıc.1dak. preslenmiş	78	9,1	61-55	10
A5	590ºC fırın 550ºC kalıp sıc.1dak. preslenmiş	77	8,5	68-65	15
A6	600ºC fırın 550ºC kalıp sıc.1dak. preslenmiş	72	9,7	65-62	15
A7	590ºC fırın 550ºC kalıp sıc. 1dak. Preslenmiş	75	8,8	75-70	20
A8	600ºC fırın 550ºC kalıp sıc.1dak. preslenmiş	69	10,3	73-66	20

6.2 TAKVİYE ELEMANININ MİKROYAPIYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

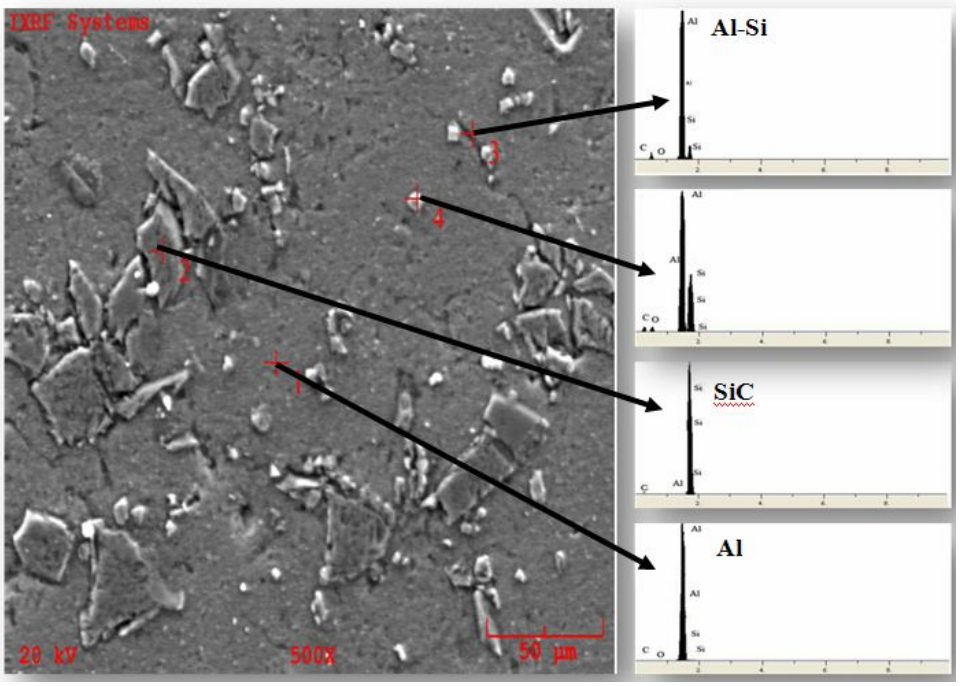
600°C fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı ve 1 dak. presleme süresiyle beraber %5, %10, %15, %20 SiC takviyesi ile elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 6.2' de verilmektedir.



Şekil 6.2 a. Mekanik karıştırılmış, fırın sıcaklığı 600ºC, kalıp sıcaklığı 550ºC, 1 dak. presleme süresi a. %5SiC (A2), b. %10SiC (A4), c. %15SiC (A6), d. %20SiC (A8) oranlarında elde edilen mikroyapı görüntüleri.

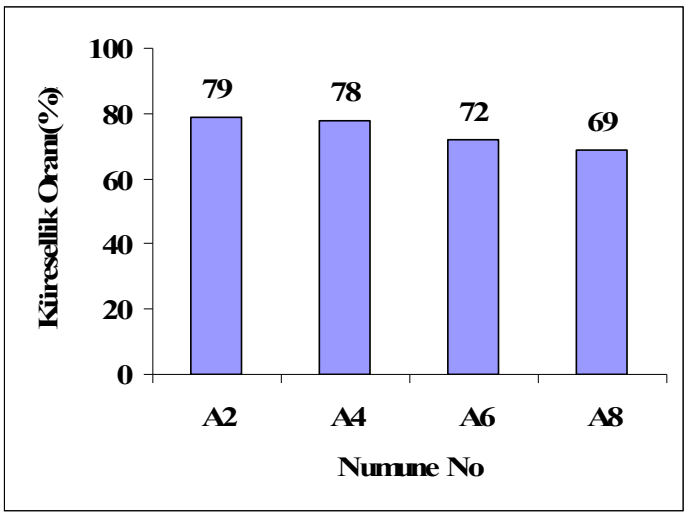
Şekil 6.2'den de anlaşılacağı gibi Al matrise ilave edilen SiC takviye fazı 30 dakikalık harmanlama etkisiyle yapıda homojen olarak bir dağılım sergilemiştir. Tikso kalıplama ile Al/SiC kompozit üretiminde takviye fazı, bu işlemin özelliği ile tane sınırlarına konumlanmıştır. Takviye fazı (SiC) mikroyapıda α-Al taneleri çevreleyen ve silisyumca zengin olan (Al-Si ötektiği) koyu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Yarı katı işlem sırasında sıvı karakteristiği sergileyen bu bölgelerde yoğunlaşan SiC parçacıkları yarı-katı malzemenin vizkositesini de yükseltmektedir. Ayrıca Şekil 6.2'de verilen mikroyapı görüntülerinde matris/takviye fazı arasında ara yüzey oluşumu gözlenmektedir.

Şekil 6.3'de 600°C fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %15 SiC oranına sahip numunenin SEM ve EDS analizi sonuçları verilmiştir.



