DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

A356 ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE SICAK YIRTILMA PROBLEMİNİN İNCELENMESİ

Ali EŞKİ

Ocak, 2024

İZMİR

A356 ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE SICAK YIRTILMA PROBLEMİNİN İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı

Ali EŞKİ

Ocak, 2024

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ALİ EŞKİ tarafından **ÖĞR.GÖR.DR. BAHADIR UYULGAN** yönetiminde hazırlanan **"A356 ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE SICAK YIRTILMA PROBLEMİNİN İNCELENMESİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Bahadır UYULGAN

Danışman

Doç.Dr. Necmiye Funda AK AZEM

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Osman ÇULHA

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Öğr. Gör. Dr. Bahadır UYULGAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca projede desteklerinden dolayı CMS Jant ve Makine San. A.Ş.'ye, Arge Mühendisleri Batuhan DOĞDU'ya, Caner KALENDER'e ve diğer personeline teşekkür ederim.

Ali EŞKİ

A356 ALAŞIMININ KOKİL KALIBA DÖKÜMÜNDE SICAK YIRTILMA PROBLEMİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Alüminyum alaşımları, hafiflik, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, yüksek elektriksel iletkenlik ve kolay şekillendirilebilirlik gibi üstün özellikleri nedeniyle, otomotiv, havacılık, savunma ve enerji gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerden biri döküm yöntemidir. Karmaşık geometrili parçaların elde edilmesini sağlayan ve malzeme israfını azaltan bu yöntem, sıcak yırtılma gibi kalite problemleriyle karşılaşabilir. Sıcak yırtılma, döküm parçalarında katılaşma aşamasında veya sonrasında oluşan çatlaklardır ve temelde döküm parçasının katılaşması sırasında oluşan termal gerilmelerden kaynaklanır. Sıcak yırtılma probleminin ortaya çıkması, döküm parçasının mekanik özelliklerini ve performansını olumsuz etkiler ve ekonomik kayıplara neden olabilir. Bu problemin önlenmesi veya azaltılması için, alaşımın kimyasal bileşimi, döküm parametreleri ve kalıp tasarımı gibi faktörlerin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu faktörlerin etkisi, hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenebilir.

Bu tezde A356 alüminyum alaşımının sıcak yırtılma duyarlılığını etkileyen döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı gibi iki ana faktör üzerinde durulmuştur. Döküm sıcaklığı için 680°C, 700°C ve 720°C; kalıp sıcaklığı için ise 240°C, 325°C ve 400°C seviyeleri seçilmiştir. Bu farklı kombinasyonlar altında toplam 27 adet döküm gerçekleştirilmiş, döküm sonrası çubuklarda oluşan çatlaklar incelenmiş, sıcak yırtılma duyarlılığı analizi ve mikroyapı analizi yapılmıştır. Ayrıca, MAGMASOFT simülasyon programı ile sayısal analizler gerçekleştirilerek bu sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, A356 alaşımının kokil kalıba dökümünde karşılaşılan sıcak yırtılma probleminin detaylı bir şekilde incelenmesini ve bu problemi azaltacak yöntemlerin araştırılmasını amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: A356 alaşımı, sıcak yırtılma, döküm sıcaklığı, alüminyum alaşımları, kalıp sıcaklığı, MAGMASOFT Simülasyon

INVESTIGATION OF HOT TEARING PROBLEMS IN A356 ALLOY CASTING IN PERMANENT MOLDS

ABSTRACT

Aluminum alloys are widely used in industries such as automotive, aerospace, defense and energy due to their superior properties such as lightness, high strength, good corrosion resistance, high electrical conductivity and easy formability. One of the most preferred methods in the production of these alloys is the casting method. This method, which enables parts with complex geometry to be obtained and reduces material waste, may encounter quality problems such as hot tearing. Hot tearing is cracks that occur in casting parts during or after the solidification phase and are basically caused by thermal stresses that occur during the solidification of the casting part. The emergence of hot tearing problem negatively affects the mechanical properties and performance of the casting part and may cause economic losses. To prevent or reduce this problem, factors such as the chemical composition of the alloy, casting parameters and mold design need to be optimized. The impact of these factors can be examined by both experimental and numerical methods.

In this thesis, two main factors affecting the hot tear sensitivity of A356 aluminum alloy, such as casting temperature and mold temperature, are emphasized. 680°C, 700°C and 720°C for casting temperature; For the mold temperature, 240°C, 325°C and 400°C levels were selected. A total of 27 castings were carried out under these different combinations, the cracks formed in the bars after casting were examined, Hot tear susceptibility analysis and microstructure analysis were performed. Additionally, numerical analyzes were carried out with the MAGMASOFT simulation program and these results were compared with experimental data. This study aims to examine in detail the hot tearing problem encountered in gravity mold casting of A356 alloy and to investigate methods to reduce this problem.

Keywords: A356 alloy, hot tear, casting temperature, aluminum alloys, mold temperature, MAGMASOFT Simulation

İÇİNDEKİLER

Page

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vi
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ ixiii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Amaç 1
1.3 Hipotezler 2

BÖLÜM İKİ -ALÜMİNYUM 3

2.1 Genel Özellikler 3
2.2 Alüminyum Kullanım Alanları 4
2.3 Alüminyum Döküm Yöntemleri 4
2.4 Alüminyum Alaşımları 5
2.4.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması 6
2.4.2 Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi 8
2.4.2.1 Silisyum 8
2.4.2.2 Bakır 9
2.4.2.3 Magnezyum 9
2.4.2.4 Demir 10
2.4.2.5 Mangan 10
2.4.2.6 Stronsiyum-Sodyum 11
2.4.2.7 Titanyum 11
2.4.2.8 Hidrojen 11
2.4.3 Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımları 12

2.4.3.1 Ötekütik Nokta Alaşımları 13
2.4.3.2 %12,6 Si'nin Altındaki Alaşımlar 13
2.4.3.3 %12,6 Si'nin Üzerindeki Alaşımlar 14
2.5 A356 Alüminyum Alaşımı ve Genel Özellikleri 14
2.5.1 Uygulama Alanları 15
2.5.2 Mikroyapısı 15
2.5.3 Kimyasal Bileşimi 17
2.5.4 Mekanik Özellikleri 17
2.5.5 Döküm Özellikleri 18
2.5.6 Avantajları ve Dezavantajları 18

BÖLÜM ÜÇ - TEORİK ÇALIŞMALAR 19

3.1 Sıcak Yırtılma 19
3.1.1 Alaşımların Bileşiminin Sıcak Yırtılma Eğilimi Üzerindeki Etkisi 20
3.1.2 A356 Alaşımında Sıcak Yırtılmaya Tane Morfolojisinin Etkisi 23
3.1.3 A356 Alaşımında Sıcak Yırtılmaya Kalıp Sıcaklığının Etkisi 28
3.1.4 A356 Alaşımında Sıcak Yırtılmaya Döküm Sıcaklığının Etkisi 28

BÖLÜM DÖRT - METOD VE YÖNTEM 33

4.1 DENEY TASARIMI 33
4.2 Kalıp Tasarımı 33
4.3 Döküm Simülasyonu ve İstatistiksel Hesaplama 35
4.4 Döküm işlemi 36
4.5 Penetrant Testi 46
4.6 Sıcak Yırtılma Noktaları Tayini ve Mikroyapı Analizi 49

BÖLÜM BEŞ - VERİLERİN ANALİZİ 55

5.1 MAGMASOFT Simülasyon Analizi 55
5.2 Termocupl Ölçümleri Analizi 57
5.3 Sıcak Yırtılma Duyarlılığı (HTS) Ölçümü 64
5.4 Mikroyapı ve SEM Analizi 69

BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER 76

KAYNAKLAR..... 78

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alüminyumun kullanım alanları (Kılıç, 2020)..... 4

Şekil 2.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (*Aülminyum alaşımlar* b.y.) 6

Şekil 2.3. Al-Si alaşımının faz diyagramı (Aguiar, 2020)..... 13

Şekil 2.4. A356 alaşımının uygulama örnekleri (*Alüminyum Alaşımları ve Kullanım* Alanları - Makine Eğitimi, b.y.) 15

Şekil 2.5. A356 alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüleri (Tunçay, 2016) 16

Şekil 3.1. Birincil katılaşma fazının dendritik yapısına sahip çok fazlı bir alaşımdaki sıcak yırtılma duyarlılığının şematik gösterimi (Rappaz ve diğer., 1999) 24

Şekil 3.2. İkili alaşım sisteminin ve dendritik olmayan yapının katılaşması sırasında katı fraksiyonun bir fonksiyonu olarak sıcak yırtılma duyarlılığının şematik gösterimi (Rappaz ve diğer., 1999). 25

Şekil 3.3. Tek fazlı alaşım ve çok fazlı alaşım için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak geçici katı fraksiyonun tipik gelişimi; Sırasıyla AA7050 ve A356.2 (Aguiar, 2020)…… …. 26

Şekil 3.4. Ti ile yüksek saflıkta Al-%2Mg alaşımı için bileşim ile çatlama fraksiyonunun değişimi (Aguiar, 2020) 27

Şekil 3.5. Ötektik katılaşma aşamasındaki sıcak yırtılmanın şematik çizimleri: a) Sc modifiye edilmemiş ve b) ağırlıkça %0,2 Sc değiştirilmiş (Puparattanapong ve diğer., 2018) 28

Şekil 3.6. Üç farklı kalıp ön ısıtma sıcaklığına ve 750 ºC'ye eşit dökme sıcaklığına sahip çelik kalıpta dökülen A356 (a, c, e) ve M206 (b, d, f) için sıcak yırtılma göstergesi (Aguiar, 2020)……..…30

Şekil 4.1. Bu projede kullanılan metodolojinin akış şeması. 33

Şekil 4.2. CRC sıcak yırtma kalıbının teknik çizim görünümü..... 34

Şekil 4.3. CRC sıcak yırtma kalıbının teknik çizimi ve üç boyutlu görünümü..... 35

Şekil 4.4. Magmasoft yazılımında CRC sıcak yırtma kalıbının kalıp ve parça olarak birleşik görünümü..... 36

Şekil 4.5. CRC Kalıbına Poteyaj Uygulaması..... 39

Şekil 4.6. Döküm potaları..... 40

Şekil 4.7. Ergitme Fırını 41

Şekil 4.8. Potalara konulacak külçelerin tartılması 42

Şekil 4.9. Ergitme fırınından çıkan metalin gazdan arındırılması işlemi 43

Şekil 4.10. Gazdan arındırma sonrası döküm işlemi..... 44

Şekil 4.11. Sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümü..... 45

Şekil 4.12. Gazlılık Ölçümü 46

Şekil 4.13. Döküm Numunelerinin Penetrant Banyosuna Alınması 47

Şekil 4.14. Penetrant solüsyon banyosu sonrası geliştirici uygulama alanı 48

Şekil 4.15. Geliştirici ile kaplandıktan sonra numunelerin görünümü..... 49

Şekil 4.16. Optik mikroskoplar ile çatlak yeri - boyu tayini 50

Şekil 4.17. Numune oluşan sıcak yırtılma çatlağı 51

Şekil 4.18. Mikroyapı analizi 52

Şekil 4.19. SEM Taramalı elektron mikroskobu..... 53

Şekil 4.20. SEM cihazına yerleştirilecek boyutları küçültülmüş numuneler 54

Şekil 5.1. Sıcak yırtılma simülasyonundan CRC kalıbının görüntüsü ve deney numunesi ile karşılaştırması 55

Şekil 5.2. Similasyon verilerin elde edilen değerlerin grafiklenmesi..... 57

Şekil 5.3. Deney 1 (680 °C döküm - 240 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 58

Şekil 5.4. Deney 2 (680 °C döküm - 325 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 58

Şekil 5.5. Deney 3 (680 °C döküm - 400 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 59

Şekil 5.6. Deney 4 (700 °C döküm - 240 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 59

Şekil 5.7. Deney 5 (700 °C döküm - 325 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 60

Şekil 5.8. Deney 6 (700 °C döküm - 400 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 60

Şekil 5. 9. Deney 7 (720 °C döküm - 240 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 61

Şekil 5.10. Deney 8 (720 °C döküm - 325 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 61

Şekil 5.11. Deney 9 (720 °C döküm - 400 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri..... 62

Şekil 5.12. Çubuk uzunluğu faktörü (Stermann ve Iraizoz, 2018)..... 64

Şekil 5.13. Çatlak bölgesi faktörü (Stermann ve Iraizoz, 2018) 65

Şekil 5.14. Numune bölgesel çatlak uzunlukları. 66

Şekil 5.15. HTS deney sonuçları 68

Şekil 5.16. Mikroyapı analizi örnek numuneleri 69

Şekil 5.17. Mikroyapı analizleri ve DAS ölçümleri 70

Şekil 5.18. En yüksek HTS değeri gördüğümüz 680-240 parametresinin SEM görüntüsü ve EDS analizi 72

Şekil 5.19. En yüksek sıcak yırtılma indeksini gördüğümüz 680 – 240 parametresinin elementel dağılımını gösteren EDS haritaları 73

Şekil 5.20. En düşük sıcak yırtılma indeksini gördüğümüz 720 - 400 parametresinin SEM görüntüsü 74

Şekil 5.21. En düşük sıcak yırtılma indeksini gördüğümüz 720 - 400 parametresinin elementel dağılımını gösteren EDS haritaları 75

Şekil 6.1. Deneysel çalışma, kalıp – döküm sıcaklığının sıcak yırtılmaya olan etkisi. 76

Şekil 6.2. Simülasyon çalışması, kalıp – döküm sıcaklığının sıcak yırtılmaya olan etkisi 77

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Saf alüminyumun özellikleri (Volkan, 2010) 3

Tablo 2.2. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Ak, 2012)..... 7

Tablo 2.3. A356 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (Barron Industries, b.y.) 17

Tablo 2.4. A356 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri 17

Tablo 3.1. Sıcak Yırtılma özellikleri (Dubey ve diğer., 2015)..... 19

Tablo 4.1. MAGMASOFT Simülasyon döküm parametreleri. 36

Tablo 4.2. A356 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of A356 alloy)..... 37

Tablo 4.3. Spektrometre Analiz Çıktısı..... 37

Tablo 5.1. Sıcak yırtılma simülasyonu sonrası yazılım verilerinden elde edilen sıcak yırtılma indeksi değerleri..... 56

Tablo 5.2. Deney 1 çatlak yerleri ve çubukların HTS değerleri..... 67

Tablo 5.3. HTS hesaplama sonuçları..... 67

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

A356 alüminyum alaşımı, otomotiv, havacılık, savunma ve enerji gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Bu alaşımın avantajları arasında hafiflik, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, yüksek elektriksel iletkenlik ve kolay şekillendirilebilirlik sayılabilir (Kılıç, 2020). A356 alaşımının üretimi genellikle döküm yöntemiyle gerçekleştirilir. Döküm yöntemi, karmaşık şekilli parçaların üretimine olanak sağlar ve malzeme kaybını önler. Ancak, döküm işlemi sırasında veya sonrasında sıcak yırtılma adı verilen bir kalite problemi ortaya çıkabilir. Sıcak yırtılma, döküm parçalarının katılaşma aşamasında veya sonrasında meydana gelen çatlaklardır. Bu çatlaklar, döküm sırasında oluşan termal gerilmelerden kaynaklanır. Sıcak yırtılma, döküm parçalarının mekanik özelliklerini ve performansını azaltır ve ekonomik zarara neden olur (Campbell ve John, 2011). Sıcak yırtılma sorununu çözmek veya en aza indirmek için, alaşımın kimyasal bileşimi, döküm parametreleri ve kalıp tasarımı gibi faktörlerin optimize edilmesi gerekir. Bu faktörlerin etkisini incelemek için hem deneysel hem de sayısal yöntemler kullanılabilir. Deneysel yöntemler, sıcak yırtılma problemini doğrudan gözlemlemeyi sağlarken, sayısal yöntemler, bu problemin simülasyonunu yapmayı mümkün kılar. Ancak, sayısal yöntemlerin güvenilirliği ve doğruluğu her zaman kesin değildir (Hu ve diğer., 2019; Song ve diğer., 2016). Bu tez çalışmasında, A356 alaşımında sıcak yırtılma probleminin deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırılması amaçlanmıştır. A356, Al-Si-Mg alaşım grubunun bir üyesi olup, özellikle otomotiv endüstrisinde tercih edilen bir alaşımdır. Bu alaşım grubu, yüksek mukavemet-ağırlık oranına ve ısıl işlem ile özelliklerinin geliştirilebilmesine sahiptir.

1.2 Amaç

Bu çalışmanın amacı, A356 alaşımında sıcak yırtılma probleminin deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmesidir. Araştırmanın hedefleri şunlardır:

• A356 alaşımının sıcak yırtılma probleminin MAGMASOFT simülasyon programı ile modellemesi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

• Sıcak Yırtılma Dutarlılığı (HTS) analizi.

• A356 alaşımının sıcak yırtılma probleminin gözlem ve mikroskop altında değerlendirilmesi.

• A356 alaşımının sıcak yırtılma duyarlılığını etkileyen döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı gibi faktörlerin optimizasyonu.

1.3 Hipotezler

Bu tezde test edilen hipotezler şunlardır:

• A356 alaşımının sıcak yırtılma duyarlılığı, döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı ile ters orantılıdır. Yani, döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı arttıkça, sıcak yırtılma duyarlılığı azalır (Hu ve diğer., 2019; Li ve diğer., 2020).

• A356 alaşımının sıcak yırtılma duyarlılığı (HTS) arttıkça, sıcak yırtılma eğilimi artar (Akhyar ve diğer., 2017; Leoben ve diğer., 2007; Puparattanapong vd., 2018).

• A356 alaşımının sıcak yırtılma probleminin MAGMASOFT simülasyonu, deneysel sonuçlarla uyumlu ve güvenilir sonuçlar verir (Uludağ ve diğer., 2017).

BÖLÜM İKİ
ALÜMİNYUM

2.1 Genel Özellikler

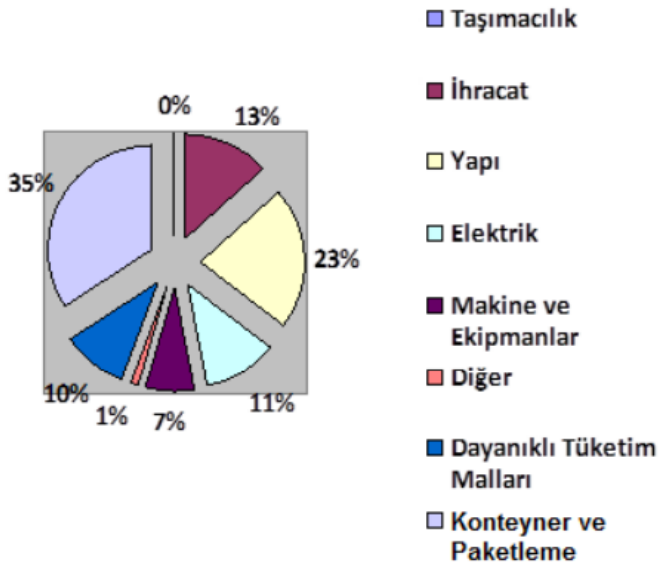
Alüminyum, farklı saflık derecelerinde üretilir ve en yüksek saflık derecesi olan %99,99, bu metalin en kaliteli formunu temsil eder. Bu derecedeki alüminyum, yumuşak yapısı, mükemmel ısı ve elektrik iletkenliği, parlak yüzeyi ve korozyona karşı üstün direnci ile öne çıkar. Ayrıca, ışığı ve ultraviyole ışınlarını etkili bir şekilde yansıtma özelliği sayesinde, güneşin zararlı etkilerine karşı koruma sağlayan alüminyum bazlı boyalarda kullanılır. Bu özellikler, saf alüminyumun teknik uygulamalarda, özellikle yüksek korozyon direnci ve üstün yüzey kalitesi gerektiren alanlarda tercih edilmesine yol açar. Örneğin, araç jantları, yansıtıcılar, kimyasal ve gıda endüstrisinde kullanılan kaplar, ince alüminyum folyolar (4/20 µm) ve elektronik sanayinde özel iletkenlerde bu saflık derecesindeki alüminyum sıklıkla kullanılır. Bu yüksek saflıkta alüminyum, %80'in üzerinde bir ışık yansıtma kapasitesine sahiptir, bu da onu çeşitli uygulamalarda ideal bir seçim haline getirir (Volkan, 2010)

Tablo 2.1. Saf alüminyumun özellikleri (Volkan, 2010)

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom Ağırlığı	26.98
Kafes Yapısı	YMK
Yoğunluğu (20 ^{o}C) (660 ^{o}C de sıvı)	2,6989 gr/cm^{3} 2,37 gr/cm3
Kaynama sıcaklığı	2300 ^{o} C
Ergime sıcaklığı	660,24 ^{o} C
Ergime ısısı	94,6 cal/gr
Özgül Isısı	0,2259 cal/g ^{o}C
Isıl Genleşme Katsayısı	23.8x10^{-6}/ ^{o}C
Elektrik Direnci (20^{o}C)	2,699 mikroOhm . cm
Çekme Mukavemeti	4-9 kPa/mm^{2}
Akma Mukavemeti	1-3 kPa/mm^{2}
Elastik Modülü	6500-7200 N/mm^{2}
Sıvılaşırken hacim büyümesi	6,5%
Katılaşırken kendini çekme	1,7…….1,8 %
Kopma uzaması	30-50 %
Sertlik	15-30 HB30
% Doğada Bulunabilirlik	7.9

2.2 Alüminyum Kullanım Alanları

Alüminyum, hafif, dayanıklı, iletken ve korozyona karşı dirençli bir metal olduğu için birçok sektörde farklı şekillerde kullanılmaktadır. Alüminyumun kullanım alanları şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Alüminyumun kullanım alanları (Kılıç, 2020)

2.3 Alüminyum Döküm Yöntemleri

Alüminyum döküm yöntemlerinin çeşitliliği, bu metalin kullanım alanlarını genişletir ve farklı ihtiyaçlara uyum sağlar. Basınçlı döküm, seri üretimde yüksek hız ve pürüzsüz yüzeyler sağlarken; kalıcı kalıba döküm, orta düzeyde hız ve kalite ile dengeli bir seçenek sunar. Kum kalıba döküm, özellikle büyük boyutlu parçalar için tercih edilen, tasarım esnekliği yüksek bir yöntemdir. Alçı kalıba döküm ve hassas döküm, daha detaylı ve hassas parçaların üretimi için idealdir, karmaşık tasarımların gerçekleştirilmesine olanak tanır. Sürekli döküm ise, özellikle uzun alüminyum çubuk ve levhaların üretiminde kullanılır. Ayrıca, kaybolan köpük dökümü, sıkıştırmalı döküm ve sıcak izostatik presleme gibi özel yöntemler de belirli gereksinimlere yönelik çözümler sunar. Her döküm yönteminin seçimi, üretilmesi gereken parçanın boyutu, karmaşıklığı ve kalite gereksinimlerine bağlıdır, büyük ölçekli dökümler genellikle kum kalıplarla yapılırken, daha küçük ve detay gerektiren parçalar için

metal kalıplar kullanılır. Kalitenin öncelikli olduğu durumlarda, gözeneksizlik, çatlak ve yüzey hatalarının azaltılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi önemlidir (Kılıç, 2020).

2.4 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, sünek ve gümüş renkli bir metal olarak, çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilen özelliklere sahiptir. Bu metalin genel özellikleri arasında iyi işlenebilirlik, yüksek yüzey kalitesi, düşük özgül ağırlık ve mükemmel dökülebilirlik bulunmaktadır. Ayrıca, alüminyumun düşük gaz çözünürlüğü, onun döküm süreçlerinde önemli bir avantaj sağlar. Alüminyumun döküm sürecinde kalıp tasarımı, metalin katılaşma esnasında gösterdiği %3,5 ile %8,5 arasındaki hacimsel çekme oranını dikkate almalıdır. Döküm alaşımları, dövme alaşımlarına göre daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve bu özellikler, bazı alaşımların ısıl işlemle geliştirilebilmesiyle daha da arttırılabilir (Güven ve Delikanli, 2011).

Alüminyum alaşımlarının dökülebilirlik özellikleri, akışkanlık, sıcak yırtılma eğilimi ve hacimsel çekme gibi faktörlerle belirlenir ve bu özellikler özel numune kalıpları kullanılarak değerlendirilebilir. Mekanik özellikler, genellikle en iyi ısıl işlem uygulanabilen ötektik kompozisyonları içeren alaşımlardan elde edilir. Döküm alaşımlarının mekanik özellikleri, ergitme ve döküm süreçlerinin sıkı kontrolü, empürite seviyesinin düşük tutulması, tane boyutunun kontrolü ve ötektik modifikasyon yoluyla optimize edilir.

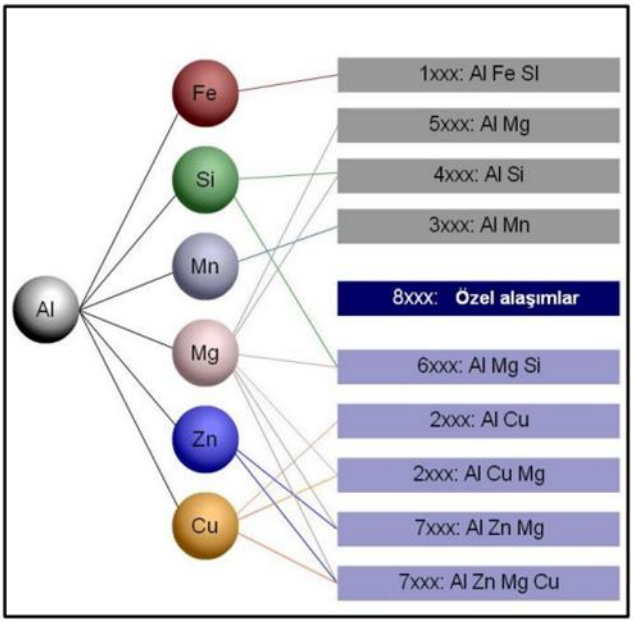
Genel kullanım amaçlı alüminyum döküm parçalarında, alaşım seçimi işlenebilirlik, korozyon direnci, sertlik ve mekanik değerler gibi özelliklere göre yapılır. Alüminyum alaşımları, pres döküm, kum kalıba döküm ve sabit kalıp içerisine döküm yöntemleriyle üretilir ve bu alaşımların işlenebilirlik ve fiziksel özellikleri oldukça iyidir. Bu alaşımlar, kaynak edilebilirlik, yüksek korozyon ve mukavemet özellikleri ile bilinir ve ısıl işlem bu döküm alaşımlarında yaygın olarak kullanılır. Yüksek sıcaklık direncini artırmak için, alaşımlara %1 ile %4 arasında bakır eklenir ve bu $CuAl_2$ çökelme fazının oluşumuna neden olur. Aynı şekilde, $MgZn_2$ çökeltisi için çinko eklenir ve tane boyutunu küçültmek için titanyum ve bor ilavesi yapılır (Güven ve Delikanli, 2011)

2.4.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları, ana olarak dövme (işlem) ve döküm alaşımları olmak üzere iki temel kategoriye ayrılır. Bu ayrım, üretim yöntemlerinin farklılığından ve sektörel ihtiyaçlardan kaynaklanır.

