



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ŞARTLARDA DÖKÜLMÜŞ MODİFİYELİ Al-12Si ALAŞIMLARINDA YAPI VE ÖZELLİKLER

Muhammet ULUDAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2011
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Muhammet ULUDAĞ

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI ŞARTLARDA DÖKÜLMÜŞ MODİFİYELİ Al-12Si ALAŞIMLARINDA YAPI VE ÖZELLİKLER

Muhammet ULUDAĞ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışmanlar: Doç. Dr. Mesut UYANER
Prof. Dr. Fevzi YILMAZ

2011, 100 **Sayfa**

Jüri
Doç. Dr. Mesut UYANER
Doç. Dr. Hüseyin İMREK
Yrd. Doç. Dr. Ali Serhat ERSOYLU

Alüminyum-silisyum alaşımları hafiflik, yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet, yüksek ısı iletkenliği ve düşük ısıl genleşme özelliklerinden dolayı genellikle otomotiv, elektrik ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların dökümünde karşılaşılan en büyük problemlerden ikisi mikro porozite ve oksit film oluşumudur. Alüminyumun yüzeyinde bulunan oksit tabakası koruyucu bir görev görmesine rağmen, türbülans gibi çeşitli sebeplerden ötürü sıvı metale karışması sonrası, ufak ancak önemli olan çatlak benzeri hataları yani bifilmleri oluştururlar. Bifilmler külçeden de gelebilir, sıvı metalde asılı kalır ve katı yapıya geçerler.

Bu çalışmada, önceden modifiye edilmiş Al-12Si alaşımına bifilmlerin etkisi üzerine araştırma yapılmıştır. Al-12Si alaşımının iki türbülanslı ve iki türbülanssız olmak üzere dört farklı dökümü yapılmıştır. Türbülanslı döküm ile türbülanssız döküm arasındaki mikroyapı ve mekanik özellik farkları araştırılmıştır. Türbülanssız dökümlerde gaz giderme yapıldı ve filtre kullanıldı.

Sonuç olarak, mekanik özellikler bakımından türbülanslı ve türbülanssız döküm arasında büyük fark görülmemiştir. Mikroyapısal özelliklerde türbülanssız döküm (az porozite ve az bifilm olması) türbülanslıya göre üstünlükler göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum-silisyum alaşımları, bifilm, döküm, mekanik özellikler, modifikasyon, ötektik alaşım, porozite.

ABSTRACT

MS THESIS

THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MODIFIED Al-12Si ALLOYS CAST UNDER DIFFERENT CONDITIONS

Muhammet ULUDAĞ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisors: Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER
Prof. Dr. Fevzi YILMAZ

2011, 100 **Pages**

Jury
Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin İMREK
Assist. Prof. Dr. Ali Serhat ERSOYLU

Aluminum-silicon alloys, due to their low weights, high corrosion resistance, high strength, high thermal conductivity and low thermal expansion, are widely used in automotive, electrical and aircraft industries. Two of the major problems in casting these alloys are formation of micro porosity and oxide films. There is growing evidence that, in general oxide protects aluminum castings under-perform by a large margin. This is all because of presence of extremely thin but detrimental defects called bifilms are develop from these oxide films. Bifilms can also come from charge and manipulations.

In this study, the effect of bifilms on structure of Al-12Si alloy has been investigated. Four different castings were made; two with turbulence and two without. Samples were collected from the castings for microstructural analysis and mechanical testing. Degassing was carried out and filters were used in the non-turbulent filling castings.

As a result, no significant differences were found in the mechanical properties between the turbulent and non-turbulent castings. Microstructural analysis show that non-turbulent castings had less porosity and less bifilm compared to the turbulent castings.

Keywords: Aluminum-silicon alloys, bifilm, casting, eutectic alloys, porosity, mechanical properties, modification.

ÖNSÖZ

Hazırlanan bu yüksek lisans tezimde genel olarak modifiye edilmiş Al-12Si alaşımında filtre, gaz giderme ve türbülansın alaşımın kalitesi üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tüm parametrelere göz önüne alınarak yorumlanmıştır.

Çalışmalarım süresince danışmanlığımı yaparak beni yönlendiren, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocalarım Doç. Dr. Mesut UYANER ve Prof. Dr. Fevzi YILMAZ' a, tez çalışmalarım konusunda yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI, Yard. Doç. Dr. Derya DIŞPINAR ve Arş. Gör. Murat ÇOLAK' a da teşekkürü bir borç bilirim.

Yardımlarını ve desteğini esirgemeyen ALTUN DÖKÜM firmasına ve GALİPOĞLU HİDROMAS firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında yanımda olan, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Muhammet ULUDAĞ
KONYA-2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **x**

TABLOLAR LİSTESİ ..... **xii**

1. GİRİŞ **1**

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **2**

2.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları 3
2.1.1. Alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri 4
2.1.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması 5
2.1.2.1. Dövme alüminyum alaşımları 6
2.1.2.2. Döküm alüminyum alaşımları 8
2.2. Alüminyum Silisyum Alaşımları 8
2.2.1. Silisyum ve diğer alaşım elementlerinin alaşıma etkileri 9
2.2.2. Alüminyum silisyum faz diyagramı 13
2.2.3. Alüminyum silisyum alaşımlarında oluşan ötektik ve bileşikler 15
2.3. Modifikasyon 16
2.3.1. Modifikasyon metodları 18
2.3.1.1. Element ilavesi ile modifikasyon 18
2.3.1.2. Çil ile modifikasyon 19
2.3.1.3. Vibrasyon ile modifikasyon 20
2.3.1.4. Yüksek basınç altında modifikasyon 20
2.3.1.5. Al-Si alaşımlarında ısıl işlem ile küreleştirme 21
2.3.2. Stronsiyum ile modifikasyon 21
2.4. Bifilm Teorisi 26
2.4.1. Alüminyum silisyum alaşımlarının dökümünde porozite formları 29
2.4.1.1. Gaz porozitesi 30
2.4.1.2. Çekmeye bağlı porozite 30
2.4.1.3. Her ikisinin de etkili olduğu porozite 31
2.4.2. Bifilm oluşumu 31
2.4.3. Bifilmin porların oluşumuna etkisi 33
2.4.4. Bifilmin döküm kalitesine etkisi 34

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **36**

3.1. Materyal 36
3.1.1. Kullanılan alüminyum silisyum alaşımı 36
3.1.2. Ergitme ocağı 37
3.1.3. Döküm kalıp kumu 38
3.1.4. Katılaşmanın gözlenmesi için kullanılan termokupl 39

3.1.5. Döküm kalıp modeli....39
3.1.6. Sıvı metalde gaz giderme ve gazlılık ölçüm cihazı....41
3.1.7. Metalografik numune hazırlama cihazları....41
3.1.8. Mikroyapı inceleme cihazları....42
3.1.9. Çekme testi cihazı....43
3.1.10. Sertlik ölçüm cihazı....44
3.1.11. Dökümde kullanılan filtre....44
3.1.12. Makro porozite ölçümünde kullanılan cihazlar....45
3.1.12.1. Arşimet hesabıyla porozite ölçüm cihazı....45
3.1.12.2. Makro yapı üzerinde porozite ölçüm cihazı....45
3.2. Metod....45
3.2.1. Döküm kalıbının hazırlanması....45
3.2.1.1. Alaşımın ergitilmesi....46
3.2.1.2. Dökümün yapılması....47
3.2.1.3. Döküm öncesi RPT numunesi alınması....47
3.2.1.4. Türbülanssız dökümün yapılması....48
3.2.1.5. Türbülanslı dökümün yapılması....49
3.2.2. Döküm parçalarının incelenmesi....49
3.2.2.1. Metalografik inceleme....49
3.2.2.2. Mekanik testlerin yapılması....50
3.2.2.2.1. Sertlik testi....50
3.2.2.2.2. Çekme testi....51
3.2.2.3. Makro porozite ölçümü....51
3.2.2.3.1. Arşimet hesabıyla porozite ölçümü....51
3.2.2.3.2. Makro yapı üzerinde porozite ölçümü....52
3.2.2.4. Soğuma eğrisinin çizilmesi....53
3.2.2.5. RPT numunelerinin incelenmesi....53
3.2.2.6. Bifilm indeksi hesaplanması....53

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA....55

4.1. Soğuma Hızı Sonuçları....55
4.2. Makro Yapı İnceleme Sonuçları....56
4.3. Mikroyapı İnceleme Sonuçları....58
4.3.1. Optik metal mikroskobu incelemeleri....58
4.3.2. Numunelerin SEM incelemeleri....63
4.4. Mikro Porozite Ölçüm Sonuçları....65
4.4.1. Hacimsel porozite ölçümü....65
4.4.2. Alansal porozite ölçümü....66
4.5. Mekanik Test Sonuçları....68
4.5.1. Sertlik testi sonuçları....68
4.5.2. Çekme testi sonuçları....69
4.5.3. Kırık yüzeylerin SEM incelemeleri....71
4.6. Döküm Kalitesinin Belirlenmesi....77

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....82

KAYNAKLAR....84

ÖZGEÇMİŞ....88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

RPT : Düşürülmüş Basınç Testi (Reduced Pressure Test)
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobisi (Scanning Electron Microscopy)
EBSD : Arka Saçınımlı Elektron Kırınımı (Electron back-Scattered Diffraction)
PPM : Milyon Başına Parçacık (Parts Per Million)
PPI : İnç Başına Piksel (Pixels per inch)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri.....6
Şekil 2.2. Alüminyum-silisyum alaşımlarının mekaniksel özellikleri.....11
Şekil 2.3. Geniş gaz boşluğu.....12
Şekil 2.4. Ötektik yapı resmi.....13
Şekil 2.5. Al-Si ikili denge diyagramı.....14
Şekil 2.6. %12 Si ve %0.3 Fe'li modifiye edilmemiş alaşım. Kum döküm X250 (Mondolfo, 1979).....15
Şekil 2.7. %10 Si ve %0.09 Fe'li alaşım. Kum döküm. (Mondolfo, 1979).....15
Şekil 2.8. Al-Si ötektik alaşımının şematik olarak katılaşması;.....22
Şekil 2.9. Normal ve modifiye edilmiş Al-Si alaşımlarında katılaşma modu (Heine ve ark., 1955).....23
Şekil 2.10. %13 Si içeren alaşımda sodyum ve antimon arasındaki etkileşme.....25
Şekil 2.11. Tipik bir gaz porozitesi (Savaş, 2005).....30
Şekil 2.12. Tipik bir çekme porozitesi (Savaş, 2005).....30
Şekil 2.13. Salkımlı yapı ve iki boyutlu görünüşü (Savaş, 2005).....31
Şekil 2.14. Yüzey türbülansı: en sık rastlanan çift film oluşum mekanizması.....32
Şekil 2.15. Çift film ve porozite oluşumu.....33
Şekil 2.16. Alaşımlarda gaz boşluğu, bifilm ilişkisi ve kuyruk oluşumu.....34
Şekil 3.1. Elektrik direnç ocağı.....37
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan SiC pota.....38
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan kum karıştırma makinesi.....38
Şekil 3.4. Hazırlanan kum kalıp.....38
Şekil 3.5. Data logger.....39
Şekil 3.6. NiCr-Ni termokupl telinin şematik görünüşü.....39
Şekil 3.7. Dökümü yapılan modelinin teknik resmi.....40
Şekil 3.8. Dökümden çıkan parça.....40
Şekil 3.9. Dökümde gaz gidermede ve gazlılık ölçümünde kullanılan cihazlar.....41
Şekil 3.10. Hidromas firmasında kullanılan numune hazırlama cihazları.....42
Şekil 3.11. Altun Döküm firmasında kullanılan numune hazırlama cihazları.....42
Şekil 3.12. Döküm mikroyapılarının incelendiği cihazlar.....43
Şekil 3.13. Çekme testi cihazı.....43
Şekil 3.14. Deneyde kullanılan sertlik ölçüm cihazları.....44
Şekil 3.15. Dökümde kullanılan 10 PPI'lik filtre.....44
Şekil 3.16. Arşimet terazisi.....45
Şekil 3.17. Makro porozite ölçümünde kullanılan mikroskop ve kamera.....45
Şekil 3.18. Döküme hazır kalıp resmi.....46
Şekil 3.19. Alaşımın ergitilmesi.....46
Şekil 3.20. Döküm yapılmasından bir resim.....47
Şekil 3.23. Türbülanssız dökülmüş parçanın katılaşmadan önceki resmi.....48
Şekil 3.21. RPT numunesi alınması.....48
Şekil3.22. Vakum altında katılaşma anı.....48
Şekil 3.24. Türbülanslı döküm parçasının katılaşmaya başladığı an.....49
Şekil 3.25. Metalografik numune alınması.....50
Şekil 3.26. Çekme numunesinden sertlik alınan bölgeler.....50
Şekil 3.27. Sertlik ve porozite ölçüm numunelerinin alındığı bölgeler.....51
Şekil 3.28. Çekme numunesi.....51
Şekil 3.29. Makro porozite ölçümü.....53
Şekil 4.1. Katılaşma hızı.....55

Şekil 4.2. Soğuma eğrisi alınan dökümün temsili mikroyapı resmi 56
Şekil 4.3. Makro inceleme resimleri. 57
Şekil 4.4. Birinci dökümün mikroyapı resimleri. 59
Şekil 4.5. İkinci dökümün mikroyapı resimleri. 60
Şekil 4.6. Üçüncü dökümün mikroyapı resimleri. 61
Şekil 4.7. Dördüncü dökümün mikroyapı resimleri.....62
Şekil 4.8. Mikroyapı resimleri (SEM).....64
Şekil 4.9. Arşimet hesabına göre porozite sonuçları.....66
Şekil 4.10. Mikroskopta alan hesabına göre porozite sonuçları. 67
Şekil 4.11. Alansal porozite ölçümünde döküm kesitlerinin porozite oranlarının karşılaştırılması. 67
Şekil 4.12. Sertlik alınan bölgedeki iz resmi. 68
Şekil 4.13. Sertlik testi sonuçlarının kesit kalınlığına göre karşılaştırılması. 69
Şekil 4.14. Kesit kalınlığına göre çekme dayanımı. 70
Şekil 4.15. Kesit kalınlığına göre çekme uzaması. 70
Şekil 4.16. İnce kesitlerin kırık yüzey görüntüleri.....73
Şekil 4.17. Orta kesitlerin kırık yüzey görüntüleri. 75
Şekil 4.18. Kalın kesitlerin kırık yüzey görüntüleri.....77
Şekil 4.19. Birinci dökümden alınan RPT numuneleri. 78
Şekil 4.20. İkinci dökümden alınan RPT numuneleri. 78
Şekil 4.21. Üçüncü dökümden alınan RPT numuneleri. 79
Şekil 4.22. Dördüncü dökümden alınan RPT numuneleri.....79
Şekil 4.23. Bifilm indeks verilerinin grafiği.....81

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. % 99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri.....5
Tablo 2.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması.....7
Tablo 2.3. Alüminyum-silisyum alaşımlarının bileşimi.....9
Tablo 2.4. Alüminyum-silisyum alaşımları için 10^{-2} m/m/^{0}K olarak verilen ısıl genleşme katsayıları.....10
Tablo 3.1. Al-12Si alaşımının döküm parametreleri. 36
Tablo 3.2. Al-12Si alaşımının kimyasal bileşimi.....37
Tablo 4.1. Hacimsel porozite ölçüm değerleri.....65
Tablo 4.2. Mikroskop ile bilgisayar ortamında alansal porozite ölçümü. 66
Tablo 4.3. Çekme testi sonuçları. 69
Tablo 4.4. RPT numunelerinin bifilm indeks sonuçları.....80

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde hafif fakat mekanik özellikleri yüksek olan alaşım ve metallere bir hayli gereksinim duyulmaktadır. Alüminyum ve alaşımları ise hafiflik, iyi işlenebilme kabiliyeti, ısı ve elektrik iletkenliği, mekanik özellikleri nedeniyle endüstride büyük önem kazanmışlardır.

Mühendislik uygulamalarında ve insan yaşamında önemli ölçüde kullanım alanı bulan alüminyumun en belirgin özelliği hafifliğidir. Alüminyum, hafifliği sayesinde; günümüz endüstriyel tasarımlarda en çok gözetilen hususlardan biri olan hafif tasarımlar için çok yatkın bir malzeme olmuştur. Ne var ki, alüminyumun da diğer malzemeler gibi elde edilişi ve işlenişi esnasında bazı sorunlar meydana çıkabilmektedir. Gündeme gelen bu sorunlar, alüminyum yapısını doğrudan etkilemekte ve zaten diğer malzemelere göre düşük olan mekanik özellikleri azaltabilmektedir.

Döküm yönteminin uygulanması esnasında yeterli bilgi ve teknoloji kullanılmadığında veya bunlar yetersiz kaldığında avantajlı yönleri dezavantaja dönüşebilmektedir. Özellikle karmaşık geometri ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm parçaların yolluk besleyici tasarımı oldukça zordur ve yoğun mühendislik bilgi ve becerisi gerektirmektedir.

Teknolojinin sürekli olarak geliştiği dünyamızda, üzerinde çalışılan ve yeni ortaya konulan her ürünün daha da geliştirilmesi gereği kaçınılmazdır. Alüminyumun hafifliği nedeniyle tercih edildiği konstrüksiyonlarda ise içyapı kusurları gibi kusurlardan dolayı olası emniyetsizlikleri önlemek için daha fazla malzemenin ürün bünyesinde kullanılması gereği duyulmaktadır. Oysaki içyapısından çok daha iyi haberdar olunarak, yapının emniyetliliğinin daha da kesinleştirilmesiyle, alüminyumun üzerine düşen teknolojinin önünü açmak hususundaki görev uğruna daha da fazla yol kat edilmiş olacaktır.

Bu çalışmada, stronsiyum (Sr) ile modifiye edilmiş Al-12Si ötektik alaşımının farklı döküm sıcaklıklarında, gaz gidermeli ve gaz gidermesiz, filtreli ve filtresiz, türbülanslı ve türbülanssız döküm şartlarında oluşturacağı mikroyapılar ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Türbülanslı yapılan döküm parçalarında oluşan bifilmler mikroyapı üzerinde incelenmiş ve özelliklere nasıl etki ettiği tartışılmıştır. Bunların yanında türbülanssız yapılmaya çalışılan ve türbülanslı yapılan dökümler arasındaki farklar da tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sıvı alüminyumda sıcaklıkla birlikte hidrojen çözünürlüğünün azalması porozitenin büyük bir kaynağı olduğuna inanılmıştır. Bu nedenle dökümhanelerde dökümde poroziteyi azaltmak için gaz giderme işlemi yürütülmektedir. Ancak, bifilmlerin sadece gözeneklerin büyümesine yardımcı olduğu yerlerde bifilmlerin yokluğunda hidrojen porozite çekirdeklenmesinin zor olduğu görülmüştür.

Dışpınar ve ark. (2010) rotary gaz giderme sırasında türbülans ve vorteksin (bifilm yoğunluğunun artması) hidrojen içeriğine göre mekanik özellikler ve porozite üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Rezvani ve ark. (1999) ve Nyahumwa ve ark. (1998) dökümün mekanik özelliklerinin güvenirliliği üzerine doldurma sistemlerinin önemini göstermişlerdir. Gren ve Campbell (1994) döküm kalitesi üzerine oksit filmlerinin önemini göstermek için Weilbull analizini kullanmışlardır. Bu alanda yapılan çeşitli çalışmaların ortak sonucunu göstermiştir ki sürüklenen oksit filmlerinin dökümün güvenirliliği üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Bu sürüklenen oksit filmler bifilmlere nispeten karmaşık özelliklere sahiptirler. Campbell (2006) bu mekanizmayı katlanma/açılma ve sarılma/çözülme olarak tarif etmiştir. Konveksiyon ve/veya türbülans gibi birçok sebepler yüzünden bifilmler kompakt hale geçebilir. Daha az zararlı bir hal olarak neticelenecek şekilde çökebilirler ama bifilmler açılmaya veya çözünmeye başladığında (birbirine bağlı olmayan oksit filmleri arası boşluğa hidrojen difüzyonu ve büzülme nedeniyle oluşan negatif basınç etkisi sebebiyle) bu durum gözenek veya çatlaklar şeklinde büyük kusurların oluşumuna yol açabilir.

Genelde hidrojen Al ve alaşımlarının dökümündeki gözeneklerin ana kaynağıdır. Hidrojenin katı içindeki azalan çözünebilirliği nedeniyle katılaşma esnasında dendiritlerin büyümesiyle hidrojen itilir ve mekanik özellikler ile döküm üretim kalitesi için kusur olan poroziteye neden olur. Bunun tersine porozite oluşumu için konveksiyonel teorilerin aksine Dışpınar ve Campbell (2004) porozite olgusuna yeni bir yaklaşım önermişlerdir.

Eriyik kontrolsüz döner gaz giderme sırasında yüzeyden katılan bifilmlerden dolayı kötü bir kaliteye sahip olabilir.

Bifilm indeksi hidrojen içeriğine bakılmaksızın bifilmlerin sayılarıyla değişir.

Farklı hidrojen içeren eriyiklerin çekme özelliklerinde fark yoktur. Mekanik özellikler içerik sapmaları için daha hassas olduğu görülür (bifilm indeksler vb.).

Bifilm indeksleri azalırken mekanik özellikler artar. Ek olarak Weibull modülleri azalır (Dışpınar ve ark., 2010).

Al-Si alaşımlarının Sr veya Na ile modifikasyonu, silisyum morfolojisinin değişmesinin yanında ötektik tane boyutununda artmasına neden olur (Stuart D. ve ark. 2004).

Ticari saflıktaki alaşımlar empürite modifikasyonu tarafından etkilenmeye karşı hassas çok sayıda güçlü çekirdekleri içerirler. Pulcuk-lif geçişinin empürite modifikasyonu ile oluşması, ötektik çekirdeklenmenin modu ve sıklığı herhangi bir değişikliğe bağlı olmadığını göstermiştir (Stuart D. ve ark. 2004).

Birincil α-Al dendiritlerinde ötektik Al çekirdekleşmesi ötektik Si flake ve fiberleri üzerinde ince Si partiküllerinin katılaşma formları ile gelişebilir. Küçük Si partiküllerinin oluşumu ötektik sıcaklıkta ötektik Al oluşumu nedeniyle eriyikte kalan Si zenginleştirilmesine atfedilmiştir. Ötektik Si fazında ana vurgu ile ötektik tanelerin oluşum mekanizmasını açıklamak için bir hipotez önerilmiştir (Nafisi S. ve ark., 2008).

Cao X., Jahazi M. (2005) Prefil Footprinter testleri kullanarak Al-Si alaşımlarında filtrasyon denemeleri yapmıştır. Prefil testlerinde, filtreden geçen sıvı metalin ağırlığı zamana bağlı olarak belirlenir. Tipik olarak lineer eğriler elde edilir ve eğri ne kadar dik ise sıvı metal inklüzyon içeriği o kadar az demektir anlamına gelir. Fakat, pratik uygulamalarda lineer olmayan eğriler ortaya çıkmaktadır. Bunun temel sebebi oksit filmlerdir ve bunların tip ve yapısına bağlı olarak filtrelemede karşılaşılan direnç (tıkanma vb sorunlar) sonrası "kek modu" adı verilen eğriler elde edilmektedir (Cao X., Jahazi M., 2005).

2.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Alüminyum hafif metaller gurubuna giren ve teknik alanda çok kullanılan bir metaldir. Hafif metal terimi, özgül ağırlığı 3,8 g/cm^3'den küçük olan metaller için kullanılmaktadır ve bu sınıfın içinde, alüminyum, magnezyum, potasyum, lityum ve berilyum bulunmaktadır. Bunlar arasında özellikle alüminyum ve magnezyum en yaygın kullanılan metallerdir. Alüminyum, düşük özgül ağırlığının (2,7 g/cm^3) yanı sıra, yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik, atmosferik korozyona direnç, kolay üretilebilirlik ve diğer metallerle çekme dayanımı yüksek alaşım oluşturabilme gibi özelliklere sahiptir (Shi-Gang ve Li-Xin, 2006).

Alüminyum alaşımları ise saflık derecelerine göre sınıflandırılırlar. Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri içerisindeki Cu, Zn, Si, Mg, Fe ve Ti gibi alaşım elementlerinin etkisi ile yükselir. Alüminyuma çok az miktarda katılan bu alaşım elementleri alüminyumun yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısında yer alıp katı eriyik oluşturarak mukavemetini artırır. Alaşım elementinin yapı içerisinde miktarının

artması ile mukavemet de artar fakat malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti azalır. Bunun yanında alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri uygulanan şekil verme işlemi ile de büyük ölçüde artırılabilir (Anık ve ark., 2000).

2.1.1. Alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri

Alüminyum periyodik cetvelin 3A grubunda bulunur. Atom numarası 13, atom ağırlığı ise 26,981538 g/mol'dür. İyon çapı 0,86 Å olan alüminyumun, atom çapı ise 1,43 Å'dür. Alüminyum, yüzey merkezli kübik kristal kafeslerinden oluşmuştur ve –269 °C' den ergime noktası olan 658 °C' ye kadar kararlıdır, yani fiziksel dönüşüm göstermez. Yer kabuğunda %8 oranında bulunan alüminyum, esas olarak alüminyum hidroksitlerden (AlOOH ve $Al(OH)_3$) üretilen bir metaldir. Bayer yöntemiyle NaOH liçiyle zenginleştirilen boksitin kimyasal formülü $Al_2O_3.2H_2O$'dür. Diğer boksitlerden diyasporit ($Al_2O_3.2H_2O$) ve jipsit ($Al_2O_3.3H_2O$), hidrat suyu içeren, alüminyum üretiminde değer taşımayan, diğer alüminyum oksitlerdir. Alüminyum metali aktif olduğundan havadan kolay etkilenir ve üzerinde pasif bir Al_2O_3 filmi meydana gelir. Bu film ince olmakla beraber metali yüksek sıcaklıkta bile korozif etkilerden korur. Alüminyum tozu havada çabucak yanar, ayrıca NaOH ve KOH içinde kolayca erir. Bu metal kükürtlü oksitlere de dayanıklıdır. Alüminyumun saflık derecesi arttıkça ergime derecesi de yükselir. Katı halden sıvı hale geçerken metalin hacmi büyür. % 99,65 alüminyum içeren metalde bu büyüme % 6,25 civarında iken; % 99,75 alüminyum içeren metalde de % 6,60 büyüme gözlenir. Hem sıvı ve hem de katı alüminyumun yoğunluğu, artan saflık derecesiyle orantılı olarak düşer. % 99,25 Al içeren metalin yoğunluğu 2,727 g/cm^3 iken % 99,40 Al içeren metalin yoğunluğu 2,706 g/cm^3 dür. Alüminyumun saflık derecesi büyüdükçe, ısıl ve elektrik iletkenliği de buna paralel olarak artar.

Yüksek saflıktaki alüminyum, teknik saflıktaki alüminyuma nazaran çok daha yumuşak ve plastiktir. Ayrıca mekanik mukavemeti de daha düşüktür. % 99,25 Alüminyum içeren bir metalin elastiklik modülü 71000 N/mm^2 iken, çok saf alüminyumun elastiklik modülü, ancak 67000 N/mm^2'dir. Alüminyum metalinin saflığı artıkça, sertliği düşer. Alüminyum oranı % 99,2 olan metalin sertliği 24-54 HB ve %99,8 olan metalin sertliği de 19-41 HB arasında değişmektedir. Yapılan deneyler, alüminyumun çekme mukavemetinin artan saflık derecesi ile azaldığını göstermiştir. Kopma anındaki kesit yüzeyinin küçülmesi ise, yüksek saflıktaki alüminyumda (> %

99,9) en fazladır (Tablo 2.1). Yani alüminyum yüzdesi arttıkça, alüminyum metali daha sünek hale gelmektedir. Çok saf alüminyumun çekme dayanımı değeri, alüminyum soğuk haddeleme ile elde edilmişse, 110-130 N/mm^2; tavlama işlemi görmüşse, 35-60 N/mm^2 aralığındadır. Bu değerlerin üzerine çıkılamaz. Uzama miktarı da % 5,5'den % 40-50 mertebelerine kadar değişebilir (Sarsılmaz, 2008).

Tablo 2.1. % 99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri (Sarsılmaz, 2008)

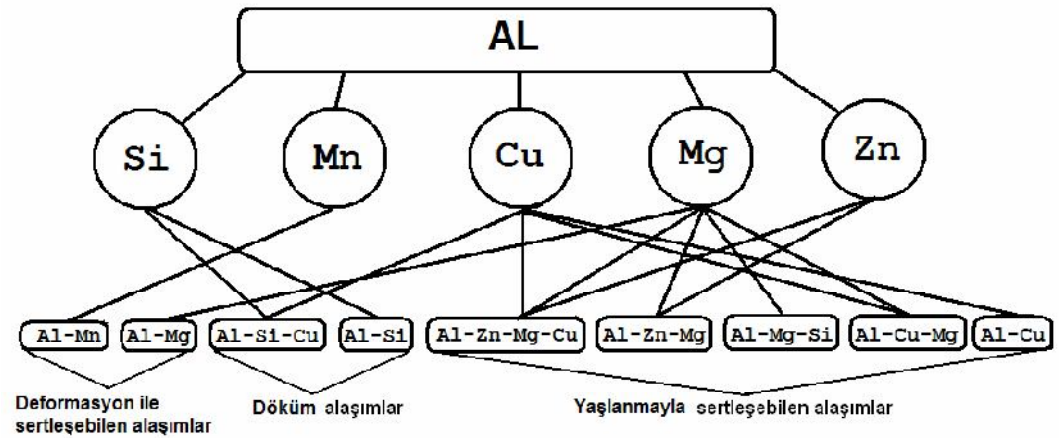
Sembol	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Kristal Yapısı	YMK
Erime Noktası	660 ^{0}C
Yoğunluğu (Oda sıcaklığında)	2.7 g/cm^3
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-320 ^{o}C
Buharlaşma Noktası	2450 ^{o}C
Isıl Genleşme Katsayısı	23.5 μm m^{-1} K^{-1}
Özgül Isısı	0.224 cal/g (100 ^{o}C'de)
Gizli Ergime Isısı	94 cal/g
Çekme Mukavemeti	40-100 N/mm^2
Akma Mukavemeti	10-30 N/mm^2
Elastisite Modülü	72 x 103 N/cm^2
Kayma Modülü	27 x 105 N/cm^2
% Uzama	45
% Kopma Uzaması	30-40
Sertlik	20 (HV)
Çentik Darbe Tokluğu	100 J/cm^2
Elektrik İletkenliği	% 59.5 IACS
Elektrik Direnci	2.65 x 10^{-8} ohm metre
Katılaşma Esnasında Kendini Çekme	% 6.7
Yansıtıcılık	Tungsten flamadan gelen beyaz ışık için % 90

2.1.2. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Endüstride kullanılan alüminyum ve alaşımları dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Taban ve Kaluç, 2005).

Dövme alüminyum ve alaşımları dört basamaklı bir sayı ile tanımlanırlar. Alüminyuma ilave edilen metale göre; dört rakamdan oluşan bir sınıflandırma kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmalarda, sistemindeki birinci rakam, alüminyuma ilave edilen esas metali gösterir (Tablo 2.2). 2XXX serisinden 7XXX ana grubuna kadar her

grup en büyük alaşım elementine göre adlandırılmaktadır. Dövme alaşımlarında, esas üretim yöntemiyle kütük (ingot) olarak dökülen alaşım, plastik sekil verme yöntemleriyle ürün haline getirilir. Döküm alaşımlarında ise, sıvı halde her türlü bileşim ve özellik ayarı yapılmış olan alaşımın, doğrudan ürün kalıbına dökümü yapılır. Dövme ve döküm alaşımları da element bileşimlerine göre alt sınıflara ayrılmaktadır (Şekil 2.1) (Öksüz, 1996; Yılmaz, 2002).



Şekil 2.1. Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri (Öksüz, 1996)

2.1.2.1. Dövme alüminyum alaşımları

Bu alaşımlar, isimlendirilmesinden de anlaşılacağı gibi; dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi plastik sekil verme yöntemleriyle üretilmektedirler. Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtir. 1XXX dizisi saf alüminyumu (% 99,00) gösterir. Son iki rakam % 99 değerinin noktadan sonraki rakamlarını belirtir. Soldan ikinci rakam ise, özel olarak denetlenen katkı elementlerin sayısını belirtir ve 1'den 9'a kadar değişebilir. 2XXX'den 8XXX'e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam değişimleri (modifikasyon) simgeler, son iki rakamın özel bir anlamı yoktur. Alaşımı dizideki diğer alaşımlardan ayıran sıra numarası gibi kullanılır (Oğuz, 1990). Tablo 2.2'de çeşitli alüminyum serileri, ısıl işlem durumları ve oluşturdukları alaşım grupları verilmiştir. Genellikle dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması alaşım elementlerinin katkılarına göre yapılırken, aynı zamanda ısıl işlem uygulanabilirliği (yaşlandırma) açısından da bu alaşımlar ele alınmaktadırlar.

Tablo 2.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması (Öksüz, 1996).