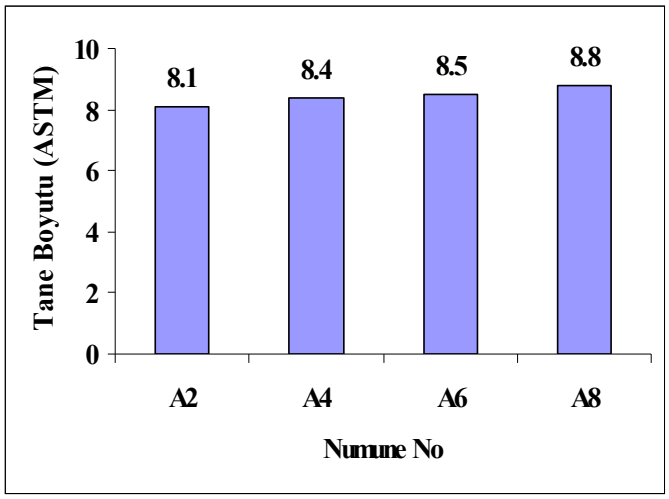
Şekil 6.3 600°C fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %15 SiC oranına sahip numunenin SEM ve EDS analizi sonuçları.

Şekilden de anlaşılacağı gibi malzemenin yapısında küresellik oranı düşüktür. Bu durum Şekil 6.4'deki histogramda daha belirgin olarak ifade edilmiştir. Yapıyı tanımlamak için alınan EDS analizlerinde oksidasyon problemleri tespit edilmiştir. Matris yapıdan alınan ölçümde (1 noktası) O_2 miktarının % 3.24 olduğu, tane sınırından alınan ölçümde ise (3 noktası) O_2 oranının % 22.6 olduğu ayrıca bu bölgede % 37.5 oranında C varlığı da belirlenmiştir. Tikso kalıplama işlemi sırasında meydana gelen oksidasyonun malzemenin küreselliği üzerinde etkili olduğu alınan EDS analizlerinde ortaya çıkmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir hususta C oranın yüksek olmasıdır. Bunun nedeninin ise tane sınırlarında SiC'ün ayrışması sonucu (1 numaralı reaksiyon sonucu) silisyumun alüminyumla ötektik oluşturması sırasında çözünmesidir. Bu durum Selvaduray ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma ile de teyit edilmektedir (Selvaduray, et al., 1990).



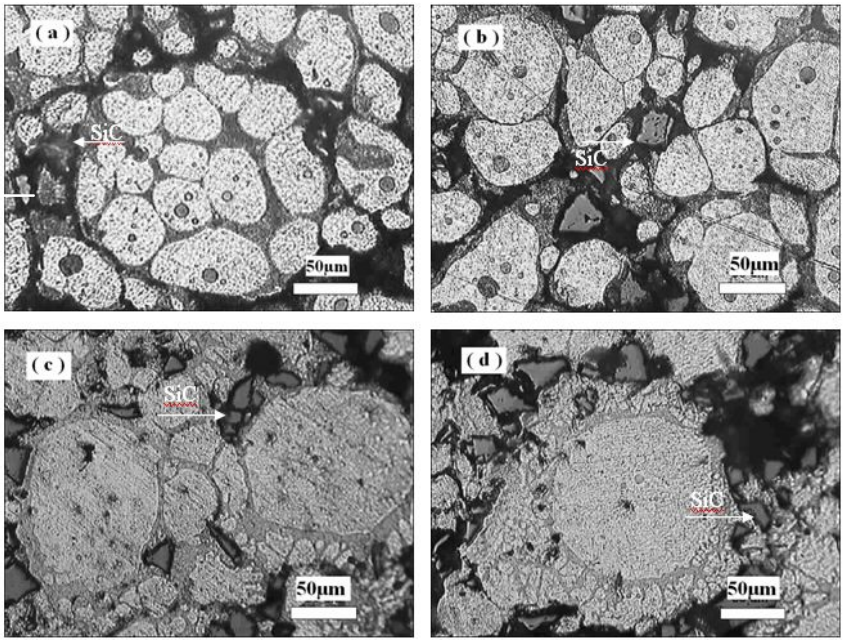
Şekil 6.4 Mekanik karıştırılmış, 600ºC fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC içeren numunelerin küresellik oranları.

Şekil 6.4'te, üretimi gerçekleştirilen SiC takviyeli A356 kompozit malzemesinin % küresellik oranları verilmektedir. %5 SiC takviyesi ile üretilen A2 numunesinin küresellik oranı %79, %10 SiC takviyesi ile üretilen A4 numunesinin küreselliği % 78, %15 SiC takviyesi ile üretilen A6 numunesinin küreselliği % 72 ve %20 SiC takviyesi ile üretimi gerçekleştirilen A8 numunesinin küresellik oranı ise % 69 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakılarak 600°C'da yarı katı işlemle üretilen A356 alaşımına takviye elamanı olarak ilave edilen SiC takviye elemanı oranının artmasıyla malzemelerin mikroyapısında % küresellik oranının düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.5 Mekanik karıştırılmış, 600ºC fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. basma süresi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC içeren numunelerin ASTM standartlarına göre tane boyutu oranları.

Şekil 6.5'te ise aynı üretim koşullarına sahip numunelerin tane boyutu oranları verilmektedir. A356 ana matris içerisine farklı SiC takviyesi (%5, %10, %15, %20) katarak elde edilen kompozit malzemelerin ASTM E112 standartlarına göre tane boyutu ölçümleri yapılmış ve bu ölçümler sonucunda A2 numunesinin tane boyutu oranı 8.1, A4 numunesinin tane boyutu oranı 8.4, A6 numunesinin tane boyutu oranı 8.5 ve A8 numunesinin tane boyutu oranı ise 8.8 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak farklı oranlarda ilave edilen SiC parçacıkları ile elde edilen A356 kompozit malzemesinde, SiC oranının artması % küresellik oranını azaltırken tane boyutu oranını da arttırdığı belirlenmiştir.