Dövme alaşımları, plastik deformasyon yoluyla şekillendirilirken, döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve mikroyapıları dövme alaşımlarından farklılık gösterir. Her iki ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan olarak iki alt gruba daha ayrılır.

Alüminyum alaşımlarını tanımlamak için geliştirilmiş bir sistem bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde yaygın olarak kabul gören bu sistem, Alüminyum Birliği tarafından geliştirilmiştir. Dövme alaşımları için dört haneli bir sistem kullanılır.



Şekil 2.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Alüminyum alaşımlar, b.y.)

İlk Hane (Birincil Element): Genellikle alaşımın ana bileşenini belirtir. Örneğin, "1" saf alüminyum, "2" bakır, "3" manganez, "4" silisyum, "5" magnezyum, "6" magnezyum ve silisyum kombinasyonu, "7" çinko ve "8" diğer elementler anlamına gelir.

İkinci Hane (Modifikasyon): Orijinal alaşıma yapılan değişiklikleri gösterir. Eğer bu hane "0" ise, bu orijinal alaşımı işaret eder; diğer rakamlar alaşımın modifiye edilmiş versiyonlarını temsil eder.

Son İki Hane: Genellikle alaşımın seri numarasını veya spesifik türünü tanımlar ve genellikle alaşımın içindeki alüminyum yüzdesini ifade eder.

Döküm alaşımlarının tanımlanmasında kullanılan sistem, son hanesinden önce bir ondalık nokta bulunan dört basamaklı bir numaralandırmaya dayanır.

Tablo 2.2. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Ak, 2012)

Sınıflandırma	Temel Alaşım Elementi
1xx.x	Alaşımlandırılmamış Alüminyum (%99,0 veya daha yüksek saflık)
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silis ile Magnezyum ve/veya Bakır
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmıyor
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay (Tin)
9xx.x	Kullanılmıyor

İlk Hane: Dövme alaşımları ile benzer şekilde, alaşımın birincil elementini belirtir.

İkinci ve Üçüncü Haneler: Genellikle alaşımın içindeki alüminyum yüzdesini ifade eder.

Ondalık Değerden Sonra Gelen Hane: Alaşımın döküm yöntemini belirtir. Örneğin, "0" kum döküm, "1" veya "2" kalıcı kalıp dökümü, "3" basınçlı döküm gibi farklı döküm tekniklerini temsil eder.

Örneğin, 1xx.x grubunda yer alan alaşımların ikinci ve üçüncü haneleri, alüminyumun minimum yüzdesini belirtir. Bu, 150.x'in minimum %99.50 alüminyum içeriğini gösterdiği anlamına gelir. Ondalık noktanın sağında yer alan hane, ürünün formunu gösterir: 0 rakamı alaşımın döküm için uygun olduğunu, 1 ve 2 rakamları ise alaşımın kimyasal limitlerinin külçe için uygun olduğunu belirtir. Örneğin, 380.0 alaşımı kum ve metalik kalıba döküm için uygunluğu, 380.1-2 ise kimyasal limitlerin külçe için uygunluğunu gösterir. Eğer bir alaşımda ağırlıkça küçük yüzdesel değişiklikler varsa, alaşım numarasının başına bir harf getirilerek bu belirtilir. Örneğin, 356.0 alaşımı ile A356.0 alaşımı arasında ana alaşım elementlerinde bir fark yoktur, ancak küçük alaşım elementi farklılıkları vardır. Avrupa standartlarında, EN AC-46000 numaralı EN AC-AlSi9Cu3Fe(a) sembollü alaşımda, (a) simgesi, alaşımın daha temiz ve empüritelerden arındırılmış olduğunu gösterir (Özderin, 2017).

Alaşımın Modifikasyonu ve Ek Harfler:

Alaşım numarasının önüne eklenen harfler, alaşımın modifikasyonunu gösterir. Örneğin, "A" alaşımın orijinal bileşimine eklenen bir elementi, "B" farklı bir işlem sırasını veya farklı bir ısı işlemi durumunu gösterir.

Ayrıca, alaşım numarasının sonuna eklenen ek harfler, alaşımın özel işlem veya durumlarını belirtebilir. Örneğin, "T" ısı ile işlenmiş (termal işlem uygulanmış) alaşımları, "H" işlenmemiş (sertleştirilmiş) alaşımları ifade eder (ASDM, 2017; J.R. Davis, 2001).

2.4.2 Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi

Saf alüminyum, endüstriyel uygulamalar için genellikle zayıf mekanik özelliklere sahip olduğundan, tek başına çok fazla kullanışlı değildir. Bu nedenle, alüminyumun mekanik özelliklerini, özellikle mukavemet, süneklik ve korozyon direncini artırmak amacıyla çeşitli alaşım elementleri eklenir. Bu alaşım elementleri, alüminyumun işlenebilirliği, dökülebilirliği, aşınma direnci ve diğer önemli özelliklerini önemli ölçüde etkiler.

2.4.2.1 Silisyum

Silisyum, alüminyum döküm alaşımlarının birçoğunda ana alaşım elementi olarak bulunur ve alüminyuma iyi dökülebilirlik ve aşınma direnci kazandırır. Silisyum, eriyik alüminyumun akışkanlığını artırır, bu da döküm işlemi sırasında alaşımın kalıba daha kolay doldurulmasını sağlar. Silisyumun alüminyuma olan düşük çözünürlüğü, soğuma sırasında saf Si fazının çökelmesine ve dolayısıyla alaşımın aşınma direncinin artmasına neden olur. Ancak, silisyum alaşımın işlenebilirliğini zorlaştırabilir. Al-Si alaşımları, özellikle silisyum konsantrasyonuna bağlı olarak ötektikaltı, ötektik ve ötektiküstü olmak üzere üç ana gruba ayrılır, ve bu gruplama alaşımların mikroyapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler (Açıcı, 2018; Kahraman, 2009).

2.4.2.2 Bakır

Bakır, alüminyum-bakır alaşımlarında önemli bir alaşım elementidir ve genellikle alaşımlara yüksek mukavemet kazandırır. Bakır, çökelme sertleşmesini kolaylaştırır ve böylece alaşımların mukavemetini ve sertliğini artırır, fakat korozyon direncini ve sünekliği azaltabilir. Bakır içeren alüminyum alaşımları, genellikle havacılık, askeri araçlar ve roket kanatları gibi yüksek mukavemet gereksinimlerine sahip uygulamalar için tercih edilir. Bakırın alüminyuma olan etkisi, alaşımın içerdiği bakır miktarına ve bakırın oluşturduğu fazın şekline bağlıdır. Bakırın alüminyumla oluşturduğu faz diyagramında, alüminyumun katılaşma sıcaklığı, bakır içeriği arttıkça düşer. Bakır içeriği %4,5'ten fazla olan alaşımlar, çökelme sertleşmesi ile sertleştirilebilir. Bu alaşımlar, ısıl işlem sırasında, alüminyum matrisi içinde dağınık olarak bulunan $CuAl_2$ fazının çözünmesi ve daha sonra belirli bir sıcaklıkta yaşlandırılması ile sertleştirilir. Bu sırada, $CuAl_2$ fazı, alüminyum matrisi içinde çok küçük ve sert parçacıklar halinde çökelir. Bu parçacıklar, alüminyum matrisini güçlendirir ve alaşımın mukavemetini ve sertliğini artırır. Ancak, bu parçacıklar, alaşımın sünekliğini ve korozyon direncini azaltır (Açıcı, 2018; Kahraman, 2009; Özderin, 2017).

2.4.2.3 Magnezyum

Magnezyum, alüminyuma iyi korozyon direnci, işlenebilirlik ve yüzey işlem kabiliyeti kazandırır. Ancak, dökülebilirliği azaltabilir. Alüminyum-silisyum

alaşımlarında magnezyum, β fazı olarak bilinen Mg_2Si fazını oluşturur. Magnezyum ilavesi, alüminyum alaşımlarının yaşlanma ile sertleşmesini sağlar ve bu da akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertlikte artışa neden olur. Ancak, magnezyum, yapıdaki kırılgan fazların şeklini ve miktarını değiştirerek sünekliği ve tokluğu olumsuz etkileyebilir. Magnezyumun alüminyuma olan etkisi, alaşımın içerdiği magnezyum miktarına ve magnezyumun oluşturduğu fazın şekline bağlıdır. Magnezyum içeriği %1,8'den fazla olan alaşımlar, çökelme sertleşmesi ile sertleştirilebilir. Bu alaşımlar, ısıl işlem sırasında, alüminyum matrisi içinde dağınık olarak bulunan Mg_2Si fazının çözünmesi ve daha sonra belirli bir sıcaklıkta yaşlandırılması ile sertleştirilir. Bu sırada, Mg_2Si fazı, alüminyum matrisi içinde çok küçük ve sert parçacıklar halinde çökelir. Bu parçacıklar, alüminyum matrisini güçlendirir ve alaşımın mukavemetini ve sertliğini artırır. Ancak, bu parçacıklar, alaşımın sünekliğini ve korozyon direncini azaltır (Açıcı, 2018; Özderin, 2017).

2.4.2.4 Demir

Demir, alüminyumun doğal bir bileşenidir ve alaşımlara mukavemet kazandırabilir. Demir, katılaşma sırasında intermetalik fazlar oluşturur ve bu fazlar, alaşımların mekanik özelliklerini ve özellikle sünekliği olumsuz etkiler. Demirin alüminyuma olan etkisi, alaşımın içerdiği demir miktarına ve demirin oluşturduğu fazın şekline bağlıdır. Alüminyumun katılaşma sıcaklığı, demir içeriği arttıkça düşer ve demir içeriği %0,5'ten fazla olan alaşımlar, intermetalik fazlar içerir. Bu fazlar, alüminyum matrisi içinde iğne şeklinde veya plaka şeklinde olabilir. İğne şeklindeki fazlar, alaşımın sünekliğini ve tokluğunu daha fazla azaltır. Plaka şeklindeki fazlar, alaşımın mukavemetini ve sertliğini artırır, ancak sünekliği ve tokluğu azaltır. (Açıcı, 2018)

2.4.2.5 Mangan

Mangan eklemesi, alüminyum alaşımlarının çekme mukavemetini ve düşük devirli yorulma direncini artırabilir. Mangan, yapıyı güçlendirir ve süneklik ile korozyon direncinde herhangi bir azalmaya neden olmaz. Mangan, alüminyumun tane boyutunu incelten ve tane sınırlarını güçlendiren bir elementtir. Manganın alüminyuma olan etkisi, alaşımın içerdiği mangan miktarına ve manganın oluşturduğu fazın şekline bağlıdır. Alüminyumun katılaşma sıcaklığı, mangan içeriği arttıkça düşer ve mangan

içeriği %1,5'ten fazla olan alaşımlar, intermetalik fazlar içerir. Bu fazlar, alüminyum matrisi içinde kübik veya hegzagonal şeklinde olabilir. Kübik şeklindeki fazlar, alaşımın mukavemetini ve sertliğini artırır, ancak sünekliği ve tokluğu azaltır. Hegzagonal şeklindeki fazlar, alaşımın mukavemetini, sertliğini, sünekliğini ve tokluğunu artırır. (Açıcı, 2018; Kahraman, 2009; Özderin, 2017)

2.4.2.6 Stronsiyum-Sodyum

Stronsiyum ve sodyum, özellikle ötektik ve hipoötektik alüminyum-silisyum alaşımlarında kullanılır ve ötektik silisyumun morfolojisini ve mikroyapısını modifiye eder. Bu elementler, ötektik silisyumun daha ince ve lamelar bir yapıya dönüşmesini sağlar, bu da alaşımın mukavemetini ve sünekliğini iyileştirir. Stronsiyum ve sodyum, alüminyumun erime noktasını düşürür ve alüminyumun akışkanlığını artırır. Stronsiyum ve sodyumun alüminyuma olan etkisi, alaşımın içerdiği stronsiyum ve sodyum miktarına ve oluşturdukları fazın şekline bağlıdır (Uludağ ve diğer., 2017). Alüminyumun katılaşma sıcaklığı, stronsiyum ve sodyum içeriği arttıkça düşer. Stronsiyum ve sodyum içeriği %0,5'ten fazla olan alaşımlar, ötektik silisyumun modifikasyonunu sağlar. Bu alaşımlar, ötektik silisyumun iğne şeklindeki yapısını, daha ince ve lamelar bir yapıya dönüştürür. Bu yapı, alaşımın mukavemetini, sünekliğini ve tokluğunu artırır.

2.4.2.7 Titanyum

Titanyum, alüminyumun tane boyutunu incelten bir element olarak kullanılır. Titanyum ve bor kombinasyonu, veya TiB_2 formunda eklenmesi, alaşımın tane boyutunu daha da incelterek mukavemetini artırır. Titanyumun alüminyuma olan etkisi, alaşımın içerdiği titanyum miktarına ve titanyumun oluşturduğu fazın şekline bağlıdır. Alüminyumun katılaşma sıcaklığı, titanyum içeriği arttıkça düşer. Titanyum içeriği %0,5'ten fazla olan alaşımlar, intermetalik fazlar içerir. Bu fazlar, alüminyum matrisi içinde kübik veya hegzagonal şeklinde olabilir. Kübik şeklindeki fazlar, alaşımın mukavemetini ve sertliğini artırır, ancak sünekliği ve tokluğu azaltır. Hegzagonal şeklindeki fazlar, alaşımın mukavemetini, sertliğini, sünekliğini ve tokluğunu artırır (Özderin, 2017).

2.4.2.8 Hidrojen

Hidrojen, Alüminyum alaşımlarında istenmeyen bir elementtir ve yapı içerisine genellikle hava ile girmekte ve soğuma sırasında gaz boşlukları oluşturmaktadır. Hidrojenin neden olduğu bu gaz boşlukları, tane sınırlarında gerilmeli korozyon çatlağına neden olabilir. Berilyum, silisyum ve kalay gibi elementlerin eklenmesi, hidrojenin alaşımlara olan olumsuz etkilerini azaltabilir. Hidrojenin alüminyuma olan etkisi, alaşımın içerdiği hidrojen miktarına ve hidrojenin oluşturduğu gaz boşluklarının büyüklüğüne, şekline ve dağılımına bağlıdır. Hidrojenin alüminyum alaşımlarından uzaklaştırılması için, alaşımların ergitilmesi, dökülmesi ve ısıl işlem görmesi sırasında, alaşımların hava ile temasını azaltmak, vakum altında işlem yapmak, alaşımlara hidrojeni bağlayan veya absorbe eden elementler eklemek gibi yöntemler kullanılabilir .

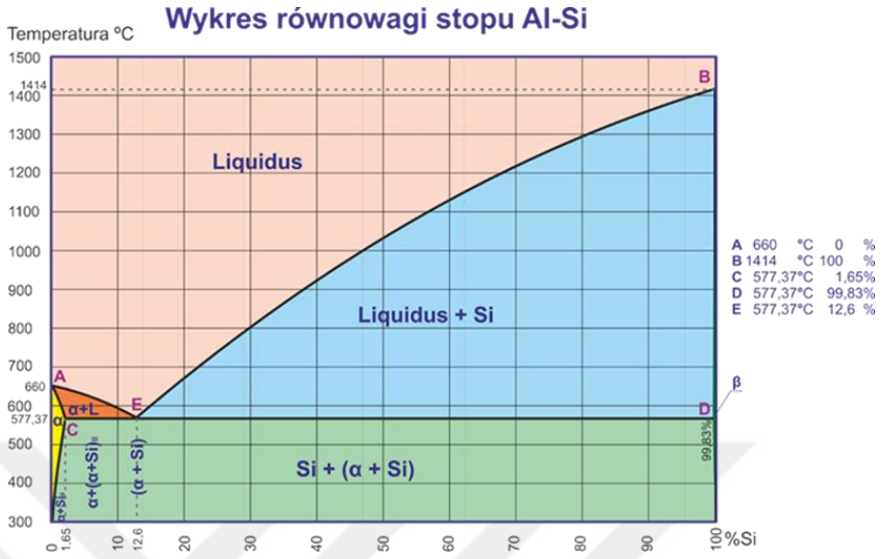
2.4.3 Alüminyum-Silisyum Döküm Alaşımları

Alüminyum-silisyum döküm alaşımları, alüminyum döküm sanayisinde yaygın olarak kullanılan ve önemli özellikler sunan bir alaşım grubudur. Bu alaşımlar, özellikle iyi dökülebilirlik, düşük yoğunluk, yüksek ısıl iletkenlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımı gibi avantajlar sunmaktadır. Otomotiv, havacılık, elektronik, makine, inşaat ve tüketici ürünleri gibi pek çok sektörde bu alaşımlar tercih edilmektedir (Ölmez ve diğer., 2016).

Bu alaşımların özellikleri, içerdikleri silisyum miktarı, diğer alaşım elementleri, döküm yöntemi, ısıl işlem ve yüzey işlemleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Silisyum, alüminyum alaşımlarında katılaşma sıcaklığını ve aralığını düşürerek alaşımlara daha iyi bir akışkanlık kazandırır. Bu, döküm sırasında alaşımların daha kolay şekillendirilmesini sağlar. Silisyum, aynı zamanda alaşımların mukavemetini ve aşınma direncini artıran fazları oluşturur. Ancak, yüksek miktarda silisyum, alaşımların sünekliğini ve kaynak edilebilirliğini olumsuz etkileyebilir, bu yüzden silisyum içeriği dikkatlice ayarlanmalıdır (Barrirero, 2019; Özderin, 2017).

Alüminyum-silisyum (Al-Si) döküm alaşımları, alüminyum döküm endüstrisinde en çok kullanılan alaşımlardandır ve silisyum içeriğine göre üç ana kategoriye

ayrılırlar. Bu alaşımların her bir kategorisi, benzersiz özellikler sunar ve çeşitli uygulamalarda kullanılır.



Şekil 2.3. Al-Si alaşımının faz diyagramı (Aguiar, 2020)

2.4.3.1 Ötekütik Nokta Alaşımları

Ötekütik nokta alaşımlar, Al-Si sisteminde 577°C sıcaklıkta ve yaklaşık %12,6 Si içeriğinde belirlenen bir noktada, en iyi dökülebilirliğe sahip alaşımlardır. Bu alaşımlar yüksek ısıl iletkenlik, aşınma direnci ve korozyon dayanımı özelliklerine sahiptir, ancak düşük süneklik ve kaynak edilebilirlik gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu özellikler, alaşımların basınçlı döküm yöntemiyle üretimini uygun kılar ve A413.0, A360.0, A380.0, A390.0 gibi alaşımlar bu kategoriye örnek olarak gösterilebilir (Barrirero, 2019).

2.4.3.2 %12,6 Si'nin Altındaki Alaşımlar

Silisyum içeriği %12,6'nın altında olan Al-Si alaşımları, soğuma sırasında öncelikle alüminyum (α) fazının katılaşmasını takiben ötekütik reaksiyonla α ve β fazlarının birlikte katılaşmasını içerir. Bu alaşımlar, ötekütik nokta alaşımlarına göre daha yüksek süneklik, kaynak edilebilirlik ve yüksek sıcaklık mukavemeti sunar, ancak dökülebilirlik ve ısıl iletkenlik açısından daha düşük seviyededir. A356.0, A357.0,

A319.0, A413.0 gibi alaşımlar bu kategoride yer alır ve hem basınçlı döküm hem de kum döküm yöntemleriyle üretilebilirler (Barrirero, 2019; B. Hu ve diğer., 2021).

2.4.3.3 %12,6 Si'nin Üzerindeki Alaşımlar

Silisyum içeriği %12,6'nın üzerinde olan alaşımlar ise, soğuma sırasında öncelikle silisyum (β) fazının katılaşması ve ardından ötekütik reaksiyonun gerçekleşmesini içerir. Bu alaşımlar, en yüksek aşınma direncine sahiptir, ancak süneklik, kaynak edilebilirlik ve yüksek sıcaklık mukavemeti açısından oldukça düşüktür. A390.0, A413.0, A418.0 gibi alaşımlar bu kategoriye örnektir ve genellikle aşınmaya maruz kalan parçaların üretiminde kullanılırlar (Barrirero, 2019; B. Hu ve diğer., 2021)

Bu alaşımların performansı ve özellikleri, içerdikleri silisyum miktarı ile doğrudan ilişkilidir ve bu da alaşımın seçimini ve kullanım alanlarını belirleyen ana faktördür.

Alüminyum-silisyum döküm alaşımları dünya çapında çeşitli standartlar ve kodlar altında üretilir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde Aluminum Association (AA) standartları, Avrupa Birliği'nde EN standartları, Japonya'da JIS standartları, Çin'de GB standartları ve Hindistan'da IS standartları kullanılır. Bu standartlar, alüminyum-silisyum döküm alaşımlarının kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, toleransları, test yöntemleri ve belgelendirme gibi konularda rehberlik eder ve alaşımların kalite kontrolü ile uluslararası ticareti için önem taşır (J.R. Davis, 2001).

2.5 A356 Alüminyum Alaşımı ve Genel Özellikleri

Alüminyum alaşımları, hafiflik, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, iyi dökülebilirlik, iyi ısıl ve elektriksel iletkenlik gibi özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları, içerdikleri elementlere göre farklı sınıflara ayrılır. Bu sınıflardan biri de silisyum (Si) içeren alüminyum-silisyum alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, özellikle ısıl işlem görebilen döküm alaşımları kategorisinde en yaygın kullanılan alaşımlardan biri olan A356 alüminyum alaşımını içerir.

2.5.1 Uygulama Alanları

A356 alüminyum alaşımı, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde şasi bileşenleri, tekerlekler ve uçak yapısal parçaları gibi parçaların üretimi için geniş bir şekilde kullanılır. Yüksek mukavemet, hafiflik ve dayanıklılık gerektiren diğer sektörlerde de kullanılır. A356 alaşımından yapılmış bazı uygulama örnekleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. A356 alaşımının uygulama örnekleri (Alüminyum Alaşımları ve Kullanım Alanları - Makine Eğitimi, b.y.)

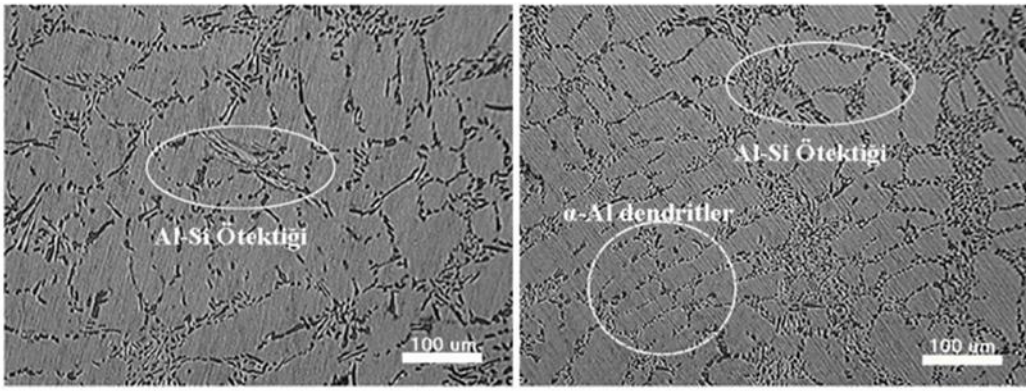
2.5.2 Mikroyapısı

Alaşımın mikroyapısı, birincil alüminyum matrisi ve alüminyum-silisyum ötektiği içerir. Alaşım, yüksek mukavemet ve tokluk ile bilinir, bu nedenle özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde ekipman üretiminde kullanılır. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra doğal yaşlanma (T4) veya yapay yaşlanma (T6) ısıl işlemleri uygulanabilir. Mg_2Si intermetalik fazının oluşumu ile mukavemet kazanır (Aybarç ve diğer., 2017; X. ping Hu ve diğer., 2019)

A356 alüminyum alaşımının mikroyapısı, döküm yöntemine, ısıl işleme ve katkı maddelerine bağlı olarak değişebilir. Döküm yöntemi, alaşımın soğuma hızını, dendrit büyümesini, ötektik oluşumunu ve gözenekliliği etkiler. Isıl işlem, alaşımın çözünürlüğünü, yaşlanmasını ve saflaşmasını belirler. Katkı maddeleri, alaşımın

akışkanlığını, korozyon direncini ve mikroyapıyı iyileştirebilir. Örneğin, Sr, ötektik Si parçacıklarını küçültmek ve yuvarlamak için yaygın olarak kullanılan bir katkı maddesidir. Alaşımın kırılganlığını artıran ve mekanik özelliklerini azaltan Fe zenginliği intermetalik fazların oluşumuna neden olur (Kim ve diğer., 2021; Uludağ ve diğer., 2017).

A356 alüminyum alaşımının mikroyapısını incelemek için çeşitli teknikler kullanılabilir. Optik mikroskop, alaşımın genel mikroyapısını, dendrit morfolojisini, ötektik dağılımını ve gözenekliliği gösterir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), alaşımın yüzeyini ve kırılma yüzeyini yüksek çözünürlükle görüntüler. SEM, ayrıca enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile birlikte kullanılarak, alaşımın kimyasal bileşimini ve faz analizini yapabilir. İletkenlik atomik kuvvet mikroskobu (CAFM), alaşımın elektriksel iletkenliğini ve yüzey topografisini ölçer. CAFM, ayrıca alaşımın faz dağılımını ve faz sınırlarını belirlemek için kullanılabilir. X-ışını kırınımı (XRD), alaşımın kristal yapısını ve faz bileşenlerini tanımlar. XRD, ayrıca alaşımın gerilme durumunu ve kristal boyutunu belirlemek için kullanılabilir. İletkenlik atomik kuvvet mikroskobu (CAFM), alaşımın elektriksel iletkenliğini ve yüzey topografisini ölçer. CAFM, ayrıca alaşımın faz dağılımını ve faz sınırlarını belirlemek için kullanılabilir.