Alaşımsız Alüminyum	1XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Bakır Alaşımı	2XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Mangan Alaşımı	3XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Silisyum Alaşımı	4XXX	Yaşlandırılamaz
Alüminyum Magnezyum Alaşımı	5XXX	Yaşlandırılamaz
Alüminyum-Silisyum-Magnezyum Alaşımı	6XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Çinko Alaşımı	7XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum ve diğer Elementler (Lityum vs.)	8XXX	Yaşlandırılabilir
Boş	9XXX	

Alüminyum alaşımlarına diğer metallerin ilave edilmesi, mekanik özelliklerin iyileşmesine olanak tanır. Örneğin, ticari vasıftaki alüminyumda mevcut küçük miktarlardaki yapı kirleticilerinin bile alüminyumun mukavemetini saf metale kıyasla % 50'ye kadar arttırmaya yeterli olduğu literatürlerde izah edilmektedir. Alüminyum alaşımlarının üretiminde en fazla kullanılan metaller bakır, silisyum, mangan, magnezyum ve çinkodur. Bu metaller, arzu edilen nitelikteki ürünü imal edebilmek için alüminyum alaşımına, tek veya bileşik halde ilave edilebilirler. Döküm alaşımlarında, alaşım yapıcı metaller daha yüksek miktarlarda kullanıldığı zaman hadde alaşımları için bu metallerin toplam yüzdesi, nadiren % 10'un üstüne çıkar. Dökülmüş ve tavlanmış şartlardaki alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti bileşimlerine bağlı olarak ticari alüminyumunun iki misline kadar yükselir. Soğuk işlem, hadde alaşımlarının çekme mukavemetini daha da yükseltir. Alaşımlandırma sonucu alüminyum metalinin mukavemetinde elde edilen yükseliş, diğer özellilerdeki değişimlerle birlikte meydana gelir. Bu değişimler farklı alaşımlarda nadiren aynı olur. Çünkü birçok alaşım, esas itibariyle aynı çekme mukavemetine sahip olmasına karşın; süneklik, elektrik ve ısı iletkenliği ile üretim kolaylığı bakımından birbiriyle önemli farklılıklar gösterir. Alaşımlandırmada bazı katkılar, malzemenin yoğunluğunu artırıcı etki gösterirken; bazı alaşımlar da daha hafif olurlar. Örneğin % 10-13 oranında silisyum içeren alaşımların yoğunluğu 2,65 g/cm^3 civarındadır (Oğuz, 1990).

2.1.2.2. Döküm alüminyum alaşımları

Döküm alaşımlar; genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak üretilirler. Bu alaşımlar son derece yüksek fiziksel özellikler gösterir ve işlenmeye elverişlidirler. Döküm alaşımlar kaynak edilebilirler. Isıl işlem çok yaygın olarak dövme alüminyum alaşımlarına uygulanmakla birlikte, döküm alaşımların bir kısmına da başarıyla uygulanabilmektedir. Bu özelliklerin yanında, mukavemet ve korozyon özellikleri iyidir. Bu nedenle döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri dövme alaşımlarından oldukça farklı olup silisyum % 5-12 oranı ile en önemli alaşım elementidir. Silisyum ötektik reaksiyon veren bir element olduğundan ilavesiyle alaşımın akıcılığı ve besleme kabiliyeti artarken, aynı zamanda malzeme mukavemeti de artar. Magnezyum elementi % 0,3-l arasında ısıl işlem uygulanabilir alaşımlara eklenir ve çökelme (Mg_2Si) ile malzeme mukavemetinin artışı sağlanır. Bakır, yüksek sıcaklık direncini arttırmak amacıyla % l-4 arasında kullanılır ve $CuAl_2$ bileşiği şeklinde çökelme fazı oluşturur. Çinko elementi de aynı şekilde yaşlanma amaçlı olarak malzemeye ilave edilir ve $MgZn_2$ çökeltisi oluşturur. Bor (B) ve titanyum (Ti) döküm alüminyum alaşımlarına tane küçültücü olarak ilave edilirken, sodyum (Na) ve stronsiyum (Sr) elementleri ötektik yapıyı modifiye edici olarak eklenir. Diğer özellikleri de kontrol amacı ile kalay (Sn) ve krom (Cr) gibi elementler kullanılabilir (Öksüz, 1996).

Bu alaşım grubunun özellikleri her ne kadar hafif bir döküm alaşımı yapısı sergiliyorsa da, özellikle otomotiv sanayisinde çok geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar. Döküm alüminyum alaşımları genellikle iki fazlıdır. Bazı bileşim özellikleri ısıl işlemle veya ergimiş metali kalıba dökmeden önce döküm yapısında bir iyileştirme işlemi vasıtasıyla düzeltilebilir.

2.2. Alüminyum Silisyum Alaşımları

Bu serinin temel alaşım elemanı silisyumdur. Al-Si alaşımlarının en önemli özelliği düşük silisyum katkılarında ergime sıcaklığının düşük olmasıdır. Bu nedenle kaynak çubukları ve sert lehim levhalar için özellikle uygundurlar. Lehim teli, mimari uygulamalar ve radyatör dilimleri başlıca kullanım yerleridir. Şekil 2.5'de Al-Si iki bileşenli faz diyagramı görülmektedir. Alüminyumda silisyumun maksimum çözünme sınırı % 1,65'dir. Ancak 4XXX serisi alaşımlarda % 2,5'e kadar silisyumlu alaşım

yapılır. Artan silisyum oranı ergime sıcaklık aralığını azaltır ve dökülebilme yeteneğini arttırır (Saldır, 2002). Yüksek silisyumlu alaşımların düşük termal genleşme katsayısı, yüksek korozyon direnci ve yüksek aşınma direnci vardır. Bu nedenle dövme motor pistonları 4032 alaşımlarından yapılır (Saldır, 2002). Diğer taraftan bu alaşımlar ısıl işlem ile sertleştirmeye elverişsizdirler (Öksüz, 1996). Önemli miktarlarda silisyum içeren alaşımlara anodik oksidasyon uygulandığında koyu gri renk alırlar, bu yüzden mimari uygulamalarda dekoratif amaçlı olarak kullanılırlar (Yılmaz, 2002).

2.2.1. Silisyum ve diğer alaşım elementlerinin alaşıma etkileri

Silisyum, alüminyum alaşımlarının esas alaşım elementidir. Akıcılık, kaynak yapabilme, ısıl işlem ve modifikasyon yapılması halinde yüksek mekanik özellikler veren alüminyum silisyum alaşımlarına ilavesi çok yaygındır. Döküm alaşımlarında silisyum miktarı maksimum % 22-24'tür. Alaşımlar toz metalurji ile üretildiğinde silisyum miktarı % 50' ye kadar çıkabilir. Alüminyum-silisyum alaşımlarının bileşimi Tablo 2.3'de verilmiştir (Mondolfo, 1979).

Tablo 2.3. Alüminyum-silisyum alaşımlarının bileşimi (Mondolfo, 1979)

Si	% 5 - 25	Mn, Cr, Co, Mo	% 3' e kadar
Cu	% 0 - 5	Ni, Be, Zr	% 3' e kadar
Fe	% 3'e kadar	Na, Sr	% 0,02'de az
Mg	% 0 - 2	P	% 0,01'den az
Zn	% 0 - 3	Al	Geri kalan

Al-Si alaşımları aşağıda belirtilen alanlarda kullanılır:

i. Elektrik motoru gövde imalatı
ii. Şalter kutuları imalatı
iii. Motor pistonları imalatı
iv. Mimari panelleri
v. Gemi ambarlarının kaplanması
vi. Deniz takımları imalatı
vii. Karıştırıcı makineler ve benzer uygulamalarında (Kocatepe, 1988).

Erimiş silisyum ve bakır alaşımın kafes parametresini küçültür. Diğer elementlerden hiçbirinin fark edilebilir etkinliği yoktur. Bileşime ve işlemlere bağlı olarak alaşımın kafes parametresi a = $4{,}045\times10^{-10}$ m. ve a = $4{,}05\times10^{-10}$ m. arasında değişir. Erimemiş silisyum ve magnezyum yoğunluğu azaltır. Erimiş silisyum ve diğer

ilave elementlerin hepsi yoğunluğu yükseltir. % 6-9 silisyumlu ve diğer elementlerin toplamı % 2'den az olan alaşım 2650-2700 kg/m^3 arasındadır. Daha yüksek silisyum (%10-13 Si) içeren alaşımın yoğunluğu 2600-2650 kg/m^3 arasındadır. % 7-12 silisyumlu alaşımın katı durumda ergime noktasındaki yoğunluğu 2560 kg/m^3, sıvı durumda 2430-2460 kg/m^3, 1400 ^{0}K'de 2290 kg/m^3 civarındadır (Mondolfo, 1979).

Isıl genleşmeyi, hafifçe yükseltmeye meyilli olan magnezyumdan başka diğer elementlerin hepsi ve silisyum azaltır. Isıl genleşme katsayısı Tablo 2.4'de gösterildiği gibi silisyum bileşimi ile kontrol edilir (Mondolfo, 1979).

Genleşme katsayısı sıfırın altındaki sıcaklıklarda bile saf alüminyumdan %10-20 daha düşüktür. Titanyum ve zirkonyum ilaveleri ile genleşme katsayısında azalma olduğu belirtilmektedir. Ancak henüz kesinlik kazanmamıştır.

Tablo 2.4. Alüminyum-silisyum alaşımları için 10^{-2} m/m/^{0}K olarak verilen ısıl genleşme katsayıları (Toplam %2'ye kadar kobalt, zirkonyum, krom, bakır, demir, magnezyum, manganez, nikel ve titanyum içeren endüstriyel alaşımlar) (Mondolfo, 1979).

Siliyum Bileşimi (% ağırlık)	Sıcaklık Aralıkları (^{0}K) 300 - 400
5	22,1 - 22,5
7 - 9	21,4 - 21,7
12	19,9 - 20,6
14	18 - 19

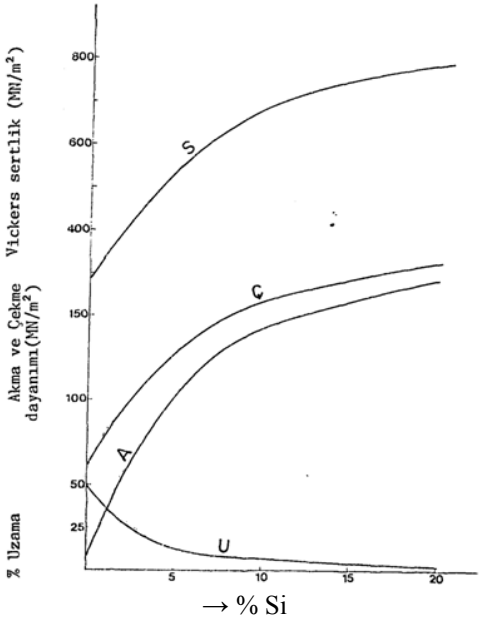
Toz metalurji ile üretilen %50'ye kadar silisyumlu alaşımlar bile daha düşük genleşme katsayısına sahiptir. Eriyik silisyumun dışında ve magnezyum ve bakırın çökelmesi sürekli genleşmeye eşlik eder (Mondolfo, 1979).

Silisyum alaşımın katılaşma çekmesini önemli ölçüde azaltır. Diğer alaşım elementlerinin çekmedeki etkisi çok azdır. Çekmedeki azalma, %6-12 silisyum bileşiminde %3-4, %20-24 silisyum bileşiminde %1-2'dir. Özgül ısı saf alüminyumdan %1-2 daha düşüktür (Mondolfo, 1979).

Al-Si alaşımların mekanik özellikleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Özellikle yüksek sıcaklıkta biraz daha yüksek dayanım gösteren alaşım tozlardan elde edilmiştir. Dövme ile şekillendirilmiş alaşımın en büyük çekme dayanımı 200-400 MN/m^2, buna mukabil olarak uzaması %20'den % 2-3' e kadar değişmektedir. Al-Si alaşımların gaz bileşimi, döküm tasarımı, soğuma hızı ve besleme gibi değişkenlerin çok hassas olması ile birlikte, zayıf döküm tekniklerinde alaşımın özelliklerini azaltabilir. Yüksek saflık ve özel işlemler ile %10-20 daha iyi mekanik özelliklere sahip alaşım elde edilebilir. Bunun yanında ikincil alaşımlar, birincil alaşımlardan daha düşük haddeleme

kabiliyetine sahiptir. Basınçlı dökümlerin mekanik özellikleri dövmedeki değerlere doğru yükselir (Mondolfo, 1979).

Yükselen silisyum miktarı haddeleme için gereken kuvveti artırır. Sodyum ile modifikasyon, özellikle kum dökümlerde dayanımı sınırlı bir şekilde artırır, fakat haddelemede önemli gelişmeler sağlar. Metal kalıba yapılan dökümlerin yüksek soğuma hızları silisyum inceltmesine rağmen modifikasyondan daha az gelişmeler sağlar. %8'den fazla silisyum içeren alaşımlarda, tane büyüklüğünün ve dendirit kolları arasındaki mesafenin mekanik özelliklere etkisi belirtilmemiştir. Daha düşük silisyum ve alüminyum dendiritlerinin hakim olduğu alaşımlarda bu etki normaldir (Mondolfo, 1979).



Şekil 2.2. Alüminyum-silisyum alaşımlarının mekaniksel özellikleri (Mondolfo, 1979)

Demir dayanımı biraz artırır, fakat manganez ve kobalt ile ıslah edilmiş ve özellikle % 0,7'den fazla ise haddelenme kabiliyetini şiddetli bir şekilde düşürür. Berilyum, manganez, krom, molibden, nikel, kobalt ve zirkonyum dayanımı biraz yükseltir. Manganez, kobalt, nikel ve molibden eğer demirin olumsuz etkisinin ortadan kaldırmak için kullanılmış ise haddelenme kabiliyetini yükseltir. Başka amaçla kullanılmış ise bunların hepsi haddelenme kabiliyetini olumsuz yönde etkiler (Kocatepe 1988).

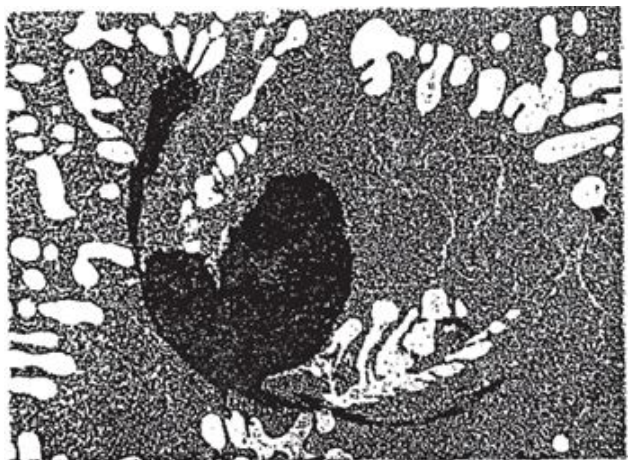
Basınç dayanımı, çekme dayanımından % 10-15 daha yüksektir. Kesme dayanımı çekme dayanımının yaklaşık % 70'i kadardır. Keskin şekli ile kırılgan silisyum fazının geniş miktarda alaşım içine dağılmasından dolayı darbe direnci

düşüktür. Darbe direnci silisyum küreleştirilmesi ile geliştirilir. Yaşlanma ile titreşim söndürme kapasitesinde azalma olduğu belirtilmektedir (Mondolfo, 1979).

Al-Si alaşımlarının akıcılığı mükemmel ve ötektik bileşimde maksimumdur. Diğer alaşım elementleri akıcılığı azaltır. Bütün Al-Si alaşımların dökülebilirliği mükemmeldir.

Al-Si alaşımların gaz emmesi saf alüminyumdan fazla farklı değildir. Kalsiyum ve sodyum, özellikle piston alaşımlarında poroziteyi artırmaya meyillidir. Ağır gazların atılması için vakum işlemi yapılabilir.

Katılaşma sırasındaki basınç özellikleri geliştirilir. Ultrasonik ve sonik titreşim; silisyum kristallerinin büyümesini engelleme, homojen yapı elde etme, gazın atılması, çekmenin azaltılması, akıcılığın artması gibi faydalı etkiye sahiptir. Diğer taraftan, ultrasonik ve sonik titreşim, özellikle modifiye edilmiş alaşımlarda silisyumu kabalaştırdığı ve birincil silisyumun segregasyonunu artırdığı belirtilmiştir (Mondolfo, 1979).



Şekil 2.3. Geniş gaz boşluğu.
% 10 Si, % 0,2 Fe'li aşırı modifiye edilmiş alaşım kum döküm. X50. Kellers ile dağlama(Mondolfo 1979)

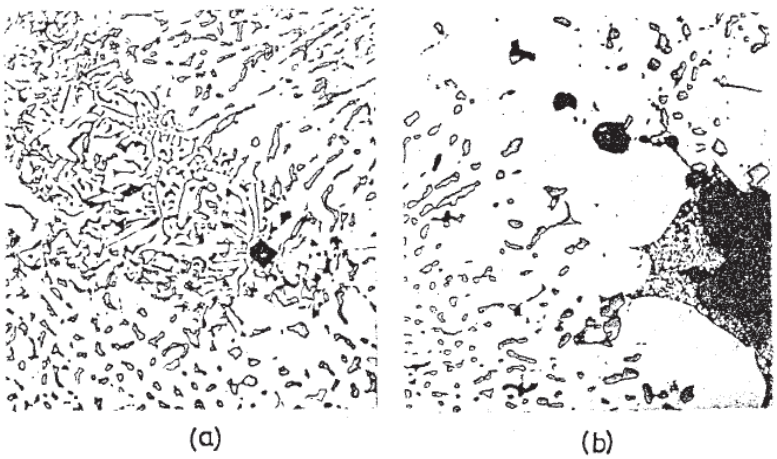
Alüminyum-silisyum alaşımlarını dökümden başka şekillendirmek zor olmasına rağmen, %13-14 Si'ye kadar olan alaşımlar levha, çubuk, tel gibi çeşitli şekillere getirilebilir. En iyi şekillendirme silisyum yapıya eşit bir şekilde dağıldığı zaman gerçekleşir.

Al-Si alaşımların dövme ile üretimi çok nadirdir. Silisyumun çok iyi bir şekilde dağıtılması gerekir. Santrifüj döküm ile elde edilen dökümler daha iyi mekanik özelliklere sahiptir.

Isıl işlem genellikle eritme işlemi ve soğutmadan meydana gelir. Enjeksiyon dökümlerin ısıl işleminde yüzeysel kabarma atmosferden kaynaklanır. Eritme işlemi

zamanı kum dökümlerde 6-12 saat, kokil ve enjeksiyon dökümlerde 2-5 saattir. Modifiye edilmiş alaşımlarda, silisyum dağılmasına ve küreleşmesine rağmen modifiye edilmiş ve ısıl işlem uygulanmış alaşımın yerini tutmaz. Eritme sıcaklıkları düşük ötektik sıcaklığı ile kontrol edilebilir. Bakırsız alaşımlar için 830 ^{0}K'nin altında, bakırlı alaşımlar için 810 ^{0}K'nin altında ergitme işlemi yapılır. Şekil 2.4' de ötektik yapı verilmiştir.

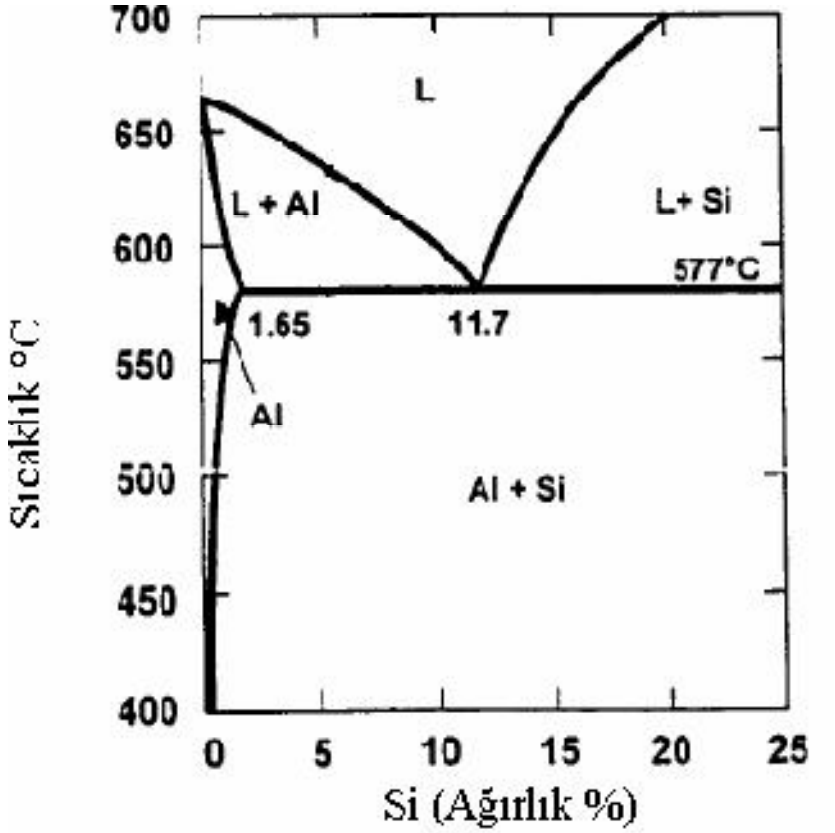
Alaşımların yüksek sıcaklığı mükemmel kaynak yapılabilme özelliğini sağlar. Yapıların kaynağında geniş bir şekilde kullanılmaz, fakat diğer alüminyum alaşımların kaynağında kullanılır. Kaynakların sıcak kırılması çok azdır. Kaynakların korozyona dayanımı çok iyidir. Al-Si alaşımları aynı malzeme ile kaynak edilmiş ve kaynaktan sonra ısıl işlem görmüş ise dayanımları maksimum olur (Mondolfo, 1979).



Şekil 2.4. Ötektik yapı resmi
a) Açık renkler, tane sınırlarında Al-Mg_2Si-Si ötektiğinin şiddetli segregasyonunu göstermektedir. b) 810 ^{0}K'nin üzerinde eritme işleminden sonra ötektik ergitilmiş ve iyi bir dağılım meydana gelmiştir.

2.2.2. Alüminyum silisyum faz diyagramı

Alüminyum ve silisyum Şekil 2.5'de görüldüğü gibi ötektik oluştururlar. Al-Si sisteminde ötektik noktanın bileşimi hakkında değişik görüşler bulunmaktadır. Bazı araştırıcılar ötektik noktanın bileşimini % 11,6 - % 11,7 civarında verirken başka bir kaynakta aynı bileşimin % 11,7 - % 14,5 arasında bulunduğu ve en muhtemel değerinin ise % 12,7 Si olduğu belirtilmektedir (Yılmaz, 1985).



Şekil 2.5. Al-Si ikili denge diyagramı (Ermiş ve ark. 2003).

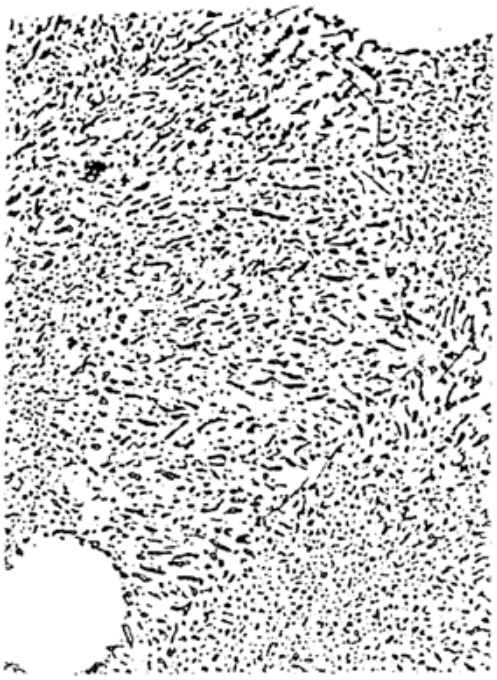
Ötektik sıcaklık genellikle 850 ^{0}K (577 ^{0}C) olarak kabul edilmiştir. Genel olarak, silisyum içeren alüminyum temelli katı eriyik fazı α, çok az alüminyum içeren silisyum temelli katı eriyik fazı da β olarak belirtilerek diyagramda gösterilmiştir. Buna rağmen denge diyagramında katı eriyikler Al ve Si olarak ta belirtilmektedir (Kocatepe 1988).

Ötektik altı alaşımın yapısı dendirit görünümünde olan birincil faz ile dendirit aralarında kümeleşmiş ötektik karışımdan oluşur. Ötektik üstü alaşımın yapısı ise, çökeltiler görünümdeki faz ile ötektik karışımdan meydana gelir (Kocatepe 1988).

Ötektik Al-Si alaşımlarında yavaş katılaşma, alüminyum matrisinde ötektik silisyumun geniş plaka şeklinde yerleştiği kaba bir mikroyapı üretir. Ötektik alaşımdaki silisyum partikülleri yaklaşık olarak birbirine paralel bir şekilde dizilmeye meyillidir. Ötektik Al-Si alaşımlarının hızlı soğuması ötektik sıcaklıkta ani düşme meydana getirtir ve sonuçta ötektik yapıda genel bir incelme görülür. Silisyum partiküllerinin şekli yavaş soğuyan alaşımlardaki şekil ile aynı, fakat daha küçük ölçülerdedir. Ötektik bileşime yakın alaşımın yapısı silisyum bileşiminden çok soğuma hızına bağlıdır. Hızlı soğuma birincil alüminyum oluşmasına yardımcı olur (Yılmaz, 1985).

2.2.3. Alüminyum silisyum alaşımlarında oluşan ötektik ve bileşikler

Alaşımda bakırın olmaması, demirin genellikle Al-$FeSiAl_5$-Si ötektiğini oluşturmasına sebep olur ve ince silisyum fazını dağıtır. Eğer % 0,8'den fazla demir varsa, demir birincil $FeSiAl_5$ kristalleri şeklinde (Şekil 2.6) görünür. Hızlı soğuma $FeSiAl_5$ kristalini (Şekil 2.7) dağıtır ve ötektiği yüksek demir bileşimine doğru kaydırır. Alaşım düşük silisyum veya magnezyum, bakır, çinko içermesi halinde, demir Çin harflerine benzeyen Fe_2SiAl_5 bileşiğini oluşturur. Alaşımda bakır bulunduğu zaman, demir bakırla muhtemelen Cu_2FeAl gibi birleşebilir. Magnezyum bulunması bileşiğin $FeMg_3Si_6Al_8$ şeklinde olmasına neden olur. Magnezyum bileşiği, ötektikte ve birincil kristal durumunda açık mavi renkte, Çin harfleri gibi görünür. Manganezli demir $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$ durumundadır. Böylece $FeSiAl_5$ için kırılma etkisi ortadan kalkar. Bununla birlikte, toplam manganez ve ayrıca demir %0,8'den fazla olursa $(FeMn)_3Si_2Al_{15}$ kristalleri birincildir ve kübik şekilde olmasına rağmen hegzagonal kümeleri gibi görünür. Bu kümeler alaşımı kırılgan yapmaz, fakat işlenebilirliği azaltır. Bu sebepten manganez, demirin birincil kristal oluşturmasını önlemek amacıyla ilave edilir. Krom ve nikel bile demirin olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için kullanılmıştır (Kocatepe 1988).



Şekil 2.6. %12 Si ve %0.3 Fe'li modifiye edilmemiş alaşım. Kum döküm X250 (Mondolfo, 1979)



Şekil 2.7. %10 Si ve %0.09 Fe'li alaşım. Kum döküm. (Mondolfo, 1979)

2.3. Modifikasyon

Al-Si alaşımlarına az oranda alkali metallerin (Na, K, Sr gibi) ilavesi yapı ve dağılımları önemli ölçüde etkilemektedir. İlaveler nedeniyle yapıda görülen bu değişimlere modifikasyon denir ve malzemenin mekanik özellikleri iyileşir. Hızlı katılaştırılan dökümlerde (kokil döküm) elde edilen yapıya da modifiye yapı denir. Türü ne olursa olsun modifikasyon yapısı liflidir ve modifikasyon olup olmaması yapının tümünün lifli olup olmaması ile eşanlamlıdır (Yılmaz, 1985).

Ötektik çekirdeklenme büyük ölçüde değişimler gösterir ve büyüme dinamikleri modifiye edici olarak eklenen elementlerin miktarı ve tipinin fonksiyonu olarak Al-Si alaşımlarında değişiklikler meydana gelir (Dahle ve ark., 2005).

Ötektik modifikasyon doğası gereği kırılgan ötektik silisyum fazlarının yapısının incelmesini ilerleterek, mekanik özellikleri, özellikle kopma uzamasını geliştirmek için öncelikle alüminyum silisyum dökümhane alaşımlarında uygulanmış yaygın bir işlemdir. Bilindiği gibi stronsiyumun eser miktarda eklemeleri (milyonda birkaç yüz parça) alüminyum silisyum ötektik altı alaşımlarının silisyum morfolojisinde kaba bir plaka yapıdan iyi inceltilmiş lifli yapıya ötektik bir dönüşümle sonuçlanır (Lu ve Hellawell, 1987). Aynı zamanda milyonda birkaç bin yüksek konsantrasyonda da olsa antimuan eklemeleri ötektik silisyum fazının dönüşümüne sebeptir. Ancak sonuç dönüştürülmüş lifli bir morfolojiden inceltilmiş kaba plakalarda daha tesirli değildir. Sodyum ve bazı nadir toprak elementlerini de içeren diğer elementlerin modifikasyona farklı derecelerde sebep olduğu bilinir (Nogita ve ark., 2004).

Modifikasyon ile silisyum morfolojisindeki değişimin evrensel bir istek olduğu bilinir. Ne yazık ki, modifikasyonun olumsuz yan etkileri ile ilgili porozite, sıcak yırtılma ve kötü yüzey gibi sonuçları olmuştur ve her zaman tavsiye edilmez. Modifiye edilmiş ve edilmemiş alaşımlarda mikroskobik ölçeklerin her ikisinde de döküm yapılarının gelişimi karşılaştırılmıştır. Çekirdeklenme ve büyüme arasındaki karşılıklı ilişki gösterilmiştir (Dahle ve ark., 2005).

Mevcut araştırmalardan Al-Si alaşımlarında (silisyum morfoloji değişimi) ötektik modifikasyonun temel mekanizması hala tam olarak anlaşılamamıştır sonucuna varılmıştır. Modifiyeli ve modifiyesiz alaşımlar arasında ötektik çekirdeklenmeler de belirgin farklılıklar vardır ve bu faklılıklar soğuma eğrileri, EBSD ve mikro ve makroskobik incelemelerle yansıtılır. Kullanılan alaşımlarda modifiyesiz alaşıma göre Sr ve Sb bireysel eklemelerden sonra çekirdeklenme zorluklarının arttığı fark edilmiştir.

Bu Sb modifiyeli alaşımlarda orta ve Sr modifiyeli alaşımlarda geniş olan ötektik taneler ile ötektik tane boyutlarını yansıtmıştır. Çekirdeklenme şekillerindeki farklılıkların modifikasyon ile ilişkili genel komplikasyonların çoğu için sebep olma ihtimali vardır. AlP alaşımı modifiye edilmemiş alaşımlarda ötektik Si için ortak bir çekirdektir, ancak modifiye alaşımlardan daha az aktif olarak görülmektedir. Bu geçiş için mekanizma belli değildir ama modifikasyon süreci ile başlayan intermetalik fosforun temizlenmesi ile ilgili olabilir. Ötektik tane boyutu ve silisyum morfolojisi bağlantılı olsalar da bunlar tamamen bağımlı değildir (Dahle ve ark., 2005).

Ötektik damlacıkların çekirdekleşme hızları Sr'un soğumayı artırdığını göstermiştir. Bu Sr'un AlP fazından etkilenmesinden olabilir (Zarif ve ark. 2010).

Ötektik altı Al-Si alaşımlarında titanyum borür eklenmesinin birincil alüminyumu incelttiği ve Sr eklenmesinin ötektik silisyumu modifiye ettiği çok iyi bilinir. Sr modifiyeli örneklerde ötektik silisyum partküllerinin sayısı Sr+Ti inceletme örnekleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek seviyede olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Ti'un ötektil silisyum partiküllerinin boyutunu biraz etkilediği tespit edilmiştir (Faraji ve Katgerman, 2009).

Sadece Sr eklenmesi Al- Si ötektiğini değil hatta morfolojik etkisini ve α- Al dentritlerinin yapısını da değiştirir. Sr α- Al dentritlerinin ve Al-Si ötektiklerinin büyüme sıcaklıklarını düşürür ve hatta dentritlerin büyüme mekanizmasını da etkiler. Daha fazla soğutma oranıyla önemli ölçüde etkilerin olduğu bulunmuştur (Zhongwei ve Ruijie 2010).

İkincil β fazının orta dereceli inceltilmesi Ti ve Sr' un eş zamanlı olarak eklenmesinden sonra elde edilebilir. (Sua´rez-Pen˜a ve Lozano, 2006).

Son zamanlardaki yayınlara göre, Na ve Sr un birlikte eklenmelerinin sinerjik etkileri veya zararlı etkileşimleri olup olmadığı hala belirsizdir.

Na ve Sr un birlikte eklenmesinde eklemeden kısa bir süre sonra bile ötektik mikroyapının modifikasyonunun iyileştirilmesinde bir sebep olmadığı görülmüştür. Na ilavesi modifiye edicilerin hızlı bir şekilde azalmasına yol açan eritme boyunca modifikasyon etkisinde hızlı bir kayba sebep olarak Sr'un buharlaşması ve kinetik oksidasyonu olduğu katkısında bulunulabilir. Soğutma boyunca ötektik katılaşma sırasında Na ile modifiye edilmiş eriyik içine Sr'un ilavesi ötektik katılaşma davranışını değiştirmemektedir. Na'un etkisi ötektik katılaşmada hakimdir ve ötektik ısıl gradyentine önemli ölçüde bağımlı olarak gelişme göstermiştir. Na ve Sr'un birlikte

eklenmeleri porozite ve döküm kusurları üzerinde yararlı etki ortaya koymuştur (Lua ve ark., 2005).