Şekil 6.6 Mekanik karıştırılmış, fırın sıcaklığı 590ºC, kalıp sıcaklığı 550ºC, 1 dak. presleme süresi a. %5SiC (A1), b. %10SiC (A3), c. %15SiC (A5), d. %20SiC (A7) oranlarında elde edilen mikroyapı görüntüleri.

Şekil 6.2'de olduğu gibi Şekil 6.6'da verilen optik mikroskop görüntülerinde de takviye elemanı/matris arasında bir arayüzey oluşmaktadır (SiC tanecikleri ile matris arasındaki koyu bölgeler). Bu durum Lee ve arkadaşlarının çalışmasında da belirtilmektedir (Lee et al., 2004).

Al-Si alaşımları alüminyum kompozit üretiminde en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Kompozit malzemelerin üretiminde döküm tekniği, toz metalurjisi teknikleri ve yarı-katı üretim teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle döküm ve yarı-katı üretim

tekniklerinde sıvı veya sıvı haldeki Al-Si ötektiği ile SiC takviye fazı arayüzeyinde Al_4C_3 fazı oluşmaktadır.

Al ve SiC arasındaki bu reaksiyon;

$$4Al_{(s)} + 3SiC_{(k)} \rightarrow Al_4C_{3(k)} + 3Si \qquad (1)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada Si, sıvı alüminyum içinde SiC'den çözünen Si'u göstermektedir. Bu reaksiyoun gerçekleşme aşamaları ise;

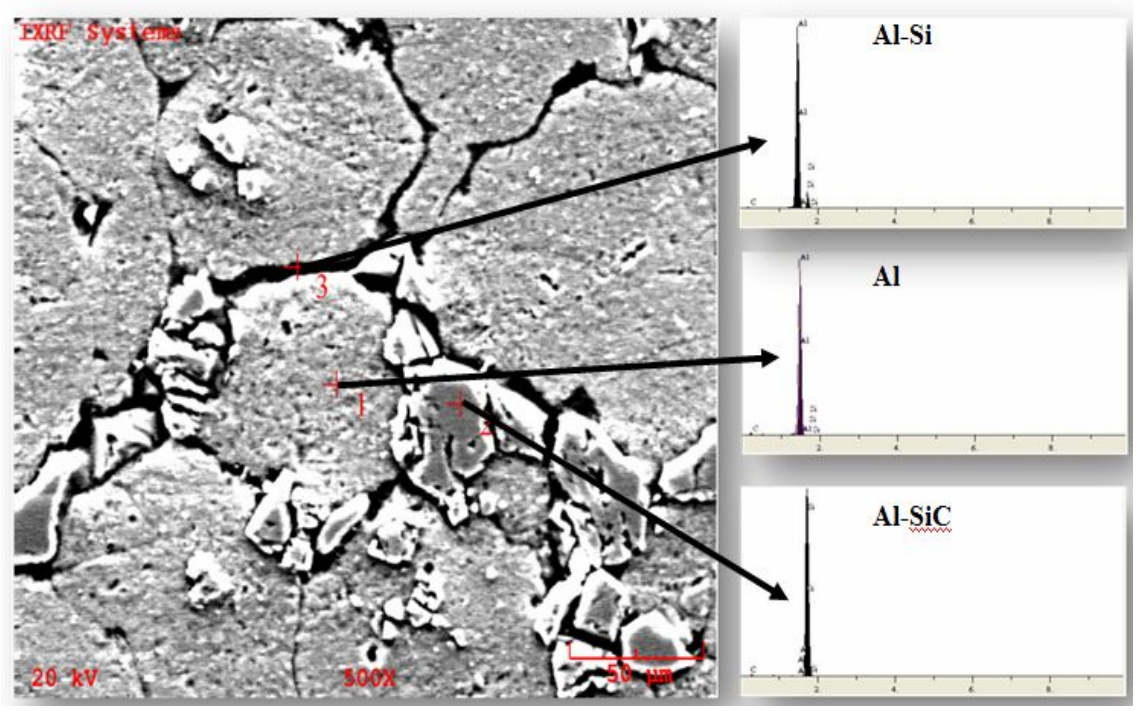
$$SiC_{(k)} = Si + C$$

$$3C + 4Al_{(s)} = Al_{(4)}C_{(3)(k)}$$

Şeklinde gerçekleşmektedir.

İlk eşitlikte görülen SiC matriste Al ile reaksiyona girerek Al_4C_3 oluşturmak için silisyum ayrışır. Bu yüzden silisyum içeriği % 8-9 arasında olan Al-Si alaşımlarında Al matrisin SiC ile reaksiyona girmelerinden kaçınmak gerekir (Selvaduray, et al., 1990).

Şekil 6.7'de 590°C fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %15 SiC oranına sahip numunenin SEM ve EDS analizi sonuçları verilmiştir.

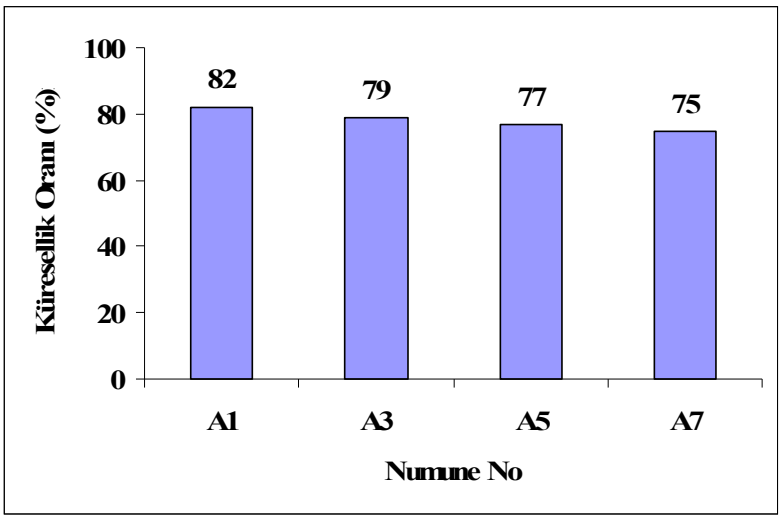


Şekil 6.7 590°C fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %15 SiC oranına sahip numunenin SEM ve EDS analizi sonuçları.