Şekil 2.5. A356 alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüleri (Tunçay, 2016)

2.5.3 Kimyasal Bileşimi

A356 alüminyum alaşımındaki ana elementler silisyum (Si), magnezyum (Mg), demir (Fe) ve titanyum (Ti)'dir. Si, alaşıma sertlik ve korozyon direnci sağlar. Mg, alaşımı ısıl işleme duyarlı hale getirir ve Mg_2Si çökeltisi ile mukavemetini artırır. Fe, alaşımın korozyon direncini ve sünekliğini azaltan zararlı bir elementtir. Ti, alaşımın tane boyutunu küçültür ve mekanik özelliklerini iyileştirir (Kim ve diğer., 2021; Özderin, 2017). A356 alüminyum alaşımının tipik kimyasal bileşimi Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. A356 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (Barron Industries, b.y.)

Element	**Si**	**Mg**	**Fe**	**Cu**	**Zn**	**Ti**	**Sr**	**Al**
Ağırlıkça (%)	7	0,3	0,15	0,02	0,01	0,03	0,01	Kalan

2.5.4 Mekanik Özellikleri

A356 alüminyum alaşımı, yüksek mukavemet, iyi süneklik ve olağanüstü tokluk gibi mükemmel mekanik özellikler sergiler. Ayrıca ısıl işleme iyi bir yanıt verir, bu da mukavemet ve sertliğini daha da artırır. A356 alüminyum alaşımının tipik mekanik özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. A356 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (Açıcı. 2018)

Isıl İşlem	**Akma Mukavemeti (MPa)**	**Çekme Mukavemeti (MPa)**	**Uzama (%)**	**Sertlik (HB)**
T4	160	230	12	70
T6	240	310	8	90

2.5.5 Döküm Özellikleri

A356 alaşımı, mükemmel dökülebilirlik sergiler, bu da karmaşık ve detaylı dökümler yaratma konusunda uygun bir seçim haline getirir. Nispeten düşük eritme ve döküm sıcaklıkları, dökülebilirliğine katkı sağlar ve sıcak yırtılma ve büzülme sorunlarını azaltır. A356 alaşımı, düşük basınçlı döküm, yarı katı döküm, vakumlu döküm, kaynaklı döküm ve yerçekimi döküm gibi çeşitli döküm yöntemleriyle işlenebilir (Açıcı, 2018; Uludağ ve diğer., 2017).

2.5.6 Avantajları ve Dezavantajları

A356 alüminyum alaşımının avantajları ve dezavantajları şunlardır:

- Avantajları: Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, iyi dökülebilirlik, mükemmel mekanik özellikler ve korozyon direnci.

- Dezavantajları: Birçok avantajına rağmen, alaşım gözeneklilik sergileyebilir ve döküm ve katılaşma sırasında hataları en aza indirmek için uygun kontrol gerektirir.

BÖLÜM ÜÇ
TEORİK ÇALIŞMALAR

3.1 Sıcak Yırtılma

Sıcak yırtılma, metal döküm parçalarında katılaşma sırasında ortaya çıkan bir kusurdur. Katılaşma sırasında, sıvı ve katı fazların bir arada bulunduğu yumuşak bölge, gerilimlerin ve büzülmelerin oluşmasına neden olur. Bu durum, sıcak yırtılma duyarlılığını etkileyen birçok faktörün rol oynadığı karmaşık bir süreçtir. Bu faktörler arasında alaşımın kimyasal bileşimi, katılaşma hızı, döküm geometrisi, ısı transferi, sıvı besleme, dendritik yapı ve intermetalik fazlar sayılabilir

Tablo 3.1. Sıcak yırtılma özellikleri (Dubey ve diğer., 2015)

Sıcak Yırtılma Özellikleri	**Ayrıntılar**
Görsel	Yırtık, dallanmış bir çatlak oluşturur. Ana yırtık ve birçok küçük yan çatlak genellikle tane sınırlarını takip eder.
Mikroskop görüntüsü	Dendritik bir morfolojiyi ortaya çıkarır
Zaman	Malzeme hala uyumsuz aşamada iken. Katılaşmanın tamamlanmasına yakın.
Konum	Genellikle bir sıcak noktada bulunur. Bitişik, geniş ince bölümlerden kaynaklanan çekme gerilimi yoğunlaşabilir.
Sıcaklık	Solidus sıcaklığında veya hemen üzerinde.
Kusurlar	Belirli malzemelere özgüdür. Zayıf malzemede tek eksenli çekme kırılması. Sıvı fazda hidrostatik gerilmelerden kaynaklanan gözeneklerle ilgili besleme problemi.

Sıcak yırtılma oluşumunu tahmin etmek için, çeşitli kriterler ve modeller geliştirilmiştir. Bu kriterler ve modeller, sıvı ve katı fazların hacim fraksiyonları,

gerilimler, sıcaklık, viskozite, dendritik yapı ve intermetalik fazlar gibi parametreleri dikkate alır. Sıcak yırtılma kriterleri, genellikle sıvı fazın kritik hacim fraksiyonu veya kritik gerilim değerini belirler. Bu değerlerin aşıldığı durumlarda, sıcak yırtılma oluşur (Campbell ve diğer., 2011.; Rappaz ve diğer., 1999).

Sıcak yırtılma önlenmesi için, alaşımın sıcak yırtılma duyarlılığını azaltacak şekilde tasarlanması ve işlenmesi gerekir. Bu amaçla, alaşımın kimyasal bileşimi, kalıp sıcaklığı, döküm sıcaklığı, katılaşma hızı, ısı transferi, sıvı besleme, dendritik yapı ve intermetalik fazlar gibi faktörler optimize edilmelidir. Ayrıca, alaşımın tane morfolojisi de sıcak yırtılmaya karşı direncini etkiler. Tane boyutu, şekli ve sınırları üzerinde çalışmalar yaparak, sıcak yırtılma olasılığını azaltmak mümkündür (Campbell ve diğer, 2011.; Rappaz ve diğer., 1999).

Sıcak yırtılmayı daha iyi anlamak ve tahmin etmek için çeşitli fenomenolojik modeller ve kriterler geliştirilmiştir. Bu modeller ve kriterler, alaşımın katılaşma davranışını, termal gerilimleri, tane yapısını ve sıcak yırtılma oluşumunu matematiksel olarak tanımlamaya çalışır.

Sıcak yırtılma, net şekilli dökümün katılaşması sırasında ortaya çıkan bir kusurdur. Sıcak yırtılma, alaşımın mekanik özelliklerini, yüzey kalitesini ve performansını olumsuz etkiler. Yıllar boyunca, sıcak yırtılma birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve analiz edilmiştir. Sıcak yırtılma ve onu etkileyen kritik faktörlerde alaşım bileşimi, tane morfolojisi, kalıp ön ısıtma sıcaklığı ve dökme sıcaklığı göze çarpanlardır.

3.1.1 Alaşımların Bileşiminin Sıcak Yırtılma Eğilimi Üzerindeki Etkisi

Alaşımların bileşimi, sıcak yırtılma eğilimini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Alaşımların bileşimi, katılaşma aralığını, katılaşma hızını, katılaşma sırasında oluşan fazları ve bunların dağılımını, katılaşma gerilimini ve akışkanlığı etkiler. Katılaşma aralığı, sıvı ve katı fazların eş zamanlı olarak var olduğu sıcaklık aralığıdır. Katılaşma aralığı, alaşımların sıcak yırtılma eğilimi ile ters orantılıdır. Yani, katılaşma aralığı dar olan alaşımlar, katılaşma aralığı geniş olan alaşımlara göre daha düşük sıcak yırtılma eğilimine sahiptir. Bunun nedeni, katılaşma aralığı dar olan alaşımlarda, katılaşma sırasında oluşan gerilmelerin daha hızlı gevşemesi ve sıvı beslemenin daha

kolay sağlanmasıdır. Katılaşma aralığı, alaşımların bileşimine bağlı olarak değişir. Alaşımlara katılan elementler, alaşımların erime noktasını düşürebilir veya yükseltebilir. Erime noktasını düşüren elementler, katılaşma aralığını genişletirken, erime noktasını yükselten elementler, katılaşma aralığını daraltır. Örneğin, alüminyum alaşımlarında, silisyum, magnezyum, bakır, çinko gibi elementler, alüminyumun erime noktasını düşürerek, katılaşma aralığını genişletirler. Buna karşılık, demir, nikel, titanyum gibi elementler, alüminyumun erime noktasını yükselterek, katılaşma aralığını daraltırlar. Bu nedenle, alaşımların bileşimini değiştirerek, katılaşma aralığını ve dolayısıyla sıcak yırtılma eğilimini kontrol etmek mümkündür (S. Li, 2010; S. Li ve diğer., 2011).

Alüminyum alaşımlarında sıcak yırtılma eğilimini etkileyen dört önemli alaşım elementi olan silisyum, magnezyum, bakır ve çinkonun etkilerinden daha detaylı bahsedersek;

Silisyum (Si), alüminyum alaşımlarına en çok eklenen elementtir. Silisyum, alaşımın sertliğini, aşınma direncini ve dökülebilirliğini artırır. Ayrıca, silisyum, alüminyumun erime noktasını düşürerek, katılaşma aralığını daraltır ve sıcak yırtılmayı azaltır. Ancak, silisyum miktarı arttıkça, katılaşma aralığı tekrar genişler ve sıcak yırtılmayı artırır. Bu nedenle, silisyum miktarı, alaşımın sıcak yırtılma eğilimi üzerinde bir optimum noktaya sahiptir. Genellikle, alüminyum-silisyum alaşımlarında silisyum miktarı %7 ile %13 arasında değişir. Bu aralıkta, silisyum, ötektik fazın miktarını ve morfolojisini değiştirerek, sıcak yırtılmayı azaltır. Ötektik faz, katılaşma sırasında sıvı fazın son kısmını oluşturan, alüminyum ve silisyumdan oluşan bir fazdır. Ötektik fazın miktarı ve şekli, alaşımın sıcak yırtılma eğilimini etkiler. Ötektik fazın miktarı azaldıkça, sıcak yırtılma eğilimi azalır. Ötektik fazın şekli ise, silisyumun katılaşma modunu değiştirerek, iğne şeklinde veya küresel şekilde olabilir. İğne şeklindeki ötektik faz, sıcak yırtılmayı artırırken, küresel şeklindeki ötektik faz, sıcak yırtılmayı azaltır. Silisyumun katılaşma modunu değiştirmek için, alüminyum-silisyum alaşımlarına sodyum, stronsiyum veya fosfor gibi modifiye edici elementler eklenir. Bu elementler, silisyumun katılaşma sıcaklığını yükselterek, katılaşma aralığını daraltır ve ötektik fazın şeklini küreselleştirir. Böylece, alüminyum-silisyum alaşımlarının sıcak yırtılma eğilimi azaltılır (Aguiar, 2020; Barrirero, 2019).

Magnezyum (Mg), alüminyum alaşımlarına dayanım, hafiflik ve korozyon direnci sağlayan bir diğer önemli elementtir. Magnezyum, alüminyumun erime noktasını düşürerek, katılaşma aralığını genişletir. Bu genişleme, sıcak yırtılma olasılığını artırabilir, çünkü katı ve sıvı fazlar arasındaki geçiş daha uzun sürebilir ve bu durum, katılaşma sırasında iç gerilmelerin artmasına neden olabilir. Bu nedenle, magnezyum miktarı, alaşımın sıcak yırtılma eğilimi üzerinde bir optimum noktaya sahiptir. Genellikle, alüminyum-magnezyum alaşımlarında magnezyum miktarı %1 ile %10 arasında değişir. Bu aralıkta, magnezyum, ötektik fazın miktarını ve morfolojisini değiştirerek, sıcak yırtılmayı etkiler. Magnezyum, ötektik fazın miktarını azaltarak, sıcak yırtılmayı azaltır. Ancak, magnezyum, ötektik fazın şeklini iğne şeklinde yaparak, sıcak yırtılmayı artırır. Bu nedenle, alüminyum-magnezyum alaşımlarında, ötektik fazın miktarı ve şekli arasında bir denge sağlanmalıdır. Alüminyum-magnezyum alaşımlarında, sıcak yırtılma eğilimini azaltmak için, alaşıma çinko, krom, manganez veya silisyum gibi diğer elementler de eklenir. Bu elementler, alaşımın katılaşma aralığını, ötektik miktarını ve mikroyapısını değiştirerek, sıcak yırtılmayı etkiler (B. Hu ve diğer., 2021).

Bakır (Cu), özellikle ısıya dayanıklı alüminyum alaşımlarında sıklıkla kullanılır ve mekanik özellikleri iyileştirir. Bakır, alüminyumun erime noktasını yükselterek, katılaşma aralığını genişletir. Bu genişletme, genellikle alaşımın sıcak yırtılma eğilimini artırır. Bakır, katılaşma aralığını genişleterek, sıvı fazın katılaşma sırasında daha uzun süre korunmasına neden olur, bu da çatlak oluşumunu kolaylaştırabilir. Bu nedenle, bakır miktarı, alaşımın sıcak yırtılma eğilimi üzerinde bir optimum noktaya sahiptir. Genellikle, alüminyum-bakır alaşımlarında bakır miktarı %2 ile %6 arasında değişir. Bu aralıkta, bakır, alaşımın ısıl işlemle sertleştirilebilirliğini sağlayarak, sıcak yırtılmayı azaltır. Isıl işlemle sertleştirilebilirlik, alaşımda katılaşma sırasında oluşan süper-satüre çözeltinin, ısıl işlemle çökeltilmesi ve alaşımın sertliğinin ve dayanımının artmasıdır. Alüminyum-bakır alaşımlarında, sıcak yırtılma eğilimini azaltmak için, alaşıma magnezyum, silisyum, çinko veya demir gibi diğer elementler de eklenir.

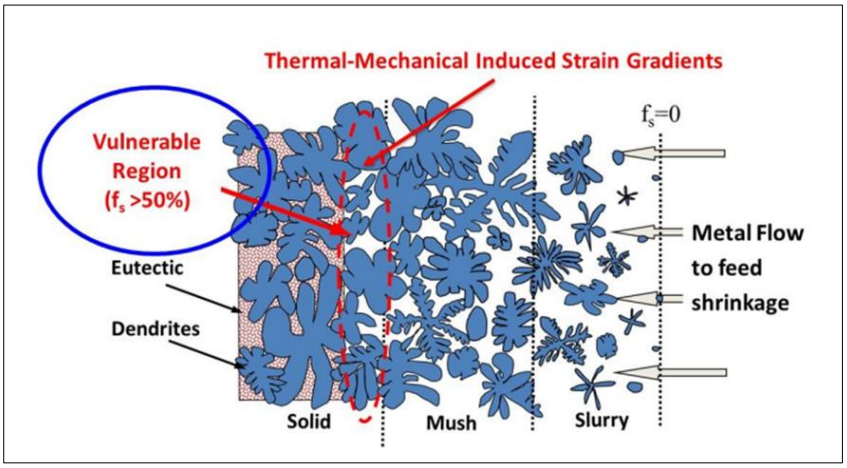
Çinko (Zn), özellikle yüksek mukavemet gerektiren alüminyum alaşımlarında kullanılır. Çinko, alüminyumun erime noktasını düşürerek, katılaşma aralığını genişletir. Bu genişletme, sıcak yırtılma riskini artırabilir, çünkü katılaşma sırasında

sıvı fazın miktarı artar ve bu da çatlak oluşumunu kolaylaştırabilir. Bu nedenle, çinko miktarı, alaşımın sıcak yırtılma eğilimi üzerinde bir optimum noktaya sahiptir. Genellikle, alüminyum-çinko alaşımlarında çinko miktarı %1 ile %8 arasında değişir. Bu aralıkta, çinko, alaşımın dayanımını, sertliğini ve yüksek sıcaklık performansını artırır. Ayrıca, çinko, alaşımın ısıl işlemle sertleştirilebilirliğini sağlar. Isıl işlemle sertleştirilebilirlik, alaşımda katılaşma sırasında oluşan süper-satüre çözeltinin, ısıl işlemle çökeltilmesi ve alaşımın sertliğinin ve dayanımının artmasıdır. Alüminyum-çinko alaşımlarında, sıcak yırtılma eğilimini azaltmak için alaşıma magnezyum, bakır, krom veya manganez gibi diğer elementler de eklenir. Bu elementler, alaşımın katılaşma aralığını, ötektik miktarını ve mikroyapısını değiştirerek, sıcak yırtılmayı etkiler (Ghambarian ve diğer., 2018).

3.1.2 A356 Alaşımında Sıcak Yırtılmaya Tane Morfolojisinin Etkisi

Tane morfolojisi, sıcak yırtılma üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Dendritik yapılar, katılaşma sırasında oluşan tanelerin şeklini ve boyutunu belirler. Dendritik olmayan yapılar, tane inceltici maddeler, alaşım bileşimindeki değişiklikler ve termal koşulların optimizasyonu ile elde edilir. Bu yapılar, sıcak yırtılmayı hafifletir, çünkü daha iyi köprülenmiş bir yapı oluşturur ve böylece artan katılaşma gerilimlerine ve streslere direnebilir.

Şekil 3.1'de dendritik katılaşma alaşımındaki sıcak yırtılma duyarlılığını göstermektedir. Dendritik yapı, katılaşma sırasında oluşan tanelerin şeklini ve boyutunu belirler. Birincil katılaşma fazının dendritik yapısına sahip çok fazlı alaşımlar, sıcak yırtılmaya karşı daha yüksek bir eğilime sahiptir (Rappaz vd., 1999). Bu alaşımlarda, katılaşma sırasında oluşan taneler sürekli büzülmeye ve artan gerilime maruz kalır. Bu gerilimleri azaltmak için, yumuşak bölgede kalan sıvının taneler arasında akışkanlığını koruması ve boşlukları doldurması gerekir. Ancak, çok fazlı alaşımlarda, intermetalik fazlar (IMP) katılaşma sırasında gelişmeye başlar ve birincil Al fazlarının taneleri etrafında karmaşık ve bağlantısız bir intermetalik faz ağı oluşturur. Bu ağ, sıvının taneler arası besleme yollarını tıkar ve besleme eksikliğine yol açar. Sonuç olarak, büyüyen boşlukların etrafında yoğunlaşan artan gerinim alanlarından sıcak yırtılmaya yol açan stabil boşlukların oluşmasına neden olur (Aguiar, 2020; Campbell ve diğer., 2011; Sigworth, 2002)



Şekil 3.1. Birincil katılaşma fazının dendritik yapısına sahip çok fazlı bir alaşımdaki sıcak yırtılma duyarlılığının şematik gösterimi (Rappaz ve diğer., 1999).

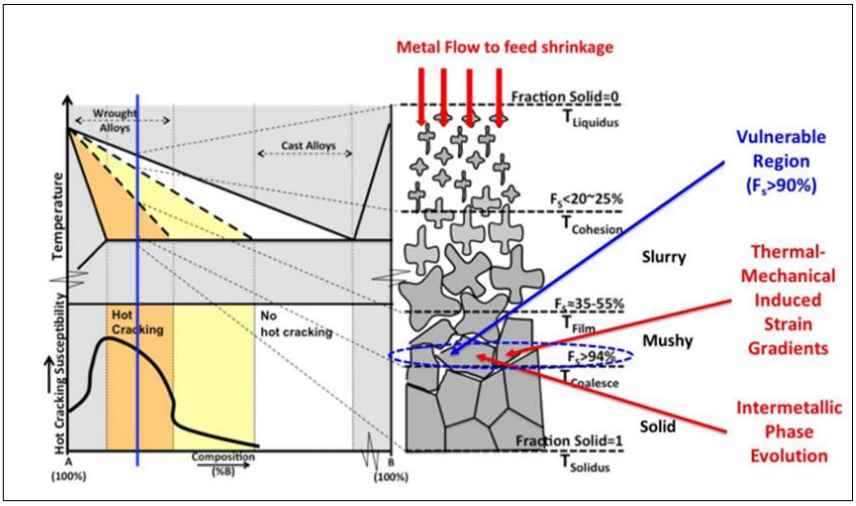
Şekil 3.2. Birincil fazın dendritik olmayan yapısıyla katılaşan tipik bir ikili ötektik altı alaşımdaki sıcak yırtılma duyarlılığının şematik gösterimi. Katı fraksiyonu, $T_{liquidus}$'ta sıfırken, $T_{solidus}$'ta bire kadar değişir. Katılaşma sırasında sıcak yırtılma olayını anlamak için kritik olan bazı aşamalar şunlardır:

$T_{Kohezyon}$, tanelerin birbirine çarpması nedeniyle sıvı beslemenin sınırlı olmaya başladığı ve birincil fazlar ağı boyunca sıvının beslenme yolunun kısıtlandığı noktadır;

T_{Film}, katının yaklaşık %35-55 oranında oluştuğu ve sıvı film kalınlığının minimum olduğu noktadır;

$T_{Coalesce}$, katı ağın %90'ının oluştuğu ve tanelerin, birincil taneciklerin etrafında ince bir sıvı filmi ile birleştiği noktadır.

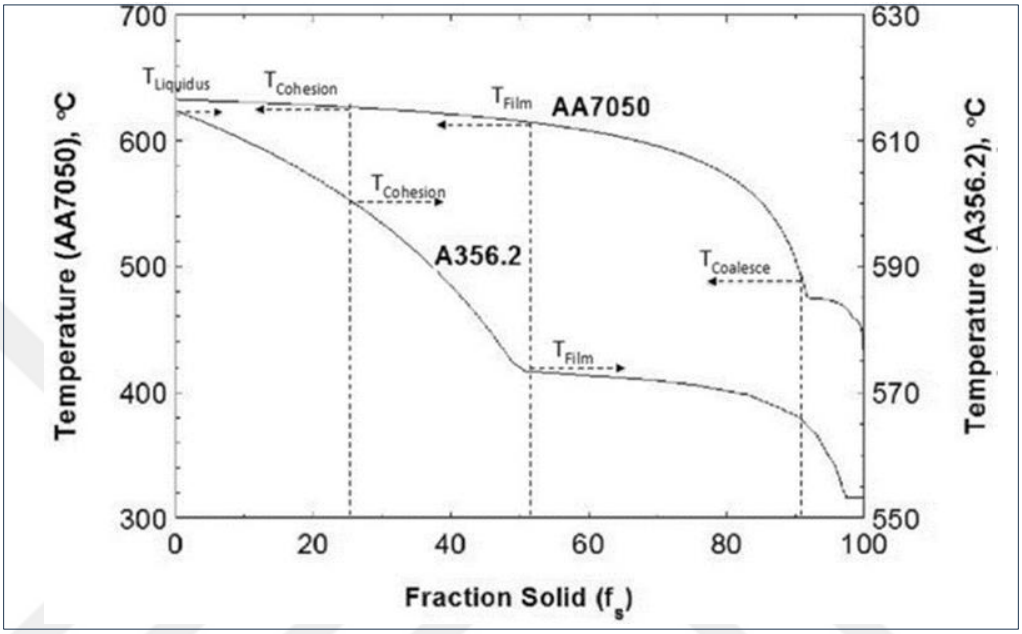
T_{Film}'den sonraki ve $T_{Coalesce}$'ye yakın olan bölge, alaşımın sıcak yırtılmaya en duyarlı olduğu bölgedir. Bu bölgede, yüksek katı oranı taneler arası beslenebilirliği kısıtlar ve birincil fazın etrafındaki ince sıvı tabakası lokal katılaşma gerilimlerine dayanamayarak sıcak yırtılmayı tetikler (Barrirero, 2019; Campbell ve diğer,. 2011; Rappaz ve diğer., 1999).



Şekil 3.2. İkili alaşım sisteminin ve dendritik olmayan yapının katılaşması sırasında katı fraksiyonun bir fonksiyonu olarak sıcak yırtılma duyarlılığının şematik gösterimi (Rappaz ve diğer., 1999).

Metalik alaşımlar genel olarak tek fazlı veya çok fazlı alaşımlar olarak kategorize edilir. Şekil 3.3, tipik bir tek fazlı (AA7050) ve çok fazlı (A356.2) alaşımlarda yumuşak bölgenin katılaşması sırasında geçici katı fraksiyonunun gelişimini göstermektedir. Şekil 3.3, çok fazlı alaşımlarda katı fraksiyonun gelişim hızının kademeli olduğunu, tek fazlı alaşımlarda ise gelişimin başlangıçta önemli ölçüde hızlı olduğunu göstermektedir. Örnek olarak, her iki alaşımda da %25 katı oluşumu için, tek fazlı bir alaşım için $T_{Liquidus}$ ve $T_{Cohesion}$ arasındaki sıcaklık farkı (ΔT), çok fazlı alaşıma göre önemli ölçüde daha küçüktür ve tutarlı tanenin hızlı bir şekilde oluşmasına yol açar. Çok fazlı alaşımlar genellikle $T_{Coalesce}$ göstermez ve birincil Al, yaklaşık %50 katı rejimde gelişmeyi durdurur ve çok fazlı bir ötektik sistem olarak katılaşmaya önemli miktarda sıvı bırakır. Sonuç olarak, katılaşma sırasındaki sürekli hacimsel büzülme, kalan sıvı yığın tarafından sürekli olarak beslenecek ve bu da sıcak yırtılmaların olmamasıyla sonuçlanacaktır. Tek fazlı alaşımlarda, birincil Al fazı, yaklaşık 0,9'luk bir katı fraksiyonuna kadar geniş bir sıcaklık aralığında gelişir. Bu durum alaşımı büyük gerinim ve gerilim alanlarına direnmede zayıf olabilecek önemli ölçüde ince bir sıvı katmanına sahip hale getirir. Katılaşma ve dökme sıvı tarafından verimli bir şekilde beslenmeme yüksek HTS'ye yol açar. Ayrıca, tek fazlı bir alaşımın katılaşmasının son aşamaları sırasında (%70'ten fazlası katı), katılaşma sırasında bir intermetalik faz oluştuğunda, bunlar taneler arası bölgelerdeki sıvı besleme yollarını

bloke etmeye başlar. Bu aynı zamanda HTS'nin artmasına da katkıda bulunabilir. Bu nedenle, tek fazlı alaşımlardaki HTS, çok fazlı muadilinden daha büyüktür ve bu alaşımlarda katılaşmanın son aşamalarını besleyen sıvı eksikliği, intermetaliklerin gelişimi ve yetersiz besleme nedeniyle kılcal besleme yollarının bir veya birkaçının tıkanmasından kaynaklanabilir.