2.3.1. Modifikasyon metodları

2.3.1.1. Element ilavesi ile modifikasyon

Frilley ve Pacz modifiye alaşımları ürettikten sonra birçok araştırmacı, çeşitli elementlerin, Al-Si alaşımlarının modifikasyonu üzerindeki etkisini belirlemek için çalıştılar. En başarılı çalışmaları Kim-Heine, Davami-Ghafelehbashi ve Thicle-Dunkhel tarafından yapıldığı belirtilmiştir (Mondolfo 1979).

Alüminyum-silisyum alaşımlarını modifiye etmek için Na, Sr, K, Rb, Cs, Li, Ca, Ba, Mg, La, P, Bi, Cd, Mn, Ni, Pb vs. kullanılmıştır. Endüstriyel uygulamalarda yalnız sodyum ve stronsiyumun düşük yoğunlukta güçlü etkileri vardır (Sigworth 1983, Kanani 1984). Potasyum, lityum ve sezyum kabul edilebilir yoğunlukta yetersiz modifikasyon üretirler. Lantanlar ve rubidyum çabucak etkisiz hale gelir ve pahalıdırlar. Kalsiyum ve baryum oksidasyonla eriyikteki kayıpları yükseltirler, akıcılığı artırmalarına rağmen gaz boşluğu meydana getirmeye meyillidirler (Sigworth 1983). Modifiye etkisi daha uzun olan kalsiyum, sodyum gibi fosforu nötralize, fakat ötektik silisyumu modifiye etkisi çok sınırlıdır. Magnezyum, fosforu nötralize etkisine sahip olmasına rağmen silisyumu fark edilebilir şekilde modifiye etmez. Mg_2 Si oluşur ve yaşlandırma sertleşmesinde etkilidir (Mondolfo 1979). Fosfor, sülfür, çinko, bizmut, indiyum ve kurşun ötektik altı Al-Si alaşımlarında modifiye meydana getirmezler, ötektikte modifikasyonu sağlamazlar. Fosfor ötektik üstü Al-Si alaşımlarında birincil silisyumu inceltmek için ilave edilir. Potasyum tuzları ile de ötektik alaşım modifiye edilmektedir (Fang ve Ji 1987).

Arsenik, antimon, selen ve kadmiyum ötektikte kaba silisyumdan biraz daha ince silisyum lamelleri üretirler. Antimon AlP'a benzer şekilde silisyumun hidrojen çekirdekleşmesinde rol oynama etkisine sahiptir. Antimon Avrupa'da oldukça geniş endüstriyel uygulamalarda kullanılmıştır. Şu anda ise daha az kullanılmaktadır. Antimon ile modifiye edilmiş hurda alaşımın yeniden antimon içermesi zordur. Antimonun hidrojenle birleşerek zehirli bir duruma geldiği belirtilmektedir (Sigworth 1983).

Silisyumu çekirdekleyen ve birincil silisyum kristalini dağıtan elementler; arsenik, sülfür, selenyum, telleryum ve galyumdur. İlave edilen telleryum, kurşun, kalay, iyot, gümüş ve çinkonun birincil silisyumu dağıttığı iddiaları vardır, fakat ispatı yetersizdir. Berilyum, seryum, kobalt, bakır, demir, civa, molibden, talyum, toryum, uranyum ve tungstenin etkileri çok azdır veya hiç yoktur. Bor ve titanyum alüminyum tanelerini inceltir, fakat silisyumu fark edilebilir derecede inceltmez. Yabancı maddelerin uzaklaştırılmasında kullanılan argon, klor, hidrojen ve nitrojen ergiyikte hareket halinde bulunduğu zaman birincil silisyumun dahil olduğu kaba tanelerin oluşumunu engellemede genel bir etkiye sahiptir (Mondolfo 1979).

Alüminyum-silisyum alaşımlarında en etkili modifikasyonu Na ve Sr yapmaktadır (Sigworth 1983). Stronsiyumla modifiye edilen alaşımların yüzde uzama değeri, sodyum ile modifiye edilen alaşımın yüzde uzama değerinden yüksektir (Hurley ve Atkinson 1985). Karmaşık alaşımlarda en etkili modifikasyonu sodyum yapmaktadır (Kanani 1984).

2.3.1.2. Çil ile modifikasyon

Yüksek soğuma hızlarının ötektik bileşimi ve sıcaklığı değiştirdiği açıktır. Ötektik denge sıcaklığı hızlı soğumalarda 10-20 ^{0}C daha düşüktür. Aynı zamanda ötektik bileşim daha yüksek %Si 'lere kayar ve mikroyapı da değişir. Sonuç olarak, hızlı soğutmada Al-Si alaşımının ötektik bileşimi (% 12,5 Si), ötektik altı gibi hareket eder (Kanani 1984, Petty 1970).

Birincil alüminyum yüzey merkezli kübik kristale sahiptir ve [100] yönünde dendiritik büyür. Karmaşık alaşımların mikroyapısında silisyum partiküllerinin hemen hemen görünmesi hızlı soğuma sonucudur. Aynı ingotta birincil alüminyum ile birincil silisyumun bir arada olması şaşırtıcı değildir. Birincil silisyum kristalleri [111] düzlemindedir (Kanani 1984).

Hızlı soğuyan alaşımlarda ötektik silisyum çok yönlü ikizleri oluşturur. Çok yönlü ikizlerin oluşması arzu edilen mekanik özellikleri meydana getirir. Oysa daha yavaş soğuyan Al-Si alaşımlarının ötektik veya ötektiğe yakın bileşimler gevrek, kırılmaya karşı yüksek hassaslıktadır. Hızlı soğuyan alaşımların kırılma moduna karşı hassas olmadığı açıktır. Ayrıca, soğuma hızlarının yükseltilmesi sonucunda silisyum fazı aralıkları azalır ve sonuç olarak çekme dayanımı ve süneklik daha yüksek olur (Kanani 1984).

2.3.1.3. Vibrasyon ile modifikasyon

Ötektik veya ötektiğe yakın Al-Si alaşımların modifikasyonunu sağlamak için kullanılan bir diğer teknik de, katılaşma sırasında sonik vibrasyon uygulamasıdır (Kanani 1984).

Vibrasyon, difüzyonun yükselmesine neden olur ve kalın Si partiküllerini kırarak dağıtır. Vibrasyon şiddetinin yükseltilmesi ile Si partikülleri daha kısa ve ince duruma gelir. Aynı zamanda polihedral Si kristalleri görülmez (Kanani 1984).

Vibrasyon şiddetinin yükseltilmesi ingotlarda tane inceltilmesine neden olur. Araştırmacılar, vibrasyon ile mekanik özelliklerdeki faydalı gelişmelerin yalnız işlem görmemiş Al-Si alaşımlarında olabileceğini belirtmişlerdir. İlaveler ile modifiye edilmiş alaşımlarda bu etkiler henüz gözlenmemiştir. Vibrasyon şiddetinin aşırı derece yükseltilmesi mekanik özelliklerin bozulmasına, kaba silisyum kristalinin meydana gelmesine neden olur (Kanani 1984).

2.3.1.4. Yüksek basınç altında modifikasyon

Al-Si alaşımlarının modifiyesine bir yaklaşımda, ergiyiğin yüksek basınç altında katılaştırılmasıdır. Bu dövme döküm tekniğidir. Yayınlanan bilgilere göre, Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerinde, ergiyik katılaşırken üzerine yüksek basınç uygulanması ile önemli gelişmeler sağlanabilir. Bu metod ile imal edilen döküm parçaların; yapısal homojenlik, döküm hatalarının olmaması, tane inceliği ve yüksek ölçü tamlığı gibi üstünlükleri vardır. Bu teknikte, sıvı metal basınç uygulaması yönünde dikey olarak akar. Gaz, kalıp ile katılaşan metal arasından tamamen dışarı atılır. Dökümün katılaşması ilerledikçe daha fazla basınca ihtiyaç vardır ve kalan sıvı çekme boşluklarının olduğu bölgelere güçlü bir şekilde akar. Dövme döküm tekniği parçaları mümkün olduğu kadar yüksek yoğunlukta ve gözeneksiz yapar (Kanani 1984).

Eğer yeterli derecede yüksek basınç uygulanırsa, soğuma ile çeken metalin ergime noktası yükselir. Katılaşma ile alüminyumun hacmi % 6 civarında azalır, silisyumun hacmi ise % 8 civarında yükselir. Katılaşmada son durum göz önünde tutulacak olursa, basınç uygulaması alüminyumun ergime noktasını yükseltir, silisyumunkini düşürür. Ötektik sıcaklık, atmosferik basınçta 577 ^{o}C iken 28 kbar'da 660 ^{o}C 'ye yükselir. Silisyumun alüminyum içinde eriyebilirliği basıncın artması ile

yükselir. Ötektik sıcaklıkta silisyumun alüminyum içinde eriyebilirliği atmosferik basınçta sadece % 1,6 'dır. Eriyebilirlik 25 kbar basınç altında % 3,5 silisyuma, 50 kbar basınç altında % 7 silisyuma yükselir (Kanani 1984).

2 kbar basınç altında üretilen dökümler, silisyum bileşimi ne olursa olsun, hemen hemen hatasızdır. Katılaşma için zamanın azalması difüzyon prosesini sınırlandırır. Basıncın artırılması ile alaşımın çekme dayanımının artması mikroyapıdaki çokgen durumundaki (poligonal) silisyum kristalinin görüntüsü ile açıklanmıştır. 3 kbar basınç altında katılaştırılan ve % 12 Si içeren Al-Si ingotlarının çekme dayanımının değeri, atmosferik basınç altında katılaştırılan aynı bileşimdeki alaşımın çekme dayanımı değerinden % 40 daha yüksektir. Alaşımın mekanik dayanımlarındaki artış ötektiğin inceltilmesinden kaynaklanmaktadır (Kanani 1984).

2.3.1.5. Al-Si alaşımlarında ısıl işlem ile küreleştirme

Modifiye edilmemiş Al-Si alaşımlarında ötektik silisyum fazı kaba yapı ile birlikte küreleştirilebilir. Isıl işlem ile küreleştirilme iki safhadan meydana gelir;

i. Ötektik silisyumun bölünmesi,
ii. Bölünmüş silisyumun küreleştirilmesi.

Genellikle parçalanarak bölünme safhası bütün proses boyunca aktif bir rol oynar ve zaman açısından büyük etkiye sahiptir. Silisyum fazı kollarında bölünmeler meydana gelir ve ince parçalar oluşur. Bölünme köşelerden başlar ve adım adım ilerler. Sodyum ile modifiye dilmiş Al-Si alaşımında ötektik silisyum ısıl işlem ile çok daha hızlı küreleşir (Zhu ve ark. 1985).

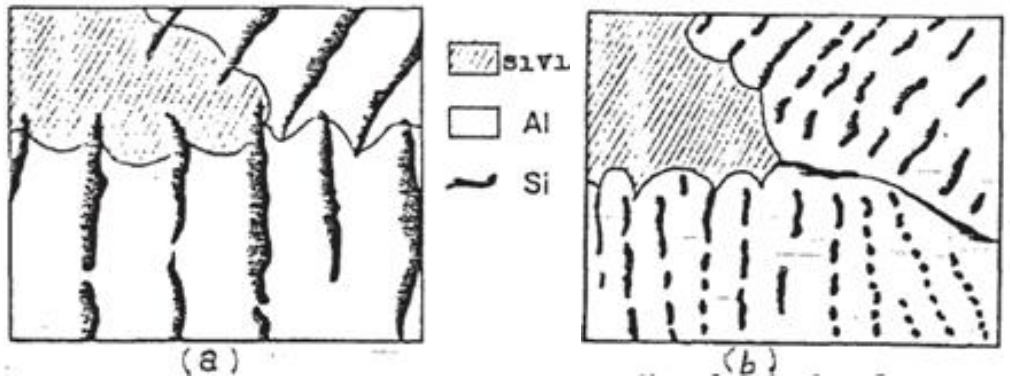
2.3.2. Stronsiyum ile modifikasyon

Modifiye edilmiş Al-Si alaşımlarının yapısı kararsızdır ve eski haline dönmeye meyillidir. Eski haline dönen alaşımın modifiyesi bozulur. Stronsiyumun ergiyiğe ilave edilmesi ile sıvının dökülmesi arasında geçen zaman bekletme zamanıdır (Kanani 1984).

Sr ile modifiye edilen alaşımlar Na ile modifiye edilen alaşımlardan daha fazla dökülebilirlik özelliğine sahiptir. Alker, Hielscher ve Gobrecht bu ayrıcalığın, sodyumla modifiye edilen sıvının üzerinde kalın oksit tabakasından ileri geldiğini iddia etmektedirler (Sigworth 1983).

Modifiye edilmiş ve edilmemiş alaşımların katılaşmasında temel farklılıklar vardır. Bu farklılıklar ötektik silisyumun büyüme modundan kaynaklanır (Crosley ve Mondolfo 1966). Kum dökümlerdeki soğutma hızlarında modifiye edilmemiş alaşımın ötektik yapısı normal olarak façetalı-façetasız tipinde katılaşır ve silisyum levhalar şeklinde yapıya yerleşir. Modifiye ile büyüme modu değişerek silisyum levhasal yapıdan çubuk yapıya dönüşür (Kocatepe 1988).

Modifiye edilmemiş alaşımlarda ötektik silisyum önce alüminyum tarafından çekirdeklendirilir. Silisyum dallantı şeklinde sürekli olarak ara yüzeyden alüminyumun önünden sıvıya doğru ilerler. Her iki fazda kristalleşen ötektik yönünde baştanbaşa sıvı ile temas halinde kalırlar. Büyüme, denge sıcaklığında mümkündür. Modifiye edilmiş alaşımlarda, silisyum alüminyum tarafından aynı şekilde çekirdeklendirilir. Fakat silisyum alüminyumun önünde büyümez. Alüminyum fazı kristalleşmeyi önden tayin eder ve sıvı silisyumun etrafında büyür (Şekil 2.8). Silisyumun katılaşması için alüminyum tarafından sürekli çekirdeklenmesi gerekir. Bu yeniden çekirdeklenme için sıvının silisyumca aşırı doymuş olması sıcaklığın tekrar yükselmesini engeller ve alüminyum tarafından silisyumun çekirdeklendiği sıcaklıkta ötektik katılaşma meydana gelir (Crosley ve Mondolfo 1966).

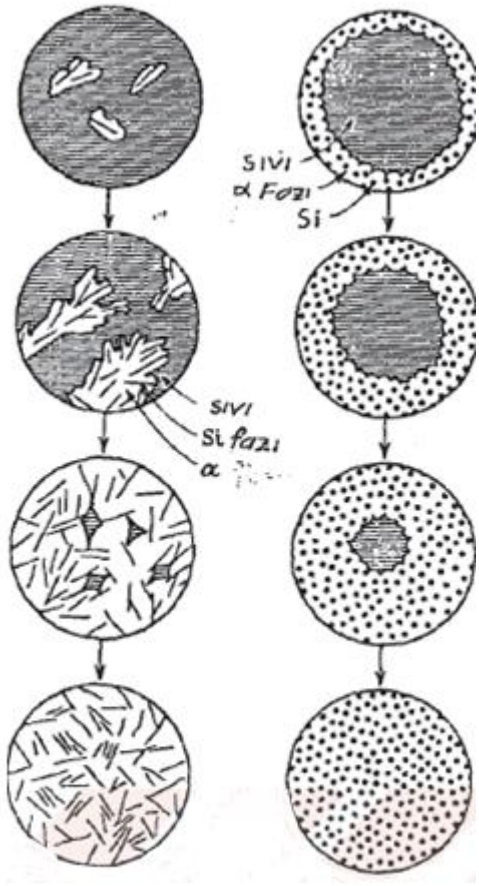


Şekil 2.8. Al-Si ötektik alaşımının şematik olarak katılaşması;
a) Modifiye edilmemiş. Silisyumun önde gittiği kristalleşme. Silisyum kristalleri tane sınırlarına kadar uzanır. b) Modifiye edilmiş. Alüminyumun önde gittiği kristalleşme (Crosley ve Mondolfo, 1966).

Ötektik kristalleşmeyi yönlendiren dal şeklindeki faz, modifikayon prosesinin en önemli noktasıdır ve deneysel ispatı çok açıktır. Alüminyum fazı içinden geçen silisyum partiküllerinin sürekliliği, silisyum plakalarının iki farklı yönden gelerek katılaşan bölge sınırına tam nüfuzu, büyüyen silisyum plakalarının etrafında alüminyumca zengin sıvının olması, ötektik silisyumun dallantı şeklinde olması, modifiye edilmemiş alaşımda silisyumun büyümeyi yönlendirdiği ispatlardan bazılarıdır. Modifiye edilmiş

alaşımda ise, iki farklı yönden gelen Si fazı katılaşma bölge sınırına ulaşmaz. Sıvıda fazla silisyumdan dolayı bazen iki katılaşma bölge sınırında ince Si fazı oluşur. Silisyum parçalandığı zaman küremsi şekilde görünür (Kocatepe 1988).

Bir başka kaynak; bu katılaşma şeklini, modifiye edilmemiş alaşımlarda içten dışa (exogenously) doğru katılaşma, modifiye edilmiş alaşımlarda ise dıştan içe (endogenously) doğru katılaşma olduğunu belirtmiştir. Şekil 2.9'da katılaşma durumları görülmektedir (Kocatepe 1988).



Şekil 2.9. Normal ve modifiye edilmiş Al-Si alaşımlarında katılaşma modu (Heine ve ark., 1955).

Modifikasyondan dolayı silisyum dallarının kırılması süreklidir. Bu, dayanımda ve uzamada büyük gelişmeler meydana getirir. Modifiye edilmemiş alaşımlarda silisyum, parlak koyu gri renkte, kırılgan ve façetalıdır. Modifiye edilmiş alaşımlarda ise daha parlaktır. Modifiye edilmemiş durumlarda kırılma sürekli olarak kırılgan fazı takip eder. Modifiye edilmemiş durumlarda ise kırılgan faz süreksizdir ve kırılma Al fazının içinden geçerek ilerler (Kocatepe 1988).

Modifiye edilmemiş bölgelerde, Çin yazısı durumundaki α(AlFeSi) ve modifiye edilmiş gölgelerde, iğne ucu şeklinde β(AlFeSi) fazı katılaşma farklılığından dolayı

meydana gelirler. Modifiye edilmiş alaşımlarda, birincil alüminyum katılaştıktan sonra, birincil alüminyumun önündeki sıvı demir ile aşırı doyuncaya ve AlFeSi bileşik formu oluşuncaya dek ikili Al-Si ötektiği katılaşmaya başlar. Modifiye edilmemiş alaşımlarda ötektik kristalleşemeye silisyum rehberlik eder. Modifiye edilmemiş ötektiğin önündeki sıvı silisyumu tüketir. α(AlFeSi) faz, daha fazla demir ve alüminyuma sahiptir. Modifiye edilmiş bölgelerde ikili ötektik kristalleşmeye alüminyum rehberlik eder ve sıvı silisyumca daha zengindir. Böylece β(AlFeSi) oluşur (Kocatepe 1988).

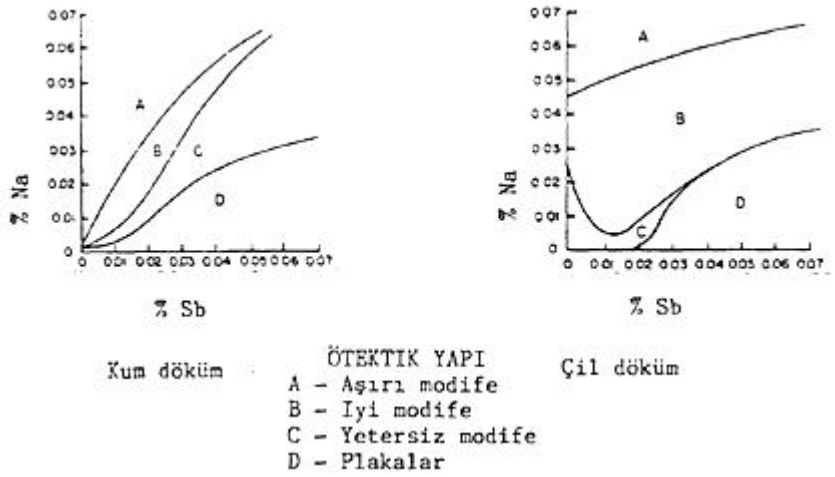
Sıvı içinde silisyumun difüzyon oranının azalması, alüminyumdan daha çok silisyumun büyüme hızının azalmasında rol oynar. Bu sebeple, sodyum ötektik kristalleşmenin yönlendirilmesindeki değişikliği meydana getirir (Kocatepe 1988).

Büyüme modunun ikiz kristal şeklinde olması diğer bir sebep olabilir. Silisyum, germanyum gibi ikiz mekanizması ile büyür.

Fosfor ve modifiyeler (sodyum ve stronsiyum) arasındaki istenmeyen etkileşimler (interaction) eskiden çok önemliydi. Endüstriyel alaşımlardaki etkileşme son zamanlarda tamamen kontrol altına alınmıştır.

Al-Si alaşımlarında bulunan fosfor, AlP bileşiğini oluşturarak silisyumu çekirdeklendirir. Fosfor içeren alaşıma sodyum ilavesi, $3\mathrm{Na} + \mathrm{AlP} \rightarrow \mathrm{Na_3P} + \mathrm{Al}$ reaksiyonu ile fosforun çekirdeklenme etkisini nötralize eder. Fosforu mümkün olan en düşük seviyede tutmak gerekir. Ötektik üstü alaşımların hurdaları esaslara uygun olmalıdır. Aynı zamanda refrakter bağlayıcı fosfattan kaçınılmalıdır. Yeniden kullanılan hurdalar dikkatli bir şekilde analiz edilmeli, en fazla 80-100 ppm fosfora sahip olmalıdır. Aşırı miktardaki fosfor daha fazla modifiyeye ihtiyaç gösterir ve bu da aşırı modifikasyona neden olur (Kocatepe 1988).

Antimon, kimyasal açıdan fosfora benzediğinden hem sodyumun hem de stronsiyumun modifiye etkisine zararlıdır. Sodyum ve antimon arasındaki etkileşme Şekil 2.10’ da gösterilmiştir (Kocatepe 1988).



Şekil 2.10. %13 Si içeren alaşımda sodyum ve antimon arasındaki etkileşme. (Sigworth 1983)

Modifikasyon için sodyum ve stronsiyum birlikte kullanılabilir. Sodyum ve stronsiyum birbirinden etkilenmez ve biri, diğerinin randımanını düşürmez. Bunun yanında Brunhuber, aktif bir rolü olan sodyumun genellikle stronsiyumun bekleme zamanını azalttığını ve etkili şekilde modifiyeyi başlattığını belirtmiştir (Sigworth 1983).

Modifikasyonla ilgili problemlerden biri de modifiye elementlerinin gaz problemlerinin gaz porozitelerini yükseltme eğilimleridir. Modifikasyonla ilgili fiziksel özelliklerdeki gelişmeler poroziteler tarafından kolayca elimine edilebilir (Hurley ve Atkinson 1985).

Sodyum ve stronsiyum modifikasyonları ile ortaya çıkan porozite hakkında çeşitli görüşler vardır. Meyer'e göre; stronsiyum mikro ve makro porozitenin dağılımını sağlamaktadır. Sodyum ise daha fazla miktarda geniş poroziteye neden olmaktadır. Traenkner, doğrudan delil göstermeksizin hem sodyumun hem de stronsiyumun kum dökümlerde gazlılık ortaya çıkardığını ve kumun nemliliği düşük tutulduğu zaman gazlılığın elimine edildiğini belirtmektedir. Fommei, modifiye alaşımın kum dökümlerinde poroziteyi gözlemiş ve modifiyelerin miktarını azaltarak problemi çözmüştür. Örnek olarak, % 13 silisyumlu alaşımda AlSiNa ince plakaların oluşması ve poroziteyi engellemek için sodyum en fazla % 0,02 olması gerektiğini kesin olarak belirtmiştir. Jakob, sodyum miktarının arttırılması ve % 7,2 silisyumlu alüminyum alaşımlarında katılaşma hızının azaltılması ile kum dökümlerde küresel gözeneklerin oluşacağını, aynı modifiye alaşımın çil dökümlerinde çok az porozite meydana geldiğini belirtmektedir (Kocatepe 1988).

Modifiye etkisinin ergiyik alaşımın gaz emmesini yükselttiği açıktır. Modifiye olmadığı durumlarda gaz seviyesi 746 ^{0}C' tan 793 ^{0}C' a kadar önemli ölçüde değişmez. Sodyum ile modifiyede 746 ^{0}C'ın üzerinde stronsiyumdaki gibi şiddetli olmasa da gaz absorbesini biraz yükselttiği gözlenmiştir (Kocatepe 1988).

Çapı 1 cm'den az olmak şartıyla klor içeren gazların hidrojeni uzaklaştırdığı gibi kuru oksijen, nitrojen ve argon 'da hidrojeni uzaklaştırmada etkilidir (Kocatepe 1988).

Katılaşma çekmesinin beslenmesinde, özellikle düşük katılaşma hızlarında porozite etkili bir faktördür. Geniş dendiritler sıvı metalin beslenmesini engellemeye çalışacaktır (Kocatepe 1988).

Modifiye edilmiş kum dökümlerde porozite hakkında varılan sonuçlar, yavaş soğuyan alaşımda olması beklenen kaba tane yapı ile ilgili de olabilir. Bu yüzden, problemi çözmek için tane inceltici ilaveler bile kullanılmıştır. Lu ve arkadaşları, modifiye edilmiş A356 alaşımda tane inceltici ilavelerin etkisi üzerinde çalıştılar. Sertlik, uzama ve çekme dayanımını geliştirdiler. Bir diğer çalışmada, master alaşımlarına titanyum-bor ilavelerinde, % 0.02 titanyum miktarıyla dökümlerin yoğunluğunu 0.02-0.04 gr/cm^3 yükselttiği bulunmuştur. Gobrecht'de master alaşımlarına titanyum bor ilavesinde, % 0.05-0.15 titanyum miktarının % 7 silisyumlu alaşımda bulunan magnezyumun modifikasyonda etkili olmadığını belirtmiş, porozite ile yoğunluk hakkında bilgi verilmemiştir. Gunther ve Jurgens'de modifiye edilmiş alaşımlarda tane incelticilerin kullanılmasını belirtmektedirler. Fakat alaşım hem demiri, hem de titanyumu yüksek miktarda içerdiğinde metaller arası Fe-Ti fazı meydana geldiği gözlenmiştir (Kocatepe 1988).

2.4. Bifilm Teorisi

Al alaşım dökümlerinde bifilm şeklindeki kusurlar mekanik özellikleri etkiler. Etkilerini değerlendirmek için, azaltılmış basınç test numunesinin mikro yapı oluşumundan bir örnek belirlenerek bifilm kusurlarının sayısı ve ölçüm uzunlukları ve metal kalitesinin yeni bir ölçümü hedeflenmiştir (Dışpınar ve Campbell, 2011).

Son yıllarda, alüminyum alaşım dökümlerinin mekanik özelliklerinin güvenirliliğinde, dolum sistemlerinin tasarımında küçük bir çalışmayla önemli bir artış olabileceği gösterilmiştir (Dai ve ark., 2003 ve Runyoro ve ark., 1992). İndirgeme mekanizması yüzey oksit filminin sürüklenmesini kapsar. Eğer yüzey filmi buharlaşma esnasında sürüklenirse, metal bükülür ve karşılıklı olarak çarpışır, yüzey filminin kuru

yüzeyleri temas eder, oluşan karşılıklı seramik yüzler yapışmayan bir ara yüzey sağlar. Onların merkezindeki yapışmayan ara yüzeyli çift filmler sıvı metalde askıda kalan çatlaklar hareket edecek şekilde batar (Dışpınar ve Campbell, 2011).

Metalde bifilm çatlaklarının varlığı sayısız sonuçlara sahiptir: yapışmayan ara yüzey içeriye doğru gazın difüzyonuyla açılabilir, böylece gaz porozitesi başlatılır. Alternatif olarak, büzülme porozitesi veya sıcak yırtılma başlatmak için büzülme gerilmeleri çekilebilir. Katılaştırılmış dökümde mekanik özellikleri, özellikle süneklik ve yorulma özelliklerini, büyük ölçüde azaltmak için hareket ederler (Dışpınar ve Campbell, 2011). Çünkü bifilmler kolayca görülemezler, bazen birkaç on nanometrelerden daha incedir, geniş alanların aksine, bazen milimetre yada santimetre olarak ölçülür, onların varlığından genellikle şüphelenilmemiştir. Azaltılmış basınç testi ile açıldığı zaman kolay bir şekilde görülmesine rağmen varlıklarının farkında olmamak eksikliktir. Al döküm endüstrisinde bu test yaygın bir şekilde kullanılır. Test, parçalı vakum altında eriyiğin küçük örneklerinin katılaştırmasının içerir (100 mbar).

Test, genel olarak vakum altında katılaşan numunenin yoğunluğunun ölçülmesi ve bunun hidrojen seviyesi ile ilişkilendirilmesi sonrasında sıvı metalin hidrojen içeriğini verecek şekilde yorumlandırılmaktadır. Fakat açıkça görüldüğü gibi, bifilm içermeyen dökümlerde hidrojenin homojen veya heterojen olarak poroziteyi çekirdekleştirebilmesi imkansızdır. Bundan dolayı bifilmler daha çok önemlidir, eğer önemsiz olsa, hidrojenden daha az merkezi kalite konusu olur (Dışpınar ve Campbell, 2011).

Son zamanlarda, yazarlar RPT'yi bifilmlerin tanımlanması ve sınıflandırılması yeteneğine sahip bir kalite testi olarak geliştirmiş olup makalelerde açıklayıcı olan bazı varsayımlar konu edilmiştir (Dışpınar ve Campbell, 2006 ve 2004). Standart azalan basınç testi (RPT) metal kalitesinde bir gösterge sağlayabileceğini gösterir (Dışpınar ve Campbell 2006 ve Dışpınar 2010). Önerilen kalite indeksi " Bifilm indeksi" olarak isimlendirilir, RPT örneklerinin seçilen formlarında ölçülen bifilmlerin toplam uzunlukları olur. Her bir bifilmin uzunluğu bir gözeneğin en uzun boyutunun uzunluğu olarak varsayılır Aslında bu yaklaşımda bir hata potansiyeli vardır. Porozitelerin maksimum uzunluğu direkt olarak bifilm uzunluğunu ile aynı olmayabilir. Diğer durumlarda gözenek bifilm başlangıç boyutunu aşan bir küresel bir balon haline gelebilir. Böyle bile olsa, yararlı bir çalışma yaklaşımı olarak milimetre cinsinde ölçülen tüm gözeneklerin maksimum uzunluklarının toplamı değerli kantifikasyon parametresi

olarak görünüyor, görünmediği takdirde kolayca kantifike olur (Dışpınar ve Campbell 2006 ve Dışpınar 2010).

Bifilmlerin toplam uzunluğunun açıkça önemli bir parametre olduğu görülür. Ancak, önemli benzer potansiyel bir ek parametre bifilmlerin toplam sayısıdır. Doğal olarak, toplam bifilm uzunluğu ile toplam bifilm sayısı üzerinden yola çıkarak, ortalama bifilm uzunluğu da hesaplanabilir. Görüleceği gibi bu değer büyük ölçüde değişebilir (Dışpınar ve Campbell, 2011).

Campbell, 2006, Konveksiyonun bastırılmasından dolayı Al alaşımlarında dökümde (çift oksit filmleri) bifilmlerin rolünün tane büyüklüğü ile kontrolü; dendirit kolları arası boşluğunda (DAS) aşırı soğuma olmasından dolayı çekirdeğin sıvı halinin izole edilmiş bölgelerinin bir sonucu olması; Si çekirdeklenmesi ve büyümesi için substratlar gibi bifilmlerin etkisizleştirilmesinde öncelik olarak açıklanan Na ve Sr tarafından Al-Si alaşımlarının modifikasyon mekanizması hakkında çalışmalar yapmıştır.

Döküm yoğunluğu ve bifilm indeksi metal kalitesini değerlendirmek için faydalı parametreler olarak tespit edilmiştir. Metal kalitesi önemli ölçüde artmıştır ve bu döküm çalışması boyunca davam ettiği bulunmuştur (i) difüzörler kullanılmıştır ve (ii) türbülans minimum seviyeye indirilmiştir (Dışpınar ve Campbell, 2007).

Alüminyumun geri dönüşümü temel alüminyumun maliyeti ile karşılaştırıldığında sonuç olarak büyük enerji tasarrufu oldukça ilgi çekicidir. Geri dönüşüm çevre için ve birde doğal kaynakların korunması için faydalıdır. Bugün dünya çapında alüminyumun geri dönüşümü tüketimin üçte biri oranındadır (Dışpınar ve Campbell, 2007).

Geri dönüşüm yönteminin nihai amacı metal kayıplarını düşürürken doğru kimyasal özellikle saf alüminyum üretmektir. Bu amaç için, alaşımlama yanı sıra flakslama ve gaz giderme işlemleri yapılır. Eriyik ondan sonra bekletme fırınına nakledilir. Sonunda, eriyik uygun ölçüdeki külçelere dökülür çeşitli döküm endüstrisi için eriyik stoklanıp servis edilir. Bu külçeler alüminyum döküm parçaları imaline gidip, onaylanan ulusal ve uluslararası özelliklere uygun olarak düzenlenir. Ancak bu ingotların oksit veya gaz içerikleri hakkında bir spesifikasyon yoktur.