Şekil 6.7'de verilen SEM görüntüsü üzerinden alınan üç farklı EDS analizinde Si oranı 0.53 (1. bölge), 75.52 (2.bölge) ve 18.75 (3.bölge) olarak görülmektedir. Tane sınırlarındaki (3.bölge) Si oranının artış göstermesi yüksek sıcaklıkta SiC'ün ayrışmasından dolayı tane sınırlarına çökelmesine neden olmaktadır. Yapılan EDS analizlerinde oksijene rastlanmamıştır. Bunun nedeni olarak düşük fırın sıcaklığında işlem yapılmasıdır. Malzemenin % küresellik oranına (%77) bakıldığı zaman yüksek olduğu görülmektedir. Bir diğer sonuç ise tane sınırlarında SiC'ün ayrışması sonucu silisyumun alüminyumla ötektik oluşturduğu ve oksidasyonun olmamasından dolayı bu miktarın 600°C'deki numuneye oranla çok fazla olduğu Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'teki 3 nolu analizlerden anlaşılmaktadır. Bu durum Selvaduray ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada yukarıda verilen (1) reaksiyona göre gerçekleştiği belirtilmektedir.

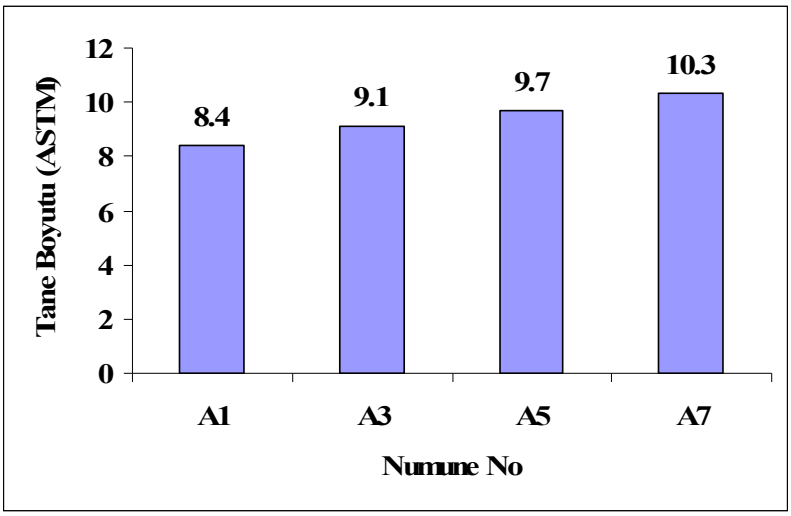
Özellikle 580°C – 620°C sıcaklık aralığında alaşımın Si içeriğinde %1 oranında (matriste solüdüs sıcaklığının altında) bir artış meydana gelmektedir. Sıcaklık artışının 750°C civarında olması durumunda ise Si içeriğindeki değişim oranı %8'lere kadar çıkabilmektedir. Si içeriğindeki artış matris ile SiC takviye fazı arasındaki reaksiyonu önlediği için SiC takviye fazı etrafında bir ara yüzey oluşmaktadır. Kompozit malzemelerde ara yüzey oluşumu

malzemenin dayanımını, tokluğunu ve aşınma karakterini olumsuz yönde etkilediği için Al/SiC kompozit malzemelerin üretiminde işlem sıcaklığına dikkat edilmelidir.



Şekil 6.8 Mekanik karıştırılmış, 590ºC fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC içeren numunelerin küresellik oranları.

Şekil 6.8'de mekanik karıştırılmış 590°C fırın sıcaklığına sahip, dört farklı oranda ilave edilen SiC takviyeli A356 kompozit malzemesinin % küresellik oranları verilmektedir. Üretilen numunelerin SiC takviyesi %5, %10, %15, %20 ve fırın sıcaklığı 590ºC'de üretimi gerçekleşmiştir. Şekil 6.6' da verilen diyagramda %5 SiC oranına sahip A1 numunesinin % küresellik oranı %82 olarak ölçülürken, A3 numunesinin % küresellik oranı %79 olarak ölçülmüştür. Ayrıca A5 numunesinin % küresellik oranı %77 ve A7 numunesinin % küresellik oranı %75 olduğu belirlenmiştir. Bu veriler ışığında 590°C'de A356 ana matris içine katılan farklı oranlardaki SiC'ün miktarı arttıkça mikroyapıda oluşan tanelerin % küresellik oranlarının azaldığı söylenebilir.



Şekil 6.9 Mekanik karıştırılmış, 590ºC fırın sıcaklığı, 550°C kalıp sıcaklığı, 1 dak. presleme süresi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında SiC içeren numunelerin ASTM standartlarına göre tane boyutu oranları.

Şekil 6.9'da ise A1, A3, A5 ve A7 numunelerin tane boyutu oranları verilmektedir. Tane boyutu incelenen numunelerin fırın sıcaklıkları 590°C, presleme süreleri 1 dakika ve kalıp sıcaklıkları 550°C'dir. Üretimi yapılan bu malzemelerin sadece A356 alaşım içine katılan SiC takviye elamanının miktarı (%5, %10, %15, %20) değişmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi SiC takviyesinin tane boyutu üzerindeki etkisi; A1 numunesinin 8.4, A3 numunesinin 9.1, A5 numunesinin 9.7 ve A7 numunesinin 10.3 olmasıyla anlaşılmaktadır. Sonuç olarak A356 ana matris içine katılan SiC takviye elemanının miktarının artmasıyla malzeme yapısında gerçekleşen tane boyutunun % oranlarında da bir artış olduğu gözlenmiştir.