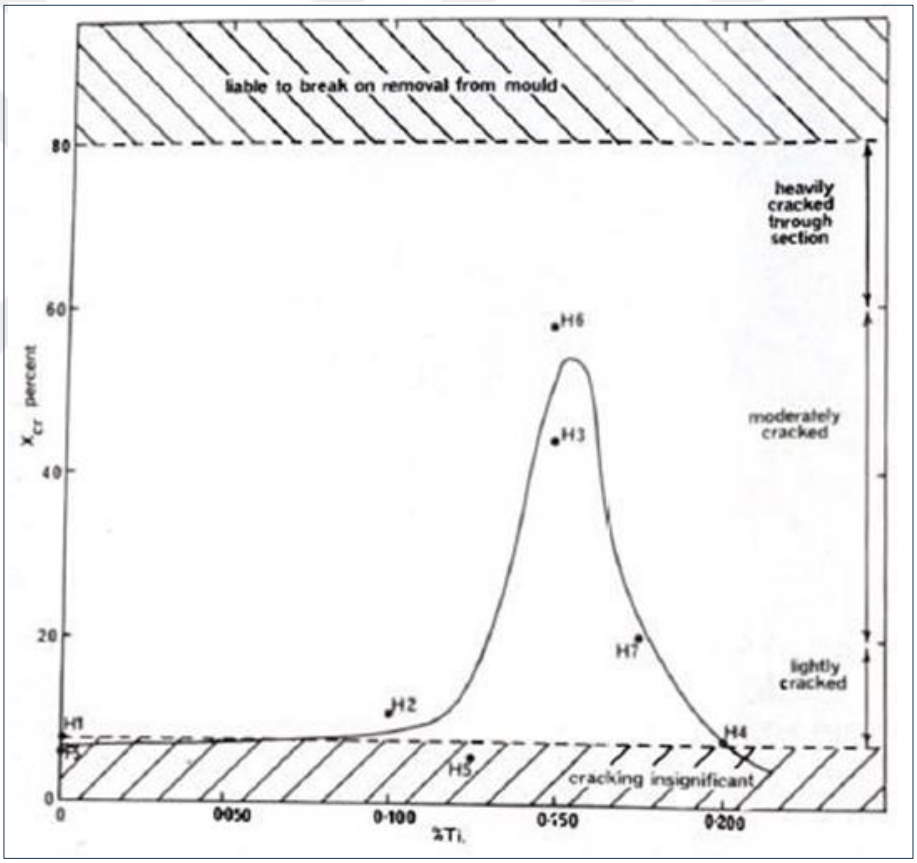


Şekil 3.3. Tek fazlı alaşım ve çok fazlı alaşım için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak geçici katı fraksiyonun tipik gelişimi; Sırasıyla AA7050 ve A356.2 (Aguiar, 2020)

Dendritik olmayan yapı, döküm esnasında tane yapısını sütunlu dendritik formdan eşeksenli forma dönüştürmek için farklı tane inceltici katkılar, alaşım bileşimleri ve termal koşullar kullanılarak elde edilir. Dendritik olmayan birincil faz morfolojisi, malzemenin daha yüksek akışkanlıkta olmasını ve böylece taneler arasındaki boşlukları daha etkin bir şekilde doldurmasını sağlar. Bu durum, malzemenin katılaşma esnasında artan gerilim ve streslere karşı daha dayanıklı bir yapı oluşturmasına yardımcı olur.

Clyne ve Davies'in 1975 yılında yaptığı çalışmada, Al-Mg alaşımlarına tane inceltici olarak titanyum eklemenin etkileri incelenmiştir. Araştırmada, iki farklı Al-Mg alaşımı üzerinde deneyler gerçekleştirilmiş; biri düşük çatlama duyarlılığına sahip Al-%2Mg alaşımı, diğeri ise yüksek çatlama duyarlılığı gösteren Al-%1Mg alaşımı.

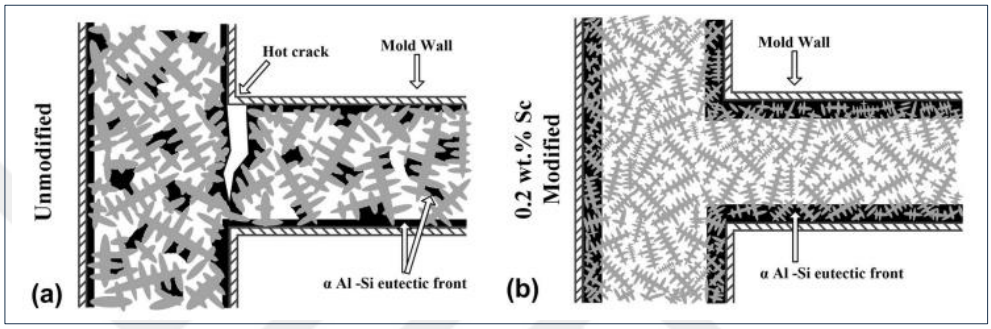
Her iki alaşımda da başlangıçta tane inceltici (Ti) olmaksızın sütunlu tane morfolojisi gözlenmiştir. Araştırmanın sonucunda düşük çatlama duyarlılığına sahip alaşımda, titanyum ilavesinin tane boyutunu küçülttüğü ve taneleri eşeksenli yapıya dönüştürdüğü gözlemlenmiş olmasına rağmen, titanyum içeriğinin dar bir aralığında çatlama eğiliminin arttığını ortaya koymuştur. Bu değişim Şekil 3.4'te görselleştirilebilir niteliktedir. Öte yandan, yüksek çatlama duyarlılığına sahip alaşım, titanyum ilavesinden etkilenmiş ve yüksek seviyelerdeki titanyum ilavesi (%0,2'den fazla) ile tanelerin sütunludan eşeksenliye dönüşümü sağlanmıştır. Clyne ve Davies tarafından yapılan bu çalışmalar, safsızlık içeriği, tane yapısı ve çatlama duyarlılığı arasında karmaşık bir ilişki olduğunu göstermiştir.



Şekil 3.4. Ti ile yüksek saflıkta Al-%2Mg alaşımı için bileşim ile çatlama fraksiyonunun değişimi (Aguiar, 2020)

K. Puparattanapong'ın çalışmasında, A356 hipöotektik Al-Si alaşımının dökülebilirliği üzerindeki scandium (Sc) katkısının etkisi incelenmiştir. Araştırmada,

alaşımların akıcılığı çok kanallı bir kalıpta katılaşan alüminyumun toplam hacmi ölçülerek ve alaşımların sıcak çatlama hassasiyeti kısıtlanmış çubuk döküm kalıp testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, mikroyapısal analizle desteklenmiştir ve 0,2 ağırlık yüzdesi Sc katkısının, katılaşma modunu değiştirerek tane incelmesi ve ötektik Si modifikasyonu sayesinde A356 alaşımının akıcılığını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ancak, Sc içeriği %0,4'e çıkarıldığında, primer Al_2Si_2Sc intermetalik fazın oluşumu nedeniyle akıcılık hafifçe azalmaktadır. A356 alaşımına Sc eklenmesiyle sıcak çatlak tamamen ortadan kaldırılmıştır (Puparattanapong vd., 2018).



Şekil 3.5. Ötektik katılaşma aşamasındaki sıcak yırtılmanın şematik çizimleri: a) Sc modifiye edilmemiş ve b) ağırlıkça %0,2 Sc değiştirilmiş (Puparattanapong ve diğer., 2018)

3.1.3 A356 Alaşımında Sıcak Yırtılmaya Kalıp Sıcaklığının Etkisi

A356 alaşımında sıcak yırtılmaya karşı mücadelede, kalıp sıcaklığının doğru bir şekilde ayarlanması ve kontrol edilmesi kritik önem taşır. Döküm teknikleri ve alaşımın özelliklerine göre uygun kalıp sıcaklığı seçimi, alaşımın mekanik özelliklerini, mikro yapısını ve döküm sırasındaki davranışını iyileştirebilir, böylece sıcak yırtılma riskini azaltabilir.

Kalıp sıcaklığı, alaşımın soğuma ve katılaşma hızını doğrudan etkiler. Daha yüksek kalıp sıcaklıkları, soğuma hızını düşürerek alaşımın iç yapısında heterojeniteler oluşmasını azaltabilir. Bu, katı ve sıvı fazlar arasındaki geçiş sırasında oluşabilecek gerilmeleri ve dolayısıyla sıcak yırtılma olasılığını azaltır (Rappaz ve diğer., 1999). Yüksek kalıp sıcaklıkları, alaşımın daha yavaş soğumasına neden olarak termal gradyanları azaltır. Bu durum, döküm sırasında oluşabilecek iç gerilimleri ve

dolayısıyla sıcak yırtılma riskini azaltır (S. Li ve diğer., 2016; Pulisheru ve Birru, 2021).

Sıcak yırtılma ile alaşımın mikroyapısı arasındaki ilişki, alaşımların döküm kalitesinin anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir. Daha düşük kalıp sıcaklıklarında hızlı soğuma, daha ince taneli bir yapıya yol açar ve bu durum sıcak yırtılmaya daha yatkın olabilir (B. Hu ve diğer., 2021; S. Li ve diğer., 2016). Buna karşılık, yüksek kalıp sıcaklıkları daha iri taneli bir yapı oluşturarak sıcak yırtılma olasılığını azaltabilir.

Farklı döküm teknikleri, kalıp sıcaklığının sıcak yırtılmaya etkisi açısından farklı sonuçlar verebilir. Örneğin, basınçlı dökümde daha düşük kalıp sıcaklıkları tercih edilirken, kum dökümde daha yüksek sıcaklıklar kullanılabilir. Her döküm yöntemi için optimal kalıp sıcaklığının belirlenmesi, üretim verimliliği ve ürün kalitesi için önemlidir (S. Li, 2010; Sigworth, 2002).

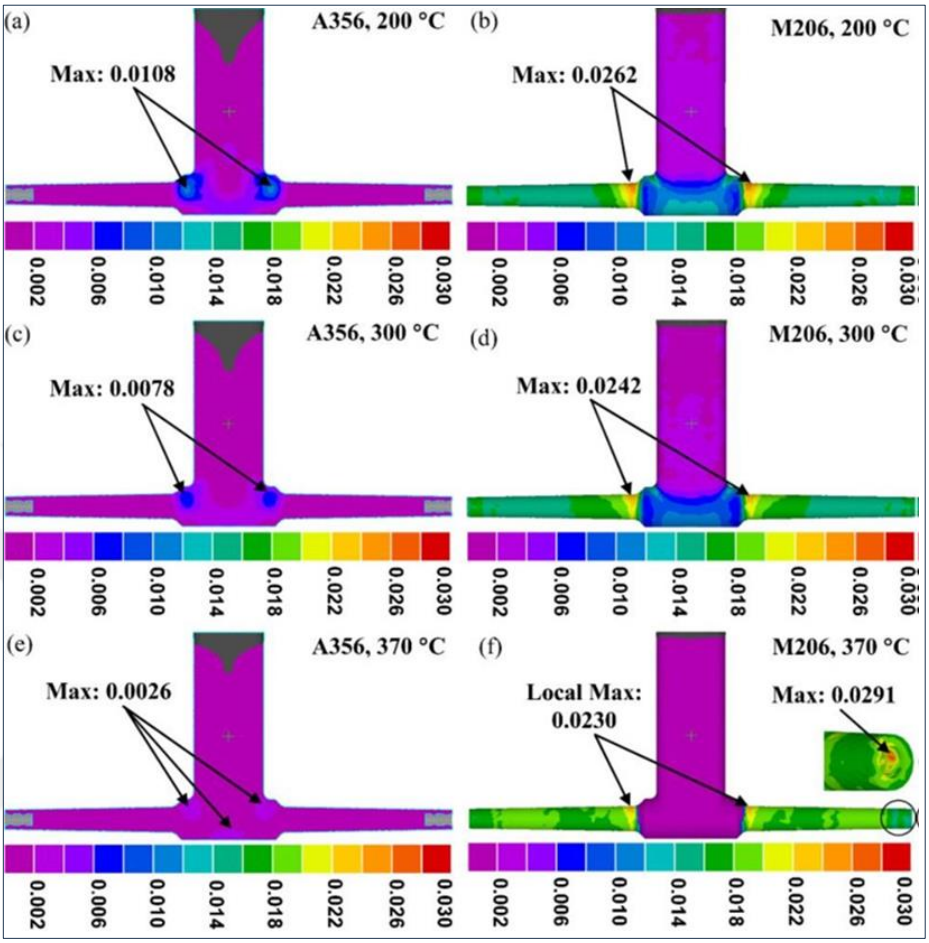
Sıcak yırtılma üzerine yapılan çoğu çalışma, soğutma hızını kontrol etmek veya katılaşma modelini düzenlemek amacıyla kalıp sıcaklığını kullanmaktadır. Yayınlanan literatürlerde bu konuda çok sınırlı çalışma bulunmaktadır.

Wang ve arkadaşları, alüminyum alaşımlarında tane incelmesinin önemine odaklanmıştır. Çalışma, kalıp sıcaklığının tane boyutu ve morfolojisi üzerindeki etkilerini ele almış ve bu etkilerin sıcak yırtılma olasılığı üzerinde nasıl bir rol oynadığını tartışmıştır. Daha düşük kalıp sıcaklıklarında tane boyutunun küçülmesi ve bu durumun sıcak yırtılmayı artırabileceği sonucuna varılmıştır (Fu ve diğer., 2017).

Li ve arkadaşlarının 2016 yılındaki çalışmasında, kalıp ön ısıtma sıcaklığının alüminyum döküm alaşımlarının sıcak yırtılma davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışma sırasında, sıcak yırtılmaya yüksek eğilim gösteren modifiye Al-Cu alaşımı 206 (alaşım M206, Ti eklenmemiş) ve A356 alaşımı üzerinde deneyler yapılmıştır. Katılaşma sürecini yük, zaman ve sıcaklık açısından değerlendiren bu deneyler, kısıtlı bir çubuk kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde, M206 alaşımı için 750°C ve A356 alaşımı için 715°C döküm sıcaklıklarında, 200, 300, 370°C kalıp ön ısıtma sıcaklıklarında testler uygulanmıştır.

Bulgular, düşük kalıp ön ısıtma sıcaklığının her iki alaşımda da sıcak yırtılmaya eğilimi artırdığını göstermiştir.



Şekil 3.6. Üç farklı kalıp ön ısıtma sıcaklığına ve 750 ºC'ye eşit dökme sıcaklığına sahip çelik kalıpta dökülen A356 (a, c, e) ve M206 (b, d, f) için sıcak yırtılma göstergesi (Aguiar, 2020)

Zhen ve arkadaşlarının 2020 yılındaki çalışması, Mg-Al ikili alaşımlarında kalıp sıcaklığının sıcak yırtılma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Araştırma sonuçları, kalıp sıcaklığının artırılmasının sıcak yırtılma hassasiyetini düşürdüğünü göstermiştir. Daha yüksek kalıp sıcaklıklarının, çatlak oluşumunun başlangıç sıcaklığını yükselttiği ve çatlakların yayılma süresini uzattığı belirlenmiştir.

Mekanizma olarak, Zhen ve ekibi, tüm kalıp sıcaklıklarında çatlak oluşumu gözlemlediklerini ancak daha yüksek kalıp sıcaklıklarında, kalan sıvının çatlakları doldurabildiği ve iyileştirebildiği sonucuna varmışlardır. Yüksek kalıp sıcaklıklarının

daha düşük soğutma hızlarına sebep olduğu ve bu durumun daha kaba mikroyapı oluşumuna yol açtığı tespit edilmiştir. Bu kaba yapının, daha kalın ve daha sürekli bir kalan sıvı filmi oluşturduğu, böylece daha yüksek başlangıç sıcaklığıyla birleşerek çatlakların doldurulmasını ve iyileştirilmesini kolaylaştırdığı belirtilmiştir (Aguiar, 2020). Limmaneevichitr ve arkadaşlarının 2018 yılındaki çalışması, tane inceltme işleminin etkinliğini ve kalıp sıcaklığının bu süreçteki rolünü ele almıştır. Araştırmacılar, daha düşük kalıp sıcaklıklarında, çatlakların şiddetinde artış olduğunu gözlemlediklerini belirtmişlerdir (Puparattanapong ve diğer., 2018).

3.1.4 A356 Alaşımında Sıcak Yırtılmaya Döküm Sıcaklığının Etkisi

Dökme sıcaklığının sıcak yırtılma eğilimine etkisi döküm alanında çalışan birçok araştırmacının ana odak noktalarından biri olmuştur. Zaman içinde, bu konu üzerine yapılan araştırmalar literatürde birbiriyle uyumlu olmayan sonuçlar sergilemiş ve bu da araştırmacılar arasında dökme sıcaklığının HTS'yi artırıp artırmadığı veya azalttığı konusunda farklı görüşlere yol açmıştır. (Bichler ve diğer., 2008; Clyne ve diğer., 1975.; Song ve diğer., 2016).

Clyne ve Davies'in 1975 yılında yaptığı çalışma, Mg içeriği değiştirilirken farklı başlangıç döküm sıcaklıklarının etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, başlangıç döküm sıcaklığının artışının HTS'yi azalttığı gözlemlenmiştir. Ancak, alaşımdaki Mg içeriği ile HTS arasındaki ilişki daha karmaşıktır ve Clyne ve diğerlerinin belirttiğine göre, Mg'nin Al içindeki çözünürlüğü göz önünde bulundurulduğunda, HTS'nin, eriyik döküm sıcaklıklarının düşürülmesiyle birlikte alaşımdaki yüksek Mg değerlerine doğru hareket eden bir tepe değeri gösterdiği belirtilmiştir (Clyne ve diğer., 1975).

Buna karşın, Bichler ve arkadaşlarının 2008 yılında yaptığı bir diğer çalışmada, dökme sıcaklığını 680°C'den 720°C'ye değiştiren bir Al-Mg alaşımı (AZ91D) üzerinde yapılan deneylerde, dökme sıcaklığının HTS üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (Bichler ve diğer., 2008).

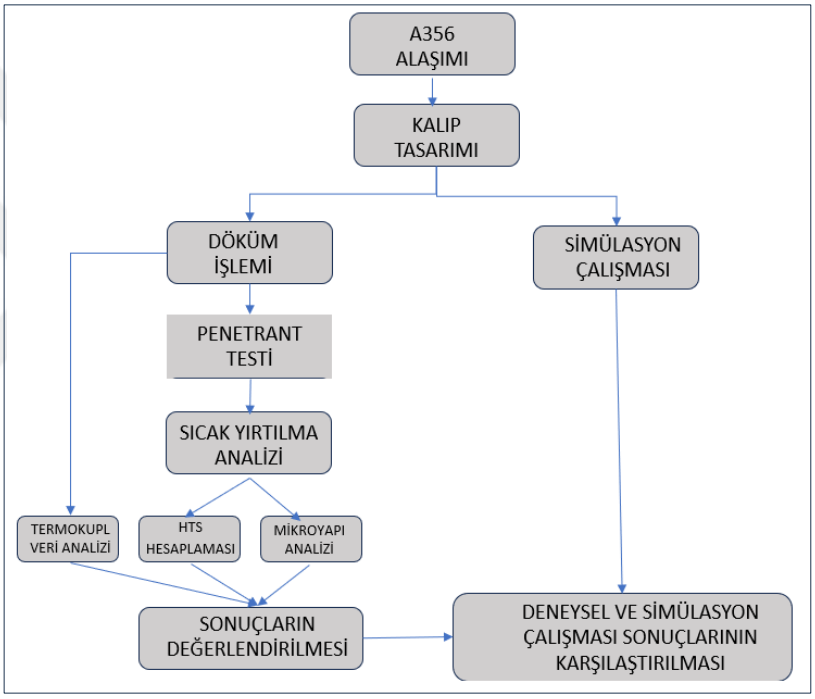
Bu iki örnek, dökme sıcaklığının HTS üzerindeki etkileri konusunda araştırmacılar arasında mevcut farklılıkları ve bu konuda bir fikir birliğine varılmasının zorluklarını göstermektedir. Literatürdeki bu tür çelişkili bulgular, dökme sıcaklığının HTS üzerindeki rolünün alaşımın türü, döküm koşulları ve diğer işlem parametreleri gibi

faktörlere göre değişkenlik gösterebileceğini işaret etmektedir. Bu karmaşık etkileşimler, döküm süreçlerinin daha iyi anlaşılması ve optimize edilmesi için daha fazla araştırma yapılmasını gerektirir.

BÖLÜM DÖRT
METOD VE YÖNTEM

4.1 DENEY TASARIMI

Bu bölüm, alaşımların hazırlanması ve eritilmesi, sıcak yırtılma kalıbının kullanıldığı döküm deneyleri, sıcak yırtılma analizleri ve mikro yapı değerlendirmesi dahil olmak üzere bu araştırmada gerçekleştirilen deneysel metodolojiyi sunmaktadır. Aşağıdaki şema bu çalışmada kullanılan metodolojinin bir özetini göstermektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Bu projede kullanılan metodolojinin akış şeması.

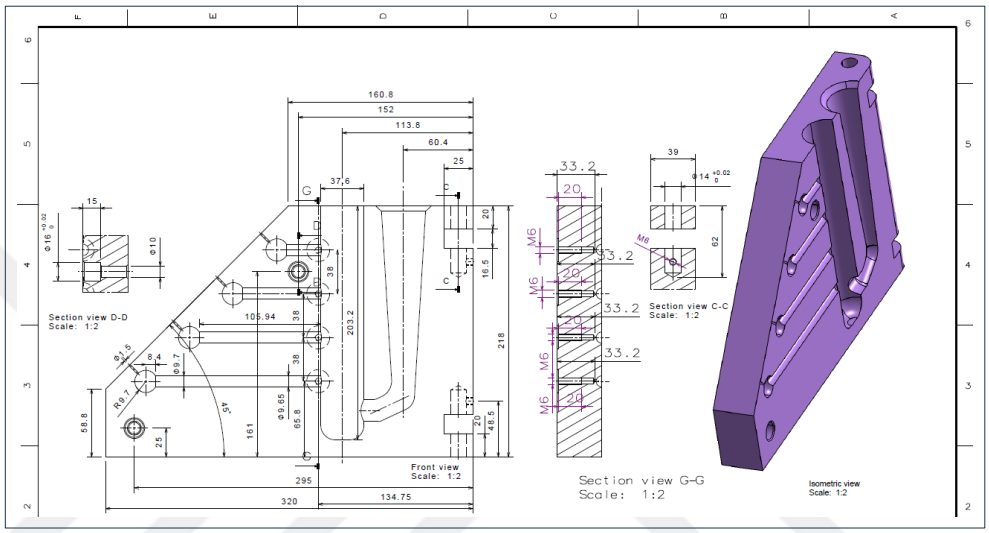
4.2 Kalıp Tasarımı

Kalıp tasarımı, belirli bir parçanın imalatında kullanılacak bir alet veya kalıbın oluşturulmasıdır. Kalıp genellikle metalden yapılır ve metal gibi ham maddeleri istenilen şekil veya formda kalıplamak için kullanılır.

İlk olarak, Catia CAD/CAM yazılımı kullanılarak, sıcak yırtılma riskinin yüksek olduğu bölgeleri dikkate alan bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Bu kapsamda, Şekil 4.2 ve

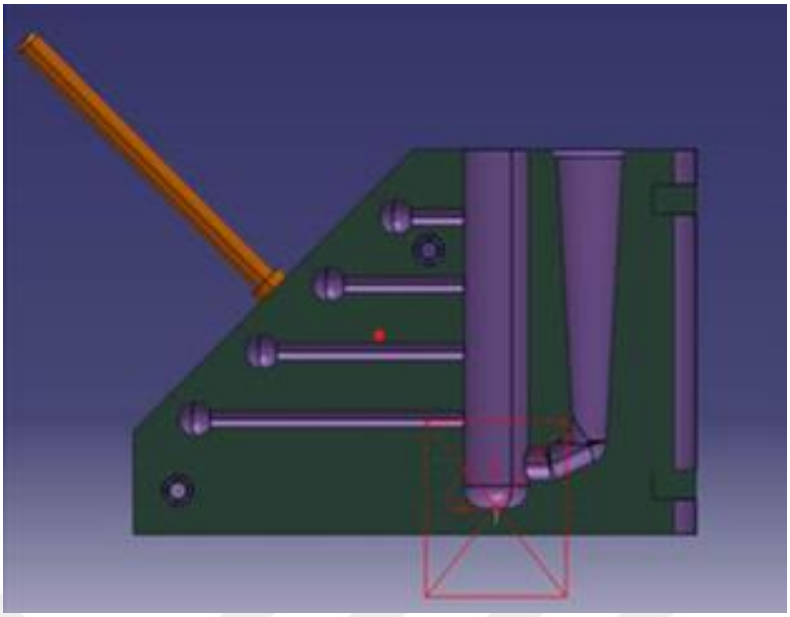
şekil 4.3'te gösterilen 4 kollu CRC kalıbı, sıcak yırtılmanın kolayca gözlemlenebileceği bir yapıda tasarlanmıştır. Bu tasarımda, kalıbın farklı bölümlerinde uçtan uca değişen soğuma hızları (kalın kesitlerde daha yüksek, ince kesitlerde daha düşük) elde etmek amaçlanmıştır.