Bir indüksiyon fırınında flakslama ve gaz giderme esnasında farklı çubukların ve seramik yayındırıcıların kullanımı incelenmiştir. Ayrıca, farklı gaz akış değerinde (debi) de incelenmiştir. Yüksek debiler kullanıldığında, bifilmlerin ortaya çıktığı eriyiğin yüzeyinde aşırı yüzey türbülansı görüldüğü tespit edildi. Düşük debiler kullanıldığında,

bifilmlerin giderilmesinin daha az etkili olduğu tespit edildi. Bu nedenle ergitme yönteminin kontrolü basit değildir. Ayrıca, sıvının transferi sırasında meydana gelen türbülans yüzünden, bifilmlerin oluştuğu aşikardır (Dışpınar ve Campbell, 2007).

Bilindiği gibi alüminyum eriyiğindeki inklüzyonların konsantrasyonu kontrol altında tutulursa eriyiğin kararlı olması metalin saflaşması için faydalı olduğu görülür. Bu nedenle, akış boyunca zamanın fonksiyonu olarak bekletme fırınında metal kalitesinin değişimi incelenmiştir. Ayrıca, eriyik bekletme fırınına hafifçe vurulmasından (tapping) kalıp kanalının doldurulmasına kadar üretim çizgisi boyunca çeşitli noktalarda denenmiştir (Dışpınar ve Campbell, 2007).

2.4.1. Alüminyum silisyum alaşımlarının dökümünde porozite formları

Alüminyum dökümlerinde başlıca problemlerden biri olan porozite; mukavemet, % uzama (süneklik), yüksek basınç altında sızdırmazlık gibi alaşımın mekanik özelliklerini azaltmaktadır. Porozite bir çok dökümün hurdaya ayrılmasına neden olmakta ve alaşımın kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Kaliteli bir döküm oluşturabilmek için malzeme içerisinde boşluk ve oyuk olarak da tanımlanan mikro porozitenin mutlaka kontrol altına alınması gereklidir. Bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişme dökümlerde oluşan mikro porozitelerin modellenmesine imkan sağlamış ve her dökümcü için ortak problem olarak bilinen mikro porozite probleminin çözümüne katkıda bulunmaktadır. Bilgisayar ortamında mikro porozitenin modellenmesi ile oluşabilecek mikro porozite oranları önceden tahmin edilmekte ve dökümün üretim maliyeti azaltılmaktadır (Savaş 2005).

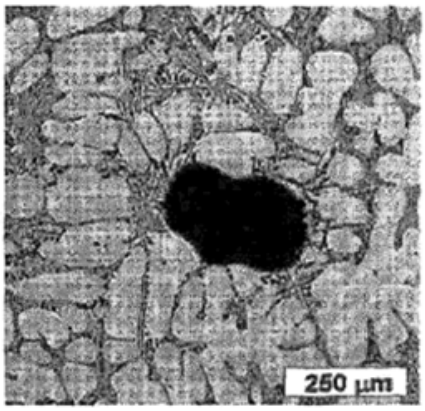
Dökümlerde ortak problem olarak bilinen mikro porozite; katılaşma sırasında yetersiz besleme nedeni ile oluşan çekme, sıvı metal içerisinde çözünmüş olan fazla hidrojen veya hem çekme hem de hidrojen gazının etkisi ile olmaktadır.

Birçok araştırmacı alüminyum-silisyum döküm alaşımlarında üç tip mikro porozite biçiminin mevcut olduğunu rapor etmişlerdir (Savaş 2005).

i. Sıvı metal içerisinde çözünmüş fazla hidrojenin neden olduğu gaz porozitesi.
ii. Katılaşma sırasında dendiritik kollar arasında kalan sıvı bölgenin yeterince beslenememesinden kaynaklanan çekme porozitesi.
iii. Her ikisinin de etkisi ile oluşan poroziteler.

2.4.1.1. Gaz porozitesi

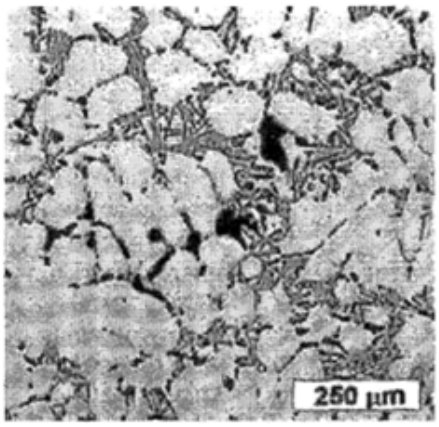
Sıvı alüminyumun katı alüminyuma göre hidrojen çözünürlüğünün fazla olmasına bağlı olarak katılaşma sırasında kararsız hale gelen elemental hidrojen gaz haline geçerek dendiritik kollar arasında kalan en son katılaşan bölgede hidrojen gaz boşluğu oluşturabilmektedir. Şekil 2.11'de tipik gaz porozitesi gösterilmiştir (Savaş 2005).



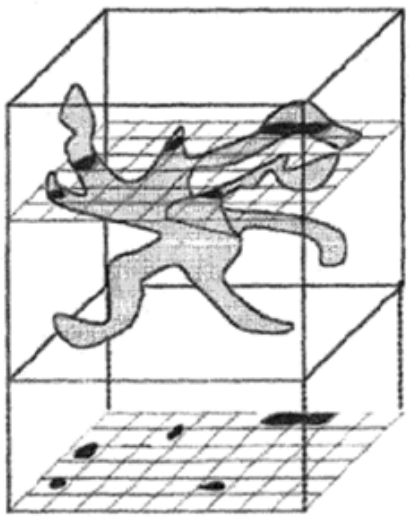
Şekil 2.11. Tipik bir gaz porozitesi (Savaş, 2005).

2.4.1.2. Çekmeye bağlı porozite

Geniş donma alanına sahip alaşımların katılaşma sırasında dendiritik kollar arsında kalan sıvı fazın beslenememesi sonucunda oluşan çekmenin neden olduğu porozitedir. Şekil 2.13'de salkımlı yapının üç boyutlu görünüşü gösterilmiş Şekil 2.12 da dendiritik kollar arasında oluşan çekme porozitesine bir örnek gösterilmiştir (Savaş 2005).



Şekil 2.12. Tipik bir çekme porozitesi (Savaş, 2005).



Şekil 2.13. Salkımlı yapı ve iki boyutlu görünüşü (Savaş, 2005).

2.4.1.3. Her ikisinin de etkili olduğu porozite

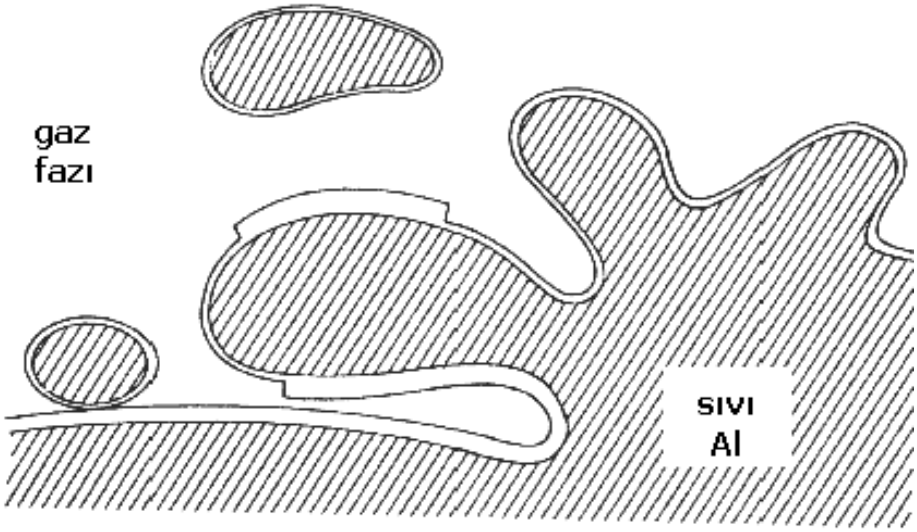
Al-Si döküm alaşımlarında porozite çoğunlukla gaz ve çekme porozitelerinin etkisi ile olmaktadır. Dendiritik kollar arasında porozite çekirdeklenmesi ve sonrada çekmenin bu çekirdeklenmeye etkisi ile olmaktadır.

İki araştırmacı, Al-Si döküm alaşımların da mikro porozite oluşumuna sıvı metalin kalitesi ve dökümün lokal ısıl şartların etkili olduğunu söylemişlerdir (Savaş 2005).

2.4.2. Bifilm oluşumu

Sıvı halde iken birçok metalin ve alaşımın yüzeylerinde katı bir oksit tabakası oluşur. Bu filmler, yüzeyden itibaren atom atom bağlanarak büyürler. Dolayısıyla filmlerin alt tarafı, sıvı ile mükemmel atomik temas halinde olur. Ancak üst yüzeyi ise kuru ve kristal halindedir. (Şekil 2.14 Al_20_3 oluşumu) Bu durum alüminyumun ergitme proseslerinde çok önemli bir yer teşkil eder. Çünkü alüminyum oksit koruyucu bir tabaka oluşturur ve altında yer alan sıvı metalin daha ileri oksitlenmesini engeller. Bu film yüzeyde kaldığı sürece bir zarar teşkil etmez. Ancak problem, bu yüzeydeki ince oksit tabakasının parçalanıp, çeşitli sebeplerden dolayı döküm sırasında katlanarak, birbirlerini ıslatmayan ve kuru oksit yüzeyleri temas eden (edecek şekilde), bununla birlikte arasında bir miktar boşluk da içerecek şekilde sıvı metal içerisine dağılmaları ile başlar (Şekil 2.14). 'Çift oksit filmi' (double oxide film) ya da 'çift film' (bifilm) olarak

adlandırılan bu hatalar katılaşma işlemi sonrasında mikroyapı içersinde de yer alır ve bir çatlak gibi görev görür (Yılmaz 2009).



Şekil 2.14. Yüzey türbülansı: en sık rastlanan çift film oluşum mekanizması. (Campbell, 2003)

Sıvı içindeki türbülanstan dolayı bu çift filmler sarmal halde karışarak kompakt hale gelirler. Gerçekte, bu durumda, boyutlarının mikron seviyede olmasından dolayı zararsız sayılabilirler. Ancak katılaşma sırasında bunlar açılarak mikron seviyesinden milimetre hatta santimetre boyutlarına ulaşabilirler.

Bu açılma mekanizmaları ve itici güçler su şekilde sıralanabilir:

1. Hidrojen: sıvı ile katı fazlar arasındaki çözünürlük farkından dolayı katılaşma sırasında çift filmler arasına difüzyonu ile,

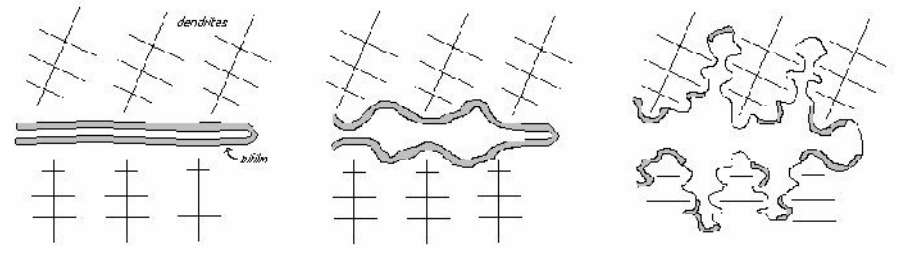
2. Çekilme boşluğu: oluşturacağı negatif basınç ile çift filmler arasındaki boşluğun genişlemesi ile,

3. Kaba tane boyutu: büyük boyutlu dendritlerin inklüzyonları itmesine benzer mekanizma ile çift filmeri açmaları.

Sıvı metalde porozite oluşturmak için gerekli aktivasyon bariyerini tahmin etmek amacıyla, yapılan denemelerde, sıvı alüminyum içinde 10Å çapında homojen bir porozitenin çekirdekleşmesi için 30.000 atm mertebesi gibi çok yüksek basınç değerlerine ihtiyaç olduğu görülmüştür. Heterojen çekirdekleşme de ise bu enerji 1500 atm'e kadar düşebilmektedir. Bu rakamlar pratikte bir dökümde ulaşılamayacak kadar yüksek değerlerdir (Yılmaz 2009).

Bu rakamlara rağmen bugüne kadar alüminyum alaşımlarında mekanik özelliklerdeki düşüşün sorumlusu olarak hidrojen ve dolayısıyla porozite gösterilmiştir.

Bu konuda çok sayıda araştırmalar yapılmıştır. Nümerik, analitik ve termodinamik yaklaşımlarda bulunulmuştur. Porozite yüzdesi, morfolojisi ve boyutlarını tahmin edebilecek şekilde simülasyonlar geliştirilmiştir. Ancak deneysel çalışmalar ile tahmin edilen sonuçlar yakınlık göstermemiştir. Bunun cevabı basitti: çift filmlerin katkısı ihmal edilmişti (Yılmaz 2009).



Şekil 2.15. Çift film ve porozite oluşumu
(Campbell, 2003)

Prensip olarak, katılaşma prosesi boyunca, hidrojen katıdaki düşük çözünürlüğünden dolayı çözeltiden ayrılıp poroziteyi oluşturma çabasında olacaktır. Ancak hidrojen ne homojen ne de heterojen olarak çekirdekleşemeyeceğinden dolayı, ya aşırı doymuş olarak katıda kalacaktır ya da arasında zaten bir miktar boşluk içeren çift film ile karşılaştığında bu boşluk içerisine difüze olarak poroziteyi oluşturacaktır. Yani porozite oluşumu aslında çekirdekleşme kademesi ile değil büyüme kademesi ile oluşmaktadır.

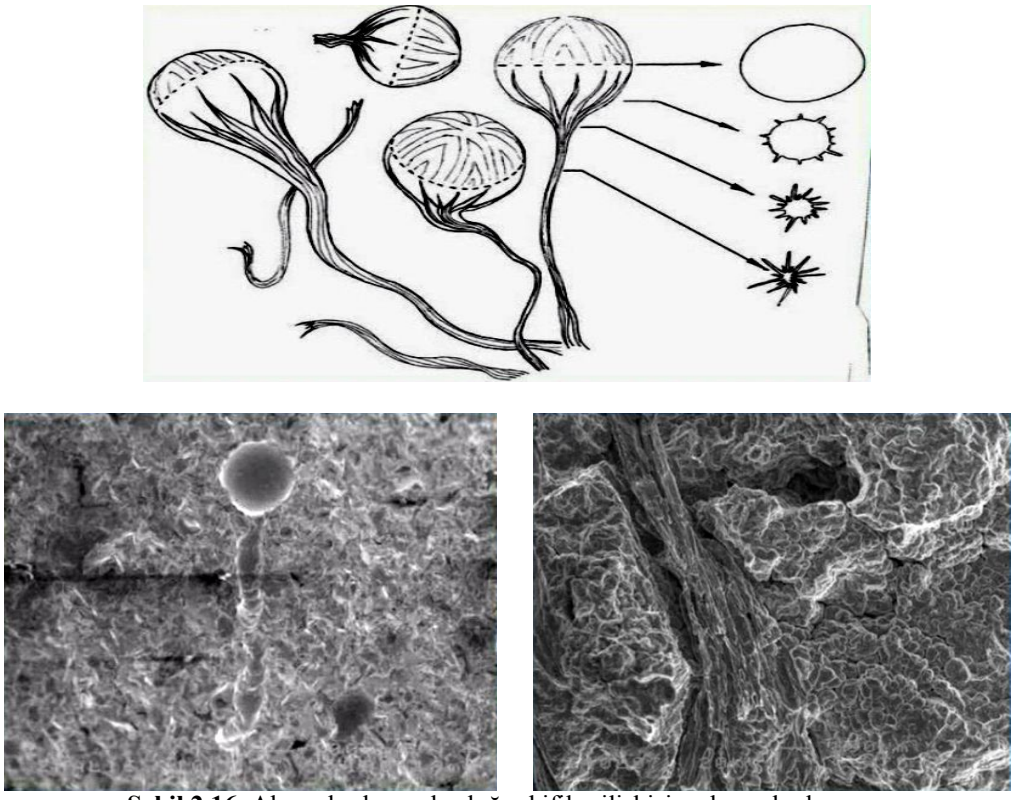
2.4.3. Bifilmin porların oluşumuna etkisi

Campbell por çekirdeklenmesi görüşü yerine bifilmin açılmasını por oluşum sebebi olarak kabul etmiştir. Katılaşmada hidrojen katı önünde segrege olur. Bifilm var ise içine difüze eder, yok ise katıda çözülür. Kısacası, bifilmler por oluşumunun tetikleyicisi, hidrojen ise destekleyicisidir (Şekil 2.15). Diğer unsur ise büyüyen dendirit ucu büzülür, negatif basınç oluşur. Buraya varsa hidrojen difüze olur yok ise vakum olarak kalır. Bu porlar, mikroboşluk olarak adlandırılır (Yılmaz 2009).

Türbülanslı dökümlerde bifilm kırıklar sıvı içinde dağılır. Bu bifilm dağılımlar azaltılmış basınç testi ile fark edilir. Bifilmler yeteri büyüklükte olduklarında döküm yüzeyinden ayrılırlar. Birçoğu ise dökümde sıkışır. Yüzeyden ayrılsalar bile uzun oksit kuyruğu dökümde kalır (Şekil 2.16). Yolluk girişinden yüzeye kadar uzun yol kateder. Etkili gaz kaçak yolu gibi davranır ve malzemenin sızdrmazlık özelliğini bozar.

Oksit filmi vakum ve inert gaz ortamında bile oluşabilir. Vakum asla tam vakum, inert gaz asla tam inert değildir. Bifilmler, MgO, Al_2O_3 ve nitrür formunda olabilir. Sıvı içindeki filmler düzensiz topak veya kıvrılmış-büzülmüş kağıt gibi olabilir. Bu şekiller, yolluk sistemindeki filtreden geçebilir, sıvı içinde açılabilir ve büyük bir hata kaynağı olabilir.

Dendirit itmesi bifilmi düzleştirir. Bifilmin ıslak dış yüzeyinde büyüyen ikinci fazın düzlemleştirici etkisi vardır ve sıcak yırtılma, açılan bifilm nedeniyledir (Yılmaz 2009).



Şekil 2.16. Alaşımlarda gaz boşluğu, bifilm ilişkisi ve kuyruk oluşumu
a) Kırık filmlerin büyüyen ve yükselen por etrafından aşağı süzülmesi ve kuyruk oluşumu (Şematik),
b) Por ve kuyruk (SEM resmi) c)Kuyruk iç yapısı (Campbell 2003)

2.4.4. Bifilmin döküm kalitesine etkisi

Alüminyum ve alaşımlarında porozite oluşumu çekirdekleşme prosesi ile oluşmamaktadır. Yüzey oksidinin sıvıya karışması mekanizması ile oluşan bifilmler poroziteyi tetikleyici görevi görürler. Yapı ve oluşum mekanizması itibariyle içerisinde zaten var olan hava ile ortamda bulunabilecek olan (sıvıda çözünmüş olan) hidrojenin bu boşluğa difüzyonu ile oluşan porozite, aslında tamamen büyüme kademesinden ibarettir. Hidrojen ise gerçek sebep değil, sadece yardımcı (veya itici) bir güçtür (Dışpınar, Campbell 2009).

Bugüne kadar bifilmlerin varlığı yaygın olarak kabul edilmemiştir. Çünkü bu çok ufak ama çok önemli olan hataların varlıklarını gösterebilecek bir yöntem mevcut değildi. Vakum altında katılaşma testinin geliştirilmesi ile bifilmlerin varlığının yanı sıra metal kalitesi bugüne kadar incelenmediği kadar hassas bir şekilde incelenebilecektir (Dışpınar, Campbell 2009).

Bifilm indeksi, alüminyum ve alaşımlarının dökümünde, döküm öncesinde metal kalitesi hakkında bir değer verebilecek şekilde kantifiye edilmiştir ve sunulmuştur (Dışpınar, Campbell 2009).

Bifilm oluşma mekanizmaları bilinerek, vakum altında testi yardımı ile optimize kalıp dizaynı ve uygun döküm yöntemleri ile yüksek kalitede malzeme alüminyum üretmek mümkün olacaktır (Dışpınar, Campbell 2009).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez hazırlanırken dört farklı döküm yapılmıştır. Yapılan dökümlerden iki tanesinde filtre kullanılmış, gaz giderme yapılmış ve türbülanssız dökülmeye çalışılmıştır. Diğer iki dökümde ise filtre kullanılmamış, gaz giderme yapılmamış ve türbülans oluşması için yüksekten dökülmüştür. Yapılan bu döküm çalışmalarının parametreleri kısaca Tablo 3.1'de verilmiştir. Eritme ve döküm deneyleri Sakarya Üniversitesi laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. Al-12Si alaşımının döküm parametreleri.

PARAMETRELER	Sr MODİFİYELİ Al-12Si ALAŞIMI			
	1. DÖKÜM	2. DÖKÜM	3. DÖKÜM	4. DÖKÜM
Gaz Giderme süresi (dk)	Yok	3	3	Yok
Gaz Giderme Sıcaklığı ^{0}C	Yok	675	675	Yok
Filtre Kullanımı (PPI)	Yok	10	10	Yok
Türbülans	Var	Yok	Yok	Var
RPT 1 numune sıcaklığı ^{0}C	675	665	670	710
RPT 2 numune sıcaklığı ^{0}C	670	655	675	700
RPT 3 numune sıcaklığı ^{0}C	675	660	675	680
RPT Vakum Değeri (mmHg)	400	600	600	600
RPT süresi (dk)	4	3	3	3
Döküm Sıcaklığı ^{0}C	670	680	680	675
Mikroyapı için alınan numune sayısı	3	3	3	3
Çekme için alınan numune sayısı	3	3	3	3

3.1. Materyal

3.1.1. Kullanılan alüminyum silisyum alaşımı

Deneysel çalışmada "Carre jant" firmasından temin edilen Sr(Stronsiyum) ile modifiye edilmiş Al-12Si ötektik alaşımı kullanılmıştır. Alaşım yaklaşık 9'ar kg olmak üzere 2 külçe halinde temin edilmiş ve her külçe 3'er parçaya ayrılmıştır. Ayrılan bu parçaların her birinin iki uç kısmından da yaklaşık 3 cm genişliğinde Spektral analiz numunesi alınmıştır. Alınan bu numuneler önce "Ayhan Metal" sonra da "3A Alüminyum" firmalarında analiz ettirilmiştir. Tablo 3.2' de deneysel çalışmada kullanılan Al-12Si alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 3.2. Al-12Si alaşımının kimyasal bileşimi

Element	**% Oranı**	**Element**	**% Oranı**
Silisyum (Si)	11,35	Titanyum (Ti)	0,097
Demir (Fe)	0,13	Kalsiyum (Ca)	0,001
Bakır (Cu)	0,001 den az	Sodyum (Na)	0,0007
Mangan (Mn)	0,008	Fosfor (P)	0,001 den az
Magnezyum (Mg)	0,16	Kurşun (Pb)	0,0014
Krom (Cr)	0,0005 den az	Stronsiyum (Sr)	0,046
Nikel (Ni)	0,001 den az	Vanadyum (V)	0,013
Çinko (Zn)	0,001 den az	Alüminyum (Al)	Kalan

3.1.2. Ergitme ocağı

Al-Si alaşım külçelerini ergitmek için 2 KW gücünde, direnç telli elektrik direnç ocağı kullanılmıştır. Ocak azami 1000 ^{0}C sıcaklığa çıkabilmekte ve 8 kg ergitme kapasitesine sahiptir. K tip termokupl ve elektronik kontaktör termostat donanımı ile sıcaklığı kontrol edilebilen ocakta SiC pota kullanılarak ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ocak astarı kalsiyum oksit türü plakalar ile yapılmıştır ve yüksek termal izolasyon özelliğine sahiptir. Şekil 3.1' de deneysel çalışma kullanılan elektrik direnç ocağı görülmektedir. Şekil 3.2' de de sıvı metal transferinde kullanılan pota görülmektedir.



Şekil 3.1. Elektrik direnç ocağı.



Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan SiC pota.

3.1.3. Döküm kalıp kumu

Döküm kalıplarının yapımında kullanılan kum, kuru silis kumu ve %2 oranında sodyum silikat reçine ile kum karıştırma makinesinde hazırlandı. Hazırlanan kumdan yapılan kalıp CO_2 gazı ile sertleştirildi. Şekil 3.3' de kum hazırlamada kullanılan karıştırma makinesi görülmektedir. Şekil 3.4'de hazırlanan kum kalıp verilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan kum karıştırma makinesi.



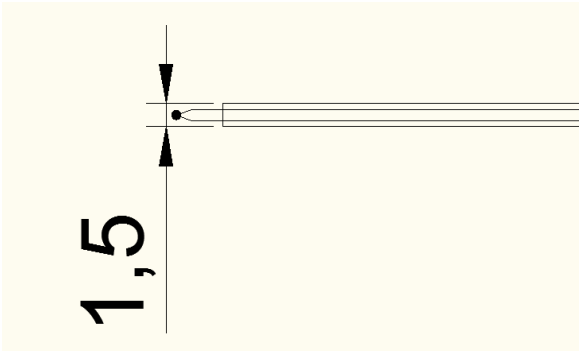
Şekil 3.4. Hazırlanan kum kalıp.

3.1.4. Katılaşmanın gözlenmesi için kullanılan termokupl

1.5 mm çapında NiCr-Ni termo eleman tel TETCİS firmasından temin dilmiştir. Tel 30 cm uzunluğunda kesilmiş, iki ucu da açılmış ve kaynak yapılmıştır. 3 adet hazırlanan tel dökümde 3 farklı kesitin katılaşmasını kontrol etmek amacıyla kalıba yerleştirildi. Telin 3 cm kadarı sıvı metalle karşılaşmak üzere kalıp boşluğunda bırakıldı. Her tel data logger cihazının bir soketine bağlanarak data logger vasıtasıyla sıcaklık düşüşü izlendi (Şekil 3.5). Şekil 3.6'de de kullanılan NiCr-Ni termokupl telin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.5. Data logger.

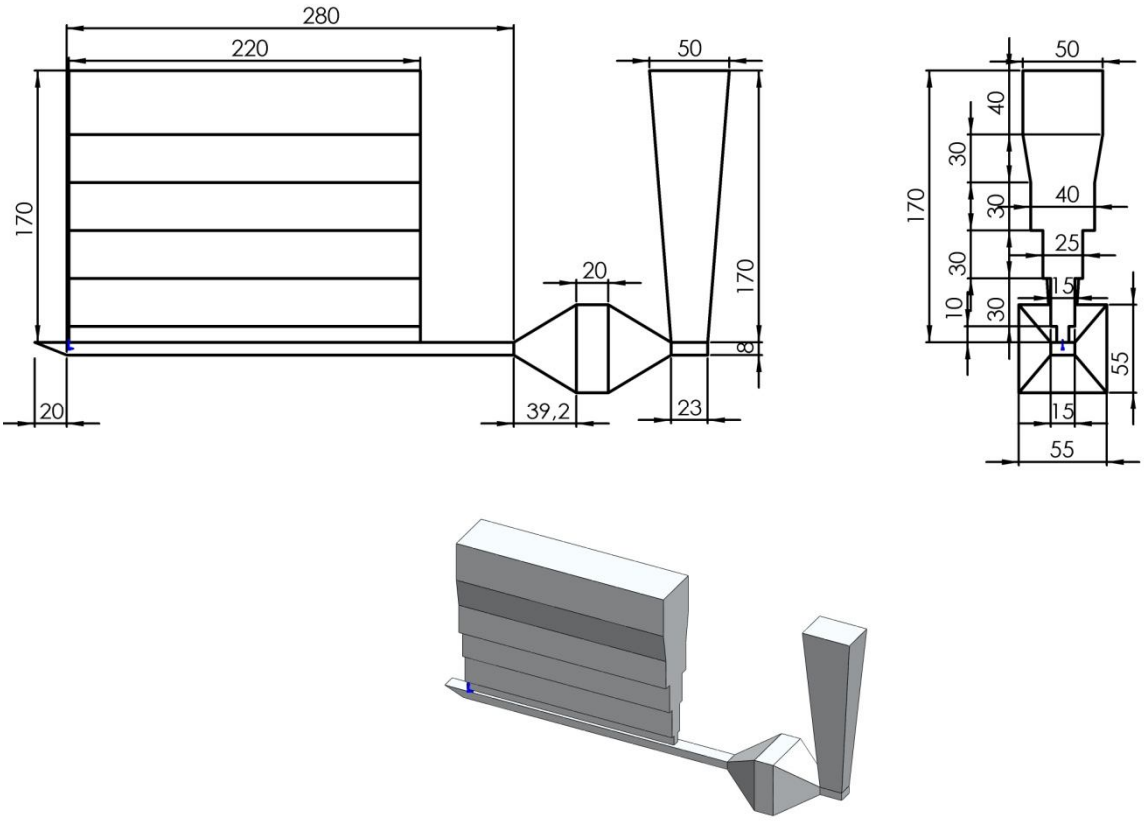


Şekil 3.6. NiCr-Ni termokupl telinin şematik görünüşü

3.1.5. Döküm kalıp modeli

Dökümde kullanılan kum kalıp modeli daha önce Yüksek Lisans tezinde kullanılmıştır (SAVAŞ, 2005). Model farklı kesit içerecek şekilde dikey tasarlanmış olup, besleyici kısım ile beraber toplam 5 farklı kesitten oluşmaktadır. Yolluk üzerine filtre yerleştirebilmek için boşluk yapılmış ve filtre kullanılmadığı zaman da türbülans oluşmasına katkıda bulunması hedeflenmiştir. Yolluktan gelen sıvı metali ilk gören kısım en ince kesit, ince kesitin hemen üsten biraz daha kalın olan orta kesit, orta kesitin

de hemen üstünde olan kalın kesit çalışmamızın asıl hedef kesitleridir. Diğer iki kesit de biri besleyici görevi görmek amacıyla tasarlanmış, diğeri ise kalın kesit ile besleyici arasında geçişi sağlayan kısımdan oluşmaktadır. Bu kesitlerin kalınlıkları mm cinsinden sırasıyla ince kesit 15 mm, orta kesit 25 mm, kalın kesit ise 40 mm olarak tasarlanmıştır.



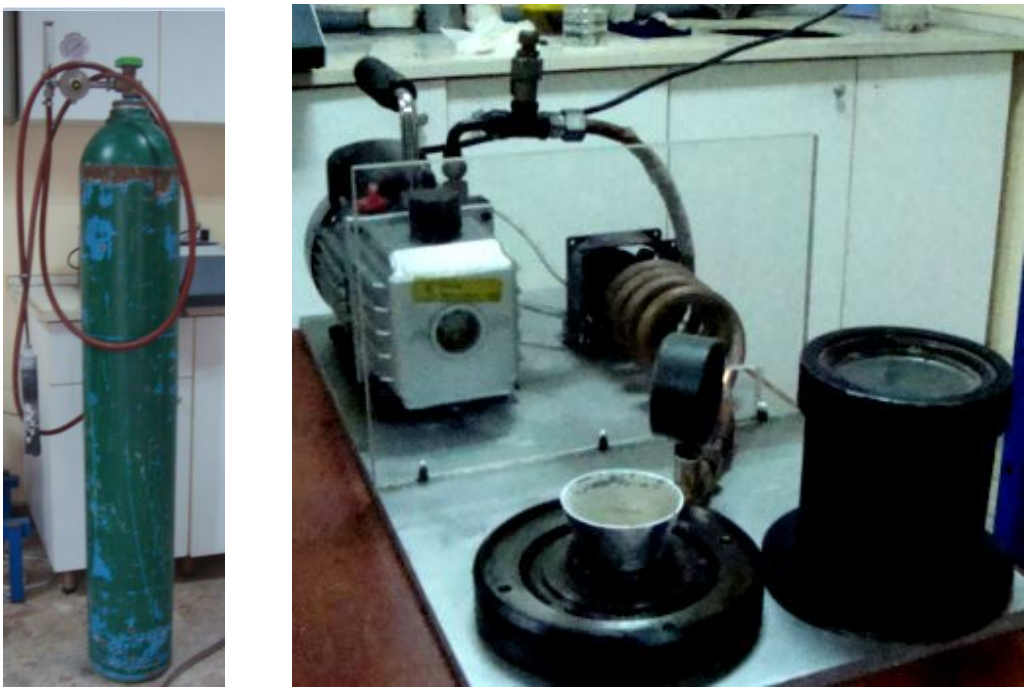
Şekil 3.7. Dökümü yapılan modelinin teknik resmi.