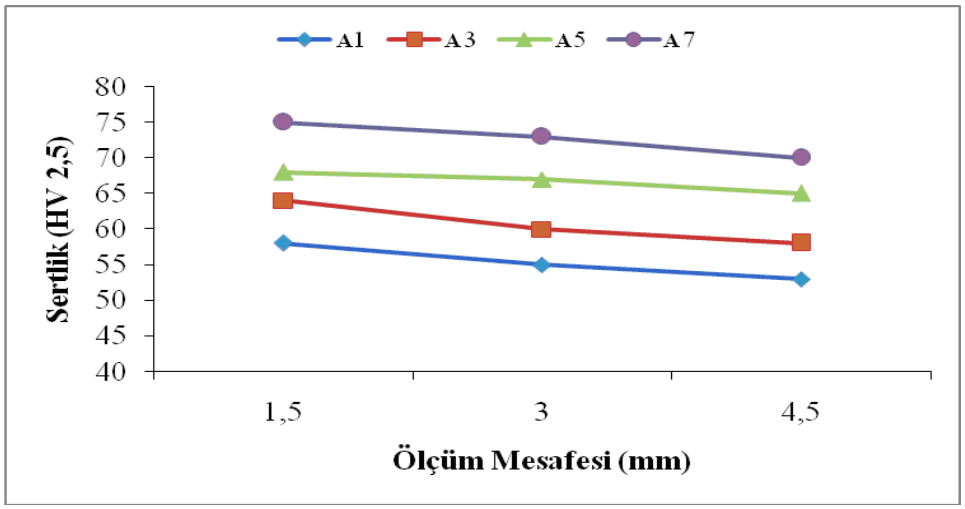
6.3 FIRIN SICAKLIĞININ MİKROYAPIYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Şekil 6.8'da A1 ve şekil 6.4'teki A2 numaralı numunelerin içerisindeki SiC oranları %5, kalıp sıcaklıkları 550°C, mekanik karıştırma yöntemi ve 1 dakika presleme süreleriyle aynı olmakta sadece fırın sıcaklıklarında (A1:590°C, A2:600°C) bir değişme olmuştur. Bu kriterler göz önünde bulundurulacak olursa; A1 numunesinin % küresellik oranı %82 iken, A2 numunesinin % küresellik oranı %79 olmaktadır. Sonuç olarak % küresellik oranı fırın sıcaklığına bağlı olmakla beraber sıcaklık miktarı artıkça % küresellik oranlarında bir düşüş söz konusu olmaktadır. Bu düşüş Şekil 6.8 ve Şekil 6.4'te de bariz bir şekilde görülmektedir. Aynı zamanda bu iki numunenin tane boyutları incelendiğinde de (Şekil 6.9 ve Şekil 6.5) A1 numunesinin tane boyutu oranı 8.4 iken, A2 numunesinin tane boyutu oranı 8.1 olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında fırın sıcaklığındaki artış tane boyutu

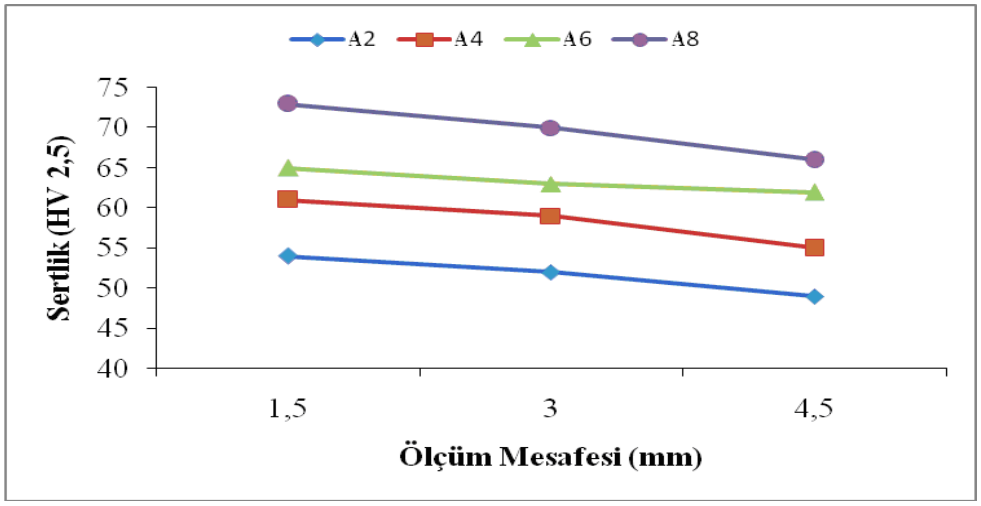
oranını azaltmaktadır. Burada fırın sıcaklığının artmasıyla % küresellik oranının arttığı, tane boyutu oranlarının azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın bütün numunelerde de (%10, %15, %20 SiC oranlı) meydana geldiği çok aşikar bir sonuçtur. Özyürek ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada fırın sıcaklığının % küresellik ve tane boyutu üzerindeki etkisinin çok etkili olduğunu belirtmişler, en uygun fırın sıcaklığının da 590°C'de gerçekleştiğini de söylemektedirler (Özyürek, et al., 2007).

6.4 TAKVİYE ELEMANININ SERTLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

A356 alüminyum alaşımına eklenilen SiC takviye elemanının mikrosertliğe etkisi Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de gösterilmektedir.



Şekil 6.10 590ºC fırın sıcaklığında preslenmiş numunelerin sertlik değerleri.