Öncelikle kalıbın üretileceği ürün analiz edilerek kalıbın gerekli şekli, boyutu ve diğer temel özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 4.2. CRC sıcak yırtma kalıbının teknik çizim görünümü

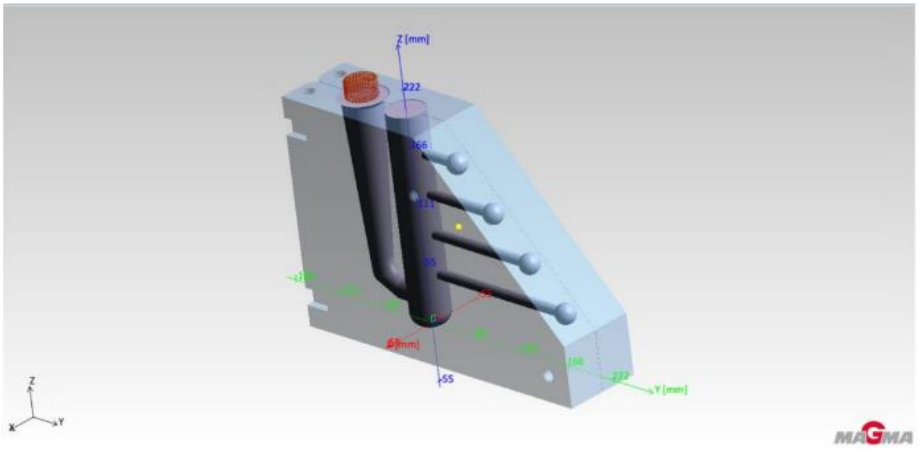
Catia/CAD programında tasarımın ana hatları ve ince detaylarıyla birlikte model oluşturulmuştur (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. CRC sıcak yırtma kalıbının üç boyutlu görünümü

4.3 Döküm Simülasyonu ve İstatistiksel Hesaplama

Tasarım tamamlandıktan sonra, bu CAD kalıbı MAGMASOFT döküm simülasyon yazılımına entegre edilmiştir. Standart döküm parametreleri (Min: 680°C, Ortalama: 700°C, Maks: 720°C döküm sıcaklığı ve Min: 240°C, Ortalama: 325°C, Maks: 400°C kalıp sıcaklığı) kullanılarak, A356 alaşımının gerçek döküm süreçlerini ve katılaşma özelliklerini incelemek üzere birden fazla deney planlanmıştır. Kalıbın termal rejimi ve her bir kolun orta noktasındaki soğuma eğrileri, sanal termokupllar kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Magmasoft yazılımında CRC sıcak yırtma kalıbının kalıp ve parça olarak birleşik görünümü

Tablo 4.1. MAGMASOFT Simülasyon döküm parametreleri.

Parameter	Material	Specification
Cast Part	Al7Si0.3Mg (A356)	Min and Max Temp
Modifier Element	Sr	150,250,350 and 450 ppm
Mold	X40CrMoV5-1 (H13)	150°C, 300°C and 450°C
Heat Transfer Between Cast Part and Mold	-	1-548°C # 1000 W/m^2*K 548-613°C # linear increment 613-1000°C # 2700 W/m^2*K
Cooling Channel (x2)	Air (6 bar, 20°C)	1450 W/m^2*K
Heat Transfer Between Mold and Medium	-	ε=0.3 h=20W/m^2*K
Heat Transfer Between Cast Part and Medium	-	ε=0.8 h=20W/m^2*K
Die Coating	Dycote34	Thickness= 0.1 mm
Molten Metal Inlet Mass Flow Rate	Al7Si0.3Mg (A356)	0.285 g/s

4.4 Döküm işlemi

Araştırma sürecinde kullanılan ana bileşen, saf ve orijinal A356.0 serisi alaşımlı külçelerdir. Bu külçelerin, toplu üretim için uygunluğunun belirlenmesi amacıyla, CMS'in uyguladığı kalite yönetimi protokollerinin bir parçası olarak yapılan ilk etap kalite denetimlerindeki spektrometre analiz sonuçları, Tablo 4.2'de ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Tablo 4.2. A356 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of A356 alloy)

Element	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Sb	Al
Ağırlıkça (%)	7.05	0.15	0.26	0.15	0.06	0.02	Kalan

Tablo 4.3. Spektrometre Analiz Çıktısı

Element	Si	Fe	Mg	Ti	Sr	Sb	P	B	Cu
Ortalama %	6,9546	0,1267	0,2413	0,1279	0,0412	0,0011	0,0001	0,0007	0,0005
Standart Sapma %	0,0653	0,3420	0,6637	0,4133	0,7179	20,9249	53,6518	8,2744	8,4717

Element	Mn	Zn	Cr	Zr	V	Ca	Na	Ni	Al
Ortalama %	0,0047	0,0036	0,0012	0,0015	0,0074	0,0015	0,0018	0,0042	92,4619
Standart Sapma %	2,4398	5,4599	5,4111	1,1559	0,4582	70,1033	13,4191	0,8693	0,0052

Sıvı Metal Hazırlama:

Döküm süreci, sıvı haldeki metaller gibi akışkan malzemelerin, önceden belirlenmiş bir tasarıma uygun boş bir kalıba dökülmesi ve bu şekilde soğuyup katılaşarak istenilen forma bürünmesi esasına dayanan bir üretim metodudur.

Bu katılaşma işlemi bittikten sonra, oluşan parçayı kalıptan çıkartarak ek işleme adımlarına geçilmiştir.

Tablo 4.4. Döküm parametreleri

DÖKÜM PARAMETRELERİ			
	Kod	**Döküm Sıcaklığı**	**Kalıp Sıcaklığı**
Deney No 1	680-240-1	680	240
	680-240-2	680	240
	680-240-3	680	240
Deney No 2	680-325-1	680	325
	680-325-2	680	325
	680-325-3	680	325
Deney No 3	680-400-1	680	400
	680-400-2	680	400
	680-400-3	680	400
Deney No 4	700-240-1	700	240
	700-240-2	700	240
	700-240-3	700	240
Deney No 5	700-325-1	700	325
	700-325-2	700	325
	700-325-3	700	325
Deney No 6	700-400-1	700	400
	700-400-2	700	400
	700-400-3	700	400
Deney No 7	720-240-1	720	240
	720-240-2	720	240
	720-240-3	720	240
Deney No 8	720-325-1	720	325
	720-325-2	720	325
	720-325-3	720	325
Deney No 9	720-400-1	720	400
	720-400-2	720	400
	720-400-3	720	400

Tablo 4.4'te belirtilen değerler tüm döküm parametreleri ve tekrarlar için elde edilmiştir. Kod kısmındaki rakamlar belirlediğimiz sıraya göre (Döküm Sıcaklığı-Kalıp Sıcaklığı-Deneme Sayısı) kodlanmıştır. Dökme Sıcaklığı bölümünde dökme işlemi başlarken anlık olarak termokupldaki erimiş metalin ölçülen değeri not edilir. Aynı şekilde Kalıp Sıcaklığı kolonundaki rakamlar da döküme başlarken anlık olarak ölçülen kalıp sıcaklığının değerlendirilmiştir.

Döküm İşlemi:

1- Döküm işleminde öncelikle Şekil 4.5'deki gibi kalıp yüzeyine termal sprey kaplama yöntemi olan poteyaj işlemini uygulanmıştır. Bunun amacı metalin yapışmasını önlemektir.



Şekil 4.5. CRC kalıbına poteyaj uygulaması (Kişisel arşiv, 2023)

2- Döküm sürecinin ikinci aşamasında, potaların ısıtılması için kullanılan eritme fırını önemli bir rol oynar. Potaların gösterildiği Şekil 4.6, bu aşamanın bir parçasıdır. Kalıp ve döküm sıcaklıkları döküm sürecinde en kritik parametrelerden bazılarıdır, çünkü bu sıcaklıkların dengeli olması, metalin doğru bir şekilde beslenmesi ve kaliteli bir döküm elde edilmesi için gereklidir.

Kalıbın ısınma direncinin uygun şekilde ayarlanması, döküm kalitesini doğrudan etkiler. Bu direncin doğru ayarlanması, kalıbın ısıtılması esnasında eşit ve istikrarlı bir sıcaklık dağılımının sağlanmasına yardımcı olur. Bu, döküm sırasında oluşabilecek termal stresleri ve çatlakları önlemek için kritik öneme sahiptir.

Eritme fırını, döküm işlemi için gerekli olan optimum sıcaklığa ulaşmak üzere ayarlanır. Ancak, fırından çıkarıldıktan sonra potansiyel bir sıcaklık kaybını telafi etmek için, sıcaklık genellikle döküm sıcaklığından biraz daha yüksek bir değere ayarlanır. Bu strateji, potaların fırından çıkarılması ve döküm işleminin gerçekleştirilmesi arasındaki süreçte oluşabilecek herhangi bir sıcaklık düşüşünü hesaba katarak döküm sıcaklığının istenen seviyede tutulmasını sağlar.

Bu aşama, dökümün başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için kritik bir öneme sahiptir ve döküm sıcaklığının ve kalıp sıcaklığının kontrolü, üretilen parçanın kalitesi üzerinde doğrudan etkili olur.

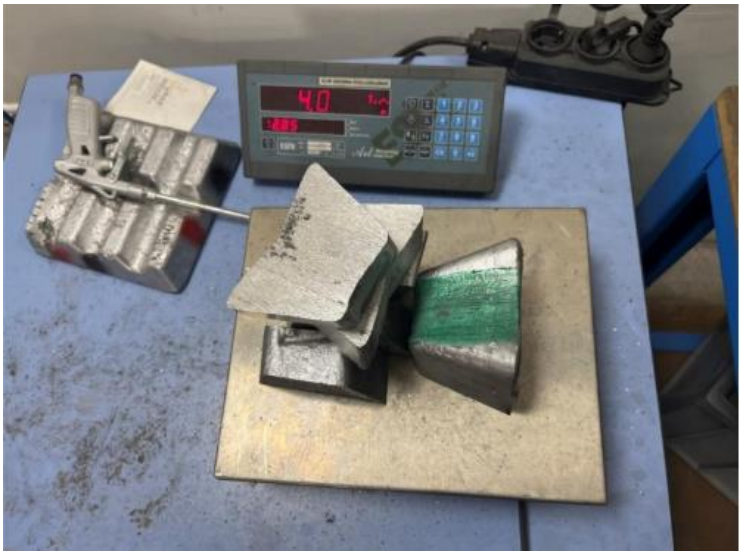


Şekil 4.6. Döküm potaları (Kişisel arşiv, 2023)



Şekil 4.7. Ergitme fırını (Kişisel arşiv, 2023)

3- Döküm sürecinin bir sonraki aşaması metalin eritilmesidir. Bu amaçla, 4 kg ağırlığında birincil alüminyum külçeler Şekil 4.4'te görüldüğü üzere tartılıp ve her biri ayrı ayrı potalara yerleştirilmiştir. Daha sonra bu potalar eritme fırınına konularak, eritme işleminin tamamlanması beklenilmiştir. Bu süreç, alüminyumun döküm için uygun sıvı hale gelmesini sağlamak amacıyla dikkatlice gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Potalara konulacak külçelerin tartılması (Kişisel arşiv, 2023)

4- Döküm sürecine geçmeden önce, ergitme ocağından çıkarılan ergimiş metal, gaz giderme işlemine tabi tutulur. Bu işlem, metaldeki gözeneklerin azaltılmasında oldukça etkilidir. Argon gazı kullanarak yürütülen bu süreçte, ergimiş metale kuru gaz kabarcıkları enjekte edilir ve bu kabarcıklar içerisine hidrojen yayılır (Şekil 4.9). Bu yöntemle, metal içindeki hidrojen miktarı aşamalı olarak düşürülür. Gaz giderme işleminin ardından, cüruf giderme işlemi de uygulanarak metalin saflığı daha da artırılır.



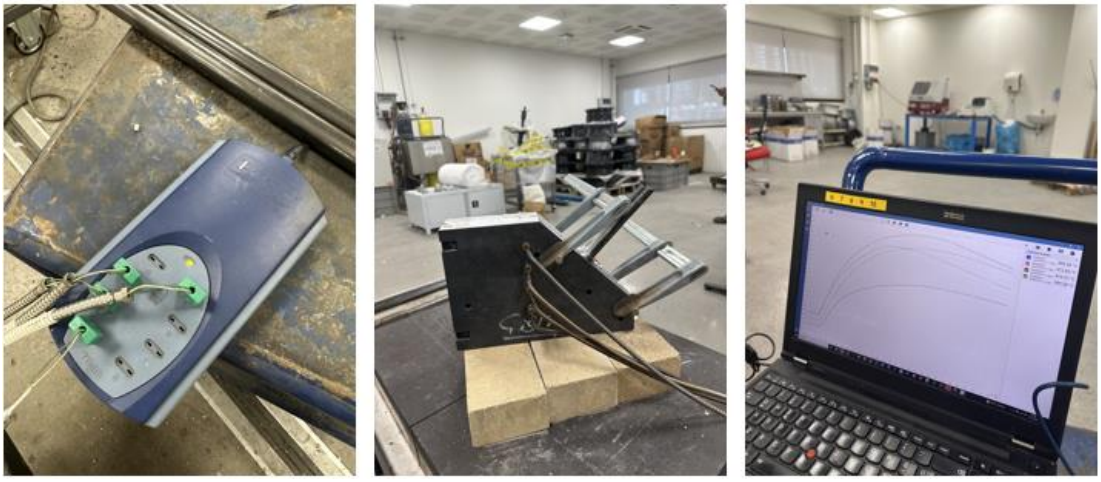
Şekil 4.9. Ergitme fırınından çıkan metalin gazdan arındırılması işlemi (Kişisel arşiv, 2023)

5- Gaz giderme işleminin tamamlanmasının ardından, metal artık döküm için hazır durumdadır. Bu noktada, döküm işlemi yerçekimi yöntemiyle yapılmıştır (Şekil 4.10). Bu süreç, belirlenen her bir parametre için dikkatlice tekrarlanarak, dökümün kalitesi ve tutarlılığı her koşulda sağlanmıştır.



Şekil 4.10. Gazdan arındırma sonrası döküm işlemi (Kişisel arşiv, 2023)

6- Döküm sürecinin başarısı büyük ölçüde, malzemenin soğuma dinamiklerine ve bu dinamiklerin yönetimine bağlıdır. Bu bağlamda, döküm sırasında termokupl kullanarak elde edilen sıcaklık-zaman verileri, malzemenin soğuma eğrilerini ve bu eğrilerin kalıp ile döküm parçasının etkileşiminin doğasını detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. A356 alüminyum alaşımının sıcak yırtılma riskini değerlendirirken, Şekil 4.11'de gösterildiği üzere kalıbın her koluna yerleştirilen termokupllardan alınan veriler, sıcaklık gradyanlarının ve soğuma hızlarının anlaşılmasında temel bir rol oynar. Bu veriler, kalıp sıcaklıklarının ve döküm sıcaklıklarının farklı kombinasyonlarının malzemenin termal davranışı üzerindeki etkilerini görselleştirmekte, böylece döküm parçalarının soğuma profillerini ve potansiyel sıcak yırtılma bölgelerini belirlemekte kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.11. Sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümü (Kişisel arşiv, 2023)

7- Dökümden sonra yoğunluk ölçümü için numuneler alınmıştır. Numunelerin yoğunluğunun ölçümü, hem hava hem de vakum ortamında gerçekleştirilmiştir. Hava ortamında yapılan testler, normal atmosferik basınç altında yoğunluğu belirlemek için kullanılırken, vakum ortamında yapılan testler, hava varlığının malzemenin yoğunluk ölçümlerine olan etkisini ortadan kaldırmak ve daha hassas bir ölçüm yapabilmek için tercih edilir. Vakum ortamında yapılan yoğunluk ölçümleri, özellikle gaz gözenekliliği veya hava kabarcıkları gibi döküm kusurlarının etkisini azaltmak amacıyla yapılır. Bu sayede, malzemenin gerçek yoğunluğu daha doğru bir şekilde tespit edilebilir.



Şekil 4.12. Gazlılık ölçümü (Kişisel arşiv, 2023)

4.5 Penetrant Testi

Penetrant muayenesi, yüzeydeki gözle görülmeyen hataların ve kusurların tespit edilmesinde kullanılan tahribatsız bir muayene yöntemidir. Bu yöntemde, penetrant adı verilen özel bir çözelti kullanılır. Bu çözelti, numunenin yüzeyindeki ince ve görünmez çatlak veya gözeneklere nüfuz eder. Numune yıkandıktan sonra bile, bu çözelti gözenekler içerisinde kalmaya devam eder. Muayene sürecinin son aşamasında, numunenin üzerine emici özellikteki bir geliştirici madde sprey şeklinde uygulanır. Bu geliştirici, penetrant çözeltisini emerek, alttaki hataları belirginleştiren bir renk reaksiyonu oluşturur ve bu sayede yüzeydeki hatalar, şekil 4.15'te gösterildiği gibi daha net bir şekilde görülebilir hale gelir.

Numunelerin penetrant muayenesi için hazırlık süreci, çözeltinin numunenin tüm gözeneklerine ve potansiyel çatlaklara nüfuz etmesi amacıyla dikkatle

gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, numuneler, çözeltinin tamamen nüfuz edebilmesi için özel bir çözelti havuzuna yerleştirilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Döküm numunelerinin penetrant banyosuna alınması (Kişisel arşiv, 2023)

Bu havuzda numunelerin 15 dakika boyunca bekletilmesi, çözeltinin gözenek ve çatlaklar içerisine iyice işlemesini sağlar. Bu süre zarfında, çözelti malzemenin mikro yapısal boşluklarına dolabilir, böylece daha sonra yapılacak olan muayenede kusurların belirlenmesi kolaylaşır. İşlem tamamlandığında, numuneler havuzdan alınıp, su ile yıkanarak, çözelti havuzunda kullanılan boyanın ve diğer kalıntıların temizlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra numuneler, herhangi bir dış müdahale olmadan doğal yollarla kurumaya bırakılmıştır ve numuneler tamamen kuruduktan sonra, geliştirici madde uygulaması için sprey odasına alınmıştır. Geliştirici maddenin uygulanması esnasında, kaplamanın ne çok ince ne de çok kalın olmamasına özen gösterilir. Bu dengeli kaplama, penetrant muayenesi sırasında kusurların daha net bir şekilde görülmesini sağlar. Sprey odasında uygulanan geliştirici madde, çözeltideki boyanın kusurlar içerisinde sıkışmasına yardımcı olur ve böylece yüzeydeki veya yüzey altındaki kusurların görünür hale gelmesini sağlar. Bu aşama, penetrant testinin doğruluğu ve etkinliği açısından kritik bir rol oynar.



Şekil 4.14. Penetrant solüsyon banyosu sonrası geliştirici uygulama alanı (Kişisel arşiv, 2023)

Kaplamadan birkaç saniye sonra çözelti, nüfuz ettiği kusurlu bölgelerden rengini kusmaya başlamıştır (Şekil 4.15).

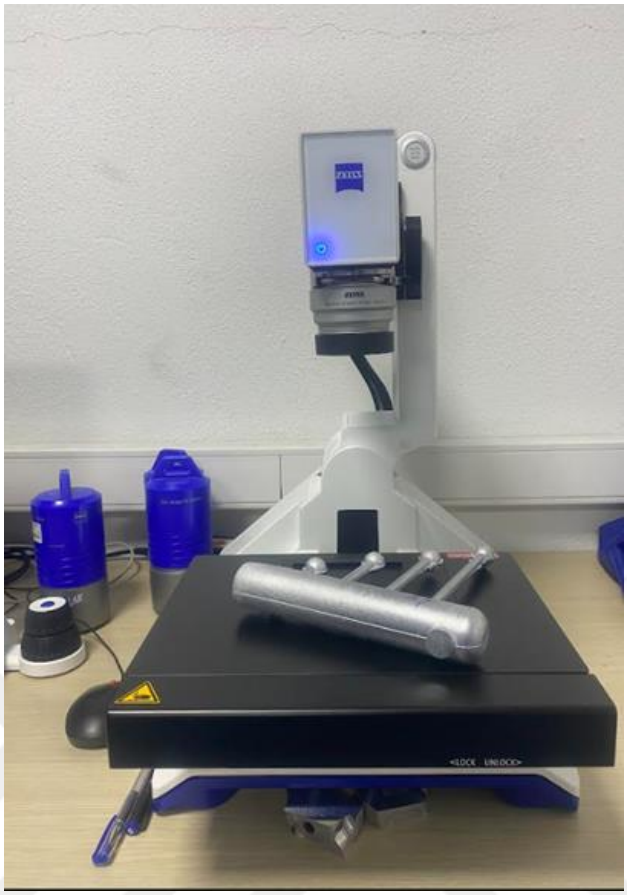


Şekil 4.15. Geliştirici ile kaplandıktan sonra numunelerin görünümü (Kişisel arşiv, 2023)

4.6 Sıcak Yırtılma Noktaları Tayini ve Mikroyapı Analizi

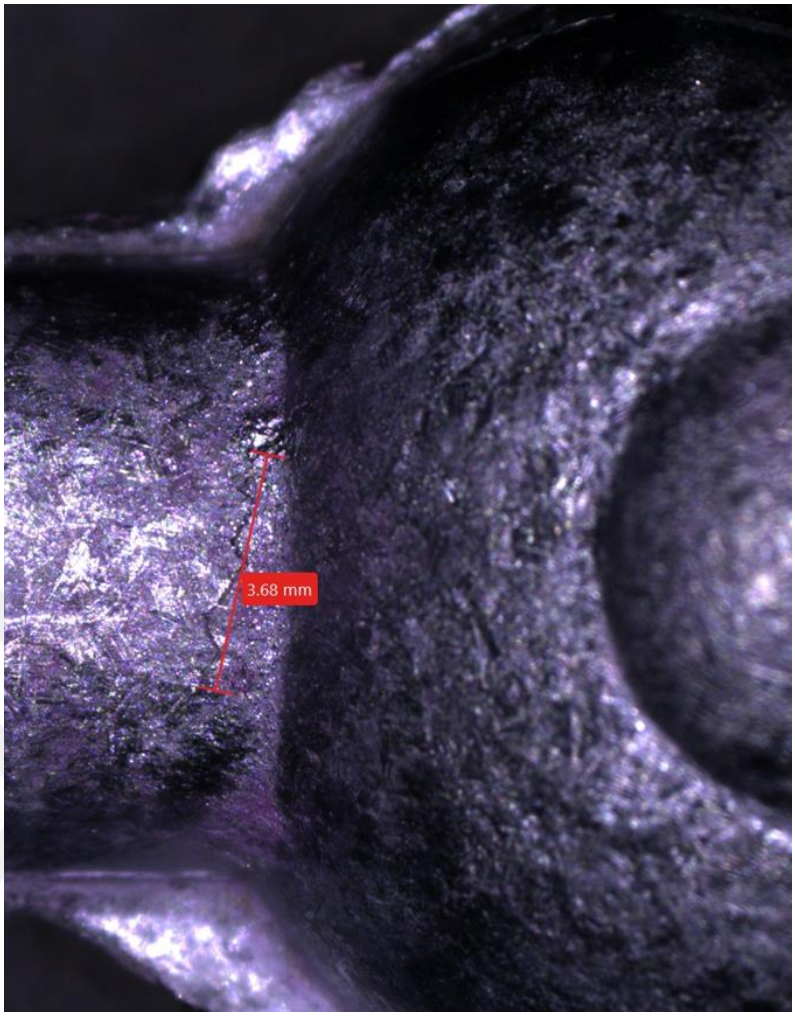
Sıcak Yırtılma Noktaları Tayini:

Sıcak yırtılma örneklerimizdeki çatlakların boyutlarını ölçmek için, numunelerin ilgili bölgeleri optik mikroskoplar ile incelenmiştir. (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Optik mikroskoplar ile çatlak yeri - boyu tayini (Kişisel arşiv, 2023)

Optik mikroskop ile yapılan taramalar sonucunda, numunelerdeki çatlakların yerleri ve büyüklükleri tespit edilmiş ve bu bilgiler sıcak yırtılma duyarlılığı (HTS - Hot Tearing Susceptibility) hesaplamalarında kullanılmak üzere kayıt altına alınmıştır (Şekil 4.17).



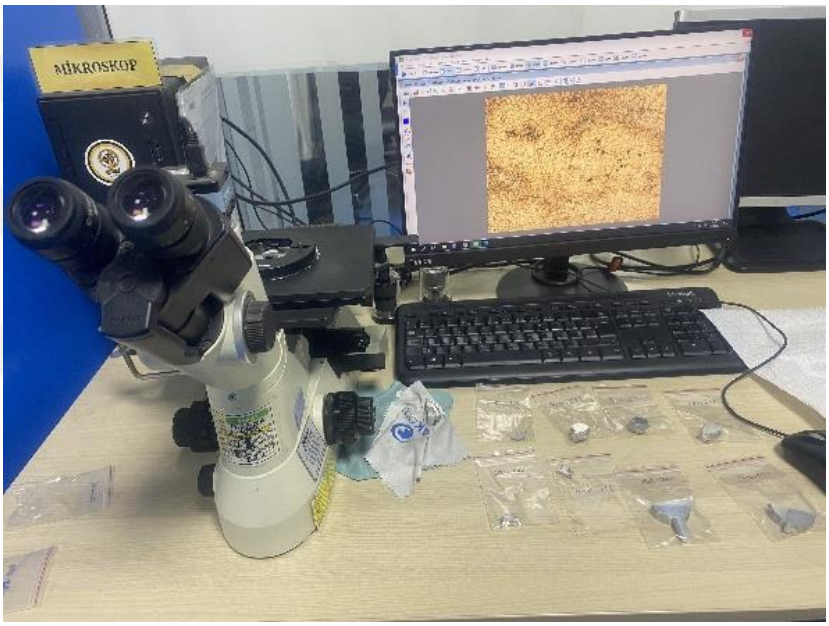
Şekil 4.17. Numune oluşan sıcak yırtılma çatlağı (Kişisel arşiv, 2023)

Bu taramalar, malzemenin yüzeyindeki veya yüzeye yakın bölümlerindeki çatlakları görselleştirmek ve ölçmek için kritik bir öneme sahiptir.

Mikroyapı Analizi:

Mikroyapı analizi, malzemenin iç yapısını ve bu yapının malzemenin genel özellikleri üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik kapsamlı bir çalışmadır. Bu analizler, elektron mikroskopları, taramalı elektron mikroskopları (SEM), transmisyon elektron mikroskopları (TEM) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) gibi gelişmiş araçlar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntemlerle, malzemenin kristal yapıları, faz dağılımları, tane sınırları, kusurları ve diğer mikroskobik özellikleri detaylı olarak incelenir.

Numunelerde belirlenen sıcak yırtılma gösteren bölümler testere ile kesilmiş ve numune hazırlama işlemlerinin ardından mikroyapı analizlerine tabi tutulmuştur. Sıcak yırtılma çatlaklarının mikroyapı analizleri, bu çatlakların oluşum mekanizmalarını ve malzemenin kusurlara neden olan özelliklerini anlamak için yapılır. Mikroyapı dağılımları, dentritik kol uzunlukları ve dendritik kol mesafesi (DAS - Dendrite Arm Spacing) değerleri gibi özellikler incelendikten sonra, daha detaylı bir inceleme için SEM analizi aşamasına geçilmiştir. SEM analizi, malzemenin mikroyapısının daha yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek ve mikroskobik düzeydeki kusurları daha ayrıntılı bir şekilde incelemek için kullanılır.