Şekil 3.8. Dökümden çıkan parça

3.1.6. Sıvı metalde gaz giderme ve gazlılık ölçüm cihazı

Elektrik direnç ocağı vasıtasıyla potada ergitilen sıvı metal dökülmeden önce, her dökümden 3'er tane RPT numunesi alınmıştır. Tablo 3.1'de verilen şartlarda 2. Ve 3. dökümlere argon gazı ile gaz giderme yapılmıştır. Alınan numuneler 130'ar gramlar halinde olup vakum altında 3 dakika bekletilerek katılaştırılmıştır. RPT numunesi alınmasındaki amaç yapacağımız dökümdeki sıvı metalin kalitesine ilişkin fikir sahibi olmaktır (Şekil 3.9).



a b

Şekil 3.9. Dökümde gaz gidermede ve gazlılık ölçümünde kullanılan cihazlar.
a) Gaz gidermede kullanılan argon tüpü ve grafit lans b) Gazlılık ölçüm cihazı

3.1.7. Metalografik numune hazırlama cihazları

Döküm parçalarından metalografik inceleme için alınan numuneler önce kesme makinesinde kesilmiştir. Kesilen numuneler küçük olduğundan hazırlama aşamasında rahat çalışması için bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler zımpara ve parlatma makinesinde önce farklı grid zımparalarla zımparalandı. Zımparalamanın ardından elmas süspansiyon ve elmas suyu ile uygun çuha kullanılarak parlatıldı. Parlatma işleminden sonra her numunenin 50X, 100X ve 200X büyütmelerde mikroyapı resimleri çekildi. Daha sonra dağlama işlemi yapıldı. Dağlama 0,5 lik HF asit ile yapıldı. Dağlamadan sonrası numunelerin 50X, 100X, 200X ve 500X büyütmelerde mikroyapı resimleri çekildi. Numune hazırlama işlemleri "Hidromas" ve "Altun Döküm" olmak

üzere iki farklı firmanın laboratuarında yapılmıştır. İki firmanın da numune hazırlama cihaz resimleri aşağıda verilmiştir.



a b c

Şekil 3.10. Hidromas firmasında kullanılan numune hazırlama cihazları.
a) Numune kesme cihazı, b) Bakalite alma cihazı, c) Zımpara ve parlatma cihazı



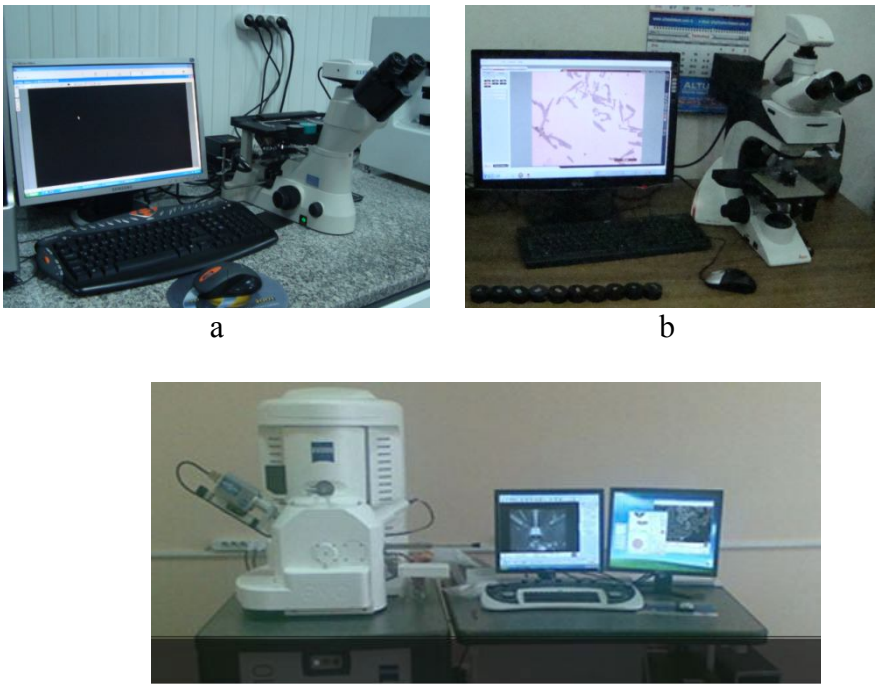
a b c

Şekil 3.11. Altun Döküm firmasında kullanılan numune hazırlama cihazları.
a) Numune kesme cihazı, b) Bakalite alma cihazı, c) Zımpara ve parlatma cihazı

3.1.8. Mikroyapı inceleme cihazları

Numune hazırlama işlemlerine tabi tutulan döküm parçalarından alınan numuneler dağlama işleminden önce ve dağlama işleminden sonra ayrı ayrı metal mikroskobunda incelendi ve resimleri çekildi. Resimler dağlama öncesi 50X, 100X ve 200X büyütmelerde çekilmiştir. Dağlama sonrası çekilen resimler de 50X, 100X, 200X ve 500X büyütmelerdedir. Optik metal mikroskobundan sonra, SEM laboratuarında her numunenin SEM cihazında incelemesi yapılmış ve resimleri çekilmiştir. Ardından numunelerden birkaçının EDX analizleri alınmıştır. Ayrıca çekme numunelerinden en az ve en fazla % uzama gösteren numunelerin kırık yüzeyleri de SEM laboratuarında incelenmiş, resimleri çekilmiş ve EDX analizleri alınmıştır. Mikroyapı incelemelerinde, dağlama öncesi Hidromas firmasının metal mikroskobu, dağlama sonrası da Altun Döküm firmasının metal mikroskobu kullanılmıştır. SEM (ZEISS LS-10) cihazındaki

çalışma da Selçuk Üniversitesi Araştırma Geliştirme merkezinde yapılmıştır. Kullanılan mikroskopların resimleri Şekil 3.12'de verilmiştir.



a b c

Şekil 3.12. Döküm mikroyapılarının incelendiği cihazlar.
a) Hidromas firmasındaki metal mikroskobu, b) Altun Döküm firmasındaki metal mikroskobu, c) S.Ü. Ar-ge merkezindeki SEM cihazı.

3.1.9. Çekme testi cihazı

Bu çalışmamızda çekme testi deneyi Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde yapılmıştır. Çekme testi cihazı maksimum 3 ton'luk yük hücresi ile çalışmaktadır. Cihaz, malzemelerin çekme-basma, 3-4 nokta eğme, sabit yük altında deformasyon testleri amacıyla kullanılmakta olup bilgisayar kontrollüdür.



Şekil 3.13. Çekme testi cihazı

3.1.10. Sertlik ölçüm cihazı

Sertlik testi önce Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme mühendisliği laboratuarında yapılmış, sonra da Altun Döküm firmasının laboratuarında yapılmıştır. Kullanılan cihazlarda 10kg ön yük, 62,5 kg yük ve 2,5 mm çapında bilye uç kullanılmıştır. Bekleme süreleri Sakarya Üniversitesinde kullanılan cihazda 10 saniye, Altun Dökümde kullanılan cihaz da ise 8 saniyedir. İki farklı cihazdan alınan değerler karşılaştırılmıştır. Kullanılan cihaz resimleri aşağıda verilmiştir.



a b

Şekil 3.14. Deneyde kullanılan sertlik ölçüm cihazları.
a) Sakarya Üniversitesinde kullanılan sertlik ölçme test cihazı,
b) Altun Döküm firmasında kullanılan sertlik ölçme test cihazı.

3.1.11. Dökümde kullanılan filtre

Filtreli dökümlerde 40mm X 40mm X 20mm boyutlarında 10 (pixels per inch) PPI'lik alümina seramik köpük filtreler kullanıldı. Şekil 3.15' de dökümlerde kullanılan 10 PPI'lik alümina seramik filtre görülmektedir.



Şekil 3.15. Dökümde kullanılan 10 PPI'lik filtre.

3.1.12. Makro porozite ölçümünde kullanılan cihazlar

3.1.12.1. Arşimet hesabıyla porozite ölçüm cihazı

Arşimet hasabına göre porozite ölçümü için, Arşimet hesabına göre yoğunluk hesabı yapılmıştır. Yoğunluk hesabını yapmak için Altun Döküm firmasının laboratuarındaki Arşimet terazisi kullanılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Arşimet terazisi.

3.1.12.2. Makro yapı üzerinde porozite ölçüm cihazı

Makro yapı üzerinde porozite ölçümü için Nikon Eclipse L150 marka mikroskop ve Clemex marka kamera ve görüntü analiz programı kullanılmıştır. Şekil 3.17'de mikroskop ve kamera görülmektedir.



Şekil 3.17. Makro porozite ölçümünde kullanılan mikroskop ve kamera.

3.2. Metod

3.2.1. Döküm kalıbının hazırlanması

Döküm çalışması, Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümünde döküm laboratuarında yapılmıştır. Dökümü yapılacak parçanın kalıbı %2

sodyum silikat reçine içeren silis kumu ile hazırlanmıştır. Kum karıştırma makinesinde karıştırılan kum model ve dereceler yardımıyla kalıp haline getirildi. Kalıp CO_2 ile sertleştirildi. Dereceler yardımıyla kalıp birleştirildi ve dik olarak durması için işkence aleti ile sıkıştırıldı. Döküm yapılmadan önce şaloma ile kalıp içi ısıtıldı (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Döküme hazır kalıp resmi.

3.2.1.1. Alaşımın ergitilmesi

Çalışmamızda dört farklı döküm yapıldı. Yapılan ilk üç dökümde yaklaşık 5700 g Sr modifiyeli Al-12Si alaşımı külçesi kullanıldı. 4. Dökümde ise 1900 gr külçe ve 3500 gr da hurda kullanıldı. Hurdalar ilk üç dökümün yolluklarından oluşmaktadır. Alaşımlar elektrik direnç ocağının içerisinde bulunan SiC potaya yüklendi. Ergime olana kadar beklendi. Sıcaklık 650 ^{0}C yi görünce dijital el probu ile sıvı metalin sıcaklığı ölçüldü. Sıcaklık istenen değere gelince gaz giderme ve ardından RPT numunesi alma işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlerden sonra tekrar sıcaklık ölçümü yapılarak döküm işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Alaşımın ergitilmesi.

3.2.1.2. Dökümün yapılması

Tez çalışmamızda yapılan dört farklı dökümün parametreleri giriş kısmında kısaca verilmiştir. Birinci ve dördüncü dökümler türbülanslı, ikinci ve üçüncü dökümler de türbülanssız yapılmaya çalışılmıştır. Türbülanslı yapılan dökümlerde gaz giderme yapılmamış ve filtre kullanılmamıştır. Türbülanssız dökümlerde ise hem gaz giderme yapılmış hem de filtre kullanılmıştır. Yapılan dört dökümden de RPT numuneleri alınmıştır. RPT numunesi alma işleminden sonra ocak içindeki pota dışarı alınmış, curufu temizlenmiş ve doğrudan potadan kalıba döküm yapılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Döküm yapılmasından bir resim.

3.2.1.3. Döküm öncesi RPT numunesi alınması

Sıvı metal içersinde çözünmüş halde bulunan hidrojen gazının temizlenmesi amacıyla sıvı alaşımı argon gazı ile yıkama işlemi gerçekleştirildi. Argonla yıkama işlemi için grafit bir lans sıvı alüminyum içerisine yaklaşık 675 ^{o}C'de daldırıldı. Böylece çok sayıda küçük gaz baloncuğunun sıvı içerisinden geçirilerek metal içersinde özünmüş bulunan hidrojen atomları bu baloncuklar içerisine difüze ederek baloncuklarla beraber atmosfere atılmaktadır.

Potada ergiyen Sr modifiyeli Al-12Si alaşımının sıcaklık kontrolü yapılarak, her döküm için üçer tane RPT numunesi alınmıştır. Numuneler kepçe yardımıyla ocak içindeki potadan alınmıştır. Potadan alınan sıvı metal RPT cihazının katılaştırma kalıbına dökülmüştür. Kalıp daha önceden şaloma yardımıyla ısıtılmıştır. Alınan numuneler 130 gr ağırlığındadır. Kalıba dökülen sıvı metalin vakum altında katılaşmasını sağlamak için üstü cam olan kavanozla kapatıldı. Sonra cihaz çalıştırıldı

ve 3-4 dk kadar beklenildi. Metalin katılaştığı görülünce cihaz kapatıldı ve numune soğuması için dışarı alındı. Yapılan dört döküm için alınan her üçer numune de bu şekilde aynı prosedür işlemiştir (Şekil 3.21 ve 3.22).



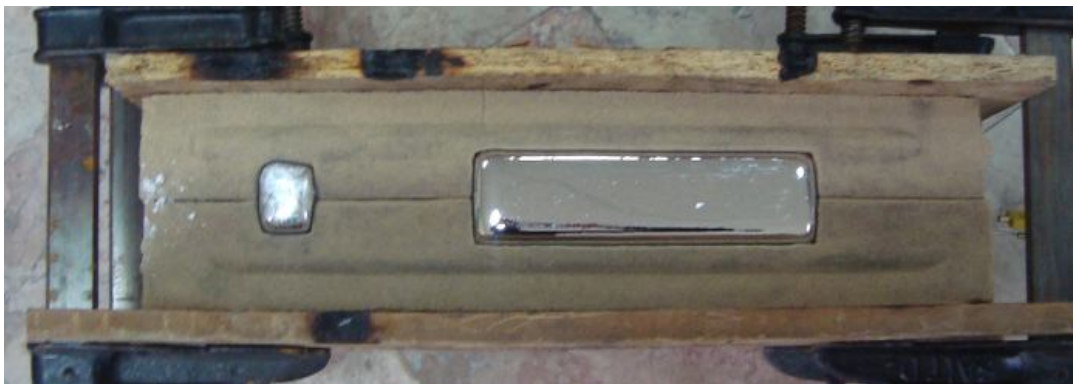
Şekil 3.21. RPT numunesi alınması



Şekil3.22. Vakum altında katılaşma anı.

3.2.1.4. Türbülanssız dökümün yapılması

Döküm çalışmamızın en zor kısımlarından biri olan türbülanssız döküm aşaması, ikinci ve üçüncü dökümler için uygulanmıştır. Sıvı metal ergidikten sonra gaz giderme ve gazlılık ölçümü yapılmış ardından maşa yardımıyla dışarı çıkarılan potada önce curuf temizleme işlemi yapılmış sonra dijital el probuyla sıcaklık ölçümü yapılarak döküm işlemine geçilmiştir. Döküm yapılırken sıvı metalin sallanmamasına çok dikkat edilmiş ve potanın ağzı kalıbın yolluk ağzına iyice yaklaştırılmıştır. Döküm hızının düşük olması için de pota döküm esnasında çok yavaş hareket ettirilmiştir. Bu şekilde türbülans oluşturmadan bir döküm elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.23'de türbülanssız yapılan döküm sonrası kalıp ve kalıp içinde soğumaya başlayan döküm parçası verilmiştir.



Şekil 3.23. Türbülanssız dökülmüş parçanın katılaşmadan önceki resmi.

3.2.1.5. Türbülanslı dökümün yapılması

Türbülanslı dökümler birinci ve dördüncü dökümlerdir. Türbülanslı dökümler yapılırken gaz giderme yapılmadığı gibi filtre de kullanılmamıştır. Maşa yardımıyla ocaktan alınan potada önce curuf temizleme işlemi yapılmış sonra digital el probuyla sıcaklık ölçülmüştür. Daha sonra pota kalıptan yaklaşık 30-35 cm yukarıda tutularak döküm yapılmıştır. Döküm hızının yüksek olması ve türbülans oluşması amacıyla döküm esnasında pota hızlı hareket ettirilmiştir. Şekil 3.24'de türbülanslı döküm sonrası kalıp ve döküm parçasının resmi verilmiştir.



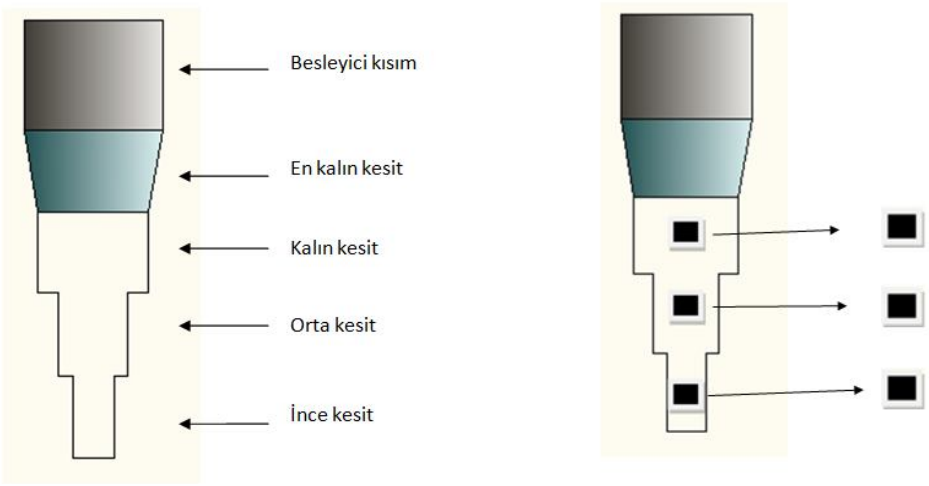
Şekil 3.24. Türbülanslı döküm parçasının katılaşmaya başladığı an.

3.2.2. Döküm parçalarının incelenmesi

3.2.2.1. Metalografik inceleme

Metalografik incelemeler kesme, bakalite alma, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinin yapılmasından sonra gerçekleştirilmiştir. İnceleme üç aşamada yapılmıştır. Bunlar; ilk olarak dağlama öncesi optik metal mikroskobunda inceleme ve resim alma, ikinci olarak dağlama sonrası optik metal mikroskobunda inceleme ve resim alma ve son olarak da (SEM) taramalı elektron mikroskobunda inceleme ve resim almadır. Numuneler döküm parçasının termokupl teli olan tarafından alınmamış, diğer taraftan alınmıştır. Kesim işlemi şöyle yapılmıştır; ilk olarak sıcaklık ölçümü yapmak amacıyla tel konan taraftan 30 mm kesilmiş. Daha sonra tekrar aynı yerde 10 mm kalınlıkta boyuna bir kesit alınmıştır. Geri kalan döküm parçası enine 5 farklı kesite ayrılmıştır. Bu kesitlerden ince, orta ve kalın kesitten çekme numunesi çıkacak şekilde

parçalar alınmış. Elimizde kalan küçük parçalardan Şekil 3.25'de de gösterildiği gibi mikroyapı numuneleri alınmıştır. Bu numuneler gerekli ve yeterli numune hazırlama işlemlerine tabi tutulduktan sonra metalografik olarak incelenmek üzere yukarıda da bahsedildiği gibi üç aşamada işlem görmüştür. Bu işlemler sonucu alınan resimler ve karşılaştırılmalar sonuçlar kısmında verilmiştir.

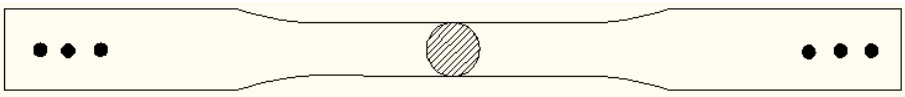


Şekil 3.25. Metalografik numune alınması.
a) Döküm parçasının kesitleri, b) Döküm parçasından alınan numuneler.

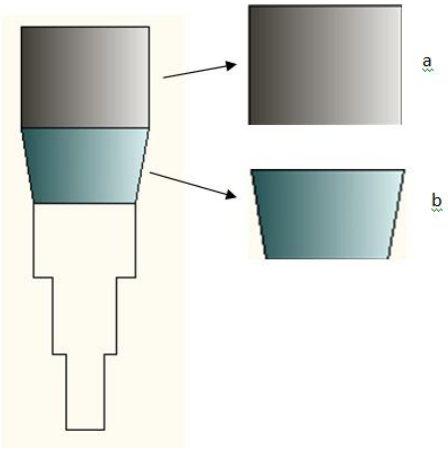
3.2.2.2. Mekanik testlerin yapılması

3.2.2.2.1. Sertlik testi

Mekanik testlerden sertlik testi, iki farklı şekilde ve farklı numuneler üzerinde yapılmıştır. İlk olarak çekme testi için hazırlanan numunelerin baş kısımlarından sertlik ölçülmüştür. Daha sonra da makro inceleme numunesi kesitlere ayrılmış dördüncü kesit ve besleyici kısımlarının setliği hem cihazdan okuma hem de çap ölçümü yaparak iz üzerinden hesaplanmıştır. Daha sonra da bu ölçümler karşılaştırılmıştır.



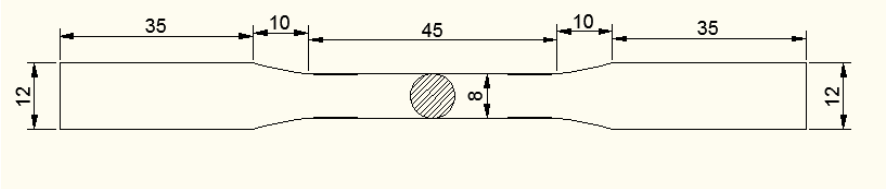
Şekil 3.26. Çekme numunesinden sertlik alınan bölgeler



Şekil 3.27. Sertlik ve porozite ölçüm numunelerinin alındığı bölgeler
a) Besleyici kısım, b) En kalın kesit bölgesi.

3.2.2.2.2. Çekme testi

Çekme testi numunesi ASTM E 8M-04 standardına uygun hazırlanmıştır. Her döküm parçasından 3 numune alınmak suretiyle toplam 12 çekme testi numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler ince kesit, orta kesit ve kalın kesit olmak üzere 4 ince kesit, 4 orta kesit ve 4 de kalın kesit numunesi şeklindedir. Çekme testi numunelerinin boyutları Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.28. Çekme numunesi

3.2.2.3. Makro porozite ölçümü

Makro porozite ölçümü iki farklı şekilde yapılmış ve alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlk olarak Arşimet hesabıyla yoğunluk farkından porozite hesaplanmıştır. İkinci olarak da makro yapı üzerinde çalışılmış ve ortalama bir yüzde hesaplanmıştır.

3.2.2.3.1. Arşimet hesabıyla porozite ölçümü

Yoğunluk ölçümleri için Şekil 3.27'de belirtilen bölgelerden her bir dökümden ikişer tane olmak üzere toplam 8 tane numune metalografik numune kesme makinesi

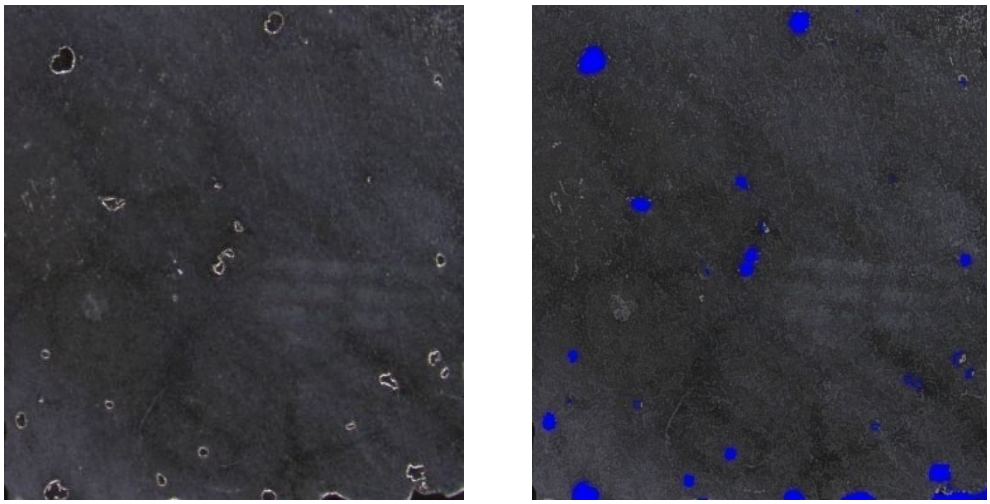
yardımı ile alındı ve numunelerin her tarafı 150 grit zımpara ile zımparalandı. Arşimet düzeneği kullanılarak numunelerin suda ve havada ağırlıkları ölçüldü. (3.1) eşitliği kullanılarak numunelerin yoğunluğu bulundu. Bulunan yoğunluklar (3.2) eşitliği yardımıyla numunelerin % porozite oranları hesaplandı. Deneysel çalışmalarda kullanılan saf suyun yoğunluğu 0.9982 kg/dm^3 bulunmuştur.

$$\text{Yoğunluk (d)} = \text{Kuru Ağırlık} / (\text{Kuru Ağırlık} - \text{Yaş Ağırlık}) \quad (3.1)$$

$$\%\ \text{Porozite} = [1 - (\text{Yoğunluk} / \text{Teorik Yoğunluk (2,68)})] \times 100 \quad (3.2)$$

3.2.2.3.2. Makro yapı üzerinde porozite ölçümü

Şekil 3.25 de gösterilen bölgelerden mikroyapı incelemeleri için alınan numuneler bakalite alındı. Bakalite alınan numuneler sırayla 80, 150, 220, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 grit zımparalarla zımparalandı sonra 0,3µ alümina keçe ile parlatıldı. Metalografik hazırlanan numunelerin tamamını ya da tamamının % 90 üzerini tarayacak şekilde her numuneden 1'er adet 5X' büyütmede makro olarak fotoğraf çekilmiş ve çekilen fotoğrafların imaj analiz programında porozite oranları hesaplanmıştır. Programın analiz yapma esası; mevcut resimdeki renk farklılıklarına dayanmaktadır. Resimdeki renk farklılıklarına göre her bir kontrasttaki rengi farklı birer faz ya da bölge olarak algılayıp bize bu farklara göre sonuçlar verir. Şekil 3.29'de Clemex görüntü analiz programı yardımıyla porozite oranının belirlenmesine örnek bir görüntü verilmiştir. Şekil 3.29 a'daki mikroyapı resminde siyah olarak görülen porozite bölgeleri Şekil 3.29 b'de mavi olarak işaretlenmiştir. Programın renk farklılığına göre algılaması porozite olarak belirlediğimiz bölgeyi algılayarak toplam alandaki kapladığı yüzde miktarı olarak sonuç bulmuştur.



Şekil 3.29. Makro porozite ölçümü.
a) ölçülendirilmemiş resim. b) porozitelerin farklı renkle gösterilmesi

3.2.2.4. Soğuma eğrisinin çizilmesi

Döküm parçalarının her dökümde ve her bir kesitin sıcaklık zaman grafiklerini almak için kalıplara K tipi temokupllar bağlanmıştır. Sıvı metalin kalıba dolmasından katılaşmanın tamamlanmasına kadar geçen sürede data logger tarafından her saniyede yaklaşık 4 veri alınarak kaydedilip, bilgisayara aktarılan verilerden grafik programları yardımıyla soğuma eğrileri oluşturulmuştur.

3.2.2.5. RPT numunelerinin incelenmesi

Döküme hazır hale gelen sıvı metalden art arda üç numune alınmıştır. Her döküm için üç toplam on iki RPT numunesi alınmıştır. Alınan numuneler şerit testere ile dik olarak ortadan kesilmiştir. Elde edilen yarım numunelerin yüzü 80, 150, 360, 600, 800 ve 1000 grit zımpara ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminde sonra temizle ve yıkama yapılmıştır. Numune kuruduktan sonra tarayıcı ile poroziteli kısım ekranda olacak şekilde taranmıştır. Daha sonra bu yüzeyler üzerinde bifilm indeks çalışması yapılmış ve her numunenin bifilm indeksi çıkarılmıştır. Çıkarılan indekslerin yorumları sonuçlar kısmında verilmiştir.

3.2.2.6. Bifilm indeksi hesaplanması

Deneysel çalışmamızda vakum altında katılaştırma testi için hazırlanan numunelerin kesit alanında gözlenen porozitelerin uzunluklarının toplamı hesaplanarak

elde edilen değere “bifilm indeksi” adı verilmiştir. Birim olarak milimetre cinsinden olan bu kalite indeksi toplam oksit uzunluğunu vermektedir ve çok basit anlamda sıvı metal kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Sonuç olarak her porozite bifilm tarafında oluştuğuna göre, vakum altında katılaştırma test numunesi kesit alanında görülen her porozitenin uzunluğu da bifilm uzunluğu olacaktır. Aslında oksit içeriğini vermek için uzunluk birimi mantıklı olmayabilir çünkü oksitler belirli bir yüzey alanına ve kalınlığa sahip olup üç boyutlu hatalardır. Fakat bu tip bir hesaplamaya gidildiği zaman, kalite indeksi gittikçe karmaşıklaşmaya başlayacaktır. Hatta işin içerisine numunenin hacmi veya ağırlığı gibi birimleri de ekleyip, birim hacimde veya birim ağırlıktaki bifilm içeriğini verecek şekilde bir indekste oluşturabilmektedir. Fakat bu basit bifilm indeksini önerilmesindeki temel amaç, pratik olarak hızlı bir şekilde döküm öncesi sıvı metal kalitesini belirlemek olmuştur (Dışpınar, Campbell 2009).

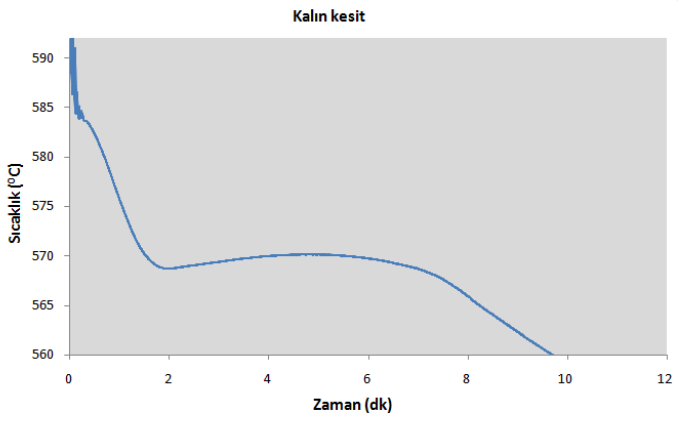
Bifilm indeksi milimetre cinsinden, bilgisayarda grafik programları yardımıyla hesaplanmıştır. Vakum altında katılaştırılan test numuneleri önce metalografik numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuş ve hazırlama işlemi bittikten sonra tarayıcı yarımıyla resim olarak bilgisayar ortamında aktarılmıştır. Grafik programları yardımıyla resim üzerinde porozite uzunlukları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu uzunluklar toplanarak bifilm indeks değerleri bulunmuştur.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneysel sonuçlar ve değerlendirilmesi; deneysel çalışmalardan alınan verilerle altı bölüm altında ele alınmıştır. İlk olarak dökümün katılaşması sırasında alınan soğuma eğrisinin sonuçları ve grafikleri verilmiştir. İkinci olarak döküm parçalarından alınan makro inceleme numunelerinin resimleri verilerek sonuçları tartışılmıştır. Üçüncü kısımda mikroyapı deney sonuçları, mikroyapı optik mikroskop ve SEM resimleri verilerek, kesit farkının etkisi değerlendirilip kesit farkı göz önüne alınarak filtre kullanımı, gaz giderme ve türbülans etkileri belirlenmiştir. Dördüncü kısımda porozite ölçüm sonuçları önce hacimsel hesaplama sonra alansal hesaplama ile yapılarak alınan sonuçlar verilerek bu sonuçlar karşılaştırılmıştır. Beşinci kısımda mekanik özellikler için yapılan döküm numunelerinin sonuçlarına yer verilerek kesit farklarının ve diğer parametrelerin etkileri incelenerek ve çekme numunelerinin SEM resimleri verilerek sonuçları incelenmiştir. Son olarak RPT cihazı ile vakum altında yapılan katılaştırma testlerinin sonuçları değerlendirilip bu sonuçların yapılan dökümün kalitesini nasıl yansıttığı belirlenmiştir.

4.1. Soğuma Hızı Sonuçları

Şekil 4.1'de soğuma grafiği ve Şekil 4.2'de soğuma eğrisi alınan dökümün temsili mikroyapı resmi verilmiştir.



Şekil 4.1. Katılaşma hızı.

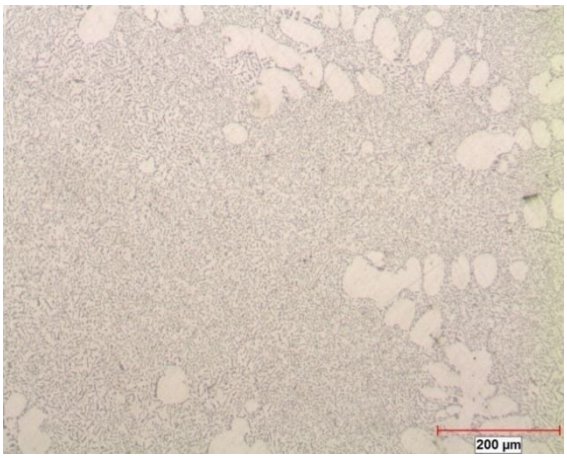
Deneysel çalışmamızda yapılan dört döküm için de soğuma eğrisi elde etme amaçlı olarak termokupl telleri kalıba bağlanmış fakat teknik problemler ve termokupl tellerinin kalibresinde çıkan problemlerden dolayı sadece son yapılan dökümde kalın

kesit için sağlıklı sonuç elde edilmiştir. Diğer sonuçlar gerçeği yansıtmadığı için onlara burada sonuç olarak yer verilmemiştir. Sonuçlarının sağlıklı olduğunu düşündüğümüz son döküm kalın kesit için şekilde dikey olarak verilen veriler sıcaklık (^{o}C), yatay verilen veriler de süre (dk) dır. Şekilde de görüldüğü üzere deney öncesi tahminlerimizi doğrulayacak şekilde ötektik sıcaklık bir miktar düşmüştür. Bunun sebebi olarak da alaşımın modifiye edilmiş olması gösterilebilir.

McDonald ve arkadaşları (2004) Alüminyum silisyum alaşımlarının ötektik çekirdeklenmesi üzerine yaptıkları çalışmada stronsiyum modifiyeli ve modifiyesiz alaşımlar kullanmışlardır. % 0,019 oranında stronsiyum ile modifiye edilmiş alaşımın ötektik sıcaklığının 577 ^{o}C den 571 ^{o}C ye düştüğünü göstermişlerdir.

Kalıba dolan sıvı metal soğumaya başladıktan sonra Şekil 4.1'de görüldüğü gibi yaklaşık 568 ^{0}C de ötektik çekirdeklenme başlamış ve bir miktar ısı ortaya çıkmıştır. Buna bağlı olarak ortam sıcaklığı yükselmiş ve soğuma eğrisinde grafik yukarıya doğru bir ivme kazanmıştır. Yaklaşık 572 ^{o}C de ötektik katılaşma meydana gelmiş ve katılaşma bittikten sonra da alaşım lineer bir azalışla soğumaya devam etmiştir. Modifikasyon etkisi ile ötektik sıcaklık değerinin değişimi McDonald ve arkadaşlarının çalışmasıyla uyum içindedir.