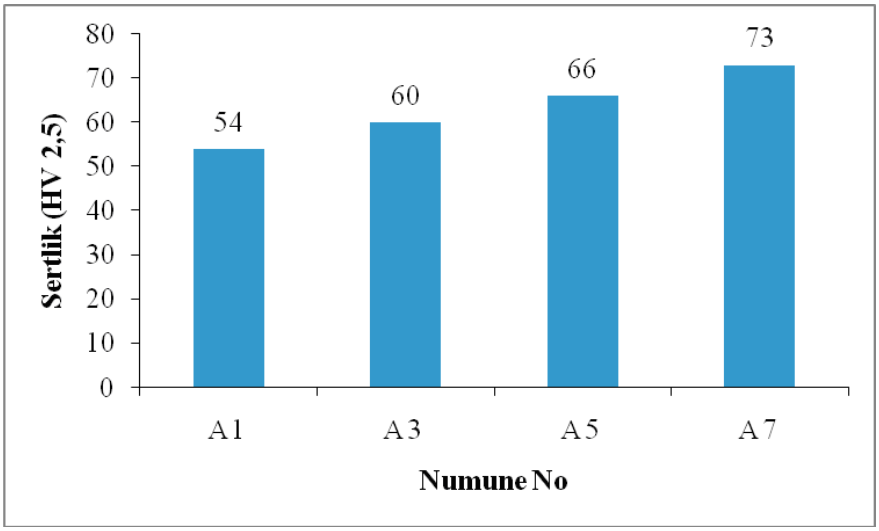
Şekil 6.11 600ºC fırın sıcaklığında preslenmiş numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 6.10'da gösterilen numuneler A1 %5SiC, A3 %10SiC, A5 %15SiC ve A7 %20SiC oranına sahiptir. Bu numuneler üzerinde gerçekleştirilen sertlik ölçümü merkezden dışa doğru üç eşit mesafede yapılmıştır. Ölçüm sonrası alınan değerlerde sertliğin dış çaptan merkeze doğru azaldığı görülmektedir. Sertliğin azalma nedeni olarak numunelerin kalıp içerisinden solüsyona alma işlemi yapılarak ani soğumaya bırakılmasıdır. Şekil 6.10'da A1 numaralı numunenin sertlik değerleri 53 HV ile 58 HV arasında, A3 numunesinin sertliği 58 HV ile 64 HV arasında, A5 numunesinin sertliği 65 HV ile 68 HV arasında ve A7 numunesinin sertliği 70 HV ile 75 HV arasında gösterilmektedir. Bu verilere bakıldığı zaman takviye elemanın artmasıyla sertliğinde artış gösterdiği bariz bir şekilde görülmektedir.

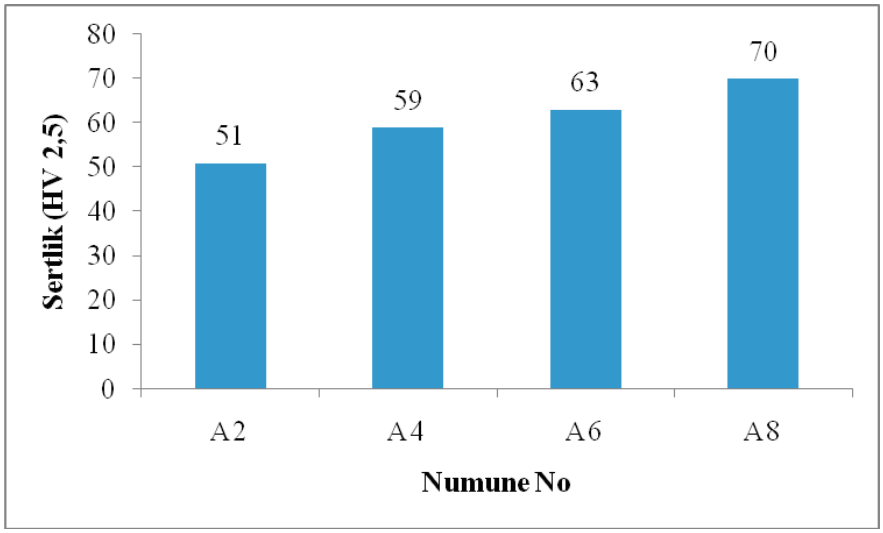
Şekil 6.11'de ise A2,A4,A6 ve A8 numaralı numuneler yer almaktadır. Grafiğe bakıldığı zaman fırın sıcaklığının 600^0C'ye çıkartılmasıyla üretimi gerçekleştirilen numunelerin sertlik değerleri takviye elemanının artmasıyla artış gösterdiği görülmektedir. A2 numaralı numunenin sertlik değerleri 49 HV ile 54 HV arasında, A4'ün sertlik değerleri 55 HV ile 61 HV arasında, A6'nın sertlik değerleri 62 HV ile 65 HV arasında, A8'in sertlik değerleri ise 66 HV ile 73 HV arasında bulunmuştur.

Sonuç olarak bütün numunelerin sertlikleri kıyaslandığında (A1, A3, A5, A7 numaralı ve A2, A4, A6, A8 numaralı numuneler) 590^oC üretilen numunelerin sertlik değerleri 600^oC üretilen numunelere göre daha sert olduğu aşağıdaki grafiklerde görülmektedir. Bunun sebebi ise fırın sıcaklığının artmasıyla sıvı-katı dengesinde sıvı miktarının artmasından dolayı mikroyapıda tane büyümesi gerçekleşeceğinden ve bundan dolayı iri taneli yapının sertliğinin küçük taneli yapıya sahip malzemelere oranla daha az olduğu için 590ºC fırın sıcaklığında preslenen malzemeler 600°C'de preslenen malzemelerden daha sert olmasına neden olmaktadır.

Üretimi gerçekleştirilen numunelerin sertlik ortalamaları aşağıda Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.12 590°C fırın sıcaklığında preslenen numunelerin sertlik ortalamaları.



Şekil 6.13 600°C fırın sıcaklığında preslenen numunelerin sertlik ortalamaları.