Şekil 4.18. Mikroyapı analizi (Kişisel arşiv, 2023)

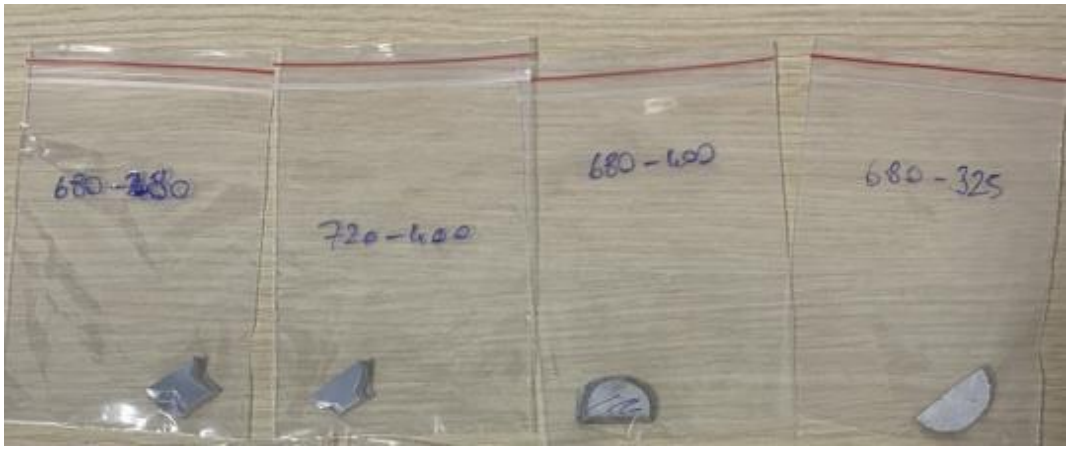
SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi:

SEM cihazı, malzemenin yüzeyine elektron ışını göndererek yüzeyin taranmasını ve görüntülenmesini sağlayan bir cihazdır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. SEM Taramalı elektron mikroskobu (Kişisel arşiv, 2023)

Sıcak yırtılma örneklerini detaylıca incelemek amacıyla, örneklerin en kritik kusurlu kısımları ve çatlak bölgeleri, testere kullanılarak dikkatlice kesilerek ayrılmıştır. Bu işlem, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi için örneklerin uygun boyutlara getirilmesini sağlamak amacıyla yapılmıştır. Ardından, numuneler SEM analizine uygun olacak şekilde daha da küçültülmüştür (Şekil 4.20). Bu küçültme işlemi, numunelerin SEM cihazında detaylı bir şekilde incelenebilmesi için gereklidir ve sıcak yırtılma örneklerinin mikroskobik düzeydeki özelliklerinin anlaşılmasına olanak tanır.



Şekil 4.20. SEM cihazına yerleştirilecek boyutları küçültülmüş numuneler (Kişisel arşiv, 2023)

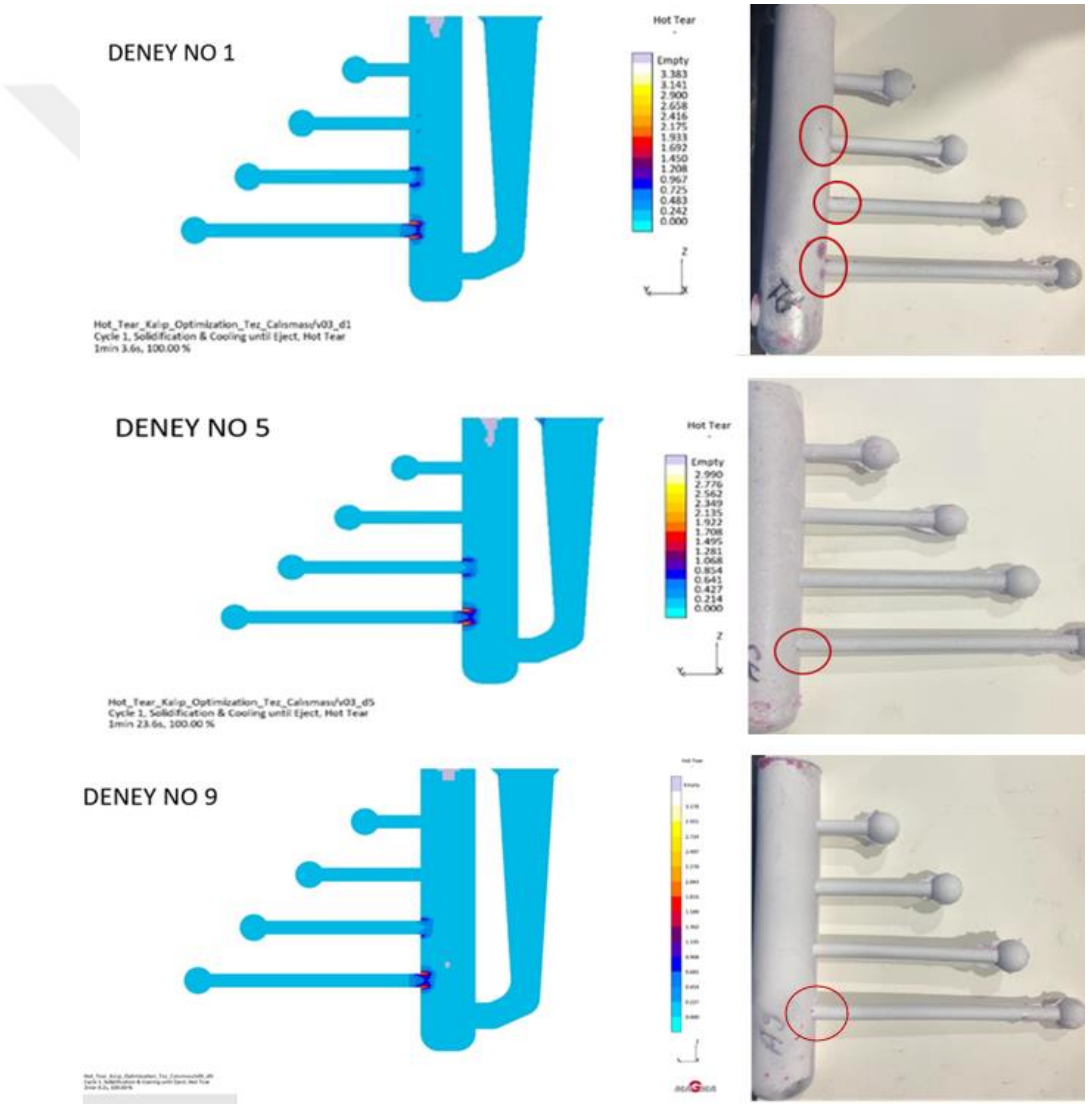
Daha sonra, numunelerin yırtılma bölgeleri üstte kalacak şekilde düzenlenerek, cihaz içerisinde sabit kalabilmeleri için bant kullanılarak cihaza dikkatlice sabitlendi. Bu işlem, SEM analizi sırasında numunelerin hareket etmemesini ve doğru pozisyonda kalmasını sağlamak için önemlidir.

BÖLÜM BEŞ

VERİLERİN ANALİZİ

5.1 MAGMASOFT Simülasyon Analizi

Magmasoft yazılımında yapılan döküm simülasyonunda özellikle parçanın uzun kollarının birleşim bölgelerinde sıcak yırtılma indeksinin yüksek olduğu gözlemlendi. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi uzun koldan kısa kola doğru sıcak yırtılma bölgelerinin kapladığı alan azalmaktadır. Sonuçlar beklendiği gibi çıkmıştır.



Şekil 5.1. Sıcak yırtılma simülasyonundan CRC kalıbının görüntüsü ve deney numunesi ile karşılaştırması (Kişisel arşiv, 2023)

Simülasyon yazılımındaki sıcak yırtılma verileri kullanılarak bir indeks belirlenmiştir. Bu veriler Tablo 5.1'de görülmektedir. Tabloda görülen değerler Şekil 5.2'de görüldüğü gibi grafiklendirilmiş ve teorik olarak elde edilen değerler, pratik deneylerde görülen sonuçlarla ilişkilendirilmiştir. Tabloda yer alan veriler, araştırmamızda elde edilen sonuçları destekleyici niteliktedir.

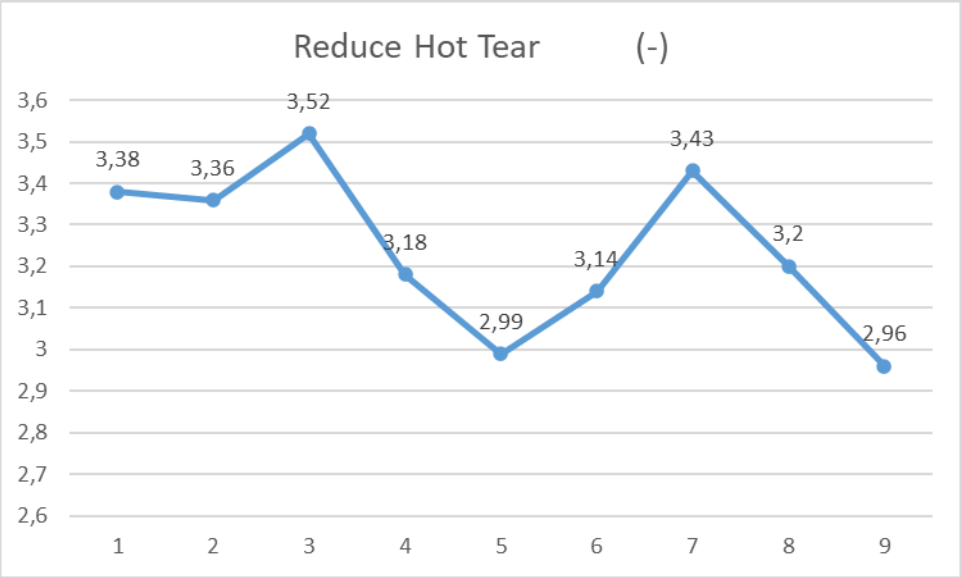
Tablo 5.1. Sıcak yırtılma simülasyonu sonrası yazılım verilerinden elde edilen sıcak yırtılma indeksi değerleri

Deney No	Döküm Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Reduce Hot Tear (-)
1	680	240	3,38
2	700	240	3,36
3	720	240	3,52
4	680	325	3,18
5	700	325	2,99
6	720	325	3,14
7	680	400	3,43
8	700	400	3,2
9	720	400	2,96

Deney 1, 2 ve 3 (680-240, 700-240, 720-240): Düşük kalıp sıcaklığı (325°C) ile yapılan deneylerde, sıcak yırtılma değerlerinin diğer kalıp sıcaklıklarından yüksek geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum termal gerilmelerin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Deney 4, 5 ve 6 (680-325, 700-325, 720-325): Orta kalıp sıcaklığı (325°C) ile yapılan deneylerde, sıcak yırtılma değerleri 3.18'den 3.14'e düşmüş. Bu, orta derecede bir kalıp sıcaklığının, sıcak yırtılma riskini bir miktar azaltmaya yardımcı olduğunu gösteriyor. Özellikle döküm sıcaklığı 700°C'de sıcak yırtılma şiddetinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiş, bu da 700°C döküm sıcaklığının bu kalıp sıcaklığı için uygun bir sıcaklık olduğunu düşündürebilir.

Deney 7, 8 ve 9 (680-400, 700-400, 720-400): Yüksek kalıp sıcaklığı (400°C) ile yapılan deneylerde, sıcak yırtılma şiddeti 3.43'ten 2.96'ya düşmüş. Bu, yüksek kalıp sıcaklığının sıcak yırtılma şiddetini azaltmada oldukça etkili olduğunu gösterir. En düşük "Reduce Hot Tear" değeri olan 2.96, 720°C döküm sıcaklığında elde edilmiş, bu da en yüksek döküm sıcaklığının yüksek kalıp sıcaklığı ile birleştiğinde sıcak yırtılmayı en aza indirdiğini gösteriyor. Bu, malzemenin soğuma sürecinin daha homojen olduğunu ve termal gerilmelerin daha düşük olduğunu işaret eder.

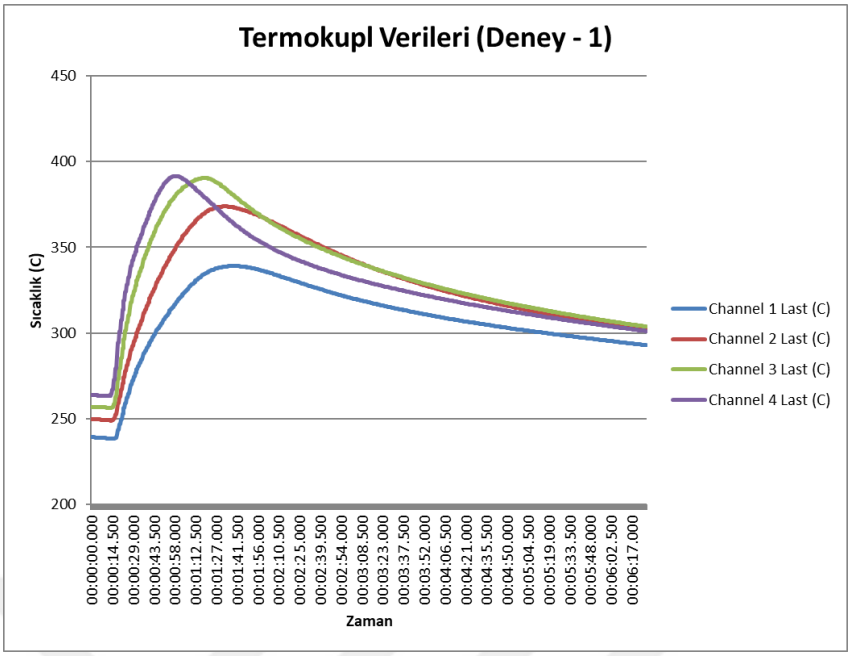


Şekil 5.2. Similasyon verilerin elde edilen değerlerin grafiklenmesi

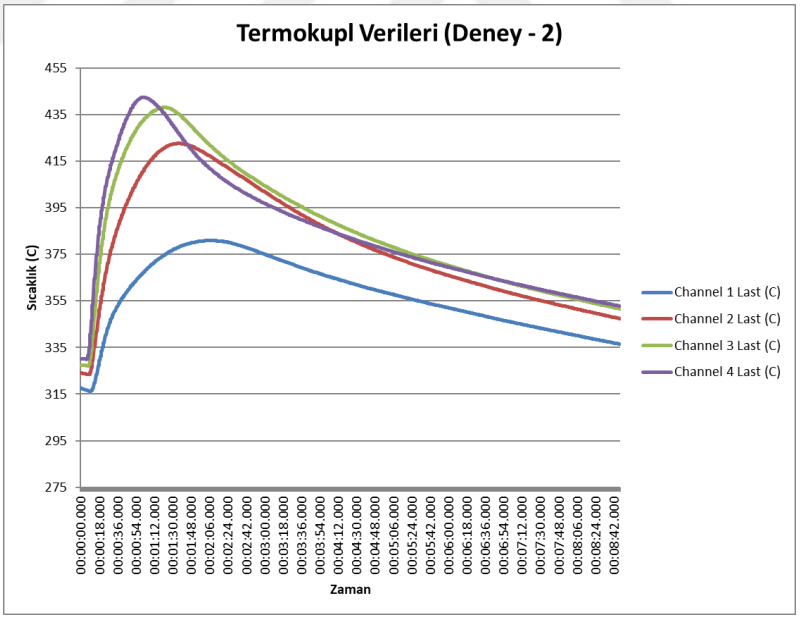
5.2 Termocupl Ölçümleri Analizi

Termokupl grafikleri, döküm ve kalıp sıcaklıklarının malzemenin soğuma davranışı ve sıcak yırtılma riski üzerindeki etkilerini göstermektedir. Döküm sıcaklığı, malzemenin kalıba döküldüğü sıcaklıktır. Kalıp sıcaklığı, kalıbın ısıtıldığı veya soğutulduğu sıcaklıktır. Bu iki sıcaklık arasındaki fark, malzemenin soğuma hızını ve termal gerilmeleri belirler. Fark ne kadar büyükse, soğuma hızı ve termal gerilmeler de o kadar büyük olur. Bu da, sıcak yırtılma riskini artırır.

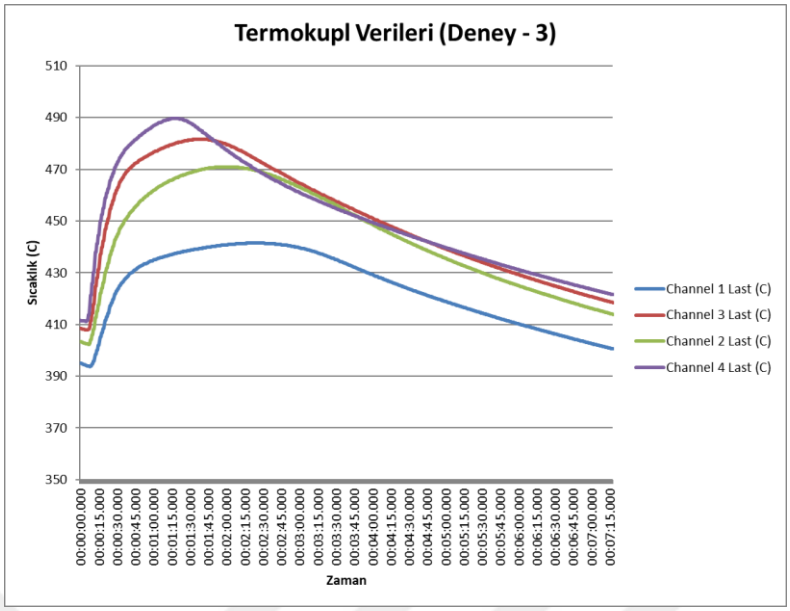
Sıcak yırtılma kalıbında en kısa koldan en uzun kola doğru, sırasıyla kanal 1-2-3-4 olmak üzere tüm sıcaklık veriler grafiklendirilmiştir.



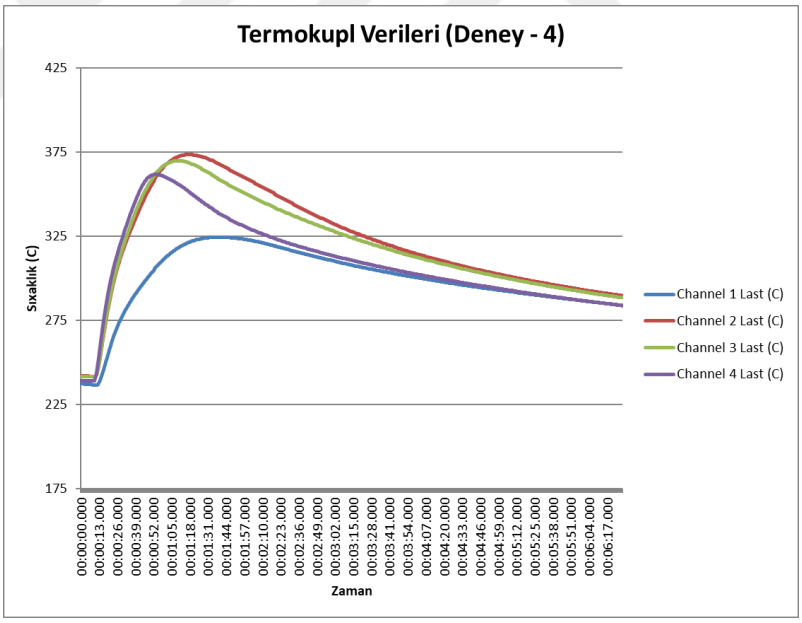
Şekil 5.3. Deney 1 (680 °C döküm - 240 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri



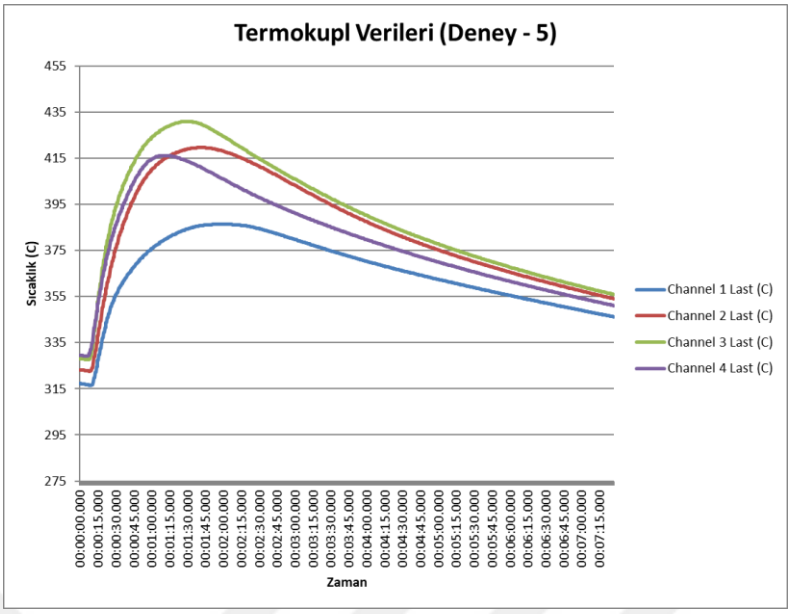
Şekil 5.4. Deney 2 (680 °C döküm - 325 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri



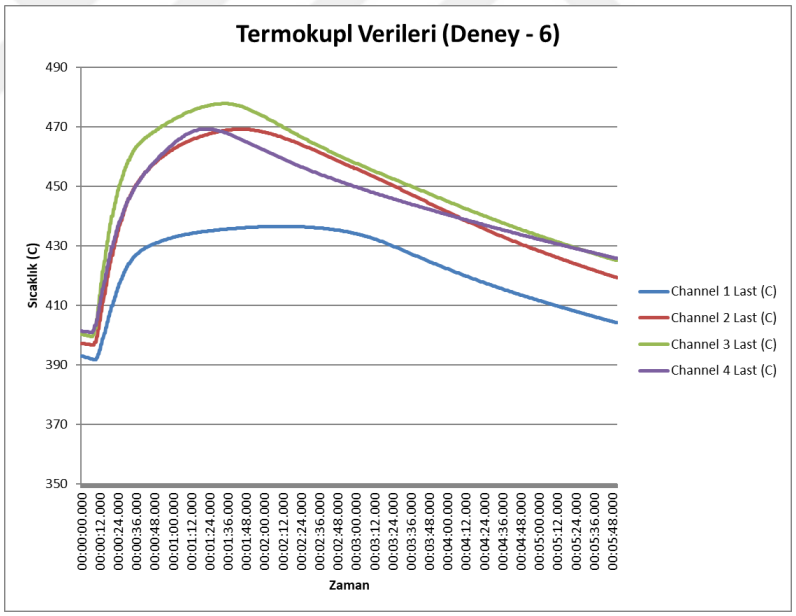
Şekil 5.5. Deney 3 (680 °C döküm - 400 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri



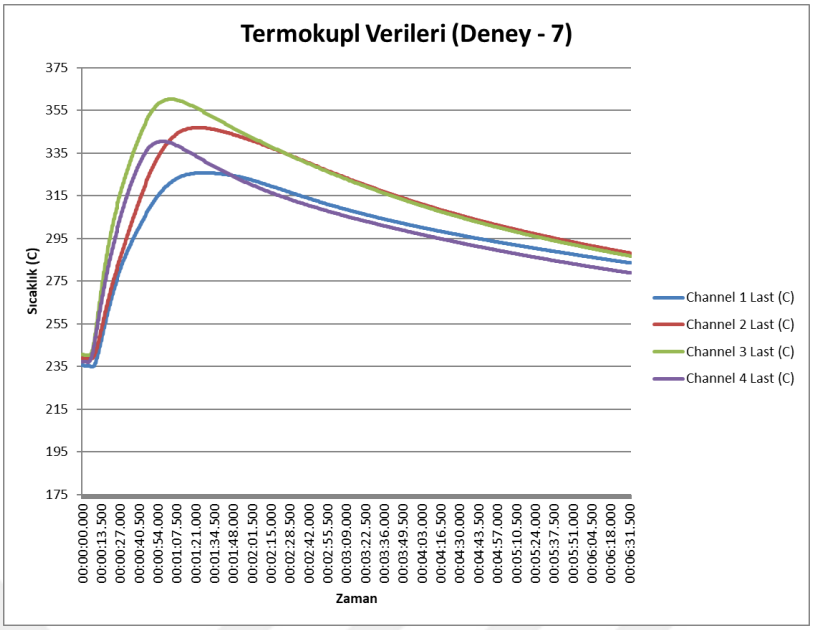
Şekil 5.6. Deney 4 (700 °C döküm - 240 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri



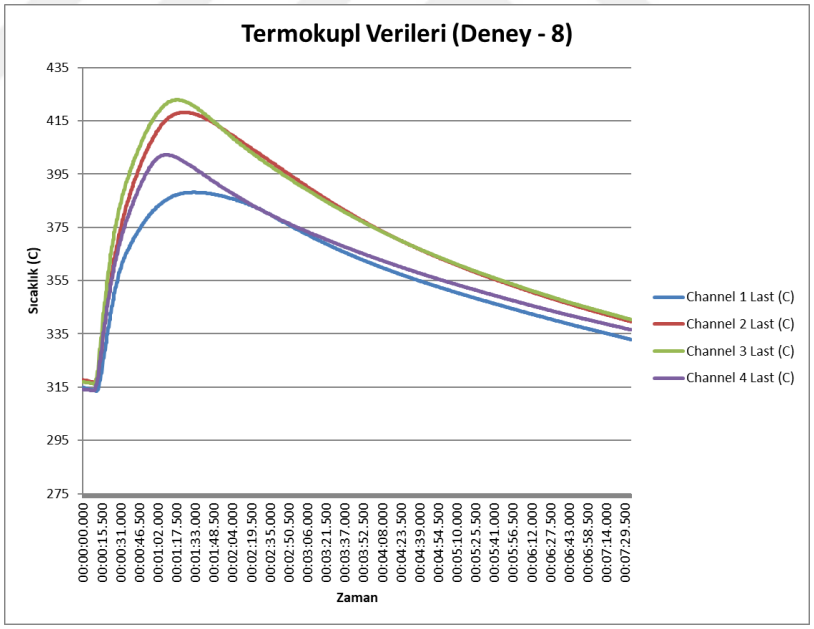
Şekil 5.7. Deney 5 (700 °C döküm - 325 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri



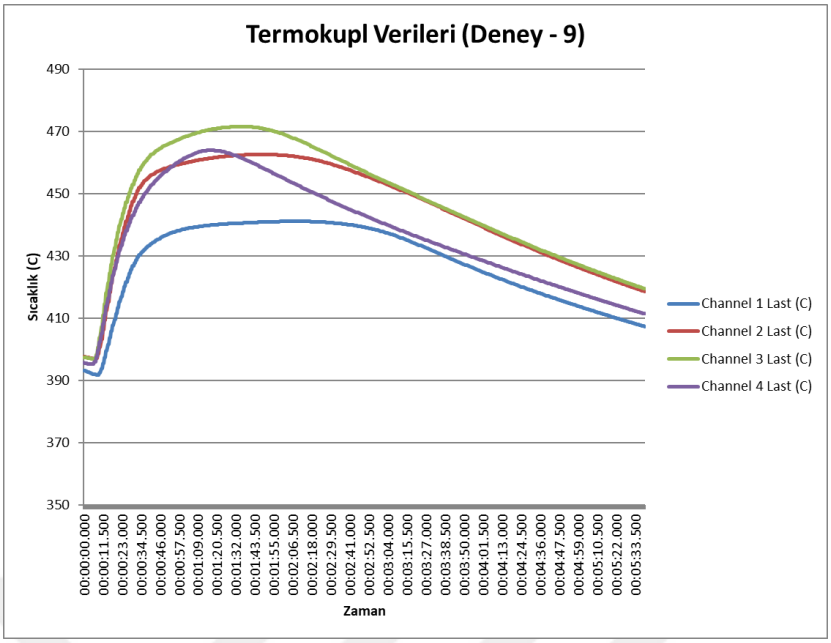
Şekil 5.8. Deney 6 (700 °C döküm - 400 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri



Şekil 5. 9. Deney 7 (720 °C döküm - 240 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri



Şekil 5.10. Deney 8 (720 °C döküm - 325 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri



Şekil 5.11. Deney 9 (720 °C döküm - 400 °C kalıp) sıcak yırtılma kalıbı termokupl ölçümleri

Termokupl verilerindeki grafiklerden yapılan gözlemler, kanal 1 ve 2'deki sıcaklık düşüşlerinin nispeten hızlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kanallar, kalıbın kısa kollarına ait termokuplları temsil etmekte olup, gözlenen hızlı soğuma, bu kısa kolların daha hızlı ısı kaybettiğini gösteriyor. Hızlı ısı kaybı, metalin bu bölgelerde daha yüksek termal gerilimler oluşturduğunu ve sonuç olarak sıcak yırtılma olasılığının arttığını düşündürebilir. Öte yandan, kanal 3 ve 4'teki sıcaklık eğrileri, daha yavaş bir düşüş sergiliyor ki bu da uzun kolların daha yavaş soğuduğuna işaret ediyor. Daha yavaş soğuma, bu bölgelerin daha düşük termal gerilimler altında kaldığını ve dolayısıyla sıcak yırtılmaya karşı potansiyel olarak daha dirençli olabileceğini belirtiyor.