Şekil 4.2 de verilen mikroyapı resminde, modifikasyonun gerçekleştiği görülmektedir. α–Al dendiritlerinin az olduğu görülmektedir. Bu da bize ötektik çekirdeklenmenin kısa alana sıkıştığını göstermektedir.



Şekil 4.2. Soğuma eğrisi alınan dökümün temsili mikroyapı resmi

4.2. Makro Yapı İnceleme Sonuçları

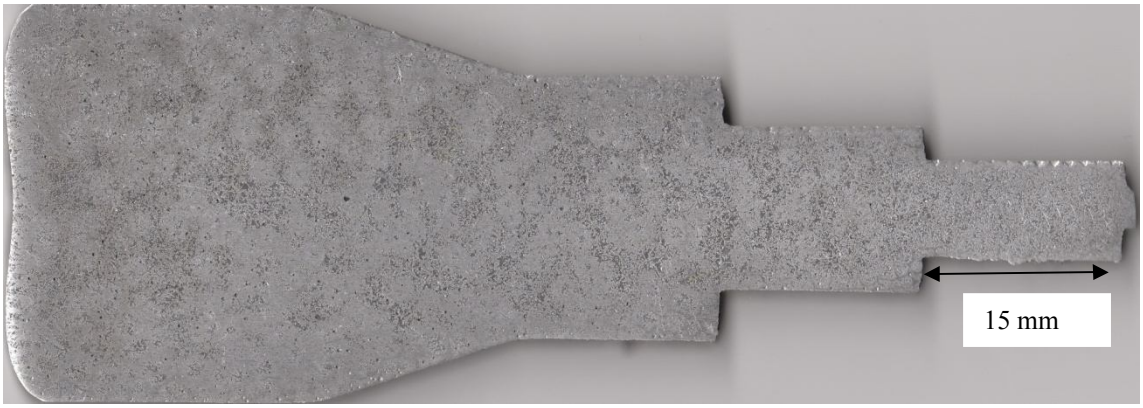
Makro yapı incelemeleri için hazırlanan numuneler Şekil 4.3'de verilmiştir.



a



b



c



d

Şekil 4.3. Makro inceleme resimleri.
a) 1. Döküm, b) 2. Döküm, c) 3. Döküm, d) 4. Döküm.

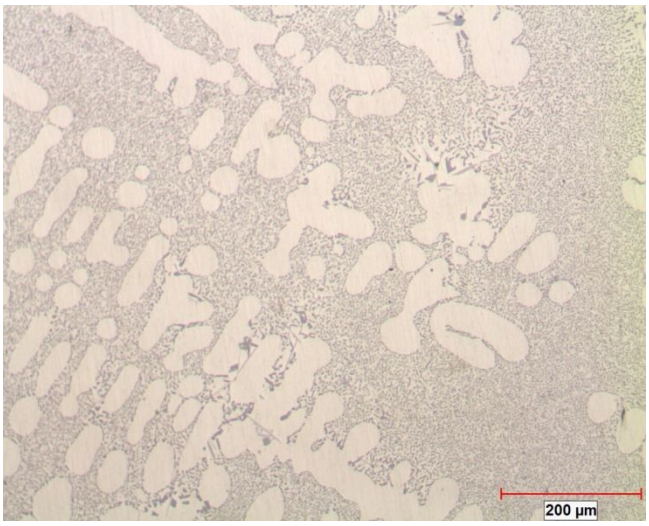
Makroyapı inceleme için alınan numuneler zımparalama işleminden sonra Keller (% 1 hidroflorik asit, % 1,5 hidroklorik asit, % 2,5 nitrik asit) ile dağlanmıştır. İnceleme sonucunda, türbülanslı yapılan, gaz gidermesiz ve filtresiz birinci ve dördüncü dökümlerde porozite oranının türbülsanssız yapılan dökümlere nazaran yüksek olduğu görülmüştür. Bu porozitelerin sayısının da kesit kalınlığı arttıkça arttığı ve aynı şekilde porozite büyüklüklerinin de arttığı görülmüştür. Porozite yoğunluğunu büyükten küçüğe sıralayacak olursak, 1. Döküm > 4. Döküm > 2. Döküm > 3. Döküm şeklinde olduğu görülür.

Taneler homojen olarak dağılmış ve nispeten birbirine yakın büyüklükte olduğu görülmektedir.

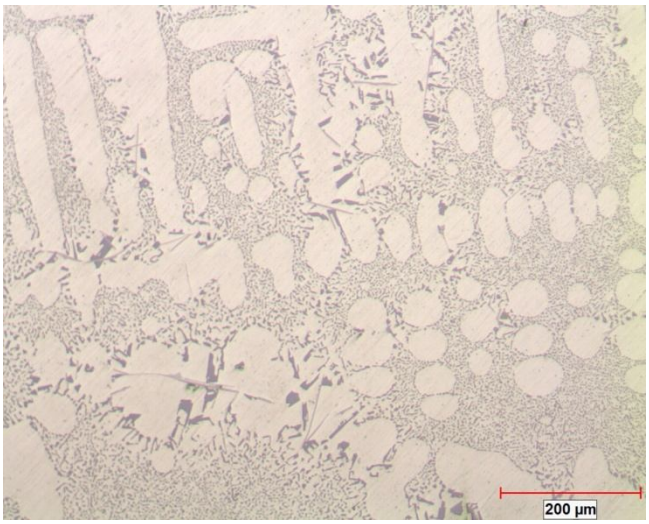
4.3. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

4.3.1. Optik metal mikroskobu incelemeleri

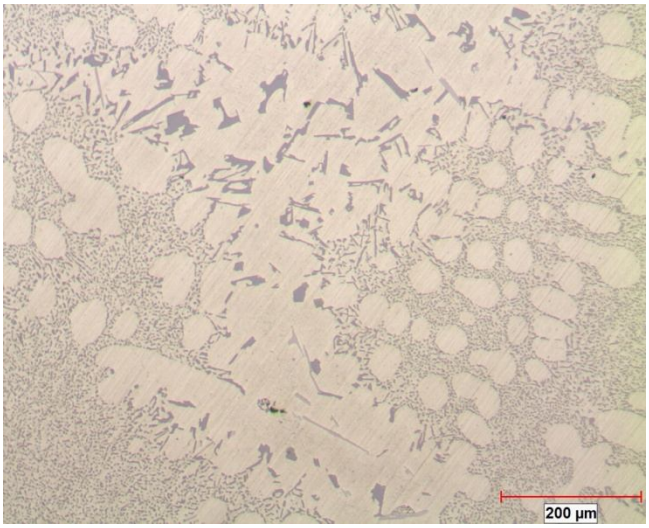
Bu çalışmada yapılan döküm işleminden elde edilen parçalar kesitlerine ayrılarak incelenmiştir. Şekil 4.4'de türbülanslı yapılan birinci dökümün kesitlerinden mikroyapı resimleri verilmiştir. Şekil 4.5'de türbülanssız yapılan ikinci dökümün kesitlerinden mikroyapı resimleri verilmiştir. Şekil 4.6'de türbülanssız yapılan üçüncü dökümün kesitlerinden mikroyapı resimleri verilmiştir. Şekil 4.7'de türbülanslı yapılan dördüncü dökümün kesitlerinden mikroyapı resimleri verilmiştir.



a

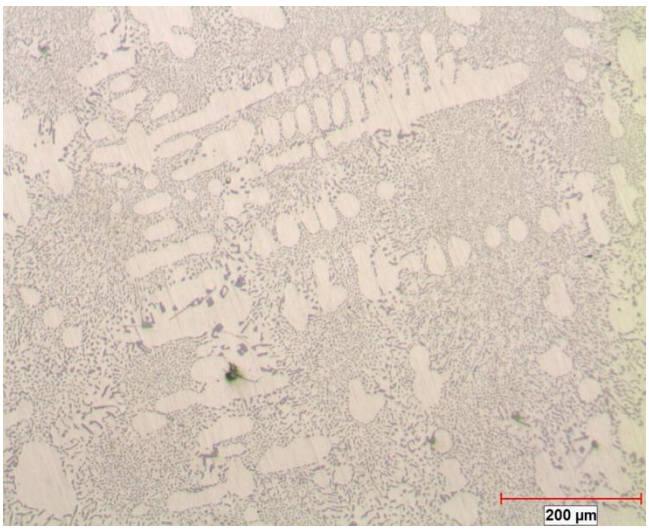


b

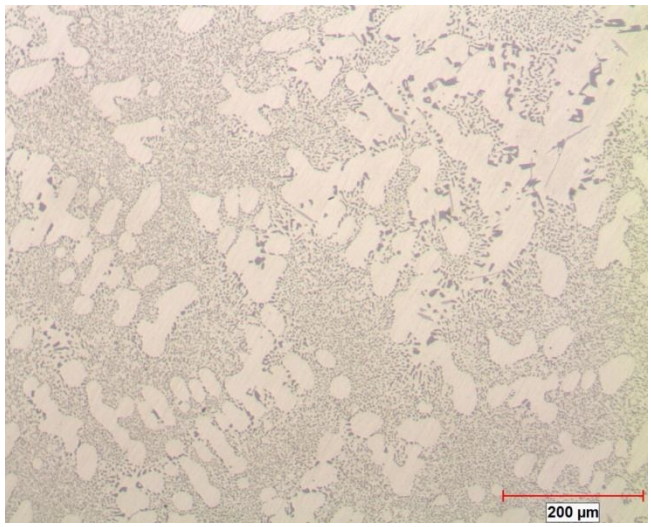


c

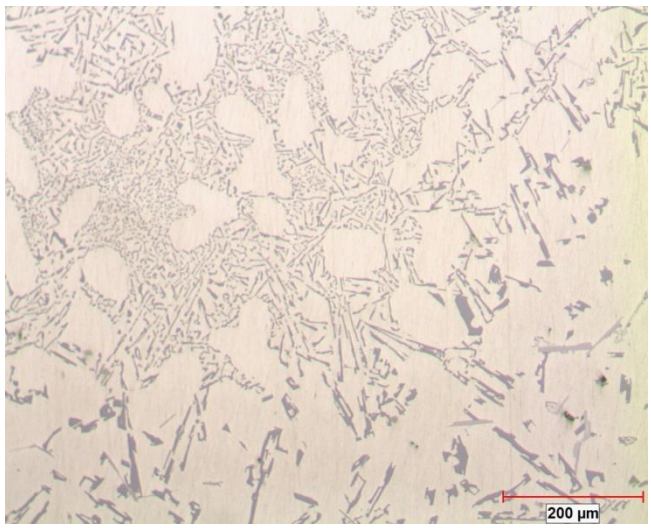
Şekil 4.4. Birinci dökümün mikroyapı resimleri.
a) İnce kesit resmi. b) Orta kesit resmi,
c) Kalın kesit resmi.



a

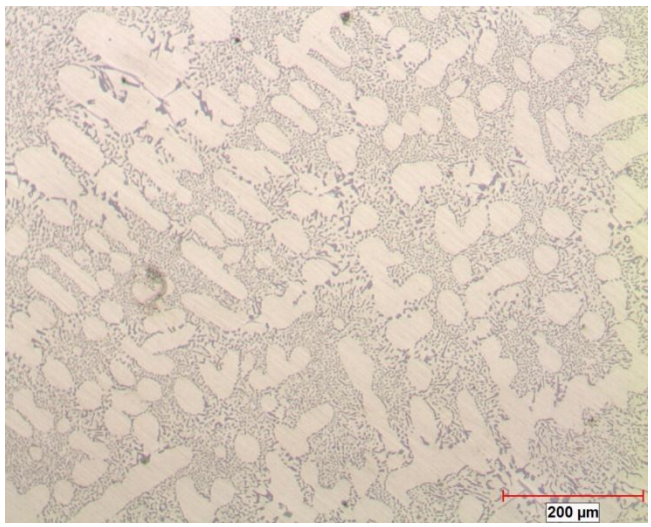


b

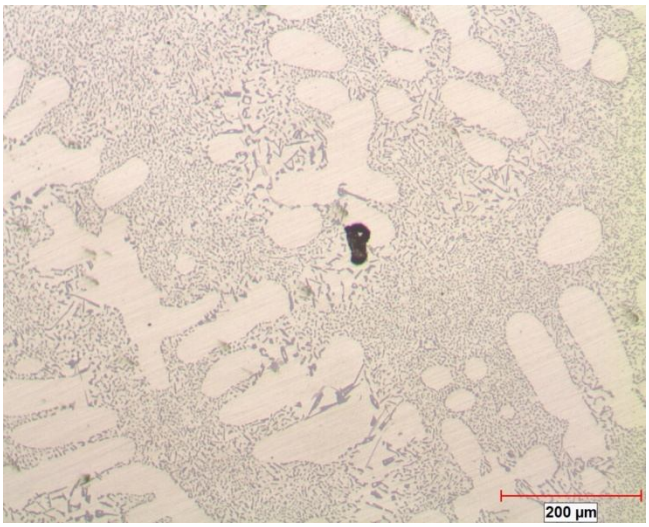


c

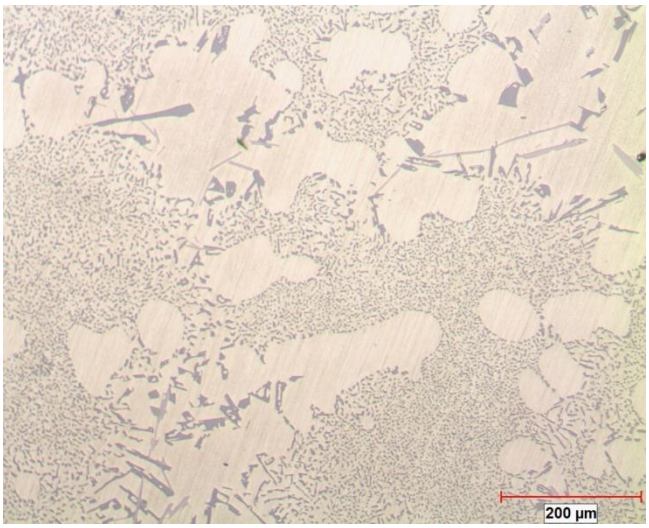
Şekil 4.5. İkinci dökümün mikroyapı resimleri.
a) İnce kesit resmi. b) Orta kesit resmi,
c) Kalın kesit resmi.



a

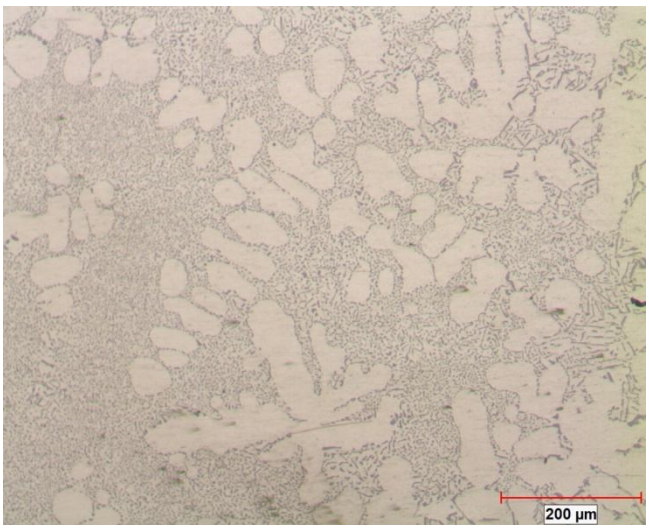


b

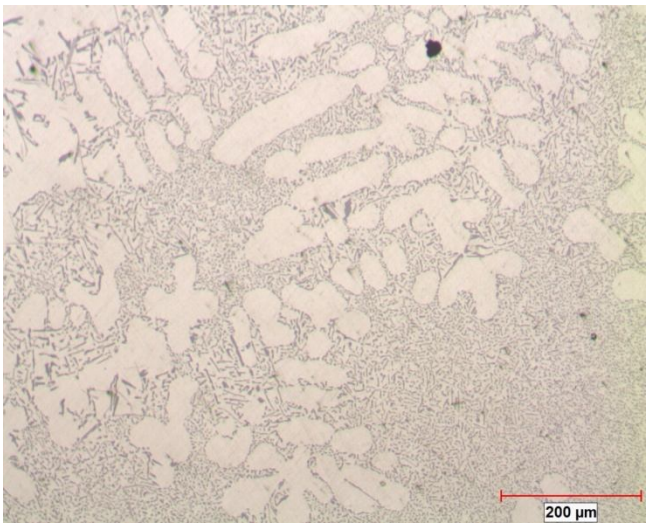


c

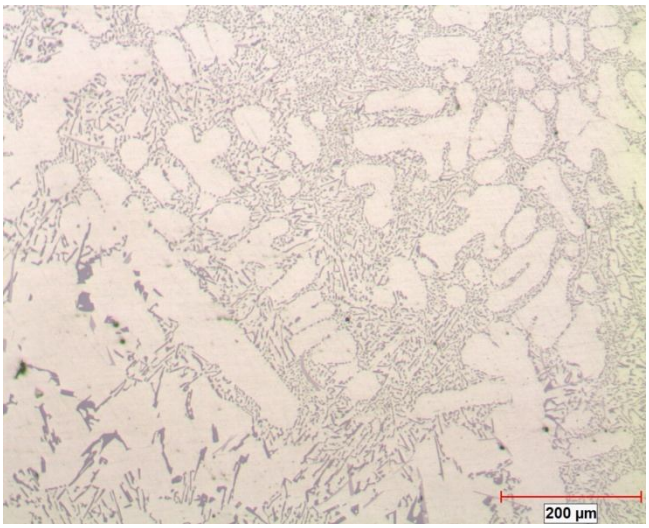
Şekil 4.6. Üçüncü dökümün mikroyapı resimleri.
a) İnce kesit resmi. b) Orta kesit resmi,
c) Kalın kesit resmi.



a



b



c

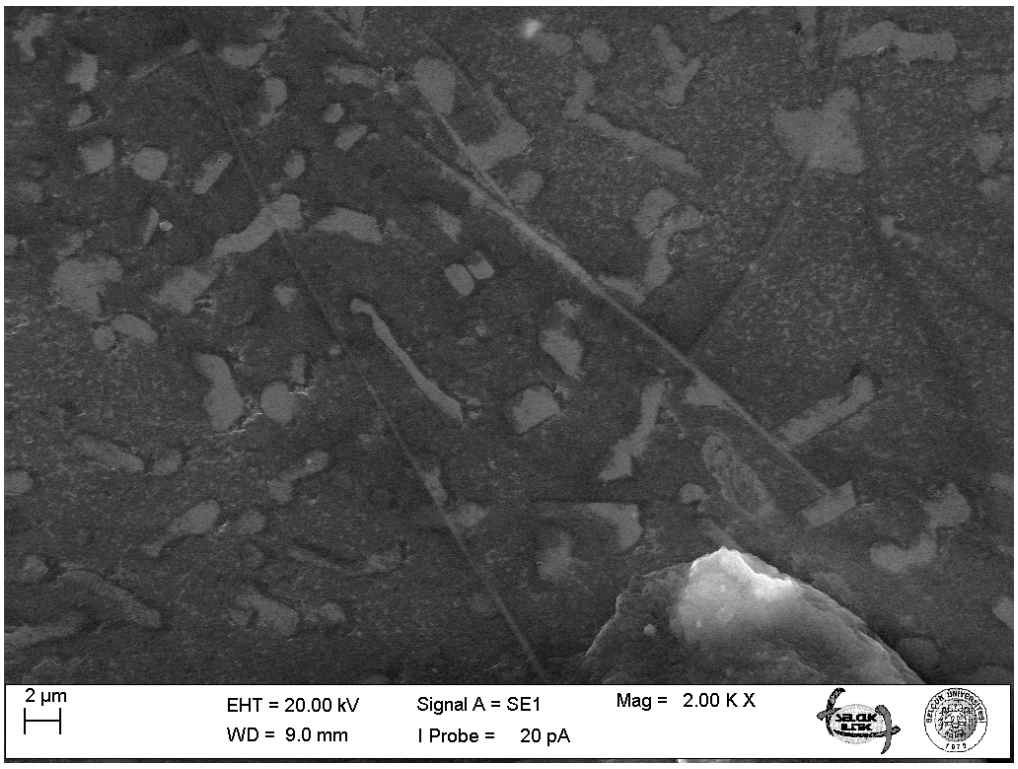
Şekil 4.7. Dördüncü dökümün mikroyapı resimleri.
a) İnce kesit resmi. b) Orta kesit resmi,
c) Kalın kesit resmi.

Faraji ve Katgerman (2009) Ötektik altı alüminyum silisyum alaşımında tane inceltme ve modifikasyonun mikroyapısal analizi çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında % 0,02 Sr ilavesinin α Al üzerinde hafif bir küçültme etkisi gösterdiğini ileri sürmüşlerdir. Sr miktarındaki düşüş modifiye ötektik Si' daki değişiklinde azalmasına sebep olduğunu açıklamışlardır.

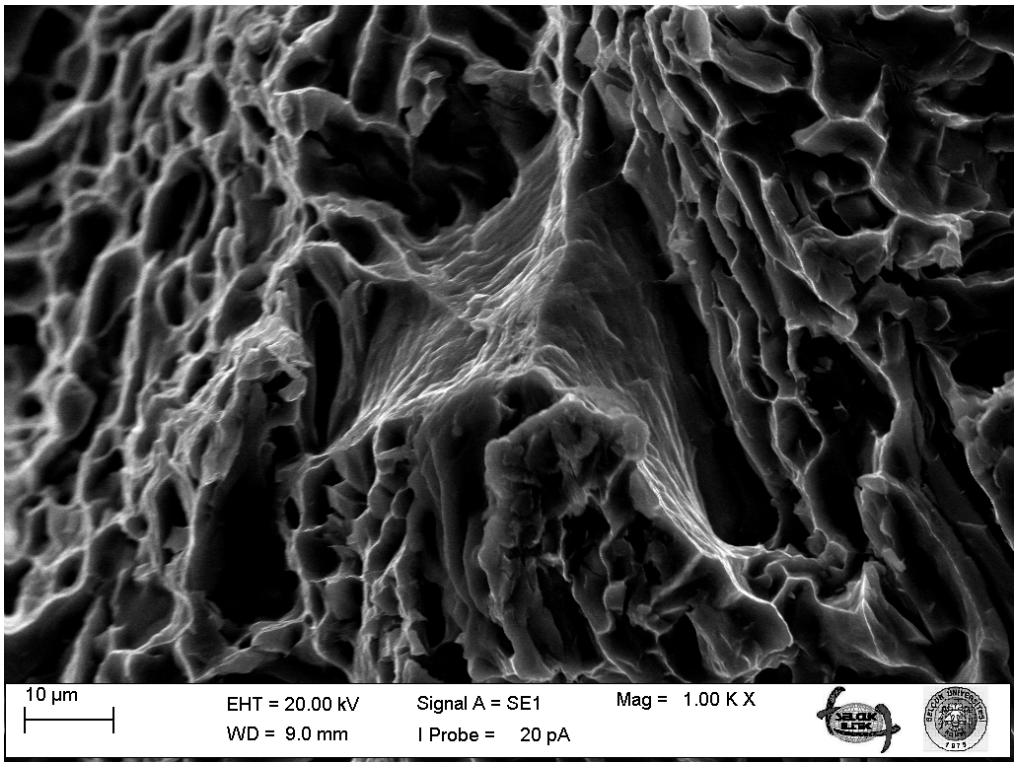
Resimlerden de görüleceği gibi ince kesit bölgelerinde stronsiyumun modifiye etkisi yoğun bir şekilde görülmektedir. Yapıda oluşan ötektik Si ise küçük yapılarda görülmektedir. Orta kesit resminde de modifiyenin ince kesite nazaran biraz daha az olduğu ve ötektik Si'un biraz daha kaba oluştuğu görülmektedir. Kalın kesit de ise modifiye etkisinin diğer iki kesitten de az olduğu ve ötektik Si'un diğer kesitlere

nazaran daha kaba oluştuğu görülmektedir. Bu sonuç Faraji ve Katgermanın çalışmalarında açıkladıkları Sr miktarının ötektik silisyumlara etkisini destekler niteliktedir. Ayrıca kalın kesit de modifiye olmamış Si plakalarını da daha yoğunlukta olduğu söylenebilir. Si plakalarının bazı yerlerde ince bazı yerlerde kalın olmasının sebebinin soğuma hızı ve modifikasyon etkisi olduğu düşünülmektedir. Farklı bir açıdan da şu şekilde açıklanabilir: α, Si'leri itmeye çalışır ve son kalan sıvıda Si daha fazladır. Döküm şartları göz önüne alınarak inceleme yapıldığında, türbülanslı dökümlerde konveksiyon etkisi hissedilmektedir. Dendiritler kopmuş ve homojen dendirit yapısı elde edilememiştir. Türbülanssız dökümlerde daha düzenli yapı elde edilmiş ve konveksiyon etkisi fazla görülmemektedir. Türbülanslı döküme nazaran türbülanssız dökümlerde daha homojen yapı elde edilmiştir.

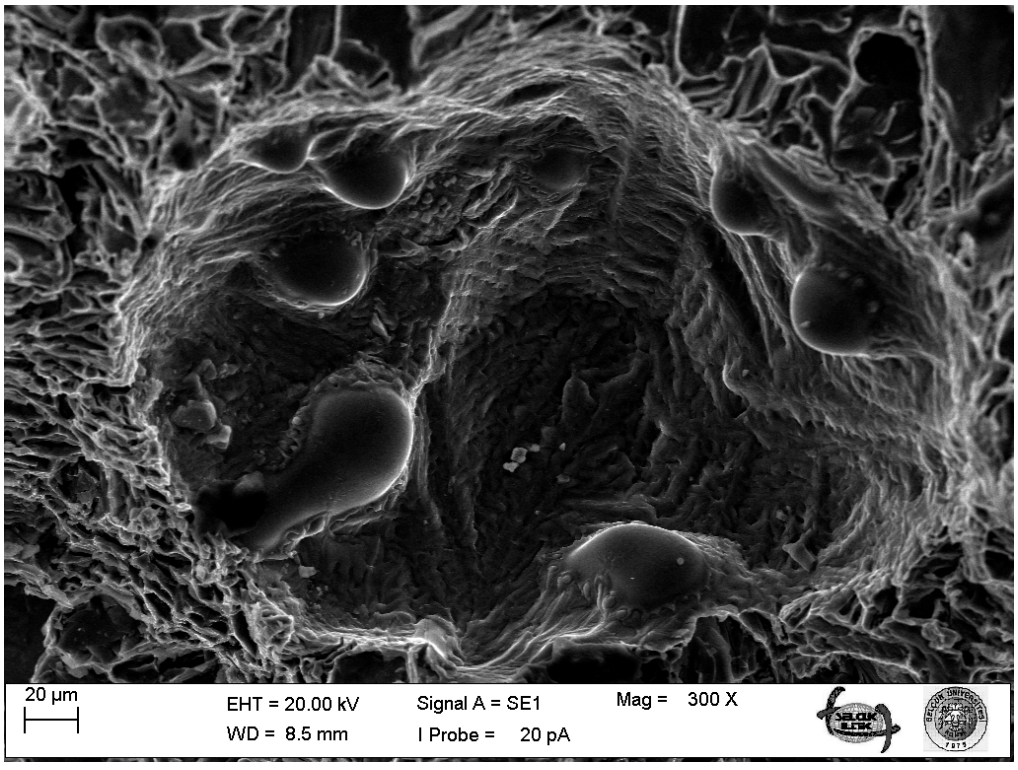
4.3.2. Numunelerin SEM incelemeleri



a



b



c

Şekil 4.8. Mikroyapı resimleri (SEM).
a) Modifiye olmuş bölgelerde mikroyapı görüntüsü, b) Porozite içerisinde oksit tabakası,
c) Kırık yüzeydeki mikro oksit tabakası.

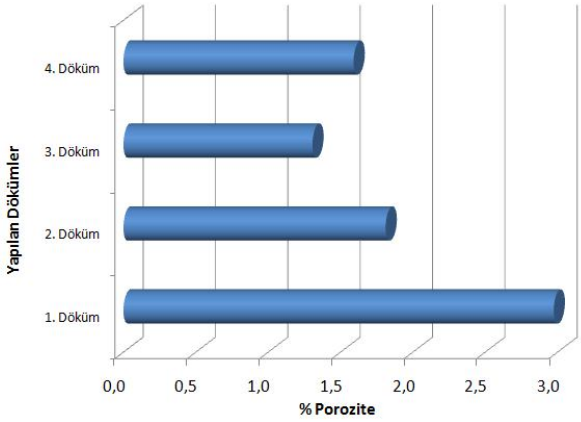
Mikroyapı numuneleri üzerinde yapılan SEM çalışmasından alınan resimlerden örnekler Şekil 4.8'de verilmiştir. Mikroyapı üzerinde oksit tabakalarının ve bifilmlerin varlığı görülmektedir. Genel olarak türbülanslı dökümlerde oksit tabakaları ve bifilmler daha yoğun ve kaba olarak görülmüştür. Türbülanssız dökümlerde ise daha ince ve seyrek görülmüştür. Şekil. 4.8.c. de kabarcık bifilm resmi görülmektedir. Türbülans sırasında bir kabarcık oluşmuş ve o şekilde döküm içinde kalmıştır.

4.4. Mikro Porozite Ölçüm Sonuçları

4.4.1. Hacimsel porozite ölçümü

Tablo 4.1. Hacimsel porozite ölçüm değerleri

1. DÖKÜM	Kuru Ağırlık (gr)	Yaş Ağırlık (gr)	Yoğunluk (kg/dm^3)	Suyun Yoğunluğu (kg/dm^3)	% Porozite	% Porozite Ortalama
4. KESİT	26,267	16,1435	2,5947	0,9982	3,0045	2,9740
BESLEYİCİ	67,5531	41,534	2,5963	0,9982	2,9435	
2. DÖKÜM	Kuru Ağırlık (gr)	Yaş Ağırlık (gr)	Yoğunluk (kg/dm^3)	Suyun Yoğunluğu (kg/dm^3)	% Porozite	% Porozite Ortalama
4. KESİT	27,3409	16,9195	2,6235	0,9982	1,9269	1,8121
BESLEYİCİ	58,0712	35,9883	2,6297	0,9982	1,6972	
3. DÖKÜM	Kuru Ağırlık (gr)	Yaş Ağırlık (gr)	Yoğunluk (kg/dm^3)	Suyun Yoğunluğu (kg/dm^3)	% Porozite	% Porozite Ortalama
4. KESİT	23,8526	14,8177	2,6401	0,9982	1,3106	1,3063
BESLEYİCİ	58,8231	36,544	2,6403	0,9982	1,3020	
4. DÖKÜM	Kuru Ağırlık (gr)	Yaş Ağırlık (gr)	Yoğunluk (kg/dm^3)	Suyun Yoğunluğu (kg/dm^3)	% Porozite	% Porozite Ortalama
4. KESİT	22,4993	13,9508	2,6320	0,9982	1,6126	1,5909
BESLEYİCİ	56,0939	34,7907	2,6331	0,9982	1,5692	



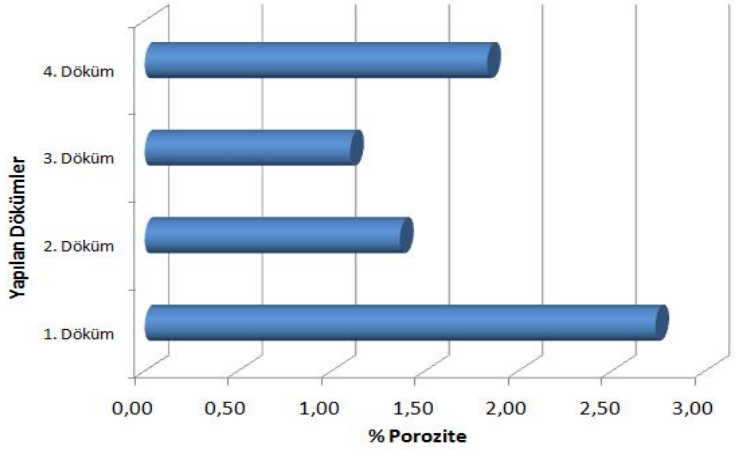
Şekil 4.9. Arşimet hesabına göre porozite sonuçları.

Arşimet hesabına göre porozite ölçüm sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir. Sonuçlarda türbülanslı yapılan dökümlerin porozite oranları yüksek, türbülanssız yapılan dökümlerin de ise porozite oranları düşük olduğu görülmüştür. Bu da türbülans sebebiyle sıvı metal içerisinde olan gaz oranının artması sonucu ortaya çıkmıştır. Türbülanssız dökümlerde gaz giderme yapılmak suretiyle sıvı metal içerisinde var olan gazlar uzaklaştırılmıştır. Filtre kullanılarak yolluk tasarımının sebep olduğu türbülans etkisi azaltılmıştır. Türbülanslı dökümlerde döküm kalitesinin düşük olduğu gözlenmiştir.