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te görüldüğü gibi, A1 numaralı numunenin ortalama serliği 54 HV iken A2 numaralı numunenin ortalama sertliği 51 HV bulunmuştur. A3 numaralı numunenin ortalama sertliği 60 HV iken A4 numaralı numunenin ortalama sertliği 59 HV bulunmuştur. A5 numunenin ortalama sertliği 66 HV iken A6 numaralı numunenin sertliği 63 HV bulunmuştur. A7 numaralı numunenin ortalama sertliği 73 HV iken A8 numaralı numunenin ortalama sertliği ise 70 HV olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerlerin farklılıklarının presleme sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Presleme sırasında tanelerin viskositesinin arttığı ve bu nedenle malzememin değiştiği gözlemlenmiştir. Bu değişiklik presleme sıcaklığının artmasıyla numunenin sertliğinde düşüş olduğu gözlenilmiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretiminde takviye elemanının ve fırın sıcaklığının küresellik oranına ve tanelerinin boyutuna etkileri incelenmiş, bu etkilenmenin malzeme özelliklerini ne derece etkilediği araştırılmıştır. Araştırma sonucu aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

1. Klasik döküm yöntemiyle elde edilen numunelerde dentritik bir mikroyapı gözlenirken, yarı katı şekillendirme yöntemiyle üretilen numunelerde küresel bir mikroyapı elde edilmiştir.

2. A356 ana matris %5, %10, %15 ve %20 SiC takviyeli Kompozit malzeme üretiminde en ideal parametre, fırın sıcaklığının 590ºC, kalıp sıcaklığının 550ºC ve presleme süresinin 1 dakika olduğu belirlenmiştir.

3. Yüksek sıcaklıklarda (600ºC) % katı-sıvı oranının değişmesiyle birlikte sıvı miktarındaki artışa bağlı olarak tane yapısında da irileşmeler olduğu belirlenmiştir.

4. Yarı-katı işlemde metalin viskositesinin yüksek olması nedeniyle akıcılık düşüktür. Bu nedenle gaz boşlukları minimum olmaktadır. Ayrıca işlem sırasında düşük bir döküm sıcaklığında çalışıldığı için daha az oksitlenme meydana gelmektedir.

5. Kompozit malzeme içerisindeki SiC takviye elemanının artışı ile tane boyutunda artış olmuştur.

6. Kompozit malzeme içerisindeki SiC takviye elemanının oranındaki artış ile küresellik oranının azaldığı tespit edilmiştir.

7. Kompozit malzeme içerisindeki SiC oranı arttıkça malzemenin sertliği artmıştır.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler:

1. Farklı kalıp malzemesi (metal kalıp) kullanılarak değişik soğuma hızlarında çalışma yapılabilir.
2. Malzemelere uygulanan yük miktarı değiştirilerek farklı basınç miktarı belirlenebilir.
3. Farklı takviye elemanlarıyla çalışılabilir.
4. Ana matris elemanı değiştirilerek uygulanan parametrelerdeki değişiklikler incelenebilir.
5. Farklı kalıp sıcaklıklarında çalışılarak ön soğumanın malzeme üzerine etkisi analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

Agyekum E, Ruch W, Starge E A, Jha S C and Sanders H (1986) Effect of Precipitate Type On Elastic Properties of Al-Li-Cu- And Al-Li-Cu-Mg Alloys. *Aluminium Alloy,* 3: 448-454.

Ashby M F (1993) Criteria for Selection the Components of Composites. *Acta Metal Mater.*, 41: 1313-1335.

Bergsma S C, Tolle M C, Kassner M E, Evangelista E and Li X (1997) Semi-solid thermal transformations of Al-Si alloys and the resulting mechanical properties. *Materials Science and engineering A,* 237: 24-34.

Çavusoglu E (1992) Thixocasting yöntemi. *Döküm Teknolojisi I kitabı,* I.T.U. Kütüphanesi, Sayı: 1499, İstanbul.

Chul L, Hyun K S and Lee H I (1999) Alloy desing of thixoformable wrought SiC/Al Alloy composites. *Materials Research Bulletin,* 34: 35-42.

Cho W G and Kang C G (2000) Mechanical properties and their micro structure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology,* 105: 269-277.

Dong J and Cui J Z (1996) Proceedings of 6th International Conference on Semi-solid of Alloys and Composites. *The University of Sheffield,* 193.

Dong J, Cui J Z, Le Q C and Lu G M (2002) The key laboratory of electromagnetic processing of material, ministry of education. Northeastren University, SHENYANG, People's Republic of China, 317.

Eisen P and Young K (2000) Diecasting system for semi-liquid and semisolid metal casting-applications. *Proceedings of alloys Sixth International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites,* pp. 41-46.

Ernst F (1995) Metal-oxide interfaces. *Materials Science and Engineering,* 14: 97-102.

Erdogan M (2001) *Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri.* Nobel Yayınları, Ankara, 135-138.

Gomez de Salazar J M and Barrena M I (2004) Influence of heat treatments on the wear behaviour of an AA6092/SiC_2 composite. *Wear*, 256: 286-293.

Guo Z X and Derby B (1995) Solid-state fabrication and interfaces of fibre reinforced metal matrix composites. *Progress in Materials Science ,* 39: 4-5.

Handbook ASM (2001) Composites, *The Material Information Society,* Ohio, ASTM, Vol. 21, s. 903-912.

Handbook ASM (1988) Casting Aluminum and Aluminum Alloys, *Aluminum Company of America,* Amerika, Vol. 15, **s.** 749-753.

Handbook ASM, (1992), Alloy Phase Diagrams, Binary Alloy Phase Diagrams, *Aluminum Company of America,* Amerika, Vol. 3, pp 52.

Huda M D, Hashmi M S J and El-Baradie M A (1995) Materials Manufacturing and Mechanical Properties, *Key Engineering Materials,* 104-107: 37-64.

Idegomori T, Hirono H, Ito O, Kimishima S and Mizoue K (1998) The manufacturing of automobile parts using semi-solid metal processing, *in: Proceedings of the Fifth International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines,* Colorado, USA, pp. 71-77.