Sıcaklık Zaman Eğrileri: Grafikteki her renk, farklı bir kanalın sıcaklık zaman eğrisini temsil ediyor. Sıcaklık eğrilerinin başlangıcı ve zirvesi, döküm sıcaklığının yansımasıdır. Grafiklerde görülen sıcaklık pikleri, döküm sırasında malzemenin katılaşma noktasına ulaştığını ve ardından soğumaya başladığını gösterir.

Soğuma Hızı: Tüm kanallarda sıcaklık, döküm işleminden sonra hızla yükselmiş ve belirli bir zirveye ulaştıktan sonra düşüşe geçmiş. Zirveden sonra sıcaklıkların düşüş eğimi, malzemenin soğuma hızını gösterir. Bu eğimler, döküm ve kalıp sıcaklıkları

arasındaki farkın bir göstergesidir. Büyük sıcaklık farkları, daha hızlı soğuma hızlarına işaret eder ki bu da termal gerilmenin arttığını ve sıcak yırtılma riskinin yüksek olduğunu gösterir.

Döküm Sıcaklığının Etkisi:

Soğuma Eğrileri ve Katılaşma Süresi: Döküm sıcaklığı arttıkça, soğuma eğrileri daha yüksek sıcaklık değerlerinden başlıyor ve daha yavaş düşüyor. Bu, malzemenin katılaşma süresinin uzadığını gösterir. Katılaşma sürecinin uzaması, malzemenin sıcak halde kaldığı süreyi uzatır ve bu durum, sıcak yırtılma oluşma riskini artırabilir çünkü malzeme termal gerilim altında daha uzun süre kalır.

Katılaşma Aralığı: Döküm sıcaklığı arttıkça, katılaşma aralığı genişliyor. Geniş bir katılaşma aralığı, malzemenin daha geniş bir sıcaklık aralığında faz değişikliği geçirdiği ve bu süreçte daha fazla termal gerilime maruz kaldığı anlamına gelir. Bu da sıcak yırtılma riskini artırabilir.

Kalıp Sıcaklığının Etkisi:

Soğuma Eğrileri ve Katılaşma Süresi: Kalıp sıcaklığı arttıkça, soğuma eğrileri daha düşük sıcaklık değerlerinden başlıyor ve daha hızlı düşüyor. Bu, malzemenin katılaşma süresinin kısaldığını gösterir. Malzemenin daha hızlı katılaşması, termal gerilimlerin azalmasına ve sıcak yırtılma riskinin düşmesine yol açabilir.

Katılaşma Aralığındaki Sıcaklık Değişimleri: Kalıp sıcaklığı arttıkça, katılaşma aralığındaki sıcaklık değişimleri azalıyor. Bu durum, malzemenin daha homojen bir soğuma profili ve daha düzgün bir soğuma eğrisi elde ettiği anlamına gelir. Malzemenin daha düzgün soğuması, iç gerilimleri ve sıcak yırtılma oluşumunu azaltabilir.

Döküm ve Kalıp Sıcaklıkları Arasındaki Farkın Etkisi:

Soğuma Hızı ve Termal Gerilmeler: Döküm ve kalıp sıcaklıkları arasındaki fark azaldıkça, soğuma eğrileri daha dengeli soğuyor. Bu, soğuma hızının ve oluşabilecek termal gerilmelerin azaldığını gösterir. Döküm ve kalıp sıcaklıkları arasındaki daha

küçük fark, malzemenin daha kontrollü bir şekilde soğumasına ve bu sayede sıcak yırtılma riskinin azalmasına katkıda bulunur.

5.3 Sıcak Yırtılma Duyarlılığı (HTS) Ölçümü

HTS hesaplaması, döküm kalitesini etkileyen sıcak yırtılma mekanizmasını anlamak ve önlemek için kritik bir araçtır. Sıcak yırtılma, döküm performansını olumsuz etkileyen bir kusurdur. Bu nedenle, alaşım bileşimi, döküm parametreleri ve kalıp tasarımı gibi faktörlerin optimizasyonu ile sıcak yırtılma duyarlılığının azaltılması hedeflenmektedir.

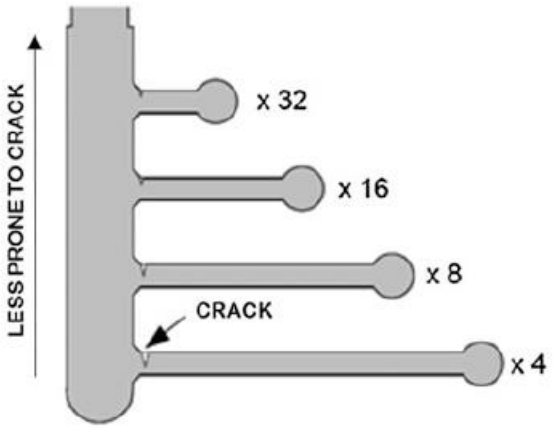
HTS, yani sıcak yırtılma duyarlılığı, döküm esnasında oluşan çatlakların bir ölçüsüdür. HTS, çubukların her biri için belirli bir faktörler toplamı olarak hesaplanır. HTS değeri arttıkça malzemenin sıcak yırtılmaya olan eğilimi artar (Puparattanapong ve diğer., 2018; Song ve diğer., 2016b).

HTS'nin hesaplanmasında kullanılan matematiksel formülü denklem 5.1'de gösterilmiştir.

$$HTS=(F_{length}\times F_{location}\times F_{crack}) \qquad (5.1)$$

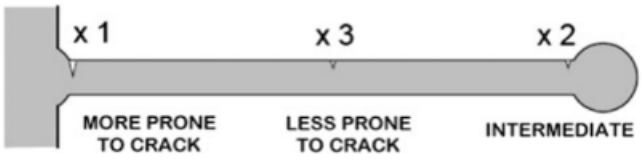
Bu formülde:

F_{length} çubuğun uzunluğuyla ilgili faktördür (çubuk 1 için x32, çubuk 2 için x16, çubuk 3 için x8 ve çubuk 4 için x4),



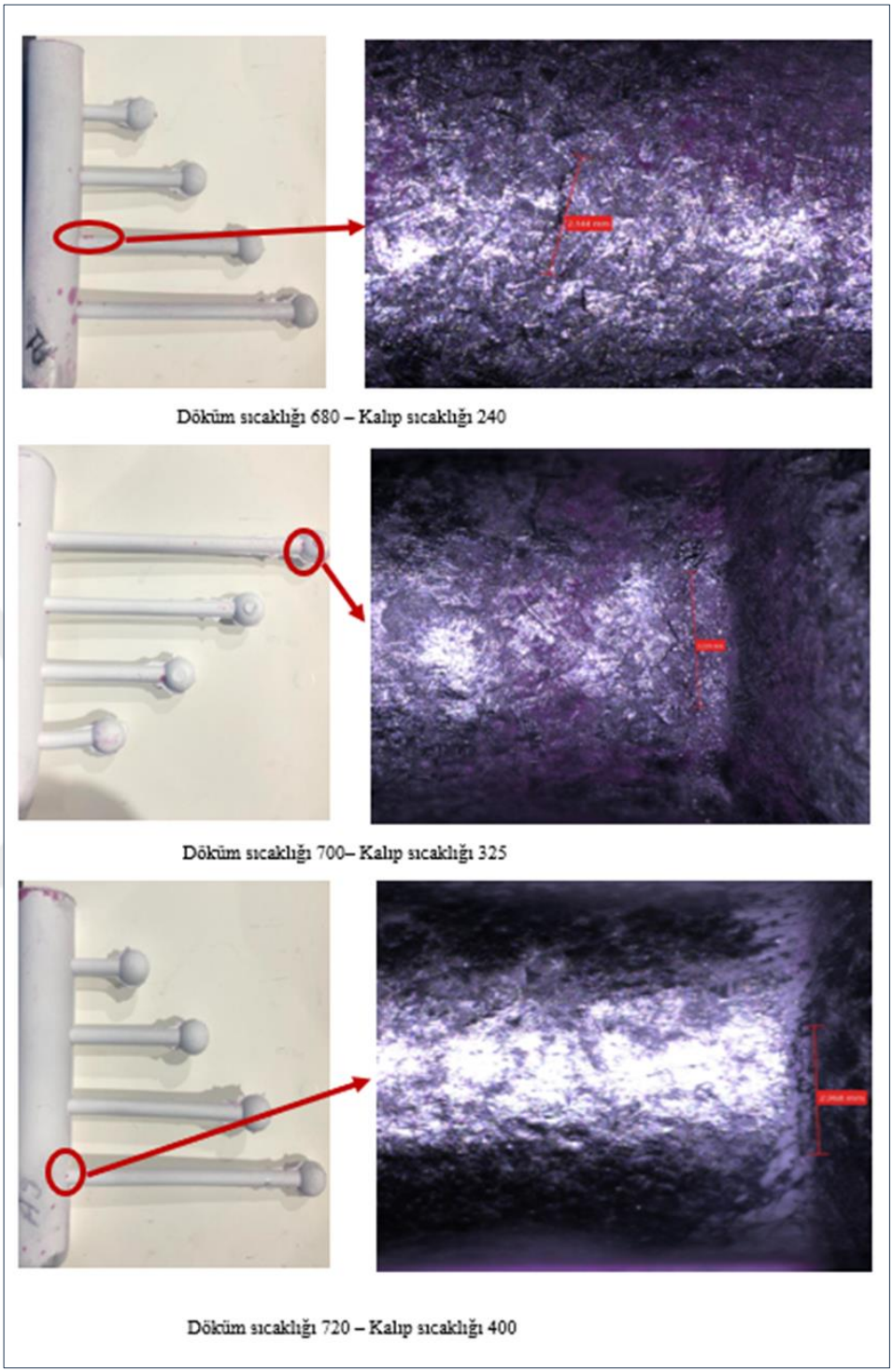
Şekil 5.12. Çubuk uzunluğu faktörü (Stermann ve Iraizoz, 2018)

$F_{location}$ çatlağın konumuyla ilgili faktördür (bölge 1 için x1, bölge 2 için x3, bölge 3 için x2).



Şekil 5.13. Çatlak bölgesi faktörü (Stermann & Iraizoz, 2018)

F_{crack} çatlağın boyutuyla ilgili faktördür (çatlak yok için 0, küçük çatlak için 1, orta çatlak için 2, şiddetli çatlak için 3 ve 4) tam ayırma için) (Puparattanapong ve diğer., 2018; Stermann ve Iraizoz, 2018).



Şekil 5.14. Numune bölgesel çatlak uzunlukları (Kişisel arşiv, 2023)

HTS değerleri tek tek tüm çubukların HTS değerleri toplanarak tüm döküm için hesaplanarak 3 deneyin ortalaması alındı.

Deney 1 için HTS hesaplaması:

Tablo 5.2. Deney 1 çatlak yerleri ve çubukların HTS değerleri

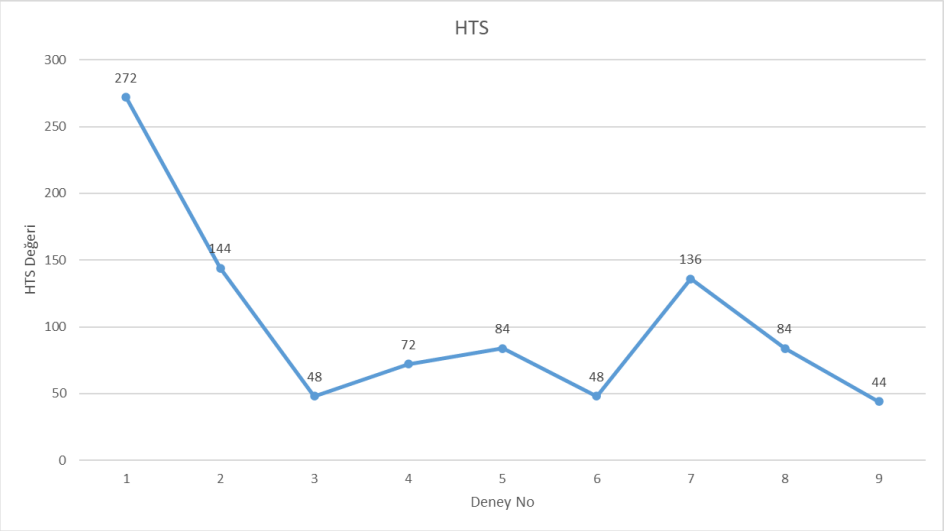
Deney No 1		Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3	HTS Değerleri
	Rod 1		1	1	160
	Rod 2		1		48
	Rod 3		1	2	56
	Rod 4			1	8
	Toplam HTS				272

Bu değer, deney 1 için çubukların sıcak yırtılma duyarlılığını gösterir.

Elde edilen ortalama HTS değerleri Tablo 5.3'te sunulmuştur.

Tablo 5.3. HTS hesaplama sonuçları.

Deney No	**Döküm Sıcaklığı (°C)**	**Kalıp Sıcaklığı (°C)**	**HTS**
1	680	240	272
2	700	240	144
3	720	240	48
4	680	325	72
5	700	325	84
6	720	325	48
7	680	400	136
8	700	400	84
9	720	400	44



Şekil 5.15. HTS deney sonuçları

Deney sonuçlarının gösterdiği gibi, döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının birbirleriyle olan etkileşimi ve bu etkileşimin sıcak yırtılma riskine etkisi oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Döküm sıcaklığının artışının, özellikle düşük ve orta seviye kalıp sıcaklıklarında sıcak yırtılma riskini daha etkili bir şekilde azaltması, malzemenin termal davranışları ve mikro yapısal özellikleriyle yakından ilişkilidir.

Düşük kalıp sıcaklıklarında, malzemenin soğuma hızı yüksek olur ve bu, malzemenin içindeki termal gerilimleri artırabilir. Ancak, döküm sıcaklığının artması, malzemenin daha uzun süre sıvı halde kalmasını sağlar, bu da iç gerilimlerin azalmasına ve daha homojen bir katılaşma sürecine yol açar. Bu durum, sıcak yırtılma riskini azaltır.

Orta seviye kalıp sıcaklıklarında, döküm sıcaklığının artışı, malzemenin daha kontrollü bir şekilde soğumasını ve termal gerilimlerin daha etkili bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu, sıcak yırtılma riskinin daha fazla azalmasına neden olur, çünkü malzeme daha esnek bir yapı kazanır ve iç gerilimlere karşı daha dayanıklı hale gelir.

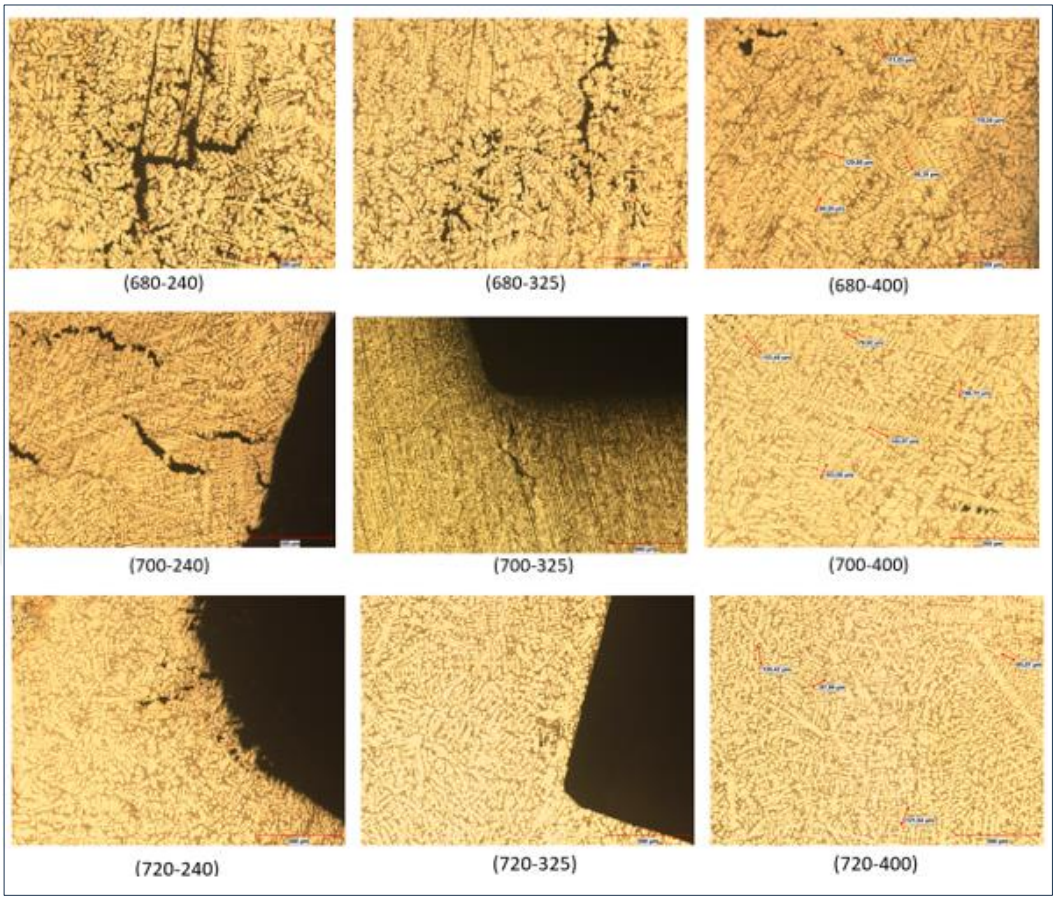
Yüksek kalıp sıcaklıklarında ise, malzeme zaten daha yavaş soğur ve termal gerilimler daha azdır. Bu durumda, döküm sıcaklığının artışının sıcak yırtılma riskini azalttığı gözükmektedir. Çünkü malzeme zaten daha az gerilim altındadır ve ekstra sıcaklık artışı, bu aşamada termal gerilmeleri daha da azaltmaktadır.

5.4 Mikroyapı ve SEM Analizi

Mikroyapısal analizler, malzemenin katılaşma sırasında maruz kaldığı termal gerilimleri ve bu gerilimlerin çatlak oluşumu üzerindeki etkisini anlamada önemli bir araçtır. Şekil 5.16'da farklı deney numaralarına göre çatlak bölgelerinden elde edilen numunelerin mikroyapıları incelemek üzere hazırlandı ve mikroyapı analizleri yapıldı. Ayrıca numunelerden 720-400 (en düşük sıcak yırtılma şiddetine sahip parametre) ve 680-240 (en yüksek sıcak yırtılma şiddetine sahip parametre) SEM mikroskopu altında incelenmiştir. Beklenildiği gibi katılaşma nedeniyle mikroyapılarda farklılıklar gözlendi.



Şekil 5.16. Mikroyapı analizi örnek numuneleri (Kişisel arşiv, 2023)



Şekil 5.17. Mikroyapı analizleri ve DAS ölçümleri (Kişisel arşiv, 2023)

Düşük Kalıp Sıcaklığı (240°C) ve Farklı Döküm Sıcaklıkları (680°C, 700°C, 720°C):

Düşük kalıp sıcaklığı, hızlı soğutma ve sertleşme koşullarını beraberinde getirir. Bu koşullarda, alaşımın hızla katılaştığı ve malzeme içinde termal gerilimlerin arttığı görülür. Mikroyapı fotoğraflarında bu durum, büyük ve belirgin çatlaklar olarak kendini gösterir. Döküm sıcaklığının artışıyla, malzemenin katılaşma süresi uzar ve bu da termal gerilimleri artırarak sıcak yırtılma olasılığını yükseltir. Bu aşamada malzeme daha akıcı olduğundan çatlak oluşumları daha geniş bir alana yayılır.

Orta Kalıp Sıcaklığı (325°C) ve Farklı Döküm Sıcaklıkları (680°C, 700°C, 720°C):

Orta seviyede bir kalıp sıcaklığı, alaşımın daha kontrollü bir şekilde soğumasını ve böylece termal gerilimlerin daha az oluşmasını sağlar. Bu durum döküm sıcaklığı arttıkça, dendritlerin daha düzenli ve daha homojen bir yapıda oluşmasına olanak tanır. Mikroyapıların daha az çatlak ve daha dengeli bir dendritik yapı göstermesi bu yüzden beklenir.

Yüksek Kalıp Sıcaklığı (400°C) ve Farklı Döküm Sıcaklıkları (680°C, 700°C, 720°C):

Yüksek kalıp sıcaklığında, döküm sıcaklığı artışı soğutma hızını daha da azaltır ve termal gradyanları düşürür. Bu, alaşımın daha homojen bir şekilde katılaşmasına ve iç gerilimlerin daha az oluşmasına yardımcı olur. Görsellerde, çatlakların azaldığı veya tamamen yok olduğu, dendritlerin geniş bir alana yayıldığı ve mikro yapının daha homojen olduğu görülür. Bu durum, sıcak yırtılma riskinin önemli ölçüde azaldığını gösterir.

DAS (Dendritik Kol Aralığı) değerleri, alaşımın mikroyapısındaki dendritlerin büyüklüğü ve dendritler arasındaki mesafeyi ifade eder ve genellikle soğutma hızının bir göstergesi olarak kabul edilir. DAS değerleri, alaşımın mekanik özellikleri ve döküm sırasındaki davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

A356 alüminyum alaşımı için verilen DAS değerlerini yorumlamak gerekirse:

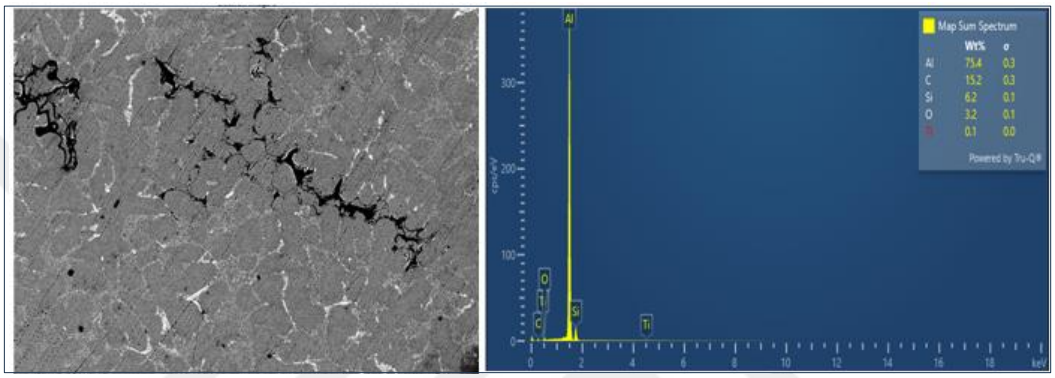
680°C Döküm Sıcaklığı ve 240°C Kalıp Sıcaklığında DAS Değeri (25): Bu koşullar altında, alaşımın yüksek soğutma hızına maruz kaldığını ve bu nedenle dendritlerin daha geniş aralıklarla oluştuğunu gösterir. Yüksek soğutma hızı, malzemenin daha hızlı katılaşmasına ve dendritlerin daha geniş olmasına sebep olur. Mekanik özellikler açısından, geniş dendritler kırılganlık ve diğer kusurlara yol açabilir.

700°C Döküm Sıcaklığı ve 325°C Kalıp Sıcaklığında DAS Değeri (23,64): DAS değerindeki düşüş, soğutma hızının biraz düştüğünü ve dendritlerin daha ince ve daha yakın aralıklarla oluştuğunu gösterir. Bu durum, mikro yapısal anlamda daha homojen bir yapıyı ve potansiyel olarak daha iyi mekanik özellikleri işaret eder.

720°C Döküm Sıcaklığı ve 400°C Kalıp Sıcaklığında DAS Değeri (20): Bu, soğutma hızının daha kontrollü olduğunu ve dendritlerin daha ince ve daha düzenli

olduğunu gösterir. Bu durum, alaşımın mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabilecek daha homojen bir mikro yapıyı ifade eder.

Bu DAS değerlerine dayanarak, 680°C'den 720°C'ye doğru döküm sıcaklığının arttıkça ve 240°C'den 400°C'ye doğru kalıp sıcaklığının arttıkça, A356 alüminyum alaşımının dendritik yapısının daha homojen olduğu sonucuna varılabilir. Bu, alaşımın soğutma hızının daha kontrollü olduğunu ve sonuç olarak mekanik özelliklerin iyileşebileceği anlamına gelir.

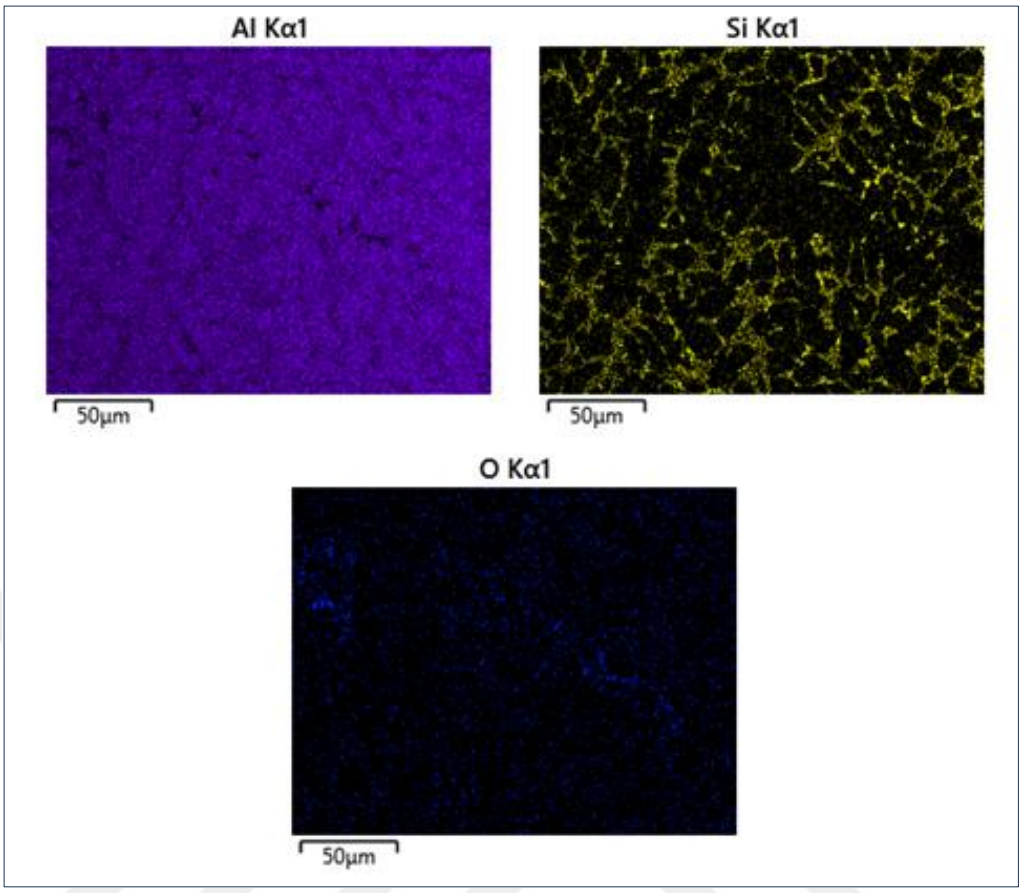


Şekil 5.18. En yüksek HTS değeri gördüğümüz 680-240 parametresinin SEM görüntüsü ve EDS analizi (Kişisel arşiv, 2023)

Şekil 5.18'de görülen mikroyapılar, A356 alüminyum alaşımının döküm süreci sırasında oluşan mikro yapısal özelliklerin detaylı bir şekilde incelenmesini sağlar.

Görüntülenen çatlaklar, sıcak çatlama fenomeniyle uyumlu, ve bu tip çatlaklar genellikle malzemenin sıcak katılaşma aralığında, yani katı ve sıvı fazların bir arada olduğu sıcaklık aralığında yüksek termal gerilmelere maruz kaldığında oluşur. Sıcak çatlama, malzeme katılaşırken yeterli sıvı fazın mevcut olmamasından veya soğuma sırasında yeterince beslenme sağlanamamasından kaynaklanabilir.

EDS analizi ise alaşımın beklenen kimyasal bileşimini doğruluyor ve yüzeyde olası bir oksidasyon veya diğer yüzey etkileşimlerine işaret etmektedir.



Şekil 5.19. En yüksek sıcak yırtılma indeksini gördüğümüz 680 - 240 parametresinin elementel dağılımını gösteren EDS haritaları (Kişisel arşiv, 2023)

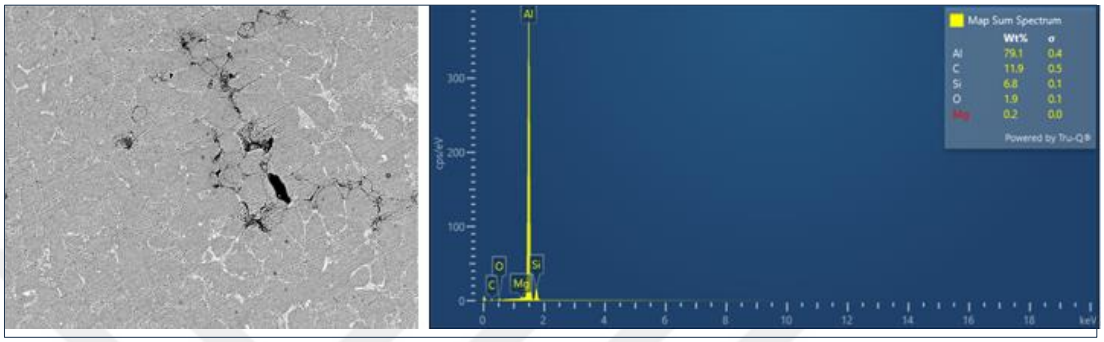
Şekil 5.19'da ve şekil 5.21'de A356 alüminyum alaşımının elementel dağılımını gösteren EDS haritaları gösterilmiştir. Her bir görüntü alaşım içindeki farklı elementlerin dağılımını gösterir: Al (alüminyum) mor renkte, Si (silikon) sarı renkte ve O (oksijen) mavi renkte temsil edilmiştir.

Alüminyum (Al) Haritası: Al elementinin yoğun dağılımını gösterir ve bu alüminyum alaşımının matrisini temsil eder. Mor renk, alüminyumun alaşım içerisinde eşit ve homojen bir şekilde dağıldığını gösteriyor. Bu genel homojenlik, alaşımın iyi bir döküm kabiliyetine ve mekanik özelliklere sahip olduğunu işaret etmektedir.

Silisyum (Si) Haritası: Yoğun sarı çizgiler ve lekeler, silisin alaşım içindeki dağılımını belirtir. Silisyum, A356 alaşımının mukavemetini ve dökülebilirliğini artırmak için eklenir, ancak aşırı konsantrasyonlar çatlakların oluşmasına katkıda

bulunabilir. Görüntülerdeki silisyumun yüksek yoğunluğu, çatlakların etrafında zenginleştiğini ve potansiyel stres yoğunlaşma bölgeleri oluşturduğunu gösteriyor.

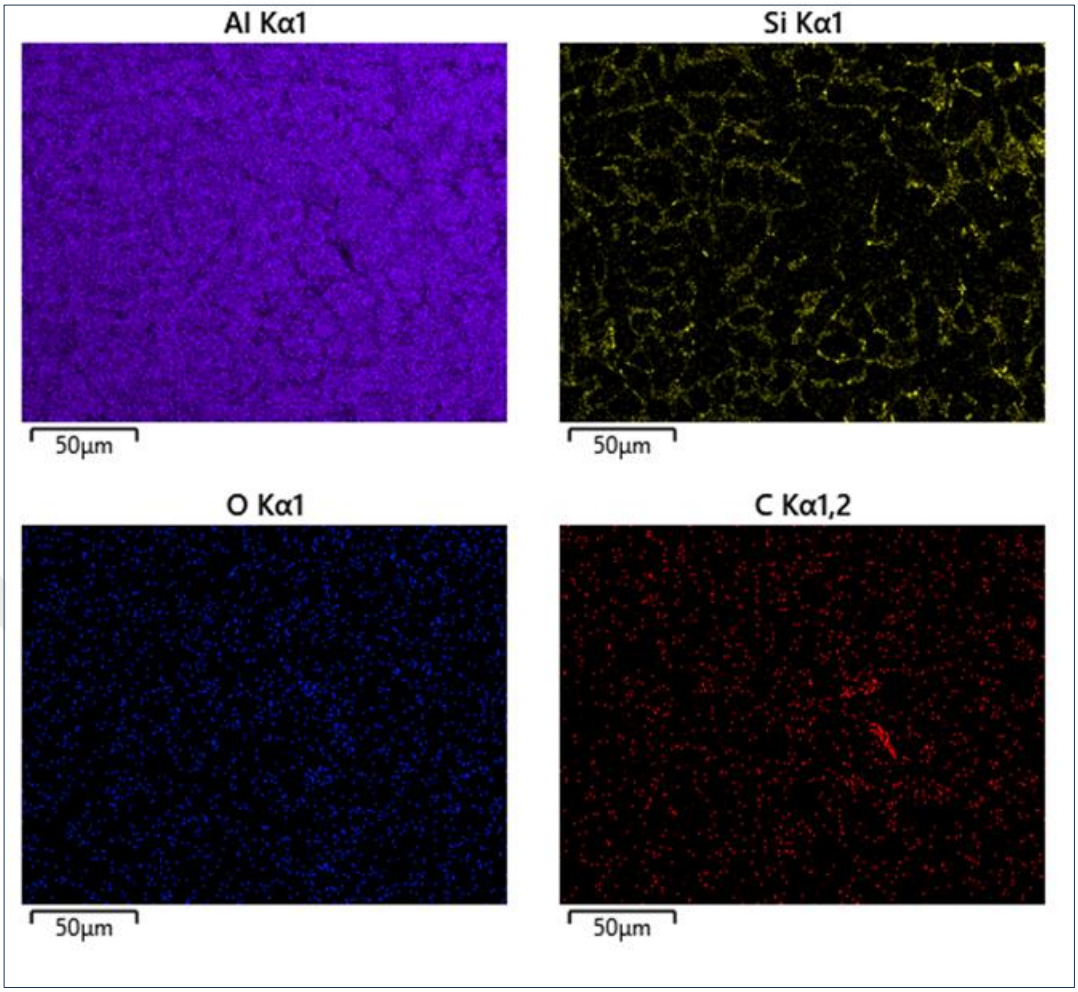
Oksijen (O) Haritası: Mavi noktalarla serpiştirilmiş koyu bir arka plan, oksijenin varlığını ve dağılımını gösterir. Oksijen, genellikle alaşım yüzeyindeki oksidasyon veya malzeme içindeki oksit içeriklerini temsil eder.



Şekil 5.20. En düşük sıcak yırtılma indeksini gördüğümüz 720 - 400 parametresinin SEM görüntüsü (Kişisel arşiv, 2023)

Şekil 5.20, 720-400 parametreleri altında alaşımın soğuma ve katılaşma davranışını etkileyen mikro yapısal özellikleri açığa çıkartır. Yüksek döküm ve kalıp sıcaklıklarının birleşimi, dendritik büyümenin yavaşladığı ve termal gerilimlerin daha eşit dağıldığı bir soğutma rejimine işaret eder. Bu da alaşımın daha homojen ve daha az kusurlu bir mikro yapıya sahip olmasını sağlar.

Bu mikro yapısal özellikler, malzemenin sıcak yırtılma eğiliminin düşük olmasının nedenlerini açıklar. Dendritik yapılar azalmış ve daha dengeli bir dağılıma sahip olabilir, bu da malzemenin içerisindeki gerilimlerin daha eşit dağıldığı ve böylece sıcak yırtılmaya karşı daha dirençli olduğu anlamına gelir. Ayrıca, ötektik bölgelerin varlığı ve dağılımı da malzemenin genel mekanik özelliklerini etkileyebilir ve SEM analizi bu bölgelerin karakterizasyonu için de kritik bilgiler sunar.



Şekil 5.21. En düşük sıcak yırtılma indeksini gördüğümüz 720-400 parametresinin elementel dağılımını gösteren EDS haritaları (Kişisel arşiv, 2023)

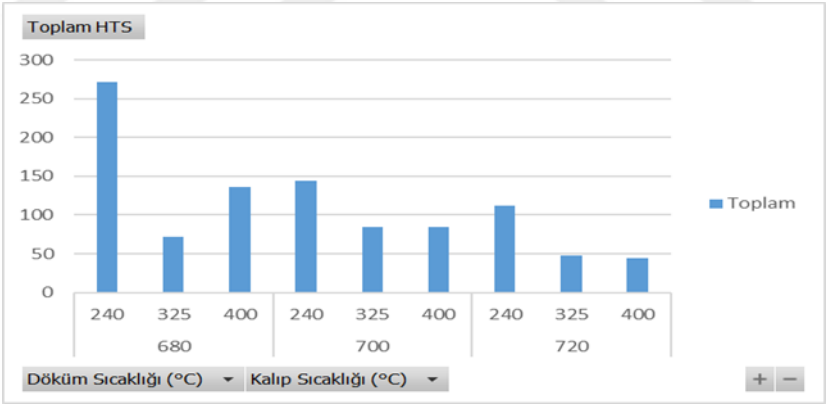
A356 alüminyum alaşımının yüksek döküm sıcaklığı ve düşük kalıp sıcaklığı altında oluşan dendritik bir mikroyapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu dendritler, alaşımın katılaşma sırasında oluşan termal gerilmeleri artıran ve sıcak yırtılma problemini tetikleyen uzun ve kalın kollardan oluşmaktadır. Bu dendritler arasında, ötektik silisyum fazının bulunduğu ve bu fazın sıcak yırtılma bölgelerine neden olduğu tespit edilmiştir. Ötektik silisyum fazı, dendritlerin arasında ayrışarak, alaşımın bütünlüğünü bozmakta ve alaşımın mekanik özelliklerini düşürmektedir. Bu nedenle, alaşımın mikroyapısını iyileştirmek ve sıcak yırtılma problemini azaltmak için, döküm sıcaklığının ve kalıp sıcaklığının optimize edilmesi gerekmektedir.

BÖLÜM ALTI
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, A356 alaşımında sıcak yırtılma probleminin incelenmesi amacıyla bir simülasyon ve deneysel çalışma yapılmıştır. Sıcak yırtılma duyarlılığını etkileyen iki faktör seçilmiştir: döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı. Bu faktörler için farklı seviyeler belirlenmiş ve dokuz farklı faktör kombinasyonu elde edilmiştir. Her bir faktör kombinasyonu için kısıtlı çubuk döküm kalıbında döküm yapılmış ve Termokupl verileri analizi, sıcak yırtılma duyarlılığı (HTS) değerleri, mikroyapı SEM analizleri yapılmıştır. Aynı faktör kombinasyonları için MAGMASOFT programı ile simülasyon çalışması yapılmış sıcak yırtılma şiddeti değerleri hesaplanmıştır.

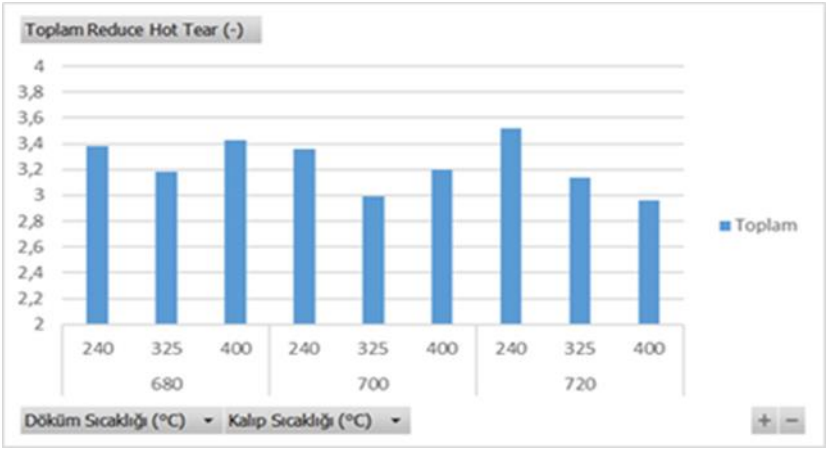
Çalışmanın sonucunda, aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- Deneysel sonuçlarda döküm ve kalıp sıcaklığı arttıkça, alaşımın sıcak yırtılma duyarlılığı azalmaktadır. Bu, alaşımın akışkanlığını arttırması ve stres bölgelerindeki metal beslemesini arttırması, katılaşma sırasında termal gerilmelerin azalması nedeniyledir.



Şekil 6.1. Deneysel çalışma, kalıp – döküm sıcaklığının sıcak yırtılmaya olan etkisi

- Magmasoft Simülasyon sonuçlarında döküm ve kalıp sıcaklığı arttıkça, alaşımın sıcak yırtılma duyarlılığı azalmaktadır. Bu, deneysel sonuçlarda olduğu gibi beslemenin artması ve termal gerilmelerin azalması nedeniyledir.



Şekil 6.2. Magmasoft Simülasyon, kalıp – döküm sıcaklığının sıcak yırtılmaya olan etkisi

- Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında yüksek bir uyum vardır. Bu, iki veri seti arasında pozitif bir doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir. Bu, MAGMASOFT programının alüminyum döküm alaşımlarının sıcak yırtılma duyarlılığını simüle etmede etkili bir araç olduğunu göstermektedir.
- A356 alaşımının sıcak yırtılma duyarlılığını azaltmak için optimum döküm koşulları belirlenmiştir. Optimum döküm koşulları, döküm sıcaklığının 720°C ve kalıp sıcaklığının 400°C olmasıdır.

Bu çalışmanın önerileri şunlardır:

- Alüminyum döküm alaşımlarının sıcak yırtılma duyarlılığını etkileyen diğer faktörler de incelenmelidir. Örneğin, alaşımın kimyasal bileşimi, kalıp malzemesi ve tasarımı gibi faktörler de sıcak yırtılma duyarlılığını etkileyebilir.
- MAGMASOFT programının otonom mühendislik yöntemi kullanılarak farklı kalite ve maliyet hedefleri aynı anda takip edilmelidir. Böylece, daha geniş bir optimizasyon alanı elde edilebilir.
- Sıcak yırtılma problemini önlemek veya azaltmak için farklı yöntemler de araştırılmalıdır. Örneğin, alaşıma katkı maddeleri eklemek, ısıl işlem uygulamak veya mikroyapısını iyileştirmek gibi yöntemler de sıcak yırtılma duyarlılığını azaltabilir.

KAYNAKLAR

Açıcı, N. (2018). A356 ve A380 alaşımlarının eğimli soğutucu ile dökümü ve yarı katı dövme işlemi. [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul]. AVESİS.

Aguiar, A. M. (2020). Hot Tearing Susceptibility of Single-Phase Al-3.8 wt%Zn-1 wt%Mg Alloy Using the Constrained Rod Solidification Experiment: Influence of 1.2 wt%Fe Addition and Grain Refinement. [Doktora tezi, McMaster Üniversitesi, Hamilton]. MacSphere.

Ak, M. (2012). A206 Alüminyum Döküm Alaşımında Empürite Demirin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi. [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul].

Akhyar, H., Malau, V., Suyitno ve Iswanto, P. T. (2017). Hot tearing susceptibility of aluminum alloys using CRCM-Horizontal mold. Results in Physics, 7, 1030-1039. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.02.041

yalitimli-aluminyum.com. (2018, Temmuz 25). Alüminyum alaşımlar. https://yalitimli-aluminyum.com/aluminyum-alasimlar

Makine Eğitimi. (b.y.). Alüminyum Alaşımları ve Kullanım Alanları. Alındığı tarih: 24 Aralık 2023, https://www.makinaegitimi.com/aluminyum-alasimlari-kullanim-alanlari/

Aluminum Association. (2017). Aluminum Standards and Data 2017 Metric SI. www.aluminum.org

Aybarç, U., Kara, A., Çubuklusu, H. E. ve Çe, Ö. B. (2017). Effect of hot isostatic pressing on metallurgical and mechanical properties of A356 alloy. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32(4), 1327-1335. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.369853

Kahraman, B. (2009). Otomotiv endüstrisinde kullanılan 5754 alüminyum alaşımı sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı

(FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi. [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi]. Kocaeli.

Barrirero, J. (2019). Eutectic modification of Al-Si casting alloys. Linköping Studies in Science and Technology, Dissertation.

Bichler, L., Elsayed, A., Lee, K. ve Ravindran, C. (2008). Influence of mold and pouring temperatures on hot tearing susceptibility of AZ91D magnesium alloy. Ryerson University, Toronto, Canada. American Foundry Society.

Campbell, & John. (2011). Complete casting handbook metal casting processes, metallurgy, techniques and design. University of Birmingham, UK

Clyne, T. W., Wolf, M., & Kurz, W. (1975). The effect of melt composition on solidification cracking of steel, with particular reference to continuous casting. https://doi.org/10.1007/BF02664583

Kılıç, Ö. (2020). Alüminyum alaşımlarının dökümünde yörüngesel çalkalamanın mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul]. AVESİS.

Dubey, S.N. (2015). Study of hot tearing evaluation methods and quantification of contraction forces in die casting alloys.

Fu, W., Song, X. G., Zhao, Y. X., Cao, J., Feng, J. C., Jin, C. ve Wang, G. D. (2016). Effect of Ti content on the wetting behavior of Sn0.3Ag0.7Cu/AlN system. Materials & Design, 115, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.041

Ghambarian, M., Boutorabi, S.M.A. ve Shahri, F. (2018). Investigation on the Simultaneous Effects of Zn Additions and Critical Ingate Velocity on the Hot Tearing Susceptibility of A356 and A206 Aluminum Alloys. Journal of Environmental Friendly Materials, 2(1), 13-17.

Hu, B., Li, D., Li, Z., Xu, J., Wang, X. ve Zeng, X. (2021). Hot tearing behavior in double ternary eutectic alloy system: Al-Mg-Si Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 52(2), 789-805. https://doi.org/10.1007/s11661-020-06101-8

Hu, X. ping, Zhao, Y., Wang, Q., Zhang, X. zhi, Li, R. Xin. ve Zhang, B. rong. (2019). Effect of pouring and cooling temperatures on microstructures and mechanical properties of as-cast and T6 treated A356 alloy. China Foundry, 16(6), 380-385. https://doi.org/10.1007/s41230-019-9068-8

J.R. Davis. (2001). Aluminum and aluminum alloys ıntroduction and overview. https://doi.org/10.1361/autb2001p351

Kim, W., Jang, K., Ji, C. ve Lee, E. (2021). Effects of heat treatment on the microstructure and hardness of a356 (AlSi7 Mg0.3) manufactured by vertical centrifugal casting. Applied Sciences (Switzerland), 11(23). https://doi.org/10.3390/app112311572

Pierer, R. F. (2007). Formulation of a Hot Tearing Criterion for the Continuous Casting Process. [Doktora tezi, Montanuniversität Leoben, Metallurgie Lehrstuhl, Leoben, Avusturya].

Li, M., Li, Y. ve Zhou, H. (2010). Effects of pouring temperature on microstructure and mechanical properties of the A356 aluminum alloy diecastings. Materials Research, 23(1). https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0676

Li, S. (2010). Hot tearing in cast aluminum alloys: Measures and effects of process variables. [Doktora tezi, Worcester Polytechnic Institute, Materials Science and Engineering, Worcester, MA].

Li, S., Sadayappan, K. ve Apelian, D. (2016). Effects of mold temperature and pouring temperature on the hot tearing of cast Al-Cu alloys. Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 47(5), 2979-2990. https://doi.org/10.1007/s11663-016-0739-1

Ölmez, S. ve Keleşoğlu, E. (2016). Alüminyum silisyum alaşımların yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının incelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 4(1), 31-39. e-ISSN: 1308-6693

Özderin, S. (2012). AlTi5B1 master alaşımının alüminyum basınçlı döküm yönteminde tane inceltici olarak kullanımının incelenmesi [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul].

Pulisheru, K. S. ve Birru, A. K. (2021). Effect of pouring temperature on hot tearing susceptibility of Al-Cu cast alloy casting simulation. Materials Today: Proceedings, 47, 7086-7090. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.06.182

Puparattanapong, K., Pandee, P., Boontein, S. ve Limmaneevichitr, C. (2018). Fluidity and hot cracking susceptibility of A356 alloys with Sc additions. Transactions of the Indian Institute of Metals, 71(7), 1583-1593. https://doi.org/10.1007/s12666-018-1293-0

Rappaz, M., Drezet, J.-M. ve Gremaud, M. (1999). A New Hot-Tearing Criterion. Metallurgical and Materials Transactions A, 30A(2), 449-455. https://doi.org/10.1007/s11661-999-0334-z

Sigworth, G.K. (1996). Hot Tearing of Metals. AFS Transactions, 1053. Johnstown, Pennsylvania: GKS Engineering Services.

Song, J., Pan, F., Jiang, B., Atrens, A., Zhang, M. X., & Lu, Y. (2016). A review on hot tearing of magnesium alloys. Journal of Magnesium and Alloys. https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.08.003

Stermann, L. ve Iraizoz, M. (2018). Evaluation of hot tearing susceptibility of 6000 series aluminum alloys using constrained solidification test. Minerals, Metals and Materials Series, Part F4, 389-395. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_52

TUNÇAY Tansel. (2016). A356 alaşımında Cu miktarının mikroyapı ve aşınma davranışı üzerine etkisi. Journal of Polytechnic, 19(4), 585-592. https://doi.org/10.2339/2016.19.4

Uludağ, M., Çetin, R. ve Dışpınar, D. (2017a). Observation of hot tearing in Sr-B modified A356 alloy. Archives of Foundry Engineering, 17(4), 165-168. https://doi.org/10.1515/afe-2017-0151

Onar, V. (2010). TIG kaynağında azot gazının alüminyum yüzey ve mikroyapı özelliklerine etkisi. [Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi]. Ankara.

Yılmaz Güven, Ş. ve Delikanli, Y. E. (2011). A 2024 Alüminyum alaşımında çökelme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi. SDU Teknik Bilimler Dergisi, 2(4), 13-20.