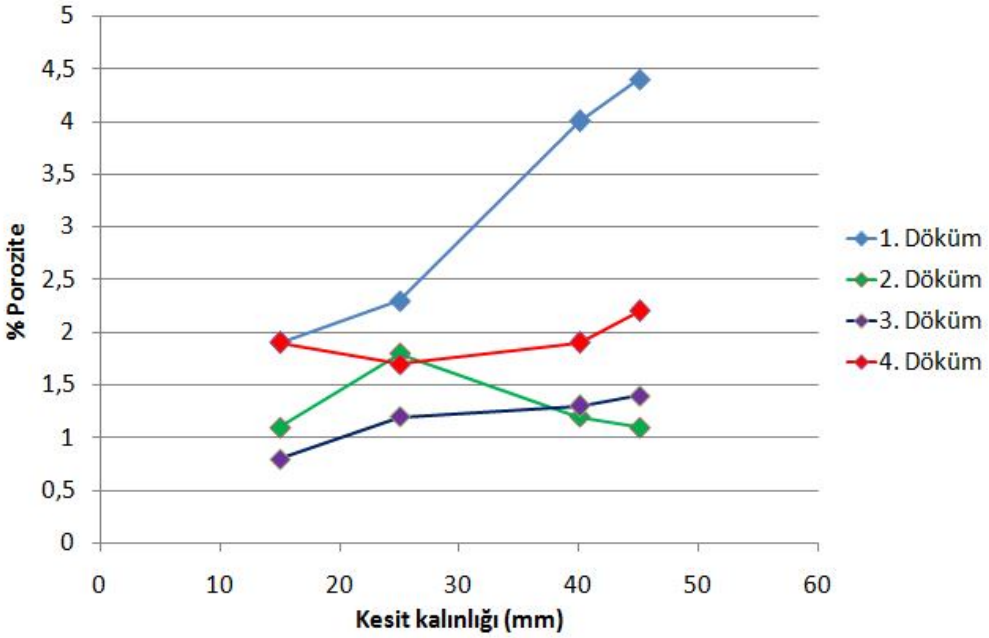
4.4.2. Alansal porozite ölçümü

Tablo 4.2. Mikroskop ile bilgisayar ortamında alansal porozite ölçümü.

Döküm No	Kesit No	% Porozite	ORTALAMA
1	15	1,9	3,15
1	25	2,3	
1	40	4	
1	45	4,4	
2	15	1,1	1,3
2	25	1,8	
2	40	1,2	
2	45	1,1	
3	15	0,8	1,175
3	25	1,2	
3	40	1,3	
3	45	1,4	
4	15	1,9	1,925
4	25	1,7	
4	40	1,9	
4	45	2,2	



Şekil 4.10. Mikroskopta alan hesabına göre porozite sonuçları.



Şekil 4.11. Alansal porozite ölçümünde döküm kesitlerinin porozite oranlarının karşılaştırılması.

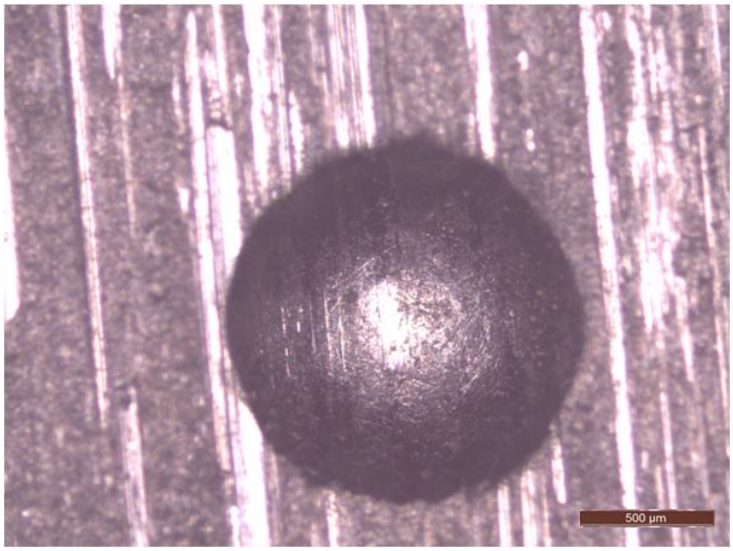
Ömer SAVAŞ (2005) yüksek lisans tezinde alüminyum silisyum alaşımlarının porozite oranlarını ölçmüştür. Elde ettiği verilerde porozite oranlarının % 0,07 ile % 1,51 arasında değiştiğini açıklamıştır.

Murat ÇOLAK (2009) yaptığı çalışmada Etial 160 alaşımında tane inceltmenin porozite oluşumuna etkisini araştırmıştır. Tane inceltme işlemi uygulanmamış alaşımlarda porozite oranını maksimum % 17 bulurken tane inceltme uygulanmış alaşımlarda maksimum % 5 olduğunu görmüştür. Tane inceltmenin porozite oranında % 10 kadar bir fark ortaya koyduğunu açıklamıştır.

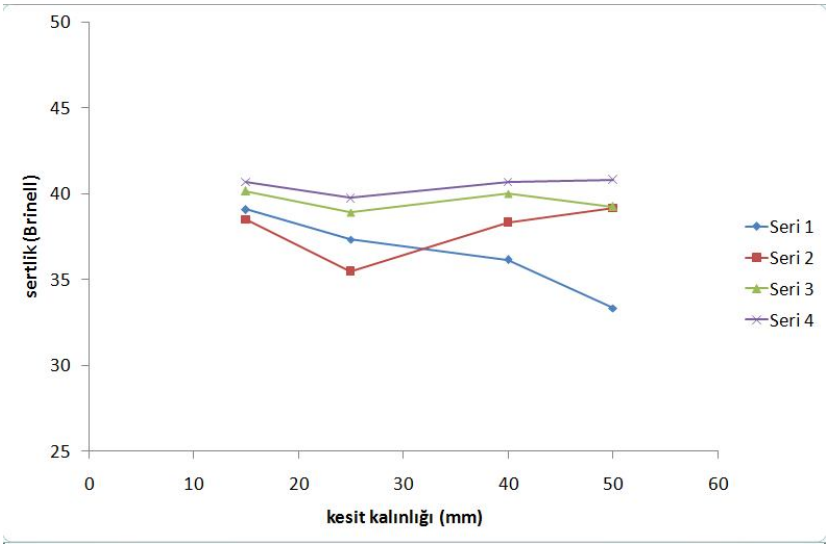
Arşimet hesabına göre alınan sonuçlar mikroskopta alınan sonuçları doğrular niteliktedir. Şekil 4.10'de türbülanslı ve türbülanssız döküm parçalarının porozite oranları görülmektedir. Sonuç olarak türbülanslı dökümlerde porozite oranları yüksek türbülanssız dökümlerde ise düşük bulunmuştur. Çalışmamızda elde ettiğimiz verilerin türbülans göre değişimi Ömer SAVAŞ'ın sonuçlarıyla nispeten uyumludur. Mikroskop ortamında yapılan inceleme sonuçlarındaki oranlar Arşimet hesabına göre bulunan oranlarla birbirine çok yakın değerlerdedir. Bu da bize döküm malzemesinde porozite yoğunluğunun homojen dağıldığını göstermiştir.

4.5. Mekanik Test Sonuçları

4.5.1. Sertlik testi sonuçları



Şekil 4.12. Sertlik alınan bölgedeki iz resmi.



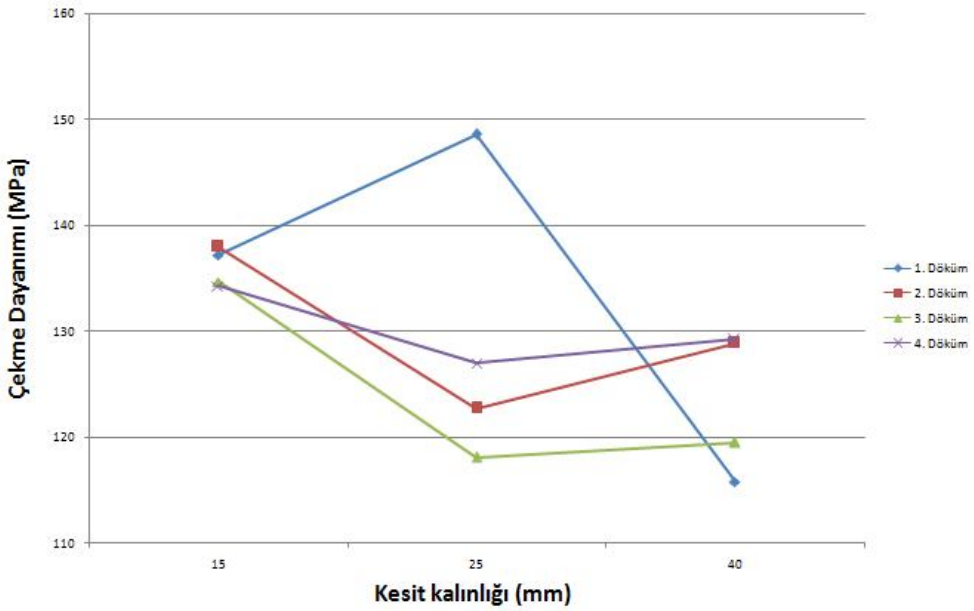
Şekil 4.13. Sertlik testi sonuçlarının kesit kalınlığına göre karşılaştırılması.

Sertlik test sonuçlarında alınan iz resmi Şekil 4.12'de, kesit kalınlığına göre sertlik değerleri de Şekil 4.13'de verilmiştir. Türbülanslı dökümlerde sertlik test sonuçları türbülanssız dökümlere nazaran daha düşüktür. Sonuçlar beklenildiği gibi türbülanssız dökümlerde yüksek çıkmıştır. Bu da bize türbülanssız dökümlerin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğunu göstermektedir.

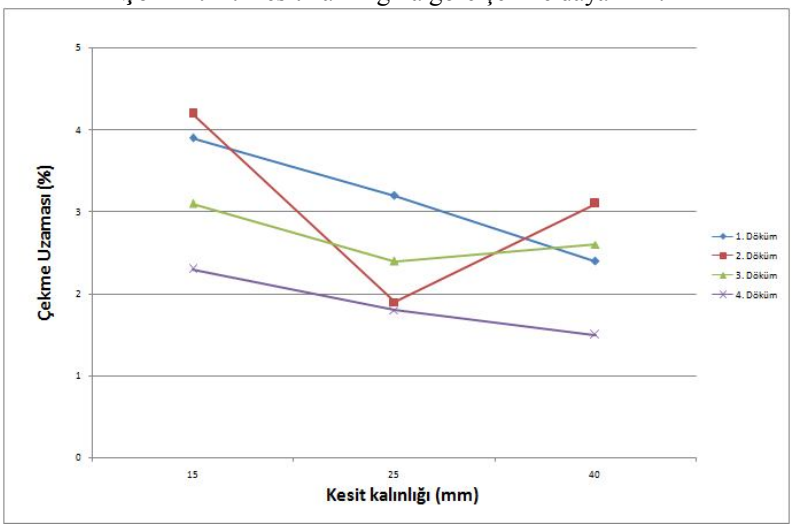
4.5.2. Çekme testi sonuçları

Tablo 4.3. Çekme testi sonuçları.

	Kesit Kalınlığı [mm]	**Çekme Gerilmesi** [MPa]	**Kopma Uzaması** [%]
1. Döküm	15	137,2	3,9
	25	148,6	3,2
	40	115,8	2,4
2. Döküm	15	138	4,2
	25	122,7	1,9
	40	128,9	3,1
3. Döküm	15	134,7	3,1
	25	118,1	2,4
	40	119,5	2,6
4. Döküm	15	134,3	2,3
	25	127	1,8
	40	129,2	1,5



Şekil 4.14. Kesit kalınlığına göre çekme dayanımı.



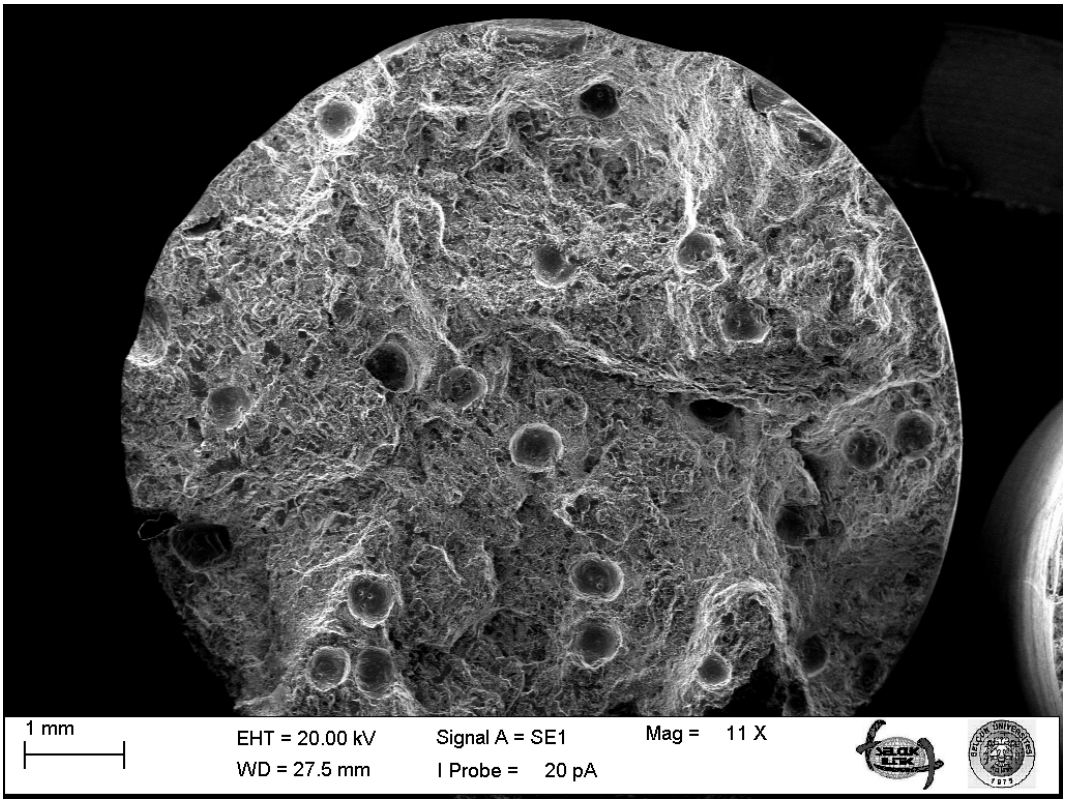
Şekil 4.15. Kesit kalınlığına göre çekme uzaması.

Dışpınar ve arkadaşları (2009) Al ve alaşımlarının dökümü sırasında gaz giderme işleminin döküm kalitesi üzerine etkilerini çalışmışlardır. Gaz giderme sırasında gerekli optimizasyon yapılmazsa gaz gidermek yerine sıvı metal kalitesini düşüren bifilm içeriğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Artan bifilm indeksi ile mekanik özelliklerin düştüğünü göstermişlerdir.

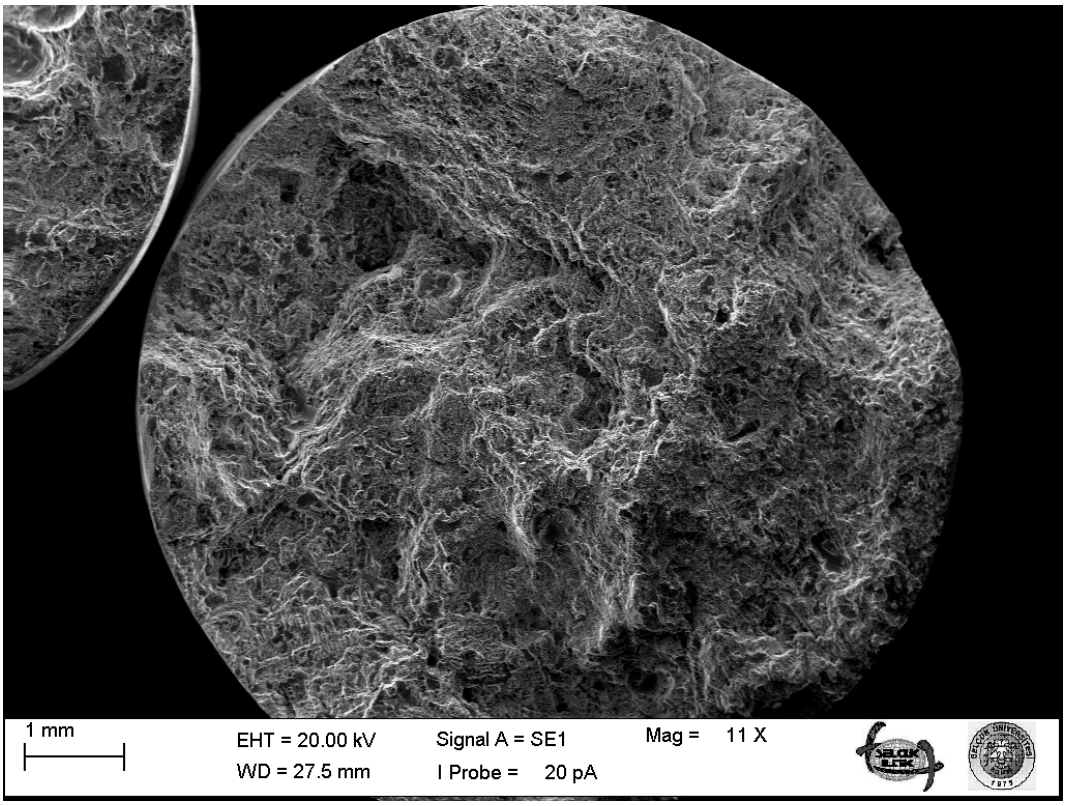
Çekme test sonuçları Tablo 4.3 de verilmiştir. Kesit kalınlığına göre çekme dayanımı Şekil 4.14'de çekme uzaması da Şekil 4.15'de verilmiştir. Bu veriler ışığında türbülanslı dökümlerin yüzde uzama miktarları düşük türbülanssız dökümlerin ise türbülanslıya göre nispeten biraz yüksektir. Türbülanslı döküm numunelerinin türbülanssız döküm numunelerine nazaran daha gevrek kırılma gösterdiği

görülmektedir. Bifilm indeks sonuçlarıyla ilişkilendirilecek olursak bifilm indeksi 27 mm olan dökümde ince kesit için % uzama değeri 3,1 iken bifilm indeksi 65 mm olan dökümün ince kesitinde bu değer % 2,3 olarak bulunmuştur. Bu sonuç Dışpınar ve arkadaşlarının gözlemleriyle uyumludur.

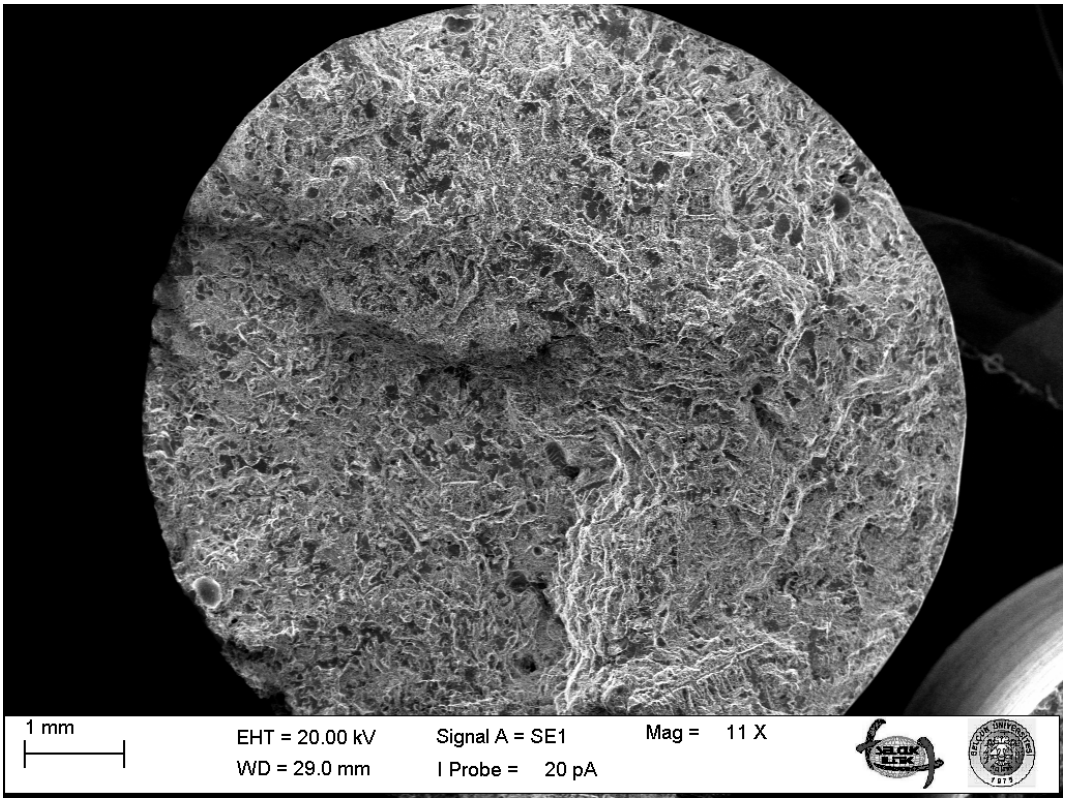
4.5.3. Kırık yüzeylerin SEM incelemeleri



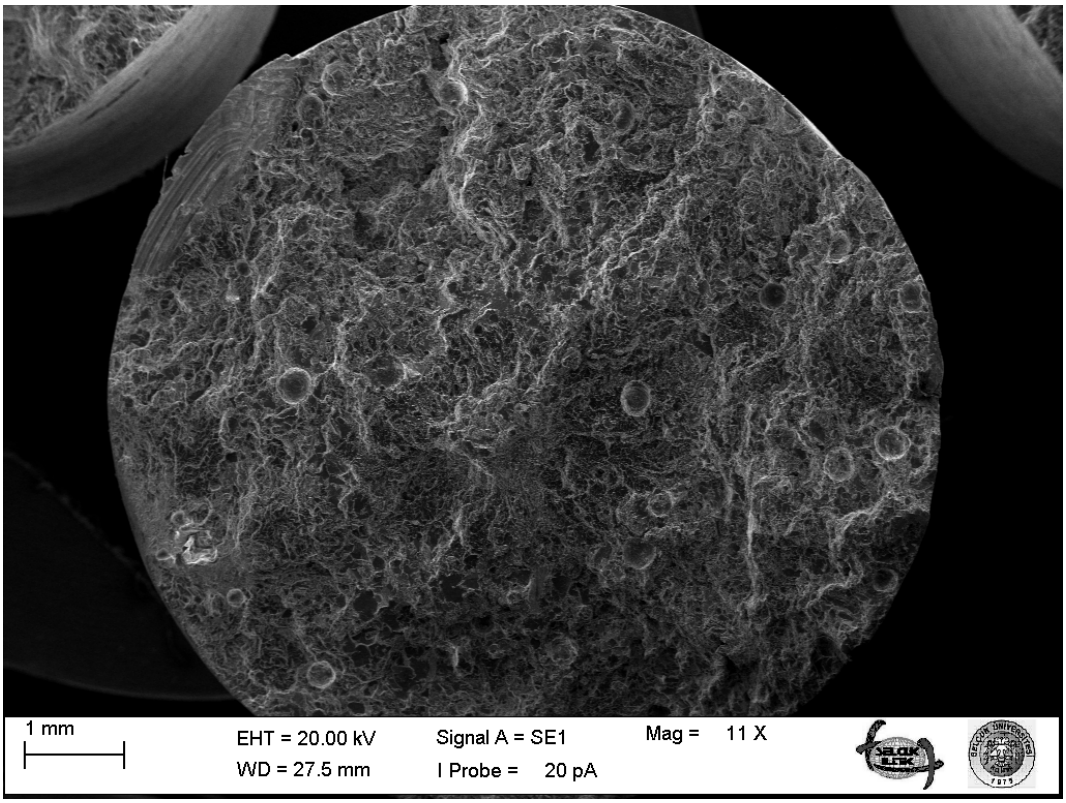
a


1 mm
EHT = 20.00 kV
WD = 27.5 mm
Signal A = SE1
I Probe = 20 pA
Mag = 11 X

b

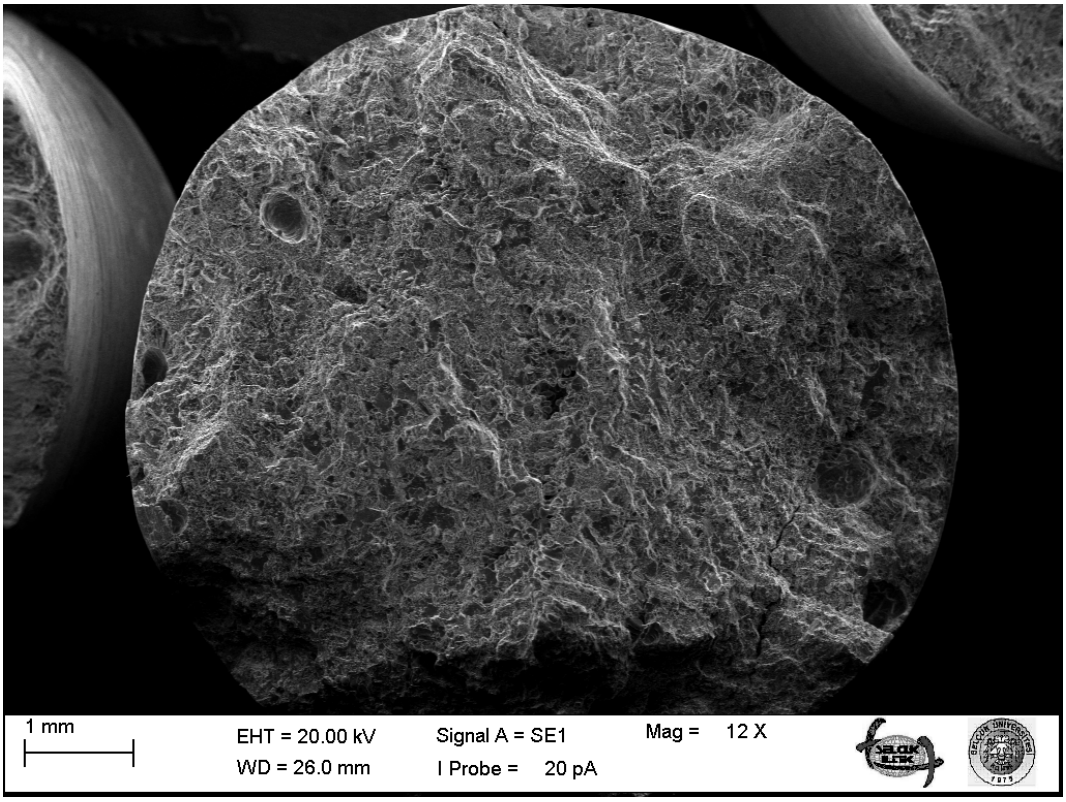

1 mm
EHT = 20.00 kV
WD = 29.0 mm
Signal A = SE1
I Probe = 20 pA
Mag = 11 X

c

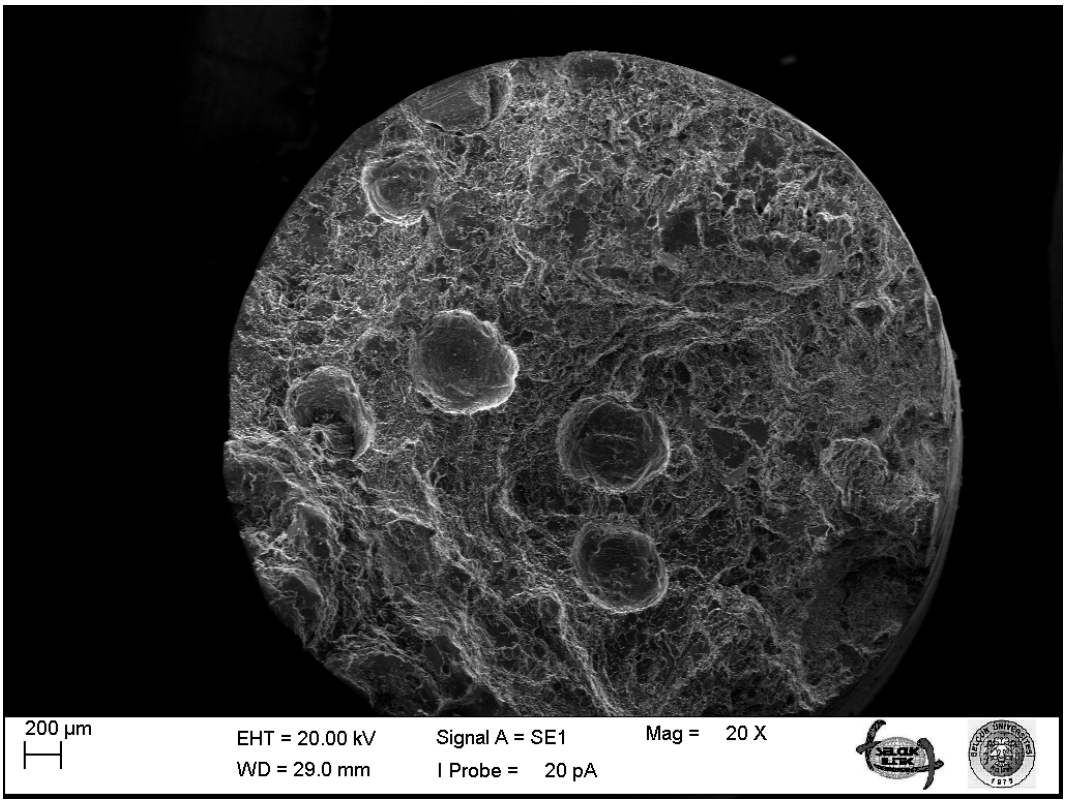


d

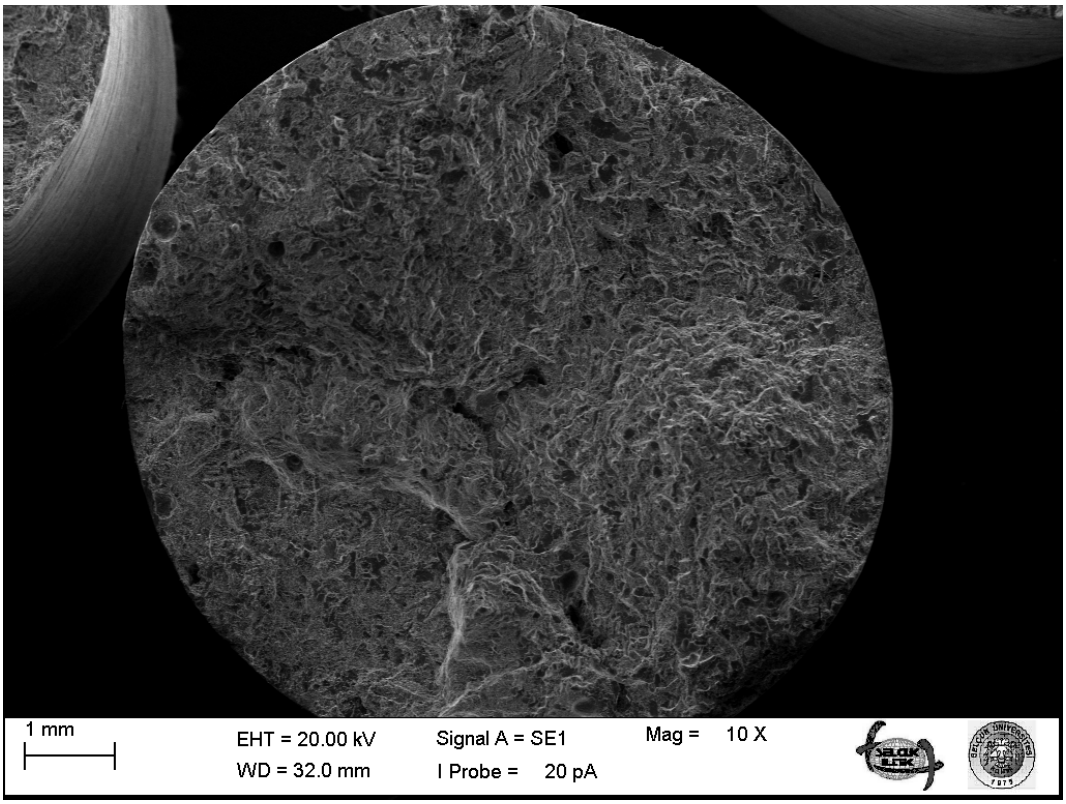
Şekil 4.16. İnce kesitlerin kırık yüzey görüntüleri.
a) Birinci döküm, b) İkinci döküm,
c) Üçüncü döküm, d) Dördüncü döküm.