Jung H K (2000) The induction heating process of semi-solid aluminium alloys for thixoforming and their micro structure evaluation, *journal of materials processing technology,* 105: 176-190.

Kang C G, Choi J S and Kim K H (1999) The effect of strain rate on macroscapic behavior in the compression forming of semi-solid aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology,* 88: 159-168.

Kang C G and Jung G D (2001) Improvement of the liquid segregation phenomena of semisolid aluminium alloys by the multistage strain rate control in the compression test. *Journal of Materials Eng. Performas,* 10*:* 419-428.

Kapranos P, Atkinson H V, Camacho A M and Argent B B (2003) Thermo dynamic predictions of wrought alloy compositions amenable to semi-solid processing. *Acta Materialia,* 51: 2319-2330.

Kapranos P (2000) Proceedings of 6th International Conference on Semisolid of Alloys and Composites. *Turin, Italy.*

Kapranos P, Gibson R C, Kirkwood D H, Hayes P J and Sellar C M J (1996) *Materials Science Tech.,* 12: 274-278.

Kapranos P, Kirkwood D H and Sellars C M (1992) Semi-solid forging of high temperature alloys. *in: Proceedings of the Second International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Massachusetts Institute of Technology of, Massachusetts, USA,* pp.119-122.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Koewius A (1996) Die Freude am Fahren und die Ökologiesche Vernunft, *Teil 1., Alminium. 72.Jahrgang,4:* 232-238.

Kouji S (1997) The characteristics of thixoforming product, *in: Proceedings of the175th JSTP symposium for Semi-Soild Metals Forming, , JSTP & JSME, Tokyo University of Technology, Tokyo, Japan,* pp. 25-33.

Pinsky D A, Charreyron P O and Flemings M C (1984) Compression of semi-solid dentritic Sn-Pb alloys at low strain rates. *Metall. Trans.,* 15: 173-181.

Lee D H, Seo P K and Kang C G (2004) Die design by filling analysis of semi-solid injection forging process and their experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology ,* 147: 45-50.

Özyürek D, Aktar N and Aztekin H (2007) Design and construction of a thixo forming unit and production of Al–Si alloys. *Materials &Design,* in pres: 1-5.

Röhrle M D (1999) Giessereitechnik und Automobileindustrie-eine Partnerschaft mit Tradition. *Aluminium. 75.Jahrgang,* 9: 689-733.

Salvador M D, Amigó V, Martinez N and Busquets D J (2003) Microstructure and mechanical behaviour of Al–Si–Mg alloys reinforced with Ti–Al intermetallics. *Journal of Materials Processing Technology ,* 143: 605-611.

Sanders T H and Starke E A (1986) Owerview of the Physical Metallurgy In The Al-Li– X Systems Proc. Of The 3 rd. Int. Conf. On Al-Li Alloys, *The Inst. Of Metals,* pp 1- 12.

Selvaduray G, Rickman R, Quinn D, Richard D and Rowland D (1990) Interfaces in Metal-Ceramics Composites, *TMS Annual Meeting*, (Anaheim, C A): 271-276

Sılcock J M (1960) The Stuructural Againg Characterictics Of Al-Cu-Mg Alloys With Copper-Magnesium Weight Ratios Of: 7:1 And 2,2:1. *Journal Of The Institute Of Metals,* 89: 203-206.

Spencer D P, Mehriban R and Flemings M C (1972) Rheological Behaviour of Sn-15%Pb in the crystallisation range. *Metal Trans,* 3*:* 749-753.

Sukimoto M (1986) Aluminium Technology Proceedings of The International Conference, *London.*

Suzuki S and Haga T (2001) Casting of aluminum alloy ingots for thixoforming using a cooling slope. *Journal of Materials Processing Tech*., 118: 169-172.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Tietmann A, Bremer T, Hirt G and Kopp R (1992) Preliminary results in thixoforming aluminum wrought alloys, *in: Proceedings of the Second International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites,* Massachusetts Institute of Technology of, Massachusetts, USA, pp. 170-179.

URL-1 (2007) http://www.oit.doe.gov,11 Kasım 2007.

URL-2 (2007) http:// 64.233.179.104 /scholar?hl=tr&lr=&q=cache:oBD4zyqXiAAJ: www. shef.ac.uk/materials/SSM/Downloads/semsolid.pdf+Kirkwood+D+H+1996,11Kasım 2007.

Ward P J, Atkinson H V, Anderson P R G, Elias L G, Garcia L, Kahlen L and Rogriguez-ibabe J-M (1995) Semi-solid processing of novel MMCs based on hypereutectic aluminium-silicon alloys. *Acta Materialia*, 44: 1717-1727.

Witulski T, Morjan U, Niedick I and Hirt G (1998) The thixoformability of aluminium alloys, *in: Proceedings of the Fifth International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites,* Colorado School of Mines, Colorado, USA, pp. 353-360.

Yoshida C, Moritaka M, Shinya S, Takebayashi K and Nanba A (1992) Semi-solid forging of aluminium alloys, *in: S.B. Brown, M.C. Flemings (Eds), Proceedings of the Second International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites,* MIT Press, Cambridge, MA, June 10-12, pp.95-102.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan AZTEKİN 1979'da Konya'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Konya Merkez İmam Hatip Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2000 yılında Z.K.Ü Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Döküm Öğretmenliği'ne girdi; 2004'de mezun olduktan iki yıl sonra KBÜ Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü'nde yüksek lisans'a başladı; ve aynı bölümde yüksek lisansını sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Mehmet Akif Mah. Küçük kuyu Sok.
No:14/2 42200 Selçuklu/KONYA

Tel: (332) 247 66 18
Gsm: (535) 512 09 90
E-posta: aztekin42@hotmail.com