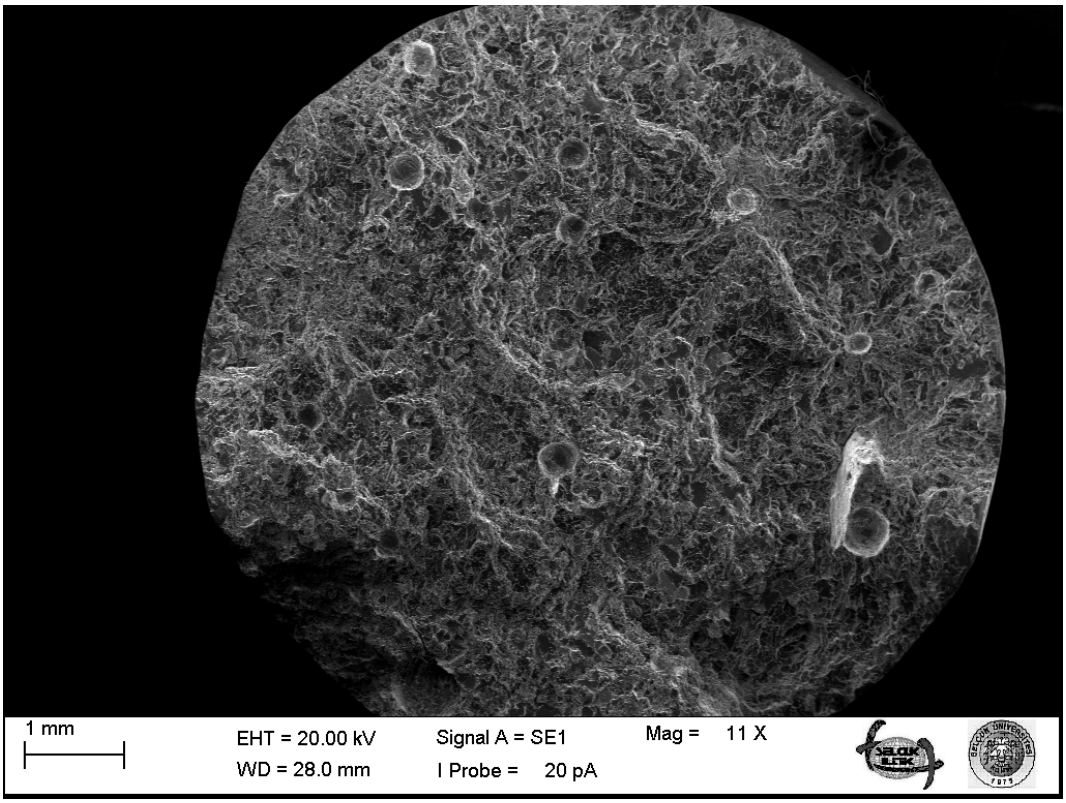
a


200 µm
EHT = 20.00 kV
WD = 29.0 mm
Signal A = SE1
I Probe = 20 pA
Mag = 20 X

b

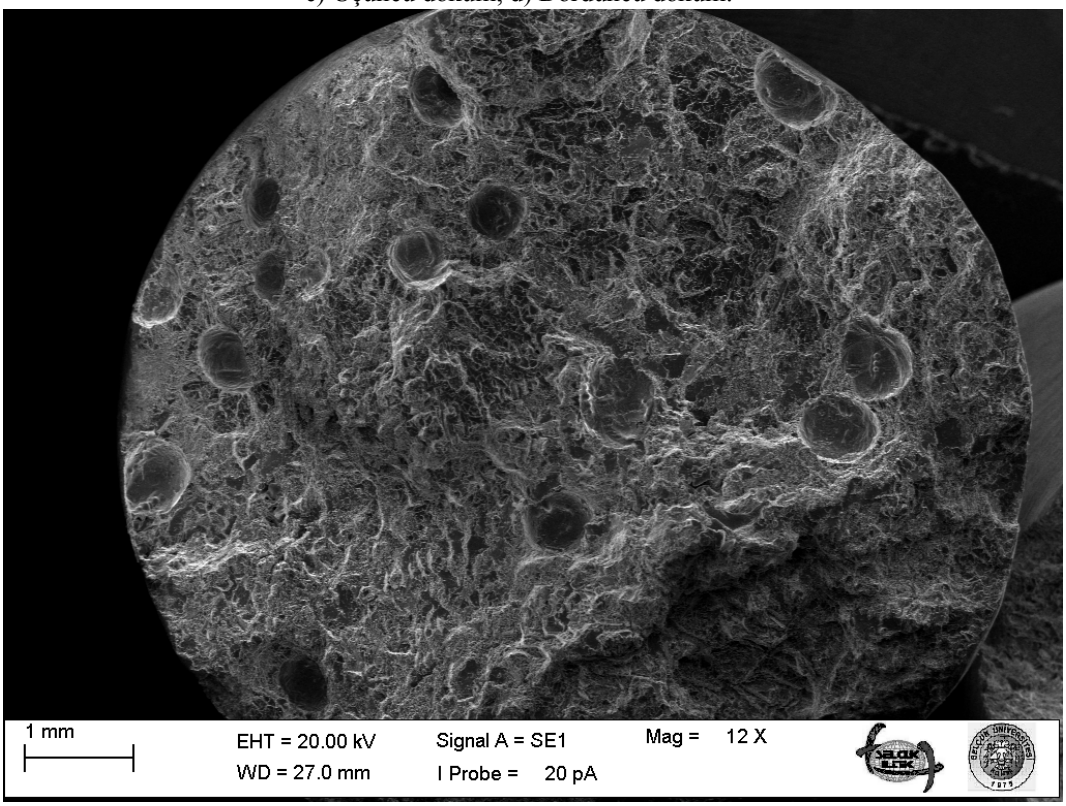

1 mm
EHT = 20.00 kV
WD = 32.0 mm
Signal A = SE1
I Probe = 20 pA
Mag = 10 X

c

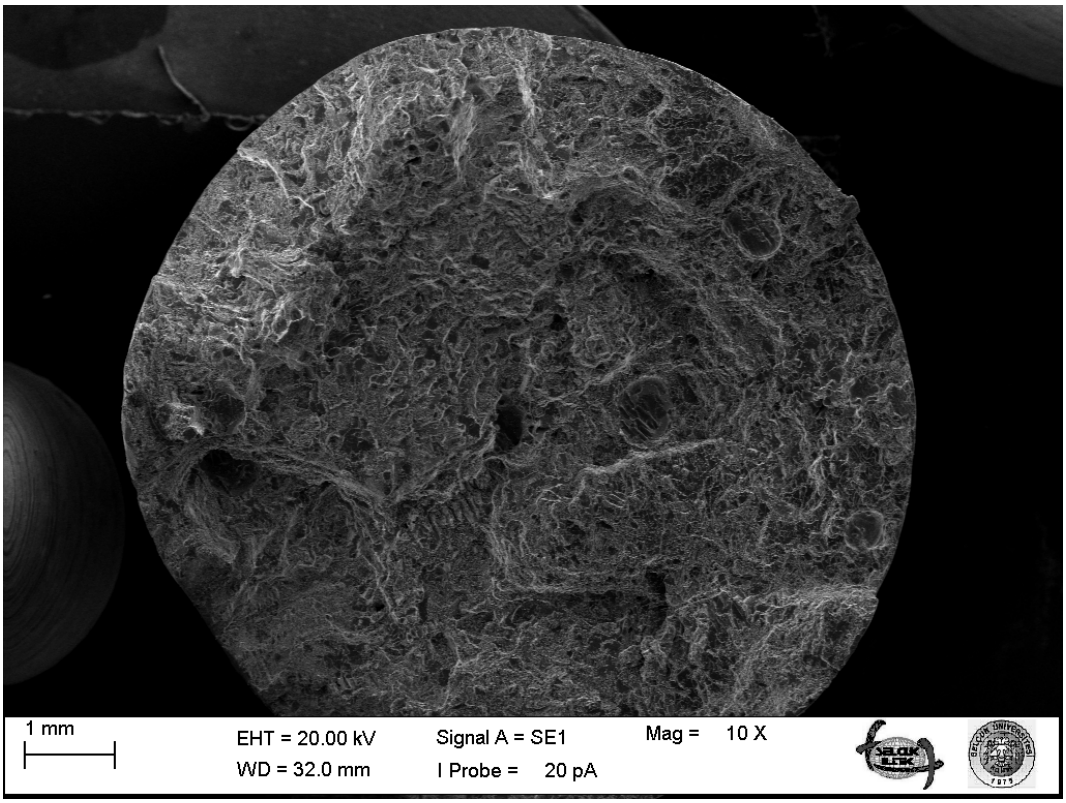


d

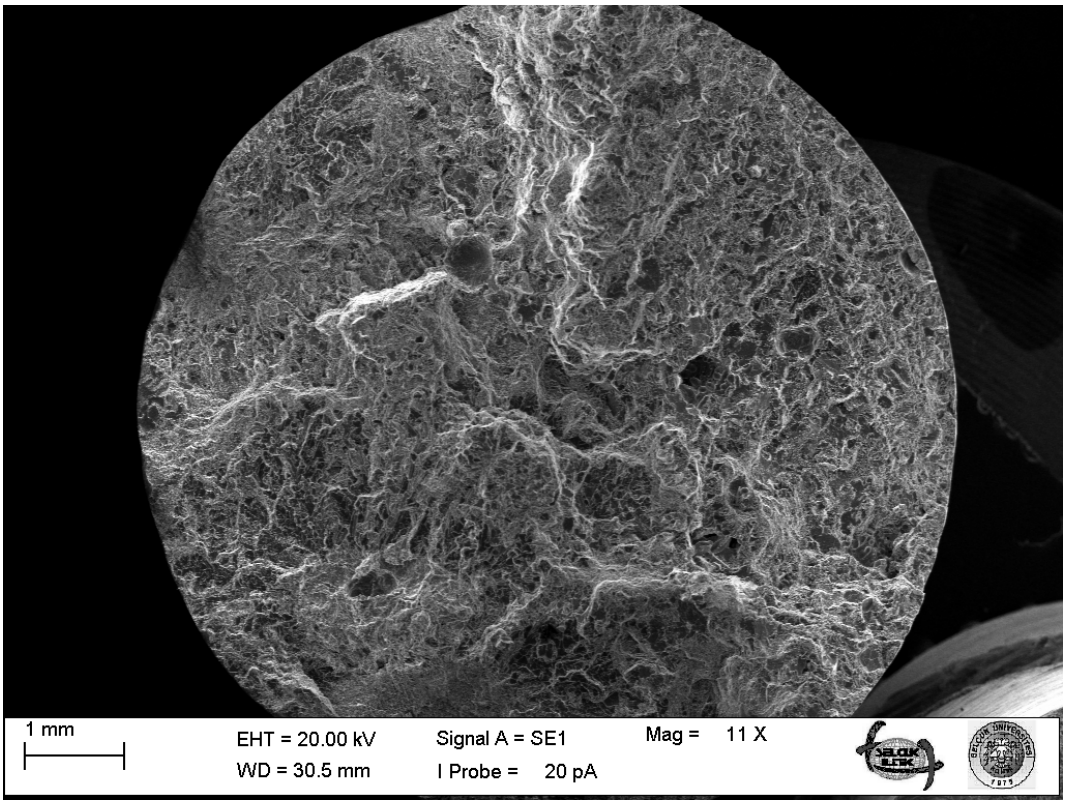
Şekil 4.17. Orta kesitlerin kırık yüzey görüntüleri.
a) Birinci döküm, b) İkinci döküm,
c) Üçüncü döküm, d) Dördüncü döküm.



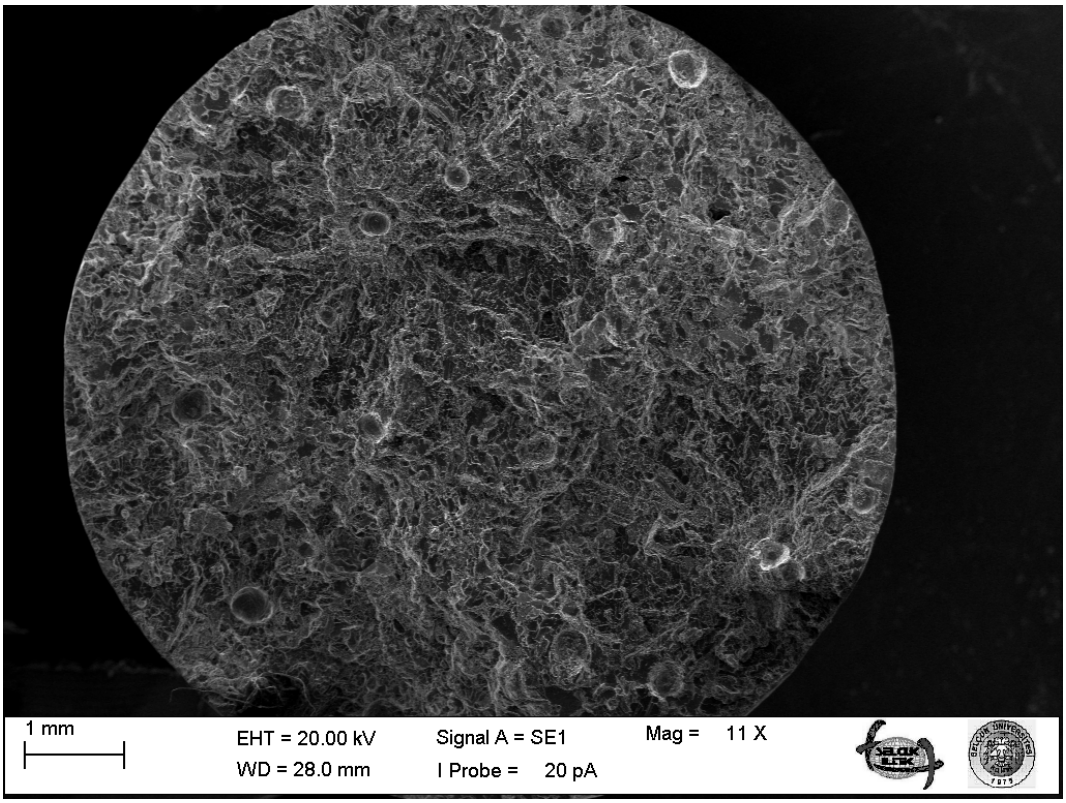
a


1 mm
EHT = 20.00 kV
WD = 32.0 mm
Signal A = SE1
I Probe = 20 pA
Mag = 10 X

b


1 mm
EHT = 20.00 kV
WD = 30.5 mm
Signal A = SE1
I Probe = 20 pA
Mag = 11 X

c



d

Şekil 4.18. Kalın kesitlerin kırık yüzey görüntüleri.
a) Birinci döküm, b) İkinci döküm,
c) Üçüncü döküm, d) Dördüncü döküm.

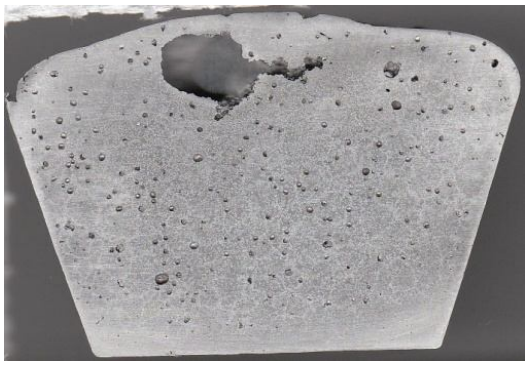
Yapılan çekme test numunelerinin kırık yüzeylerinin SEM resimleri Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'da verilmiştir. Kırık yüzeylerde poroziteler görülmektedir. Türbülanslı yapılan birinci ve dördüncü dökümde kırık yüzeylerde poroziteler fazla olup gevrek kırılma meydana gelmiştir. Türbülanssız yapılan ikinci ve üçüncü dökümlerde ise kırık yüzeylerde poroziteler az ve küçük boyutlarda oluşmuş olup daha sünek bir kırılma meydana gelmiştir. Porozite yoğunluklarının birinci döküm (türbülanslı) ve dördüncü döküm (türbülanslı)'lerde ikinci döküm (türbülanssız) ve üçüncü döküme (türbülanssız) nazaran daha fazla olduğu görülmektedir.

4.6. Döküm Kalitesinin Belirlenmesi



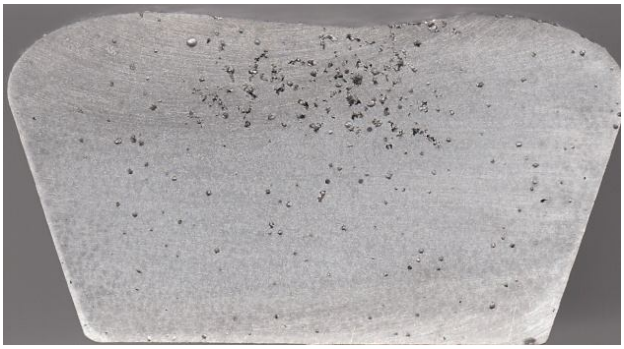
a





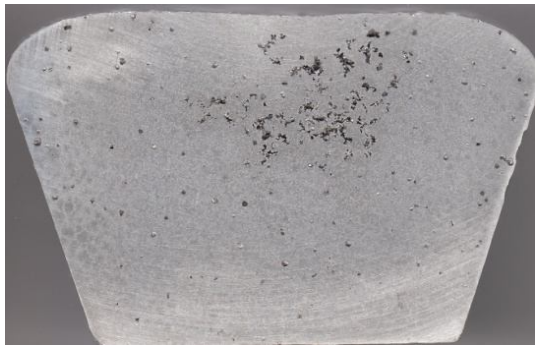
b c

Şekil 4.19. Birinci dökümden alınan RPT numuneleri.
a) ilk alınan numune, b) ikinci alınan numune, c) üçüncü alınan numune.



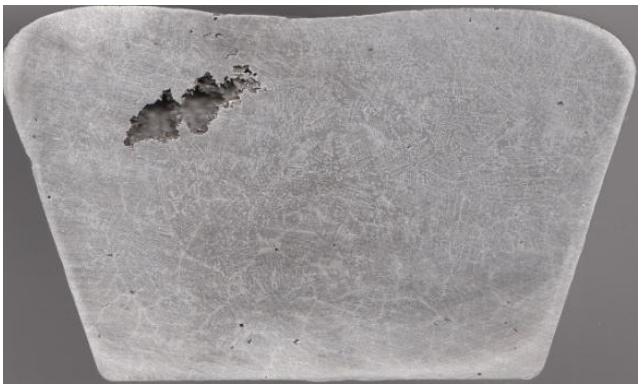
a





b c

Şekil 4.20. İkinci dökümden alınan RPT numuneleri.
a) ilk alınan numune, b) ikinci alınan numune, c) üçüncü alınan numune.

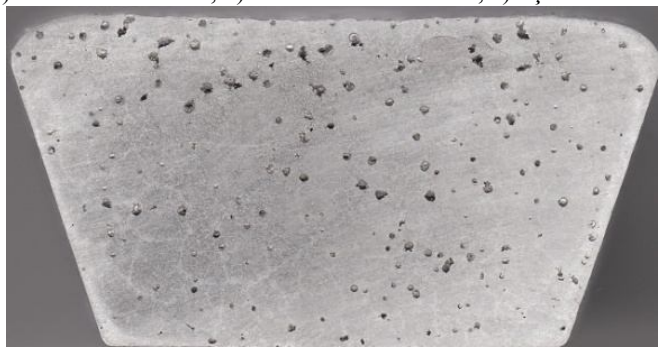


a



b c

Şekil 4.21. Üçüncü dökümden alınan RPT numuneleri.
a) ilk alınan numune, b) ikinci alınan numune, c) üçüncü alınan numune.



a



b c

Şekil 4.22. Dördüncü dökümden alınan RPT numuneleri.
a) İlk alınan numune, b) İkinci alınan numune, c) Üçüncü alınan numune.

Dışpınar ve Campbell (2009) Al ve alaşımlarının kalitesini belirlemek için vakum altında katılaştırma testini kullanmışlardır. Bu test yönteminden bir kalite

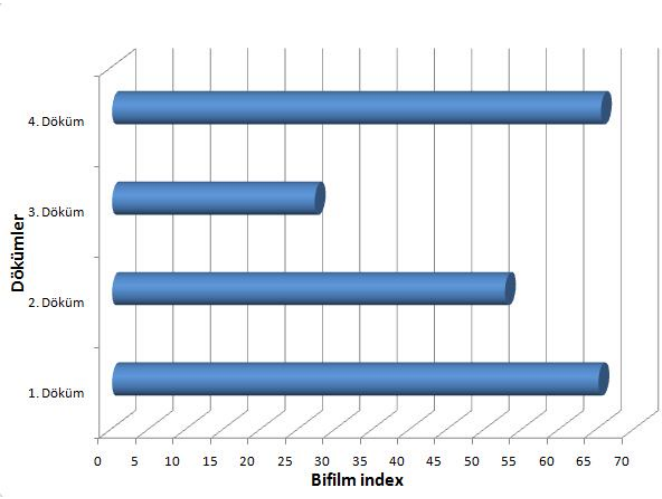
indeksi ileri sürmüşler ve buna da "bifilm indeksi" adını vermişlerdir. İlk defa Al alaşımlarında hidrojenin porozite prosesinde gerçek kaynak değil sadece bir katılımcı olduğunu ve havanın hidrojenle birlikte poroziteyi oluşturduğunun kanıtını göstermişlerdir.

Döküm işleminden önce ergitilen sıvı metalin içersindeki çözünmüş halde bulunan hidrojen gazının temizlenmesi amacıyla sıvı alaşımı azot gazı ile yıkama işleminin nasıl yapıldığı deneysel çalışmalar bölümünde anlatılmıştı. Gaz giderme işleminin ne kadar başarılı olduğu ve sıvı metalin kalitesini tespit etmek için RPT numuneleri alındı. Şekil 4.19, 4.20, 4.21, 4.22'de farklı gaz oranlarına sahip RPT numuneleri görülmektedir. RPT cihazındaki vakum nedeniyle döküm içinde kalan gaz boşlukları büyür. Şekildeki numuneleri incelediğimizde sıvı metal kalitesi iyi olmayan ve içerisinde gaz miktarı fazla olan numuneler kek gibi kabarmış bir görüntü vermektedir. Yüzeyinde kabarıklık olmayıp bir miktar içeri doğru çekme yapan numune sıvı metalin kalitesinin dökülebilir seviyede olduğuna işaret etmektedir.

Sıvı metal kalitesini resimlerden genel olarak belirleyebileceğimiz gibi RPT numunelerindeki porozite oranları karşılaştırılarak da daha net bir bilgi elde edilebilir. Bu bilgiyi elde etmek için bifilm indeksi yapılır. Her numune ortadan kesildikten sonra zımpara ve parlatma işlemlerine tabi tutulur. Temiz bir yüzey elde edildikten sonra bu yüzeyler tarayıcı yardımıyla bilgisayara resim olarak atılır. Bilgisayar ortamında programlar yardımıyla temiz yüzeyde görülen porozitelerin uzunlukları mm olarak hesaplanır. Hesaplanmış değerler Tablo 4.4 de verilmiştir.

Tablo 4.4. RPT numunelerinin bifilm indeks sonuçları.

	Bifilm İndeksi [mm]			
Döküm	**1. Numune**	**2. Numune**	**3. Numune**	**Ortalama**
1. Döküm	76,83	66,38	52,24	65,15
2. Döküm	57,98	41,87	58,05	52,63
3. Döküm	30,08	27,24	24,13	27,15
4. Döküm	70,88	60,08	65,48	65,48



Şekil 4.23. Bifilm indeks verilerinin grafiği.

Elde edilen verilerle bifilm indeks grafiği çizilebilir. Şekil 4.23 deki grafikten de görüleceği gibi üçüncü dökümün bifilm indeksi en azdır daha sonra ikinci döküm ve son olarak birbirine yakın değerlere sahip birinci ve dördüncü dökümün olduğu söylenebilir. Bifilm indeksi ne kadar düşükse sıvı metal o kadar kaliteli demektir. Bizim çalışmamızda da üçüncü dökümdeki metalimizin en kaliteli metal olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca üçüncü dökümde ikinci döküme nazaran daha sağlıklı bir gaz giderme işlemi yapıldığı sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. Modifiye edilmiş Al-12Si alaşımının gaz giderme, filtre kullanımı ve türbülans etkileri altında kalitesi incelendiği bu çalışmada türbülans etkisinin önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.

2. Türbülanssız yapılan dökümlerde türbülanslı yapılan dökümlere nazaran modifikasyonun daha iyi olduğu ve buna bağlı olarak da mekanik özelliklerin de daha yüksek olduğu görülmektedir.

3. Mikroyapıda oluşan porozitelerin sebepleri önem sırasına göre türbülans, gaz giderme yapmama ve filtre kullanmama olarak belirlenmiştir. Bunun yanında sıvı metalin ergitilmesi esnasında yüksek sıcaklıklara çıkmanın da gaz oranını yükselttiği buna bağlı olarak da poroziteyi arttırdığı görülmektedir.

4. Türbülanssız yapılan dökümlerde daha düzenli bir yapı ve daha iyi bir modifikasyon olduğu görülmüş buna karşın türbülanslı dökümlerde konveksiyon etkisi hissedilmiş ve buna bağlı olarak da yapının daha düzensiz, modifikasyonun daha kötü olduğu belirlenmiştir.

5. Kesitler arasındaki farkları incelemek amacıyla faklı kesit boyutları içeren kalıp modeli kullanılmıştır. Kesit kalınlığı arttıkça yapının homojenliğinin azaldığı, dendirit kollarının irileştiği ve mekanik özelliklerin de düştüğü görülmüştür.

6. Bu çalışmadan alınan sonuçlar ışığında ileriki çalışmalar için aşağıdaki tavsiyeler yapılabilir.

a. Bu çalışmada modifiye edici olarak kullanılan stronsiyum miktarı 46 ppm'dir. Al-12Si alaşımının daha iyi modifiye olması için bu miktarın artırılmasını içeren farklı çalışmalar yapılmalıdır.
b. Çalışmamızda gaz giderme işlemi, filtre kullanımı ve türbülans etkileri birlikte incelenmiştir. Bu parametrelerin her birinin etkisini görmek amacıyla, tek parametre kullanılarak farklı döküm şartlarında deneyler yapılmalıdır.

c. Döküm kalıbı hazırlanırken 10 PPI filtre kullanımı seçilmiştir. Filtrenin etkisi incelenmek üzere 20 PPI ve 30 PPI filtrelerde kullanılarak farklı çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

Anık, S., Anık, E.S., Varol, M., 2000, 1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı, *Birsen yayınevi*, İstanbul.

Campbell, J., 2006, An Overview of the Effects of Bifilms on the Structure and Properties of Cast Alloys, *Metallurgical And Materials Transactions B Volume 37b*, 857-863.

Campbell J., 2006, *Materials Science and Technology 22 (2),* 127–145

Campbell, J., 2003, *Castings. 2nd ed.*, Buttonworths.

Cao X., Jahazi M., 2005, Examination and verification of the filtration mechanism of cake mode during the pressure filtration tests of liquid Al–Si cast alloys, *Materials Science and Engineering A 408*, 234–242.

Chen Zhongwei, Zhang Ruijie, 2010, Effect of strontium on primary dendrite and eutectic temperature of A357 aluminum alloy, *Research & Development*, 147-152

Crosley, P.B. and Mondolfo, L.F., 1966, The modification of aluminium-silicon alloys, *A.F.S. Transactions 13*.

Çolak, M., 2009, ETİAL 160 alaşımının dökümünde makro ve mikro porozite oluşumunun modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*

Dahle, A.K., Nogita, K., McDonald, S.D., Dinnis, C., Luc, L., 2005, Eutectic modification and microstructure development in Al–Si Alloys, *Materials Science and Engineering A 413–414*, 243–248.

Dai, X., et al, 2003, *Materials Science and Engineering A 354 (1–2),* 315–325.

Dışpınar, D., and Campbell, J., 2009, Alüminyum ve alaşımlarının döküm kalitesinin belirlenmesi, *Alüminyum sempozyumu*, İstanbul, 394 – 404.

Dışpınar, D., Nordmark, A., Dı Sabatino, M., Arnberg, L., 2009, Alüminyum ve alaşımlarının dökümü sırasında gaz giderme işlemi ve döküm kalitesi üzerine etkileri, *Alüminyum sempozyumu*, İstanbul, 405 – 410.

Dışpınar, D., Syvertsen, F., Ekelik, M., Campbell, J., 2009, Al-Si Alaşımlarında kalıp dizaynı ile mekanik özellikler arası ilişki, *Alüminyum sempozyumu*, İstanbul, 363 – 372.

Dışpınar, D., Syvertsen, F., Campbell, J., 2009, Alüminyum dökümünde bekletme fırınının döküm kalitesi üzerine etkisi, *Alüminyum sempozyumu*, İstanbul, 326 – 332.

Dispinar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M., Arnberg, L., 2010, Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356, *Materials Science and Engineering A 527,* 3719–3725.

Dispinar,D., Campbell, J., 2011, Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings, *Materials Science and Engineering A 528,* 3860–3865.

Dispinar Derya, Campbell John, 2007, Effect of casting conditions on aluminium metal quality, *Journal of Materials Processing Technology 182*, 405–410.

Dispinar D., Campbell J., 2004*, International Journal of Cast Metals Research 17 (5),* 280–286.

Dispinar D., Campbell J., 2006, *International Journal of Cast Metals Research 19 (1)*, 5–17.

Ermiş, H. M., Yaman, B., Küçükkaragöz, S., Çiğdem, M., 2003, ‘‘Etial 145 Al-Si (A.A332) alaşımlarının modifikasyonu’’, *2.Alüminyum Sempozyumu*, Seydişehir 98-113.

Fang, B.X., and Ji, J.M., 1987, Potassiumsalt modifying agent of Al-Si alloys, *The British Foundryman*, 232.

Faraji M., Katgerman L., 2009, Microstructural analysis of modification and grain refinement in a hypoeutectic Al–Si alloy, *International Journal of Cast Metals Research VOL 22*, 1–4.

Green N.R., Campbel J. l, 1994, *AFS Transactions* 102, 341–347.

Heine, R.W., Loper, C. R., Phlilip, J. Et. al., 1955, Principle of Metal Casting, *2 nd. Ed., Mc.Graw Hill, Newyork.*

Hurley, T.J., and Atkinson, R.G., 1985, Effectsof modification practice on aluminium A356 alloys, *A.F.S. Transactions*, 291.

James G. Conley, Julie Huang, Jo Asada, Kenji Akiba, 2000, Modeling the effects of cooling rate, hydrogen content, grain refiner and modifier on microporosity formation in Al A356 alloys, *Materials Science and Engineering A285*, 49–55.

Kanani, N., Abbaschican, G.R., Gainesuille, F.L., 1984, Modification of aluminium-silicon alloys, *Aluminium*, 8,505

Kocatepe, K., 1988, Al-Si12 alaşımının metalik sodyum ile modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Lua L., Nogita K., Dahle A.K., 2005, Combining Sr and Na additions in hypoeutectic Al–Si foundry alloys, *Materials Science and Engineering A 399*, 244–253

Lu S., Hellawell A.,1987, *Metall. Trans. A 18*, 1721–1733

Muhammad Zarif, Brian McKay, Jiehua Li and Peter Schumacher, 2010, Study of the Effect of Strontium (Sr) on the Nucleation of Eutectic Silicon (Si) in High Purity Hypoeutectic Al-5Si Alloys, *BHM Vol. 155(11),* 506 – 511

Mondolfo, L.F., 1979, Al-Si-Mg Alloys, Aluminium Alloys Structure Properties, *Butterworths, London*, 759 -774.

Nafisi S., Ghomashchi R., Vali H., 2008, Eutectic nucleation in hypoeutectic Al-Si alloys, *Materials Characterization 5 9,* 1 4 6 6 – 1 4 7 3.

Nogita K., McDonald S.D., Dahle A.K., 2004, *Mater. Trans. 45*, 323–326.

Nyahumwa C., Green N.R., Campbell J., 1998, *AFS Transactions 106*, 215–224.

Oguz, B., 1990, Demir dışı Metallerin Kaynağı Metalurji-Uygulama, *Oerlikon Yayınları*, İstanbul.

Öksüz, C., 1996, Yüksek Mukavemetli (2024,6061,7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Su verme Duyarlılığı., Yüksek Lisans Tezi, *İT.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi.

Petty, E.R., 1970, Physical Metallurgy of Engineering Materials, *2d.ed*., London

Rezvani M., Yang X., Campbell J., 1999, *Transactions of the American Foundrymen's Society 107*, 181–188.

Runyoro J., Boutorabi S.M.A., Campbell J., 1992, *AFS Transactions 100*, 225–234.

Sarsılmaz, F., 2008, Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 4–16.

Savaş, Ö., 2005, Al-Si Döküm alaşımlarında mikroporozite oluşumuna etki eden faktörlerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*

Shi-Gang X. and Li-Xin S., 2006. Composition and thermal properties of the coating containing mullite and alumina, *Materials Chemistry and Physics*, 97, 132–136.

Sigworth, G.K., 1983, Theoretical and partical aspects of the modification of aluminium-silicon alloys, *A.F.S. Transactions* 66.

Stuart D. McDonald, Kazuhiro Nogita, Arne K. Dahle, 2004, Eutectic nucleation in Al–Si alloys, *Acta Materialia 52,* 4273–4280.

Sua´rez-Pen˜a B., Asensio-Lozano J., 2006, Influence of Sr modification and Ti grain refinement on the morphology of Fe-rich precipitates in eutectic Al–Si die cast alloys, *Scripta Materialia* 54, 1543–1548

Taban, E., Kaluç, E., 2005, Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının endüstriyel kullanım alanları, *Metal Dünyası*, Şubat 2005.

Zhu, P.Y., Liu, Q.Y., Hou, T.X., 1985, Spheroidization of eutectic silicon in Al-Si alloys, *A.F.S. Transactions*, 609.

Yılmaz, B., 2002, Alüminyum alaşımlarında faz yapılarının mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *S.D.Ü. Fen Bilimleri Ens*.

Yılmaz, F., 2009, Al-Si alaşımlarında çiftfilm ve modifikasyon teorilerine eleştirel bakış, *Alüminyum sempozyumu*, İstanbul, 411 – 423.

Yılmaz, F., 1985, Alaşımlar, *İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi*, Sakarya, 84

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Muhammet ULUDAĞ
Uyruğu	**:**	TC
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Ereğli / 29.01.1982
Telefon	**:**	0530 417 41 97
Faks	**:**	
e-mail	**:**	uludag@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Ereğli Lisesi, Ereğli, Zonguldak**	**2000**
Üniversite	:	**İstanbul Üniv., Avcılar, İstanbul**	**2007**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniv., Selçuklu, Konya**	**Devam**
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2008	**Hedef Çelik**	**Satış Mühendisi**
2009	**MEB**	**Öğretmen**
2010	**Manaş Madencilik**	**Metalurji Mühendisi**
2011	**Selçuk Üniversitesi**	**Araştırma Görevlisi**

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR