



**T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AL-7Sİ-MG VE AL-7Sİ-0.6MG ALAŞIMLARININ
FREZELENMESİNDE T6 ISIL İŞLEMİN İŞLENEBİLİRLİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Cem ALPARSLAN

**Danışman
Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR**

**RİZE
2023**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR danışmanlığında, Cem ALPARSLAN tarafından hazırlanan *Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg Alaşımlarının Frezelenmesinde T6 Isıl İşlemin İşlenebilirlik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 13/06/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı, Adı SOYADI

İmza

Başkan

:

Doç. Dr. Yakup TURGUT

Üye

:

Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR

Üye

:

Doç. Dr. Uğur AKBULUT

ETİK BEYAN

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg Alaşımlarının Frezelenmesinde T6 Isıl İşlemin İşlenebilirlik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve/veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim. 13/06/2023

Cem ALPARSLAN

ÖN SÖZ

Son zamanlarda malzeme üretim sektöründe hızlı bir gelişim yaşanmaktadır. Bu gelişim, imalat süreçlerinde mekanik özellikleri iyileştirilmiş ürünlerin ortaya çıkması ve gelişmiş işleme yöntemlerinin kullanılmasına olan ihtiyacın artmasıyla sonuçlanmıştır. Özellikle, alüminyum (Al) esaslı alaşımların endüstride kullanım alanlarının artması farklı tür ihtiyaçlara ve rekabete yol açmıştır. Al esaslı alaşımların kolay dökülebilmesi, şekillendirilebilmesi ve tedarik edilebilmesi, birçok işleme yöntemleriyle kullanılabilmesi, tedarik edilebilmesi, hafif ve yüksek özgül mukavemet ve korozyon direncine sahip olması en sık tercih edilen alaşımlar arasında yer almasını sağlamıştır. Genellikle, kullanılan sektörler göre silisyum (Si), magnezyum (Mg), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi elementler ilave edilerek Al alaşımlarının mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Ayrıca, yüksek korozyon direnci sayesinde Al esaslı alaşımlara ısıt işlemler uygulanarak mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Otomotiv ve havacılık sektörlerinde yüksek mukavemeti, dökülebilirliği ve kaynak edilebilirliği sayesinde Al-Si esaslı alaşımların kullanımları yaygınlıkla tercih edilmektedir. Özellikle, uçak motor kapakları, pervane kanatları, araba motor bloğu, silindir kapağı, piston, rulman kapağı, jant ve fren valf üretiminde yaygınlıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Al-Si esaslı alaşımlar arasında yer alan Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının kokil kalıba dökülmüş ve ısıt işlemleri durumundaki yapısal, mekanik ve frezeleme işleminde kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür kesiciler kullanılarak işlenebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmanın yürütülmesinde akademik danışmanlığımı yapan ve manevi olarak desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR ve tüm çalışma hayatı boyunca yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Cem ALPARSLAN

2023/RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET.....	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	14
2.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	17
2.2. Silisyum ve Magnezyum Elementlerinin Alüminyuma Etkisi.....	20
2.3. Alüminyum-Silisyum Esaslı Alaşımlar.....	21
2.3.1. Alüminyum-Silisyum faz diyagramı	22
3. ISIL İŞLEM	24
3.1. Çözeltiliye Alma.....	28
3.2. Su Verme	29
3.3. Yaşlandırma.....	30
4. İŞLENEBİLİRLİK.....	31
4.1. Frezeleme	31
4.1.1. Frezelemede kullanılan kesici takımlar	33
4.2. Frezelemede Kesme Parametreleri	34
4.2.1. Kesme hızı (V_c)	34
4.2.2. İlerleme (f).....	35
4.2.3. Talaş derinliği (a_p)	36
4.3. Yüzey Pürüzlülüğü	36
4.4. Takım Aşınması	38
4.5. Kesme Kuvvetleri.....	40

4.5.1. Kesme modelleri	41
4.6. Frezelemede Oluşan Kuvvetler	42
5. MATERYAL VE METOT	44
5.1. Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg Alaşımlarının Üretilmesi	44
5.2. Mikroyapısal İnceleme ve Mekanik Testler İçin Numunelerin Hazırlanması.....	45
5.3. Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg Alaşımlarına T6 Isıl İşlemin Uygulanması..	46
5.4. Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi	47
5.4.1. Bakalite alma.....	47
5.4.2. Zımparalama ve parlatma	48
5.4.3. Optik mikroskop ve SEM incelemesi.....	48
5.4.4. Çekme deneyleri.....	49
5.4.5. Sertlik deneyleri	49
5.5. İşlenebilirlik Deney Düzenəğinin Hazırlanması ve Frezeleme Deneylerinin Gerçekleştirilmesi.....	49
5.6. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi	50
6. BULGULAR	51
6.1. İy yapı İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular	51
6.2. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	56
6.2.1. Çekme ve sertlik testleri	56
6.3. İşlenebilirlik Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	58
7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	66
7.1. Mikroyapısal Özelliklerin Değerlendirilmesi.....	66
7.2. Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi	67
7.3. Kırılma Yüzey Özelliklerinin Değerlendirilmesi	67
7.4. İşlenebilirlik Özelliklerinin Değerlendirilmesi	68
KAYNAKÇA	74

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : Makine Mühendisliği

Tez Türü : Tezli Yüksek Lisans

Danışman : Doç. Dr. Şenol BAYRAKTAR

Hazırlayan : Cem ALPARSLAN

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 87

ÖZET

AL-7Si-Mg VE AL-7Si-0.6Mg ALAŞIMLARININ FREZELENMESİNDE T6 ISIL İŞLEMİN İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada, Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımları kokil kalıba döküm yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu alaşımlar üzerinde T6 ısıtma işlemi kapsamında çözündürme, su verme ve yapay yaşlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dökülmüş ve T6 ısıtma işlemi görmüş durumdaki alaşımların mikroyapısal, mekanik ve frezeleme işleminde işlenebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımının iç yapısı, α -Al, primer Si, ötektik Al-Si, Mg_2Si , β -Al(Fe, Mn)Si, β -Al₅FeSi ve π -AlSiMgFe fazlarından oluşmuştur. Al-7Si-0.6Mg alaşımının iç yapısında ise mevcut fazlara ilave olarak β -Al₈Mg₃FeSi₆ fazı görülmüştür. T6 ısıtma işlemi ile iç yapıda bulunan fazların küreselleşerek homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir. Alaşımlara uygulanan ısıtma işlemi ile sertlik, akma ve çekme mukavemeti artarken kopma uzamasının azaldığı tespit edilmiştir. Al-7Si-0.6Mg alaşımının daha iyi mekanik özellikler sergilediği gözlemlenmiştir. İşlenebilirlik testlerinde kesme hızının artması ile kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, yığıntı katman (YK) ve yığıntı talaş (YT) azalırken, ilerlemenin artması ile artmıştır. T6 ısıtma işlemi, kopma uzamasındaki azalmaya bağlı olarak alaşımların işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmiştir. Hem dökülmüş hem de ısıtma işlemi görmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımını daha iyi işlenebilirlik özellikleri sergilemiştir. TiAlN kaplamalı karbür parmak frezeler ile yapılan işlenebilirlik deneylerinde daha düşük kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, YK ve YT elde edilmiştir. İdeal işlenebilirlik özellikleri, T6 ısıtma işlemli durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımının 110 m/dak kesme hızı ve 0,08 mm/dev ilerleme şartlarında TiAlN kaplamalı karbür parmak frezeler ile işlenmesinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al-Si-Mg alaşımı, Isıtma işlemi, Mikroyapı, Mekanik özellik, Frezeleme

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Mechanical Engineering

Thesis Type : Master Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Şenol BAYRAKTAR

Author : Cem ALPARSLAN

Year : 2023

Pages : 87

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF T6 HEAT TREATMENT ON MACHINABILITY PROPERTIES IN MILLING OF AL-7SI-MG AND AL- 7SI-0.6MG ALLOYS

In this study, Al-7Si-Mg and Al-7Si-0.6Mg alloys were produced using the permanent mold casting method. Solution, quenching and artificial aging processes were carried out on these alloys within the scope of T6 heat treatment. Microstructural, mechanical and machinability properties in milling process of as-cast and T6 heat-treated alloys were investigated. The microstructure of the as-cast Al-7Si-Mg alloy consisted of α -Al, primary Si, eutectic Al-Si, Mg_2Si , β -Al(Fe, Mn)Si, β -Al₅FeSi and π -AlSiMgFe phases. In addition to the existing phases, β -Al₈Mg₃FeSi₆ phase was observed in the microstructure of the Al-7Si-0.6Mg alloy. It was determined that the phases in the microstructure became spheroidization and homogeneously distributed with T6 heat treatment. It was determined that the hardness, yield and tensile strengths increased with the heat treatment applied to the alloys, while the elongation to fracture decreased. It was observed that Al-7Si-0.6Mg alloy exhibited better mechanical properties. The cutting force, surface roughness, built-up layer (BUL) and built-up edge (BUE) decreased with the increase in cutting speed in the machinability tests, while it increased with the increase in feed rate. T6 heat treatment improved the machinability properties of the alloys due to the decrease in elongation to fracture. Al-7Si-0.6Mg alloy in both the as-cast and heat-treated condition exhibited better machinability properties. Lower cutting force, surface roughness, BUL and BUE were obtained in the machinability tests performed with TiAlN coated carbide end mills. Optimal machinability properties were obtained in machining of Al-7Si-0.6Mg alloy in T6 heat-treated condition with TiAlN coated carbide end mills at cutting speed of 110 m/min and feed rate of 0.08 mm/rev conditions.

Keywords: Al-Si-Mg alloy, Heat treatment, Microstructure, Mechanical property, Milling

KISALTMALAR

CVD	: Chemical vapour deposition
Dak	: Dakika
Dev	: Devir
HSS	: High speed steel
Doç. Dr.	: Doçent doktor
kW	: KiloWatt
m	: Metre
μm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
cm^3	: Santimetre küp
N	: Newton
Nm	: Newtonmetre
Ncm	: Newtonsantimetre
V_f	: İlerleme hızı
f_z	: Diş başına ilerleme
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
TiAlN	: Titanyum alüminyum nitrür
TiN	: Titanyum nitrür
V	: Volt
YT	: Yığıntı talaş
YK	: Yığıntı katman
α	: Alfa
β	: Beta
$^\circ$	: Derece
ε	: Epsilon
π	: Pi
$^\circ\text{C}$	: Santigrat derece
θ	: Teta
%	: Yüzde

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Alüminyumun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	15
Tablo 2. Dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması	17
Tablo 3. Dökme alüminyum alaşımların sınıflandırılması	18
Tablo 4. Silisyumun çeşitli sıcaklıklarda alüminyum içerisinde eriyebilirlik değerleri	23
Tablo 5. T, Temper kodları	27
Tablo 6. H, Temper kodları	27
Tablo 7. Alaşımların ağırlıkça kimyasal yüzde (%) bileşim oranları	45
Tablo 8. Çekme testi numunelerine ait mekanik özellikler	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Yüzey merkezli kübik yapı.....	14
Şekil 2. Alüminyum-Silisyum faz diyagramı	23
Şekil 3. Dövme alüminyum alaşımlarda ısıtıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşım grupları	25
Şekil 4. Dökme alüminyum alaşımlarında ısıtıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşım grupları	25
Şekil 5. Çökelme sertleşmesinin uygulanabildiği solvüs eğrisi içeren faz diyagramı ve çökelme işleminin aşamalarını gösteren grafik	28
Şekil 6. Frezeleme operasyonları, (a) Çevresel frezeleme ve (b) Alın frezeleme	32
Şekil 7. Zıt yönlü ve eş yönlü frezeleme operasyonu	33
Şekil 8. Yüzey pürüzlülüğünün örnek gösterimi	37
Şekil 9. Kesici takım aşınma aşamaları	40
Şekil 10. Dik kesme işlemi	42
Şekil 11. Alın frezeleme operasyonunda oluşan kuvvetler	43
Şekil 12. İş akış diyagramı	44
Şekil 13. Alaşımların döküm yöntemi ile üretilmesi	45
Şekil 14. Mikroyapısal inceleme, mekanik ve işlenebilirlik testleri için numunelerin teknik resimleri (ölçüler mm'dir), (a) CNC frezeleme numunesi, (b) Sertlik ve mikroyapı numunesi ve (c) Çekme numunesi	46
Şekil 15. Isıl işlem prosesi, (a) Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarına ait işleme numuneleri, (b) Isıl işlem fırını ve (c) Isıl işlem grafiği	47
Şekil 16. Bakalite alınmış numuneler	48
Şekil 17. Zımparalama ve parlatma işlemi	48
Şekil 18. Mikroyapı inceleme cihazları (a) Optik mikroskop ve (b) SEM.....	49
Şekil 19. İşlenebilirlik testleri için deney düzeneği.....	50
Şekil 20. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımının içyapı görüntüsü (20X büyütme).....	51
Şekil 21. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımının içyapı görüntüsü (50X büyütme).....	52
Şekil 22. T6 ısıtıl işlem görmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımının içyapı görüntüsü	

(20X büyütme).....	52
Şekil 23. T6 ısıtıl işlem görmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımının içyapı görüntüsü, a) π fazı ve b) β fazı (50X büyütme)	53
Şekil 24. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımının içyapı görüntüsü (20X büyütme)	54
Şekil 25. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımının içyapı görüntüsü (50X büyütme)	54
Şekil 26. T6 ısıtıl işlem görmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımının içyapı görüntüsü (20X büyütme).....	55
Şekil 27. T6 ısıtıl işlem görmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımının içyapı görüntüsü, a) π fazı ve b) β fazı (50X büyütme)	56
Şekil 28. Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarına ait kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri, (a) Al-7Si-Mg ısıtıl işlemsiz, (b) Al-7Si-Mg/T6 ısıtıl işlemlili, (c) Al-7Si-0.6Mg ısıtıl işlemsiz ve (d) Al-7Si-0.6Mg/T6 ısıtıl işlemlili.....	58
Şekil 29. Dökülmüş ve T6 ısıtıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımların V:50 m/dak kesme hızında, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde f-F ve f-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg	59
Şekil 30. Dökülmüş ve T6 ısıtıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımların V:80 m/dak kesme hızında, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde f-F ve f-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg	59
Şekil 31. Dökülmüş ve T6 ısıtıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımların V:110 m/dak kesme hızında, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde f-F ve f-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg	60
Şekil 32. Dökülmüş ve T6 ısıtıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımların f:0,08 mm/dev ilerlemede, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde V-F ve V-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg	60
Şekil 33. Dökülmüş ve T6 ısıtıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımların f:0,16 mm/dev ilerlemede, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde V-F ve V-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg	60
Şekil 34. Dökülmüş ve T6 ısıtıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımların f:0,24 mm/dev ilerlemede, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde V-F ve V-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg	61

Şekil 35. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki alaşımların TiAlN kaplamalı karbür takımlar ve farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde F ve Ra'daki değişim, (a) V:50 m/dak-f: 0,24 mm/dev ve (b) V:110 m/dak-f:0,08 mm/dev	61
Şekil 36. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki alaşımların kaplamasız karbür takımlar ve farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde F ve Ra'daki değişim, (a) V:50 m/dak-f:0,24 mm/dev ve (b) V:110 m/dak-f:0,08 mm/dev.....	61
Şekil 37. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki Al-7Si-Mg alaşımının kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür takımlar ve farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde F ve Ra'daki değişim, (a) V:50 m/dak-f:0,24 mm/dev ve (b) V:110 m/dak-f:0,08 mm/dev	62
Şekil 38. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımının kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür takımlar ve farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde F ve Ra'daki değişim, (a) V:50 m/dak-f:0,24 mm/dev ve (b) V:110 m/dak-f:0,08 mm/dev	62
Şekil 39. V:50 m/dak ve f:0,08 mm/dev parametrelerinde kaplamasız kesici takımda YK ve YT oluşumları, (a) Al-7Si-Mg, (b) Al-7Si-0.6Mg ve V:50 m/dak ve f:0,24 mm/dev parametrelerinde kaplamasız kesici takımda YK ve YT oluşumları , (c) Al-7Si-Mg, (d) Al-7Si-0.6Mg.....	63
Şekil 40. V:110 m/dak ve f:0,08 mm/dev parametrelerinde kesici takımlarda YK ve YT oluşumları, (a) Kaplamasız/Al-7Si-Mg, (b) Kaplamasız/Al-7Si-0.6Mg, (c) TiAlN Kaplamalı/Al-7Si-Mg ve (d) TiAlN Kaplamalı/Al-7Si-0.6Mg.....	64
Şekil 41. V:110 m/dak ve f:0,24 mm/dev parametrelerinde kaplamasız kesici takımda YK ve YT oluşumları, (a) Al-7Si-Mg, (b) Al-7Si-0.6Mg, (c) Al-7Si-Mg/T6 ve (d) Al-7Si-0.6Mg/T6.....	64
Şekil 42. V:110 m/dak ve f:0,08 mm/dev parametrelerinde TiAlN kaplamalı kesici takımda YK ve YT oluşumları, (a) Al-7Si-Mg, (b) Al-7Si-0.6Mg, (c) Al-7Si-Mg/T6 ve (d) Al-7Si-0.6Mg/T6.....	65

GİRİŞ

Teknoloji geliştikçe hem teknik hem de ekonomik olarak geri dönüştürülebilir ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç artmaktadır. Bu nedenle ham malzeme türleri ve üretim teknolojileri her geçen gün gelişmektedir. Tüm bu gelişmelerle uyumlu olarak, alüminyum (Al) ve Al alaşımlarının kullanımı %70-80'lere ulaşmaktadır. Çünkü, Al alaşımları hafifliği, yüksek özgül mukavemeti ve yüksek korozyon direncinin yanısıra kolay şekillendirilebilirliği ve fonksiyonel olması nedeniyle ham malzeme olarak yüksek oranda tercih edilmektedir. Kolay temin edilebilmesi ve ileri üretim teknolojilerinin gelişmiş olması, Al alaşımlarını günümüzün en önemli mühendislik malzemelerinden biri haline getirmektedir. Çok geniş kullanım alanına sahip olan Al alaşımları, havacılık-uzay, taşımacılık, otomotiv, elektronik, makine ve imalat sektörlerin de bazı özel uygulamalarda tercih edilmektedir. Hafiflikleri sayesinde otomotiv, uzay ve havacılık endüstrisinde ağırlık azaltma, yakıt tasarrufu ve hava kirliliğinin önlenmesinde çok önemli yere sahiptir (Florea vd., 2012; Chen vd., 2012; Bakavos vd., 2010). Yapısal ve mekanik özellikleri karşılamamasından dolayı Al saf halde nihai ürün olarak kullanılamamaktadır. İstenilen özellikleri sergilemesi için Al içerisine, Si ve Mg gibi birçok element ilave edilerek alaşımlandırılmaktadır. Özellikle, Si ilavesiyle birlikte oluşturulan Al-Si alaşımı, yüksek basınç dayanımı, korozyon direnci, akışkanlık ve çekme mukavemetine sahip olmaktadır. Ayrıca, bu özellikler Si oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Al-Si esaslı alaşımlar jant, dişli kutusu, fren sistemi, yakıt tankı, şase imalatı vb. ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır (Aamir vd., 2020). Mg ilavesi ise bu alaşımların ısıtılma kabiliyetini geliştirdiği için yaşlandırma işlemi sonrasında ikincil Mg_2Si çökeltisinin oluşumuna katkıda bulunarak mekanik özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. $Al_7Si_0.3Mg$ (A356) ve $Al_7Si_0.6Mg$ (A357, F357) Al esaslı döküm alaşımları, ağırlık/direnç oranları nedeniyle otomotiv ve savunma – havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Shi vd., 2021; Lombardi vd., 2015). Geniş kullanım alanına sahip olmasına rağmen Al esaslı alaşımların döküm yöntemi ile üretimi sonrasında doğrudan istenilen sistemlerde kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle döküm yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilen alaşımlar, üretim sonrasında talaşlı imalat işlemlerine tabi tutulmaktadır. Ancak, talaşlı imalat

operasyonları, mekanik bileşenlerin çalışması sırasında maruz kaldığı yorulma ve servis ömrü azalması gibi olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına sebep olan yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Bu durum, çentik faktörü etkisini ortaya çıkararak mekanik bileşenlerin performansında olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Böylelikle, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması için ilave imalat operasyonlarının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ek imalat operasyonlarının uygulanması, üretim maliyetlerinin artmasına ve işletmelerin küresel pazarda rekabet şansının azalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, talaşlı imalat işlemleri öncesinde malzemelerin yapısal ve mekanik karakterizasyonlarının incelenmesi ve uygun işleme parametrelerinin seçilmesi gerekmektedir. Böylelikle, işletmelerin üretim süreçlerinde verimlilikleri artırılarak üretim maliyetlerinin en aza indirilmesi sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, kokil kalıba döküm tekniği kullanılarak üretimi gerçekleştirilen Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının dökülmüş ve T6 ısıt işlemleri görmüş durumdaki yapısal, mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin karşılaştırmalı bir biçimde araştırılması yapılmaktadır. Ayrıca, çalışmadan elde edilen veriler ile akademik ve endüstriyel kullanıcılara katkı sağlanması hedeflenmektedir.

1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Al esaslı alaşımlar, mikroyapılarına ve bileşimlerine uygulanan işlemlere bağlı olarak dövme ve döküm Al alaşımlar olarak kategorize edilmektedir. Döküm Al alaşımlarında alaşım element içeriği, genellikle %10-12 oranında iken dövme Al alaşımlarında ise %1-2 aralığındadır. Dökme Al alaşımlar, dövme Al alaşımlar ile karşılaştırıldığında daha kötü termoplastik ve daha kötü mekanik özelliklere sahiptir. Ancak, dökme Al alaşımları istenilen korozyon direnci, hafiflik ve mekanik özelliklere sahip olmaları yanı sıra endüstride seri üretime elverişliliği ve farklı alaşım elementlerinin ilave edilebilir olması nedeniyle en çok tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır. Döküm yöntemi, dökülecek malzeme ve üretilecek parçanın geometrik yapısına göre bozulabilir ve kalıcı kalıp olmak üzere iki farklı gruba ayrılmaktadır. Kalıcı kalıba dökümde: metal kalıba döküm, basınçlı kalıba döküm, savurma döküm, sürekli döküm; bozulabilir kalıba dökümde ise: kum kalıba döküm, seramik kalıba döküm, alçı kalıba döküm ve hassas döküm yöntemleri kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemler, üretilecek olan ürünün hassasiyetine ve geometrik durumlarına göre değişiklik göstermektedir.

Al esaslı alaşımlar, düşük yoğunluk ve termal genleşme, yüksek aşınma direnci, işlenebilirlik, korozyon direnci ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı özelliklerinden dolayı havacılık, savunma ve otomotiv sanayisinde yapısal bileşenler olarak yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Gangil vd., 2017; Wei vd., 2017; Arrabal vd., 2013; Es-Said vd., 2002). Bu yapısal bileşenler arasında yer alan ve endüstriyel uygulamalarda başlangıçta kullanılan çelik esaslı alaşımlara alternatif olarak hafiflik özelliklerinden dolayı tercih edilen Al-Si-Mg alaşımları, havacılık ve otomotiv sektöründe motor bloğu, motor kapağı, silindir başlıklarında ve jant üretiminde yaygın olarak kullanılmakta (Ren vd., 2021; Jape vd., 2016; Javidani ve Larouche, 2014; Wang vd., 2011), yüksek ürün verimliliği ve düşük yakıt ekonomisi bakımından avantajlar sağlamaktadır. Bu alaşımların kullanımı ile özellikle, mekanik aşınma ve yüksek ısı akışına maruz kalan mekanik sistemlerde yüksek çalışma performansları elde edilebilmektedir. Bu odakta, Al esaslı alaşımlarda yüksek aşınma direnci, iyi kaynaklanabilirlik, iyi dökülebilirlik ve düşük çekme (shrinkage) özellikleri elde edebilmek için Si ilavesi yapılırken, mekanik sistemlerde yüksek sıcaklıklarda termal

ve mekanik kararlılığın sağlanabilmesi ve çalışma performanslarının iyileştirilebilmesi için Mg elementi ilave edilmektedir (Ozaydin ve Kaya, 2018; Zedan vd., 2010; Joseph ve Davis, 1993; Kumar vd., 2005).

Al-Si alaşımları, en yaygın kullanılan döküm alaşımlarından birisidir. Si içeriğine göre %5-10 oranında ötektik altı, %10-13 oranında ötektik ve %15-20 oranında ötektik üstü alaşımlar olarak sınıflandırılmaktadır. Gösterdikleri üstün döküm özelliklerinden dolayı döküm yönteminde kullanımı yaygındır. Literatürde Al-Si alaşımlarının yapısal ve mekanik özellikleri üzerine birçok çalışma yapılmış ve güncel çalışmalar yapılmaya da devam edilmektedir. Thirugnanam vd., Al-7Si-Mg alaşımının kırılma davranışının ötektik Si parçacıklarına ve demir (Fe) bakımından zengin intermetaliklerin boyutuna ve şekline bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Isıl işlem ile mekanik özelliklerin geliştirilebileceğini ve alaşımdaki çatlak yayılımının Si parçacıklarının morfolojisine, hücre boyutuna ve Mg içeriğine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir (Thirugnanam vd., 2007). Elmadaglı vd., farklı oranlarda Si ilavesi, Si parçacık boyutu ve sertlik değerlerine sahip döküm Al-Si alaşımlarının aşınma davranışları ile ilgili çalışma yapmışlardır. Si partikül morfolojisi ve boyutunun aşınma katsayıları ve geçiş yükleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu, alaşım sertliği ve Si hacmindeki artışın geçiş yüklerini arttırdığı, ancak aşınma katsayıları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir (Elmadaglı vd., 2007). Atxaga vd., Al-7Si-Mg alaşımının yorulma davranışı üzerinde mikroyapının etkisini inceledikleri çalışmalarında, T6 ısıl işlemin ötektik Si parçacıklarını küreselleştirerek daha homojen bir yapıya dönüştürdüğünü, sünekliği azaltarak mekanik mukavemeti arttırdığını, alaşımın yorulma ömrünün döküm kusurlarının sayısı, boyutları ve konumlarından da etkilendiğini tespit etmişlerdir (Atxaga vd., 2001). Yıldırım ve Özyürek, A356 Al alaşımına çeşitli miktarlardaki Mg'nin (%0,43; 0,67 ve 0,86) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. SEM görüntüleri sonrasında Mg_2Si , Al_5FeSi ve $Al_8Si_6Mg_3Fe$ intermetalik bileşikler tespit etmişlerdir. İncelenen mikroyapıda farklı Mg miktarlarına bağlı olarak Fe bakımından zengin metaller arası bileşiklerin oluştuğunu tespit etmişlerdir. Alaşıma eklenen Mg oranının artmasıyla alaşımın sertliğinde artış olduğunu ve bu artışa paralel olarak alaşımın çekme dayanımı artarken kopma uzaması değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, Al dendritler ile mikro yapıda oluşan oksit filmler arasında tespit edilen Fe bakımından zengin

intermetalik bileşiklerin malzemenin mukavemetini azalttığını belirlemişlerdir (Yıldırım ve Özyürek, 2013). Elsharkawi vd., değişken oranlarda Mg ve Fe içeren Al-7Si alaşımında her iki elementin ağırlıkça yüzdesi arttıkça, π fazının miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, yapılan ısıtıl işlemin Al-7Si alaşımlarda π fazının yüzey fraksiyonunda önemli bir azalmaya neden olduğunu belirlemişlerdir (Elsharhawi vd., 2010). Hekimoğlu ve Hacıosmanoğlu, kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiş ikili Al-17Si, üçlü Al-17Si-4Cu ve dörtlü Al-17Si-4Cu-0.6Mg alaşımlarının iç yapı ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, üretilen alaşım numunelerinin akma dayanımı, sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerini araştırmışlardır. İç yapı incelemeleri sonucunda, Al-17Si alaşımının iç yapısının Al bakımından zengin α , ötektik Al-Si, primer Si ve β fazlarından, üçlü Al-17Si-4Cu alaşımının mevcut fazlara ilave olarak bakırca zengin θ (Al_2Cu) fazından ve dörtlü Al-17Si-4Cu-0.6Mg alaşımının iç yapısında ilave olarak Mg_2Si fazının oluştuğunu ve β fazının π fazına dönüştüğü tespit etmişlerdir. Cu ve Mg ilavelerinin alaşımların sertlik, akma ve çekme dayanımını artırırken, kopma uzaması değerlerini azalttığını belirlemişlerdir (Hekimoğlu ve Hacıosmanoğlu, 2019). Jana vd., Al-7Si-0.6Mg alaşımının yorulma ömrü üzerinde sürtünme karıştırma prosesinin (SKP) etkisini inceledikleri çalışmalarında, SKP'nin alaşımın gözeneklerini kapatarak yorulma ömrünü beş kat arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bunun sonucunda ise içyapıdaki çatlak boyutlarının önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir (Jana vd., 2010). Vencel ve ark., döküm ve ticari A356 (AlSi7Mg0.3) alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Isıl işlem ile her iki alaşımın mekanik özelliklerin iyileştiği, düşük spesifik yükler için daha düşük sürtünme katsayılarının elde edildiğini tespit etmişlerdir. Ticari alaşıma kıyasla daha yüksek Si içeriğine bağlı olarak döküm malzemelerin genel olarak daha iyi aşınma direnci sergilediğini tespit etmişlerdir (Vencel vd., 2007). Hekmat-Ardakan vd., A390 alaşımında Mg içeriğinin artması ile kaba birincil Si partiküllerinin ince Mg_2Si partiküllerine ve ötektik Si fazının ince bir mikro yapıya dönüştürdüğünü belirlemişlerdir. Döküm alaşımlarının sertliğinin, Mg ilavesiyle arttığını ve A390 alaşımının aşınma direncinin hem döküm hem de T6 ısıtıl işlem görmüş durumda Mg ilavesiyle arttığını ortaya koymuşlardır (Hekmat-Ardakan vd., 2010). Taylor ve ark., Al-7Si-Mg alaşımlarındaki akma dayanımının, ağırlıkça yaklaşık %0,6'lık bir Mg içeriğine kadar doğrusal olarak arttığını, daha yüksek Mg

konsantrasyonları için ise azaldığını tespit etmişlerdir. Bunun nedeninin, yüksek Mg içerikli alaşımlardaki Fe bakımından zengin fazların esas olarak kararlı π -AlFeMgSi olması ve Mg içeriğinin artmasıyla sayı ve boyutun artmasından kaynaklandığını tespit etmişlerdir (Taylor vd., 2000; Wang vd., 2001). Edwards vd., Al-Si-Mg alaşımlarında kırılma davranışlarının Fe bakımından zengin intermetalik parçacıkları ve ötektik Si fazının dağılımı ile güçlendirilmiş Al dendritik matristen oluşan mikro yapıya bağlı olduğunu ve bu alaşımlarda yapısal deformasyonların genellikle Si parçacıklarının etkisiyle meydana gelen mikro çatlaklardan kaynaklandığını belirlemişlerdir (Edwards vd. 1996). Wu vd., Mg içeriğinin artması ile akma ve çekme mukavemeti azalırken kopma uzamasının azaldığını, Al-7Si-0.3Mg alaşımı için yorulma mukavemeti 60 MPa iken Al-7Si-0.6Mg alaşımı için 80 MPa olarak ölçüldüğünü ve Al-7Si-0.6Mg alaşımındaki çatlakların daha yavaş büyüdüğünü gözlemlemişlerdir (Wu vd., 2018).

Al-Si-Mg alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesinde kullanılan prosesler arasında yer alan ısıtılma işlemi, katı metallerin ısıtılması ve soğutulmasını gerektiren ve kimyasal bileşiminde herhangi bir değişiklik meydana gelmeden mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlayan bir süreçtir. Al-Si esaslı alaşımlarda Si parçacıklarını küreselleştirerek çatlak oluşumunu azaltmakta ve alaşımların sertlik ve çekme mukavemetinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu proses aynı zamanda talaşlı imalatla kesme işlemini kolaylaştırarak işlenmiş yüzey kalitesini iyileştirmektedir (Pezda ve Jarco, 2016; Gorny vd., 2014; Pezda, 2014). Ayrıca, iyileştirilmiş yüzey kalitesi ile çentik faktörü azalmakta ve mekanik sistemlerde birbiri ile temas halinde çalışan bileşenlerin ürün servis ömürleri arttırılabilmektedir. Endüstride kullanımı yaygın olarak kullanılan ısıtılma işlemi yöntemi, yaşlandırma ısıtılma işlemidir. Yaşlandırma yöntemi yardımıyla mikroyapı içerisinde ikincil faz çökeltilerinin oluşması sağlanmaktadır. Meydana gelen bu ikincil fazlar, zaman ve sıcaklık ile ilişkili olarak malzemenin sertliğini ve mekanik dayanımını arttırmaktadır. Al-Si esaslı alaşımlarda ise en çok tercih edilen yöntem T6 ısıtılma işlemidir. T6 ısıtılma işlemi, çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda ve literatürde Al esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve işlenebilirlik özellikleri dikkate alınarak üretim verimliliğinin arttırılmasına yönelik yapılan çalışmalar halen devam etmektedir. Bunlardan bazılarında; Tiryakioğlu, Al-7Si-0.6Mg alaşımının farklı çözelti ısıtılma işlemi (540°C’de

1, 4, 16 ve 64 saat) parametrelerinin sertleşme karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelediği çalışmada, çözelti ısıtıl işlem süresinin artması ile akma mukavemetinin arttığını ve ısıtıl işlemin Si parçacıklarının boyutu üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu tespit etmiştir (Tiryakioğlu, 2006). Hitchcock vd., homojen bir mikro yapı elde edebilmek için Al-10Si-Mg alaşımına ısıtıl işlem uygulanması gerektiğini ve böylelikle yapı içerisindeki Mg_2Si fazının çökerek çökelme sertleşmesine, Si parçacıklarının küreselleşmesine ve sert ikinci faz Si parçacıkları ile Al faz arasındaki bağın artmasına katkı sağladığını gözlemlemiştir (Hitchcock vd., 2007). Alexopoulos ve Stylianou, A357 dökme Al alaşımına yoğun ve aşırı yaşlandırma koşullarının alaşımın iç yapısına olan etkisini inceledikleri çalışmada, mikroyapıda β'' (Mg_2Si) parçacıklarının çökeldiğini tespit etmişlerdir (Alexopoulos ve Stylianou, 2011). Allich vd., A356 döküm alaşımlarına uygulanan yapay yaşlandırma işleminin, alaşımın sertliğini artırdığını, kesme bölgelerinde yapılan yağlama işlemlerinin ise takım ömrünü artırdığını ve yüzey kalitesini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir (Alliche vd., 2021). Beroual vd., kokil kalıba döküm yöntemi kullanılarak üretilmiş Al-Si-Cu ve Al-Si-Mg alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde ısıtıl işlemin etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında, Al-Si-Cu (E1) alaşımına 500 ve 525°C’de ve Al-Si-Mg (E2) alaşımına ise 525 °C’de, her iki alaşıma 5 dakika ile 16 saat arasında değişen sürelerde çözelti ısıtıl işlemi ve 210°C’de 10 dakika ile 50 saat arasında değişen sürelerde yapay yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Çözelti ısıtıl işlem süresinin mikroyapıyı önemli derecede etkilediğini, intermetalik fazların çözünmesine neden olduğunu ve Cu ve Mg dağılımını homojenleştirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, ağırlıkça %0,6 oranında Mg ilave edilen Al-Si-Mg alaşımının, ağırlıkça %0,3 Cu ilave edilmiş Al-Si-Cu alaşımına göre yaklaşık %34 daha fazla sertlik değeri sergilediğini, maksimum mekanik özellikler bakımından E1 alaşımı için 15 dakika çözelti ve 2 saatlik yapay yaşlandırma ve E2 alaşımı için 8 saat çözelti ve 40 dakikalık yapay yaşlandırma süresinin kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir (Beroual, 2019). Eshaghi vd., T6 ısıtıl işleminin ağırlıkça %0,15, 0,7 ve 1,2 Fe içeriğine sahip ötektik altı Al-Si alaşımlarının mikroyapısı ve 20, 30 ve 40 N yük altında aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelemiştir. Çalışmalarında, ısıtıl işlem uygulanmadan önce en yüksek aşınma direncini %0,7 Fe içeren alaşımın gösterdiğini, T6 ısıtıl işlemin tüm yükler altında farklı Fe içeriğine sahip alaşımların aşınma direncini iyileştirdiğini

tespit etmişlerdir. Faz parçacıklarının morfolojisini incelediklerinde, çekirdeklenme ve yüzey altı çatlakların yayılma olasılığının azaldığını ve alaşımlarda aşınma direncinin arttığını belirlemişlerdir (Eshaghi vd., 2011). Wu vd., Al-Si alaşımları üzerinde uygulanan ısıtma işlemi sonucunda yarı kararlı hale gelen Mg-Si fazının alan fraksiyonunun, Mg içeriğinin artmasıyla (%0,3'ten 0,6'ya) arttığını (%0,22'den 0,78'e) belirlemişlerdir. Bunun sonucunda daha yüksek malzeme sertleştirme oranı ve daha düşük kopma uzaması gözlemlenmiştir (Wu vd., 2019). Vatansever vd., T6 ısıtma işleminin ötektik altı AlSi10Mg alaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Isıtma işleminin mikroyapıdaki iğnemsî şeklindeki Si fazını küresel yapıya dönüştürdüğünü, sertlik ve çekme mukavemetinde sırasıyla %39,16 ve 40,77 oranında artış olduğunu gözlemlenmiştir (Vatansever vd., 2018). Costa ve ark., Al-Si-Cu alaşımının mikroyapı ve sertliği üzerinde T6 ısıtma işlemi çözelti süresinin etkisini araştırmışlardır. Alaşımın mikroyapısının, plaka benzeri bir morfolojiye sahip interdentritik bölgelere yayılan Si parçacıklarına sahip Al bakımından zengin dentritik matristen oluştuğunu gözlemlenmiştir. Bu mikroyapının T6 ısıtma işlemi uygulanması sonrasında lifli ve küresel bir yapıya dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca, Al_2Cu fazının Al bakımından zengin matris içerisinde tam çözünmesi için $490^{\circ}C$ 'de 8 saat ve 5 saat çözelti sürelerinin yeterli olacağını belirlemişlerdir. 5 saatlik çözelti süresi sonrasında sertlik değerlerinin hem 8 saatlik çözelti süresine hem de ısıtma işlemsiz durumdaki numunelere göre arttığını gözlemlenmiştir (Costa vd., 2016). Vencel vd., $548^{\circ}C$ 'de 6 saat çözelti ve $160^{\circ}C$ 'de 6 saat yapay yaşlandırma işleminin tikso ve karıştırma döküm teknikleri ile üretilmiş AlSi7Mg0.3 alaşımının tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, aşınma testlerinde uygulanan tüm yükler (0,2; 0,46; 0,7 ve 1 MPa) için ısıtma işleminin tribolojik özellikleri iyileştirdiğini ve karıştırma döküm ile üretilen alaşıma göre tikso döküm ile üretilen alaşımın yüksek Si içeriğine bağlı olarak daha iyi aşınma direnci sergilediğini tespit etmişlerdir (Vencel vd., 2008). Sha vd., yaptıkları çalışmalarında, Al-7Si-Mg alaşımının, yüksek sayıda β'' faz yoğunluğu oluştuğunda (4 saat boyunca $180^{\circ}C$ yaşlandırma işlemi) en yüksek sertliğe ulaştığını tespit etmişlerdir. Bu sayede çekme dayanımının maksimum değere ulaştığını ve uzamanın azaldığını gözlemlenmiştir (Sha vd., 2012). Liao vd., Al-Si alaşımlarında uygulanan ön yaşlandırma ($120^{\circ}C/14$ saat + $170^{\circ}C/6$ saat) sonucunda, β'' çökelti miktarında

önemli bir artışa neden olurken, tane boyutunda belirgin bir azalmaya neden olduğunu gözlemişlerdir. Aynı zamanda, β' fazının miktarı ve tane boyutunun azaldığını, Si çökeltisinin tamamen oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bunun sonucunda da çekme mukavemetinde azalma ve uzamada iki kattan fazla bir artışın meydana geldiğini belirlemişlerdir (Liao vd., 2013).

Döküm metotları kullanılarak üretilen alaşımların, herhangi bir mekanik sistemde istenilen son ürün olarak kullanılabilmesi için farklı talaşlı imalat operasyonlarına tabi tutulması gerekmektedir. Talaşlı imalat sonrasında arzu edilen yüzey kalitesinin elde edilebilmesi için kesme parametrelerinin optimum tespiti son derece önem taşımaktadır. Endüstriyel uygulamalarda da döküm teknikleri ile üretilen Al-Si esaslı alaşımların nihai ürün olarak kullanılabilmesi için geometrik ve ölçü toleranslarına uygun olacak şekilde talaşlı imalat operasyonları gerekmektedir. Kesme parametreleri, işlenmiş yüzey kalitesinin dışında kesme kuvveti, takım aşınması, boyutsal doğruluk ve işlenmiş yüzey ve yüzey altı gibi çıktılar üzerinde etkilidir. Birbiri ile temas eden makine elemanlarının verimli çalışabilmesi, yüzey kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Yüzey pürüzlülüğü; alaşımlarda yorulma direnci, yağlama, sürtünme ve aşınma özellikleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Literatürde Al-Si esaslı alaşımların işlenmesi ile ilgili güncel çalışmaların bulunduğu görülmüş olup bunlardan bazılarında; Sadiq vd., farklı kesme hızı (1000, 2000 ve 3000 dev/dak) ve ilerleme (0,05; 0,1 ve 0,15 mm/dev) parametrelerinde ticari AA6061T6, LM6 ve AA5083 alaşımlarının HSS (High speed steel) matkaplar yardımı ile delinebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. A6061T6 alaşımının ısıtılma işleminden dolayı minimum yüzey pürüzlülüğü ($3,8 \mu\text{m}$) için optimum parametrelerin 3000 dev/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme olarak tespit etmişlerdir. Al5083 alaşımında minimum yüzey pürüzlülüğü ($4,9 \mu\text{m}$) için optimum parametrelerinin kesme hızı ve ilerleme için sırasıyla 1000 dev/dak ve 0,15 mm/dev olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, AA5083 ve A6061T6 alaşımlarının delinmesinde kesici takımda minimum YT oluşurken LM6 alaşımında ise daha yüksek seviyede YT'nin oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Sadiq vd., 2019). Dos Santos vd., kokil kalıba döküm teknikleri ile üretilen Al-12Si ve Al-16Si alaşımlarının işlenebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. Deneylerinde, kaplamasız sementit ve sementit karbür üzerine elmas benzeri karbon kaplama yapılmış kesiciler ile tornalanma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, Si içeriğinin

artması ile ilerleme kuvvetlerinin arttığını, elmas benzeri kaplamalı kesiciler ile Si içeriğine rağmen kesme kuvvetlerinin azaldığını tespit etmişlerdir (Dos Santos vd., 2007). Zedan vd., Al-Si esaslı malzemelerin delinmesinde artan Si içeriği ile kesme kuvveti ve momentin arttığını belirlemişlerdir (Zedan vd., 2010). Hekimoğlu ve Bayraktar, Al-9Si alaşımına yapılan %0,1 Sr ilavesinin akma ve çekme mukavemeti ile kopma uzamasını arttırdığını, Al-9Si-0,1Sr alaşımına %0,6 Mg ilavesi ile akma ve çekme mukavemeti artarken kopma uzamasının azaldığını, kaplamasız karbür kesici uçlar ile tornalama testleri sonucunda Mg ilavesinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve YT oluşumunu önemli ölçüde azalttığını gözlemlemişlerdir (Hekimoğlu ve Bayraktar, 2022). Kucmaszewski vd., Al10SiMg alaşımının TiB₂, TiAlCN kaplamalı ve iki ağızlı kaplamasız kesiciler ile frezelemede işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, minimum yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması için yüksek mukavemet sağlayan TiAlCN kaplamalı kesicilerin daha iyi işleme performansı sergilediğini belirlemişlerdir (Kucmaszewski vd., 2018). Machado vd., ağırlıkça Al-(%3, 7, ve 12)Si-0.6Mg T6 ısıt işleme görmüş ve dökülmüş üç farklı alaşımın tornalanmasında işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. Numunelere CNC torna tezgahı kullanılarak alın tornalama işlemi yapmışlardır. Alaşımlara kesme kuvvetinin fonksiyonu olan parametrelerle (kesme derinliği, ilerleme hızı, kesme hızı ve kesici takım) işlenebilirlik testleri uygulamışlardır. Döküm alaşımlarda işlemenin başlangıcında maksimum kesme kuvveti görülürken, işleme ilerledikçe kesme kuvvetinin azaldığı gözlemlemişler. Isıt işleme görmüş alaşımların işlenmesinde kesme kuvvetleri neredeyse sabit değerler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Böylelikle, homojen bir mikro yapı ve sertliğin bir sonucu olarak ısıt işleme görmüş alaşımların tornalanması sırasında daha kararlı bir işlenebilirlik davranışı sergilediği tespit edilmiştir (Machado vd., 2022). Akyüz ve Şenaysoy, AA6013 ve AA6082 Al alaşımlarında yaşlandırma prosesinin alaşımların mekanik ve işlenebilirlik özellikleri üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmada, kesme hızının artması ile kesme kuvvetleri azalırken, kesme derinliğinin artması ile arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, yaşlandırma süresindeki artış ile kesme kuvvetlerinin arttığı gözlenirken, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yaşlandırma süresi ve kesme hızındaki artışa bağlı olarak iyileştiğini ortaya koymuşlardır (Akyüz ve Şenaysoy, 2014). Hekimoğlu ve Bayraktar, Al-12Si alaşımına %0,02, 0,1 ve 1 oranlarında ilave edilen stronsiyum (Sr) ilavelerinin yapısal,

mekanik ve tornalama işleminde işlenebilirlik özellikleri (Kesme hızı: 200, 300 ve 400 m/dak; ilerleme: 0,05; 0,1 ve 0,15 mm/dev) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında en yüksek sertlik ve çekme mukavemetinin %0,1 Sr ilavesi ile elde edildiğini, artan Sr ilavesi ile kopma uzamasının azaldığını gözlemlemişlerdir. İşleme testlerinde ise kesme hızı arttıkça kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığını; ilerleme arttıkça kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirlemişlerdir. En düşük kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve YT oluşumunun %0,1 Sr ilaveli alaşımda olduğunu gözlemlemişlerdir (Hekimoğlu ve Bayraktar, 2022). Barakat vd., Al-Si esaslı A319 ve A356 alaşımlarına göre Al-Cu alaşımının delme ve kılavuz çekme operasyonlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. T6 yaşlandırma işlemi ile birlikte A356 alaşımında 2500 delikten sonra en yüksek kesme kuvvetinin (yaklaşık 360 N) meydana geldiğini belirlemişler. Al-Cu bazlı alaşımlarda ise, yaşlandırma işleminin değiştirilmesinin pratikte kesme kuvvetleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir. Yüksek Cu içeriği alaşım içerisinde yağlayıcı görevi gördüğü için kesici takımlarda aşınma olmadan 2700 deliğe kadar delme işlemini kolaylaştırdığını gözlemlemişler. Ayrıca, Al-Cu esaslı alaşımdaki düşük Si seviyesinden dolayı, konik geometriye sahip talaşın (YT) daha sık oluştuğunu ve bunun sonucunda delik boyutu toleranslarının daha fazla etkilendiğini belirlemişlerdir (Barakat vd., 2019). Bayraktar ve Afyon, Al-7Si alaşımına ilave edilen %4 Zn ve %3 Cu elementlerinin alaşımların sertlik ve çekme mukavemetini arttırırken kopma uzamasını azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, kaplamasız karbür matkaplar ile delme işleminde Zn ve Cu ilavelerinin kesme kuvveti, tork, YT ve YK oluşumunu azalttığını gözlemlemişlerdir (Bayraktar ve Afyon, 2020). Sharif vd., Al-Si (A383) alaşımının yüksek kesme hızlarında kaplamasız, TiAlN ve AlTiN kaplamalı takımlar ile delinmesinde kesme parametrelerinin kesici takım aşınması üzerinde etkilerini araştırmışlardır. İlerleme parametresinin en önemli faktör olduğunu, kesme hızının arttırılması ile YT'nin azaltılabileceği, kesme esnasında kesici takımlarda plastik deformasyon, difüzyon ve kırılma aşınmalarının gözlemlendiğini ve en iyi kesme performansının TiAlN kaplamalı takımlar ile elde edildiğini belirlemişlerdir (Sharif ve Idris, 2021). Fernandes vd., çalışmalarında Al-Si-Mg (AA6351-T6) alaşım üzerinde DLC (Diamond like carbon) kaplamalı HSS (High speed steel) kesiciler ile M12X1,5 diş açma işlemini gerçekleştirdikleri çalışmada, kesici takımlarda plastik

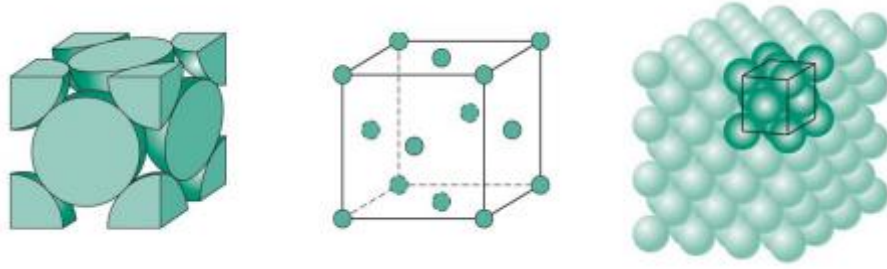
deformasyon, YT ve serbest yüzey aşınmasının meydana geldiğini gözlemişlerdir (Fernandes vd., 2021). Kishway vd., A356 Al-Si alaşımının tornalanmasında kesici takımlarda YT ve abrasif aşınma mekanizmalarının oluştuğunu tespit etmişlerdir (Kishawy vd., 2005). Gomez-Parra vd., Al-Cu ve Al-Zn esaslı alaşımların tornalanması esnasında kesici takım kesme kenarında YT ve talaş yüzeyinde YK olarak iki farklı şekilde aşınmanın gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, bu aşınma mekanizmalarının düşük kesme sıcaklıkları, kesici takım-iş parçası arasındaki kimyasal etkileşimden ve malzemenin süneklik özelliğinden meydana geldiğini belirlemişlerdir (Gómez-Parra vd., 2013). Bayraktar ve Demir, Al-12Si-0.6Mg alaşımını kokil kalıba döküm yöntemi ile ürettikleri çalışmada; alaşımı tornalama operasyonuna tabi tutularak, kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve yığıntı talaşın azaldığını; ilerlemenin artması ile bu çıktıların arttığını tespit etmişlerdir. Kullanılan kaplamasız kesici takımların TiCN/TiN ve TiAlN/TiN kaplamalı kesici takımlara göre daha yüksek işlenebilirlik performansı gösterdiği ve malzemelere uygulanan T6 ısıtılma işlemin işlenebilirlik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlemişlerdir (Bayraktar ve Demir 2020). Bhowmick vd. tarafından, yüksek Si içeren alaşımların işlenmesi sonucunda kesici takımlarda yanal aşınma meydana getirdiği belirlenmiştir (Bhowmick vd., 2015). Narahari vd., ötektik Al-Si (LM6) ve hipotektik (LM25) alaşımlarının işlenmesinde artan SiCp takviyesi ile takım ömrünün azaldığını belirlemişlerdir. Kaplamasız karbür takımlarının HSS takımlardan daha iyi takım ömrü performansı sergilediğini gözlemlemişlerdir. Tüm bunlara ek olarak, kesme sıvısı kullanımının her iki kesici takım ömrünü %10-20 oranında artırdığını gözlemlemişlerdir (Narahari vd, 1999). Wang vd., Al-Si alaşımının PCD takımlarla işlenmesinde, adhezif aşınmanın yüksek basınç ve takım-talaş arasındaki nispi kayma nedeniyle meydana geldiğini, sürtünmenin etkisiyle oluşan ısı nedeniyle kesici takım sertliğinin azalmasıyla abrasif aşınmanın meydana geldiğini gözlemlemişlerdir (Wang vd., 2012). Barooah vd., Al-12Si alaşımını basınçlı döküm yöntemi kullanarak ürettikleri çalışmada, alaşıma kaplamasız HSS kullanılarak vida açma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu işlem sonucunda, YT ve abrasif aşınma mekanizmalarının kesici takım üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, α -Al fazı içerisinde bulunan sert Si parçacıklarının abrasif aşınmaya neden olduğunu belirlemişlerdir (Barooah vd., 2020). Kuczmazewski vd., Al10SiMg alaşımının iki ağızlı kaplamasız,

TiB₂ ve TiAlCN kaplamalı kesiciler ile frezelenmesinde TiAlCN kaplamalı kesicilerin daha iyi işleme performansı sergilediğini gözlemlemişlerdir (Kuczmazewski vd., 2018). Oles vd., Al-18% Si alaşımını CVD elmas ve PCD takımlarla tornalarken, PCD takımların CVD kaplamalı takımlarından daha iyi takım ömrü ve işlenmiş yüzey kalitesi sergilediğini belirlemişlerdir (Oles vd., 1996).



2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum, “Al” ile sembolize edilmiş bir element olup 13 atom numarasıyla periyodik cetvelde 3. periyotta 3A grubu elementler arasında yer almaktadır. Üç boyutlu düzende küp köşelerinde ve küp yüzeylerinin ortasında atomlar dizilerek yüzey merkezli kübik (YMK) adı verilen kristal yapı oluşturmaktadır (Şekil 1). Al’nin atomik yapısı, atomlar arası bağları ve atom dizilimleri; fiziksel, mekanik, kimyasal ve ısı özelliklerini etkilemektedir. Son yörüngelerindeki serbest elektronlar sayesinde elektrik ve ısıyı iyi iletir, gri renklidir ve şekil verilebilirliği yüksektir. Metalik bağ kuvveti sayesinde nispeten yüksek ergime, kaynama sıcaklığı ve yüksek olarak nitelendirilebilecek elastik modül ve sertliğe sahiptir. YMK yapıya sahip Al’de sıkı dizilmiş atomlar sayesinde yapıda boşluk oldukça azdır. Atomların düzlem ve doğrultular boyunca sıkı dizilmiş olmaları sayesinde oda sıcaklığında dahi üzerine yük uygulanarak şekil vermek mümkündür.



Şekil 1. Yüzey merkezli kübik yapı

Al alaşımları, Al’nin, belirli oranlar içinde, farklı tür bir ya da birden fazla metalle ergime yoluyla birleşmesiyle oluşan yeni metal malzemelerdir. Hafif alaşımlar olarak bilinen Al alaşımları genellikle Si, Mg, Cu, Fe, Zn vb. elementlerin ilaveleri ile dökme, çekme, haddeleme, dövme vb. yöntemlerle oluşturulurlar. Al alaşımlarının kullanım alanları çok geniştir, endüstriyel, ticari veya bireysel kullanım için alaşım seçimi özelliklere ve nihai ürünün gereksinimlerine göre yapılmaktadır. (Çakanyıldırım ve Gürü, 2021). Al’yi farklı metallere göre birçok alanda avantajlı kılan önemli özellikleri aşağıdaki gibidir. (Inoue vd, 1998; Nair vd., 1985; Ramesh vd., 2011; Fu vd., 2006; Gilbert Kaufman ve Roo, 2004; ASM, 2006).

- Hafif olması,

- Yeterli mukavemeti sağlamak için alaşımlandırıldığında dahi hafifliğini koruması,
- Tekrar kullanılabilme özelliği,
- Yüksek korozyon direnci göstermesi,
- Şekillendirilebilme kabiliyetinin olması,
- Dövülebilirliği,
- İşlenebilme kolaylığı,
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği,
- Işık ve ısı yansıtma özelliği,
- Toksikolojik reaksiyonlara sebep olmaması,
- Kaynaklanabilme yeteneği

Hafiflik: Hafiflik Al ve Al alaşımlarını önemli yapan ve endüstride vazgeçilmez hale getiren en önemli özelliklerinden birisidir. Fe elementinden yaklaşık üç kat daha hafif olan Al; farklı metallerle alaşımlandırılarak mukavemeti Fe içeren çeliklere yakın bir malzemeye dönüşebilmektedir (URL-1).

Mekanik Özellik: Yapı çeliklerine göre Al alaşımlarının özgül dayanımı (çekme dayanımı/özgül ağırlık) üç kat daha fazla olmaktadır. Diğer bir ifade ile Al alaşımları yüksek mukavemete sahiptirler. Bu nedenle Al alaşımları, hafiflik ve dayanımın önemli olduğu hava ve kara taşıtları üretiminde oldukça elverişlidir (Heinz vd., 2000; Dündar ve Güngör, 2002). Nispeten yüksek elastik modül ve mekanik özelliklere sahip olan Al'nin düşük yoğunluğu sayesinde özgül (spesifik) mukavemeti yüksektir (Keleş, 2021). Al bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (Juan vd., 2020).

Tablo 1. Alüminyumun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Al	Fe	Cu	Zn	Mg
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,71	7,86	8,96	7,14	1,73
Ergime Sıcaklığı (°C)	660,32	1538	1084,62	419,53	650
Kristal Yapısı	YMK	HMK	Kübik	Hegzagonal	Hegzagonal
Brinell Sertliği (HB)	245	490	874	412	260

Korozif Özellik: Malzemelerin kimyasal veya elektrokimyasal olarak bulundukları ortamdan etkilenmeleriyle özellikle yüzeylerinde görülen bozulmalar korozyon olarak adlandırılmaktadır. Al normal atmosfer şartlarında oksijenle tepkimeye girerek kendi yüzeyinde doğal bir koruyucu film tabakası oluşturmaktadır. Bu oksit tabakası, yüzey boyunca homojen ve gözle görülmeyecek kadar incedir. Bu tabaka Al'nin yüzeyini birçok ortamda korozyona karşı korumaktadır (Keleş, (2021). Korozyon dayanımının daha da arttırılması gerektiği durumlarda, eloksal ve toz boya yüzey işlemleri de uygulanabilmektedir. Bu işlemler sayesinde malzeme tuzlu su veya diğer çeşitli kimyasallara daha dayanıklı hale gelmektedir.

Isı ve elektrik iletkenliği: Malzemelerin ısıyı bir yerden diğer tarafa transfer kabiliyetine ısı iletkenlik denir. Metallerdeki serbest elektronlar ısı iletiminin sağlanmasında önemlidir. Al'de metal olarak yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Bu özelliği sayesinde aydınlatmalarda, radyo dalgaları ve kızılötesi ışıma karşın koruyucu ve ısı yataklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ağırlık değerleri ve ürün maliyetleri ile birlikte değerlendirildiğinde diğer metallerden daha yüksek ısı iletkenlik değerine sahiptirler. Elektrik direnci ise elektrik akımına ne kadar güçlü direndiğinin göstergesidir. Elektrik direnci ile elektrik iletkenliği arasında ters orantı vardır. Al serbest elektronları sayesinde yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir (URL-2). Genellikle, sıcak veya soğukun iletimi işlevini gören uygulamalarda Al'un kullanımı tercih edilmektedir. 0-100 °C aralığındaki herhangi bir metal ile alaşımlanmamış Al, 244 W/mK ısı iletkenliğe sahiptir. Bu özelliği nedeniyle radyatörler ve ısı değiştiricilerin üretilmesinde tercih sebebidir.

Kırılma Tokluğu ve Enerji Absorpsiyonu: Kırılma tokluğu çatlak içeren malzemelerin kırılmaya karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanmaktadır. Kırılmaya karşı yüksek direnç, malzemelerin enerji sönümlene kabiliyetinin de yüksek olduğunun göstergesidir. Al'nin kırılma tokluğu ve enerji absorpsiyonu yüksektir. Al alaşımlar araç şasislerinde kaza anında oluşan enerjiden daha az etkilenmek ve aracın ön tarafının maruz kaldığı kazalarda araç içerisinde yer alan yolcuların hasar görmemesini sağlamak için darbe sönümleyici yapılar olarak kullanılmaktadır (Kusyairi, 2017).

2.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Al alaşımlarının sınıflandırılmasında Amerikan Alüminyum Birliği (Aluminum Association-AA) sistemi uluslararası standartlarda yaygın olarak kabul görmüştür. Bu sistem, Al alaşımlarını üretim tekniklerini esas alarak dövme (wrought) ve döküm (cast) olarak sınıflandırmaktadır (ASM Handbook, 1992). Dövme Al alaşımları, dövme, presleme, estetik ve diğer mekanik işlemler için kullanılabilir. Döküm Al alaşımları ise genellikle kumlama ve kokil kalıba döküm gibi yöntemler ile üretilmektedir. Bu yöntemle üretildiğinde Al alaşımları kuvvetlere ve darbelere karşı daha az dayanıklı hale gelmektedir.

Dövme Al alaşımlarının sınıflandırılmasında Amerikan Alüminyum Birliği (Aluminum Association-AA) tarafından belirlenen dört basamaklı bir numaralandırma sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde, ilk rakam temel alaşım elementini, ikinci rakam alaşım modifikasyonlarını göstermektedir. İkinci rakam sıfır ise alaşımda herhangi bir modifikasyon yapılmamıştır. Gösterimde kullanılan son iki rakam ise farklı Al alaşımlarını ayırmak için kullanılır. Örneğin, 1xxx grubu herhangi bir alaşım yapılmamış saf Al'dir ve ilk iki rakam "10" şeklinde yazılırken, son iki rakam minimum saflık yüzdesini göstermektedir.

Dövme Al alaşımları, Si oranı bakımından düşük bir içyapıya sahip alaşımlardır. Bu alaşımların 300'den fazla çeşidi bulunmaktadır. Farklı döküm yöntemleri kullanılarak yarı-mamül haline getirilmekte ve daha sonra ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilmektedir. Dövme Al alaşımlar, Tablo 2'deki gibi sınıflandırılmaktadır (Lumley, 2018).

Tablo 2. Dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması

Seri Adı	Açıklama
1xxx serisi	Al içerir (min %99) ve genellikle elektrik iletkenliği, iyi işlenebilirlik ve hafiflik için kullanılmaktadır. Elektrik ve kimya endüstrisinde en çok tercih edilmektedir.
2xxx serisi	Cu elementi içermektedir. Araç gövde panelleri, uçak gövdesi ve mekanik elemanları gibi yüksek mukavemet istenen ürünlerin imalatında kullanımı tercih edilmektedir.
3xxx serisi	Al, Mn ve Si içermektedir. Genellikle dayanıklılık ve işlenebilirlik için kullanılmaktadır. Endüstriyel çatı elemanları, içecek kutu malzemeleri, kimyasal kaplar, eğri borular gibi ürünlerin imalatında kullanılmaktadır.

Tablo 2 (devamı). Dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması

4xxx serisi	Si elementi içermektedir. Kaynak işlemi gerçekleştirilmiş yapılar, levha üretiminde, pistonlar gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı ve termal döngü gerektiren parçaların imalatında, kaynak teli ve lehim alaşımı olarak da kullanım alanı bulunmaktadır. Al, Mg ve küçük miktarlarda Cu, Mn ve Zn içermektedir.
5xxx serisi	Genellikle hafiflik, dayanıklılık ve iyi işlenebilirlik için kullanılmaktadır. Deniz suyu ve kimyasallara karşı yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu için gemi sanayisinde birçok kullanım alanına bulunmaktadır.
6xxx serisi	Al, Mg ve Si içermektedir. Genellikle iyi işlenebilirlik, dayanıklılık ve yüksek çekme mukavemeti gerektiren yapılarda kullanılmaktadır.
7xxx serisi	Al, Zn ve diğer elementleri içermektedir. Genellikle yüksek mukavemet, iyi işlenebilirlik ve iyi dayanıklılık sağlayabilmek için uçaklarda kullanılmaktadır.
8xxx ve 9xxx serisi	Diğer alaşım elementleri (Fe, Sn, Li) içermektedir. İyi yorulma direnci ve tokluk özellikleri nedeniyle uçak ve uzay ekipmanlarının imalatında kullanılmaktadır.

Döküm Al alaşımları, dövme Al alaşımlarına benzer şekilde, dört basamaklı bir numaralandırma sistemi ile tanımlanmaktadır. Farklı olarak, son basamak nokta işareti ile diğerlerinden ayrılmakta ve alaşımın döküm ya da ingot halinde olduğunu gösterilmektedir. İlk basamak alaşım grubunu, ikinci ve üçüncü basamak özel alaşımı, 1xx.x grubunda ise alaşımın saflık yüzdesini belirtmektedir. Eğer noktadan sonraki hane "0" ise parçanın son döküm şeklini aldığı anlaşılmaktadır. "1" genel ticari alaşım bileşimi kullanılarak ingot dökülmüş ve ingottan döküm parçası üretilecektir anlamına gelmektedir. "2" ise dar bir kimyasal bileşim aralığında ingot üretildiğini göstermektedir. Kodlama sistemindeki dört hanenin önüne bazen "A" ve "B" harfleri gelebilmektedir, bu kimyasal bileşiminde değişim olduğunu göstergesidir (ACS, 2001; Zolotoretsky vd., 2007).

Tablo 3. Dökme alüminyum alaşımların sınıflandırılması

Seri Adı	Açıklama
1xx.x serisi	Saf Al (%99,0 minimum)
2xx.x serisi	Cu (%4 - 5)
3xx.x serisi	Si (%4 - 13), Cu (%0,2 - 5) ve/veya Mg (%0,3 - 1.5)
4xx.x serisi	Si, (%3 - 13),
5xx.x serisi	Mg (%2,5 - 11)
7xx.x serisi	Zn (%2,7 - 7)
8xx.x serisi	Sn (%5,5 - 7)
9xx.x serisi:	Diğerleri (Fe, Sn)

1xx.x serisi (Saf Al): Al alaşımlarının numaralandırma sistemi içinde saf Al'yi temsil etmektedir. Bu seri alaşımların saflık yüzdesi %99 ve üzerindedir. Örneğın, Al1100 serisi Al alaşımı %99 saf Al ve Al1145 serisi ise %99,45 saf Al içermektedir. Bu seri alaşımlar, yüksek mukavemetli ve korozyona dayanıklı olması nedeniyle, elektrik iletkenliğı, Al ağırlıklı parçaların yapımı ve çeşitli endüstriyel uygulamalar için kullanılır (Kaufman vd., 2004; Apelian, 2009).

2xx.x serisi (Al-Cu döküm alaşımları): Al alaşımlarının numaralandırma sistemi içinde Al ve Cu içeren alaşımları temsil etmektedir. Bu seri alaşımlar, Al'nin mukavemetini ve Cu'nun iyi iletkenliğini birleştirerek, yüksek mukavemetli, iyi iletken ve korozyona dayanıklı parçaların yapımı için kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, zayıf dökülebilirlik sergilemekte ve genellikle, kum döküm yöntemi ile üretilmektedir. Örneğın, 2024 serisi alaşımı %20-24 Cu, 2219 serisi alaşımı %19-22 Cu içermektedir. Bu alaşımlar, genellikle uçak ve uzay uygulamaları, elektrikli araçlar, enerji üretim tesisleri ve deniz uygulamaları için kullanılmaktadır (Molina vd., 2011a; Molina vd., 2011b).

3xx.x serisi (Al-Si-Cu/Mg döküm alaşımları): Al alaşımlarının numaralandırma sistemi içinde Al, Si, Cu ve/veya Mg içeren alaşımları temsil etmektedir. Bu seri alaşımlar, Al'nin mukavemetini, Si'nin korozyona dayanıklılığını, Cu'nun iyi iletkenliğini ve Mg'nin düşük yoğunluğı ile iyi soğutma özelliklerini birleştirerek, yüksek mukavemetli, iyi iletken, korozyona dayanıklı ve iyi soğutulan parçaların yapımı için kullanılmaktadır. Örneğın, A319 serisi alaşımı %1.9-3 Si A357 serisi alaşımı %3-5,7 Mg içermektedir. Bu alaşımlar, genellikle otomotiv, enerji üretim tesisleri, otomobil silindir blokları ve kafaları, otomobil jantları, makine imalatı, havacılıkta birleştirme elemanları, kompresör veya pompa parçalarında ve farklı endüstriyel uygulamalar için kullanılmaktadır (Melin ve Garagnani, 2009; Molina vd., 2011a; Molina vd., b).

4xx.x serisi (Al-Si döküm alaşımları): Al alaşımlarının numaralandırma sistemi içinde Al ve Si içeren alaşımları temsil etmektedir. Bu seri alaşımlar, Al'nin mukavemetini ve Si'nin korozyona dayanıklılığını birleştirerek, yüksek mukavemetli ve korozyona dayanıklı parçaların yapımı için kullanılmaktadır. Düşük yoğunluk, kaynaklanabilirlik, korozyon dayanımı, iyi dökülebilirlik, sızdırmazlık özellikleri sergilemektedir. Örneğın, 4032 serisi alaşımı %3.2-4, 4043 serisi alaşımı %4-4.3 Si

içermektedir. Bu alaşımlar, genellikle endüstriyel uygulamalar, otomotiv, enerji üretim tesisleri ve makine imalatı için kullanılmaktadır (Alkahtani vd., 2016; Kosa vd., 2012; Warmuzek, 2004).

5xx.x serisi (Al-Mg döküm alaşımları): Al alaşımlarının numaralandırma sistemi içinde Al ve Mg içeren alaşımları temsil etmektedir. Bu seri alaşımlar, Al'nin mukavemetini ve Mg'nin düşük yoğunluğu ile iyi soğutma özelliklerini birleştirerek, yüksek mukavemetli, iyi soğutulan ve düşük ağırlıklı parçaların yapımı için kullanılmaktadır. Bu seri alaşımlara ısıtma işlemi uygulanamamakta ve dökülebilirlikleri zor olmasına rağmen; kum, basınçlı, kokil, hassas ve santrifüj döküm teknikleri ile dökülebilmektedir. Örneğin, 5083 ve 5050 serileri %5 Mg içermektedir. Bu alaşımlar, genellikle gemi inşası, otomotiv, enerji üretim tesisleri ve endüstriyel uygulamalar için kullanılmaktadır (Dahle vd., 2001).

7xx.x serisi (Al-Zn döküm alaşımları): Al alaşımlarının numaralandırma sistemi içinde Al ve Zn içeren alaşımları temsil etmektedir. Bu seri alaşımlar, Al'nin mukavemetini ve Zn'nin iyi iletkenliğini ve korozyon direnci özelliklerini birleştirerek, yüksek mukavemetli, iyi iletken ve korozyona dayanıklı parçaların yapımı için kullanılmaktadır. Örneğin, 7075 ve 7050 serileri %7 Zn içermektedir. Bu alaşımlar, genellikle uçak ve uzay uygulamaları, enerji üretim tesisleri, deniz uygulamaları ve endüstriyel uygulamalar için kullanılmaktadır (Yang, 2003).

8xx.x serisi (Al-Sn döküm alaşımları): Al alaşımlarının numaralandırma sistemi içinde Al ve Sn içeren alaşımları temsil eder. Bu seri alaşımlar, Al'nin mukavemetini ve Sn'nin korozyona dayanıklılığını birleştirerek, yüksek mukavemetli ve korozyona dayanıklı parçaların yapımı için kullanılmaktadır. Örneğin, 8090 ve 8095 serileri %8 Sn içermektedir. Bu alaşımlar, genellikle elektrik ve elektronik uygulamaları, endüstriyel uygulamalar ve deniz uygulamaları için kullanılmaktadır.

2.2. Silisyum ve Magnezyum Elementlerinin Alüminyuma Etkisi

Kullanım amacına göre Al esaslı malzeme, istenilen mikroyapı ve mekanik özelliklere ulaşabilmesi için farklı elementlerle alaşımlandırılmaktadır. Al'ye eklenen ana elementler, Cu, Si, Mg, Fe, Sn, fosfor (P), Zn, Mangan (Mn), Nikel (Ni), Titanyum (Ti), Krom (Cr), Zirkonyum (Zr), Lityum (Li) ve Sodyum (Na)'dır. Bu elementlerin

çoğu mukavemet artışını sağlamak için ticari alaşımlarda en yaygın olarak kullanılan elementlerdir ve tümü Al içerisinde önemli katı çözünürlüğe sahiptir.

Si etkisi: Si, Al'nin ticari olarak döküm endüstrisinde uygulanabilirliğini mümkün kılan ana alaşım elementidir. Si elementinin Al alaşımlarında göstermiş olduğu yüksek akışkanlık performansı nedeniyle dökülebilirliği yüksektir. $2,34 \text{ g/cm}^3$ düşük yoğunluğu ile alaşımın toplam ağırlığının azalmasında fayda sağlayabilmektedir. Al içerisinde %13 oranından fazla bulunması önerilmemektedir. %13'den fazla Si, Al alaşımlarının işlenmesini zorlaştırmaktadır. Si ilavesi ile Al'nin akışkanlık, kaynak kabiliyeti ve korozyon direnci artmaktadır (Fayomi vd., 2017).

Mg etkisi: Al alaşımlarına Mg ilavesi ile mukavemet özellikleri, dökülebilirliği, kaynaklanabilirliği ve korozyon direnci iyileştirilmektedir. Mg, alaşımın daha yüksek sıcaklıklarda stabil kalmasını ve alaşımın dayanıklılığını arttırmaktadır. %8'den fazla Mg içeren Al alaşımlara ısıtılma işlemi uygulanabilmektedir. Isıl işlem sayesinde alaşımların mekanik özellikleri daha da iyileştirilebilmektedir. Mg oranının artması ile alaşımların çekme mukavemeti önemli ölçüde arttırılmaktadır. Mg yüksek anodik faz (Mg_5Al_3 veya Mg_5Al_8) olarak tane sınırlarında çökelmektedir. Bu çökeltme taneleri arasında çatlamaya ve gerilim korozyonuna karşı hassasiyet oluşturmaktadır (Rana vd, 2021).

2.3. Alüminyum-Silisyum Esaslı Alaşımlar

Al-Si alaşımları, yüksek mukavemet, mekanik ve ısı iletkenliğinin yanı sıra düşük ısı genleşme özelliğinin olmasından dolayı oldukça önemli alaşım grubunda yer almaktadır. Alaşım elementleri içerisinde yüksek oranda Si içermesi alaşımın akışkanlık yeteneğini arttırdığından dökülebilirliğin artması ve hafif olması otomotiv, uzay ve havacılık sektörlerinde tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, Al-Si alaşımlarının mikroyapısında genel olarak iğnemsiz ve sert Si ve sünek α -Al fazları bulunmaktadır (Voort, 2004).

Al-Si esaslı alaşımların üretiminde kullanılan döküm metotları malzemenin içyapısında farklılıklara sebep olabilmektedir. Örneğin, basınçlı döküm metodu ile üretilen Al-Si esaslı bir malzemenin dökümü esnasında meydana gelen hızlı soğuma sonucunda malzemenin mikroyapısında ince ötektik bir yapı elde edilmektedir. Bu durum ise dentrit kolları arasındaki mesafenin kısılmasına ve tanelerin nispeten

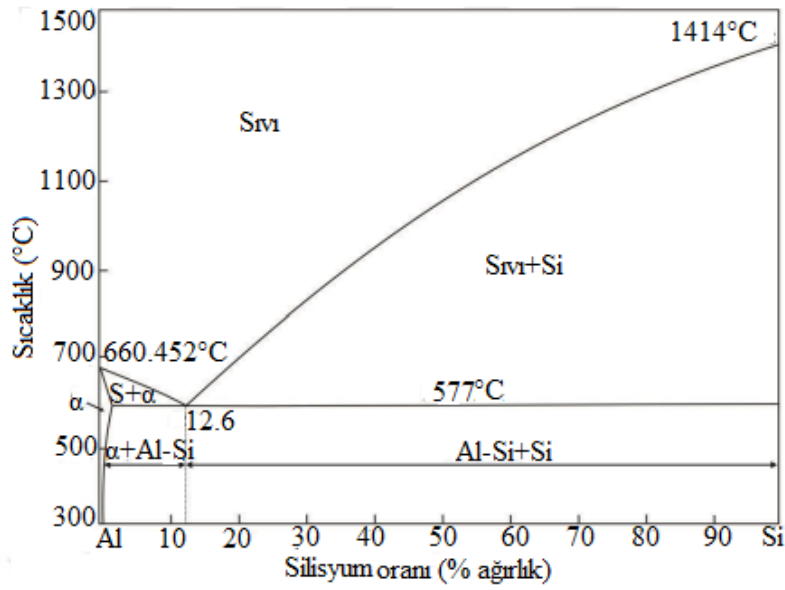
küçülmesine yol açmaktadır. Al-Si esaslı alaşımların mekanik özelliklerini etkileyen parametreler arasında ötektik Si fazının alaşım içerisinde dağılımı ve boyutu yer almaktadır. Çünkü, ötektik Si fazı malzemenin sert ve kırılgan bir yapıya dönüşmesini sağlamaktadır. Al-Si esaslı alaşımların üretim metotlarına bağlı olarak soğuma hızı değiştirilerek veya Si elementinin katılaşmasına etkisi olan Na ve Sr gibi elementlerin eklenmesiyle mikroyapı içerisinde yer alan ötektik Si dağılımı ve boyutu değiştirilebilmektedir (Kaufman ve Rooy, 2004). Ayrıca, maksimum %0,45 oranında Mg içeren Al-Si alaşımlarında meydana gelen Mg_2Si fazı alaşımın çekme mukavemetini etkilemektedir. Bu durumda Mg_2Si fazının Al dentritleri arasında çözünebilmesi için alaşıma su verme ve yaşlandırma gibi prosesler uygulanmaktadır.

Ek olarak, alaşımlama işlemlerinde kullanılan Si miktarı alaşımın katılaşma hızına bağlı olarak uygulanan döküm yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin, kokil kalıba döküm yönteminde yaklaşık olarak %7-9 oranında, kum kalıba döküm yönteminde %5-7 oranında, basınçlı döküm yönteminde ise %6-12 oranında Si miktarlarının kullanımı tercih edilmektedir.

2.3.1. Alüminyum-Silisyum faz diyagramı

Al-Si alaşımları, içeriklerindeki Si oranına göre üç gruba ayrılmaktadır. Al-Si oranı ağırlıkça %12 altında ise ötektik altı, %12-13 Si içeriyorsa ötektik ve bu oranın üzerinde Si içeriyorsa ötektik üstü alaşım olarak adlandırılmaktadır. Al-Si ikili alaşımı tam ötektik bir sistem oluşturmaktadır. Bazı kaynaklarda ötektik nokta %11,6-11,7 civarında verilirken, bazı kaynaklarda ise %11,7-14,5 değerleri arasında verilmektedir. Ötektik noktanın optimum değeri ise %12,5 Si içeriğinde olduğu belirtilmektedir (Şekil 2).

Yüksek çekme dayanımına sahip alaşımların elde edilebilmesi için Si miktarını ötektik noktanın altında, yüksek aşınma direnci istenen uygulamalarda ise Si miktarını ötektik noktanın üzerinde tutmak gerekmektedir. Yüksek Si değerlerinde Si kristalleri yapıda sert ve keskin köşeli olarak bulunmaktadır (Çetin, 2017; Baker, 1992).



Şekil 2. Alüminyum-Silisyum faz diyagramı

Faz diagramında da görülebileceği gibi ötektik sıcaklık, 577 °C (850 °K) olarak kabul edilmiştir. Bu sıcaklıkta oluşan ötektik yapıda Si içeren Al esaslı katı eriyik fazına α , çok az Al içeren Si temelli faza ise β adı verilmiştir. Bu fazlardan α katı çözeltisi daha sünek olmakla birlikte saf haldeki Si daha gevrek olarak yapıda bulunmaktadır (Warmuzek, 2004).

Ötektik sıcaklıkta, Al kristalleri %1,65 Si çözümlenebilmektedir. Azalan sıcaklıkla birlikte Al içerisinde Si çözünabilirliği azalmaktadır. Oda sıcaklığında ise Si'nin Al içerisindeki çözünürlüğü yok denecek kadar azdır. Çeşitli sıcaklıklardaki Si'nin eriyebilirlik değerleri Tablo 4 üzerinde verilmiştir (Mondolfo, 1976).

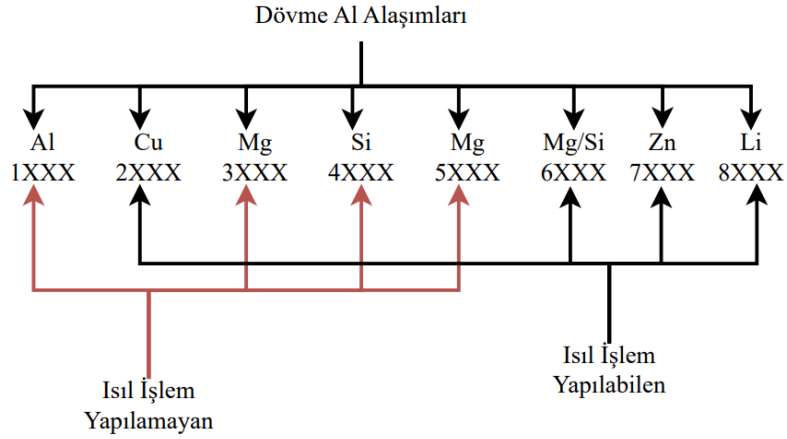
Tablo 4. Silisyumun çeşitli sıcaklıklarda alüminyum içerisinde eriyebilirlik değerleri

Sıcaklık (°C)	Eriyebilirlik (%Ağırlık)
577	1,65
550	1,30
500	1,10
450	0,70
400	0,45
350	0,25
300	0,10

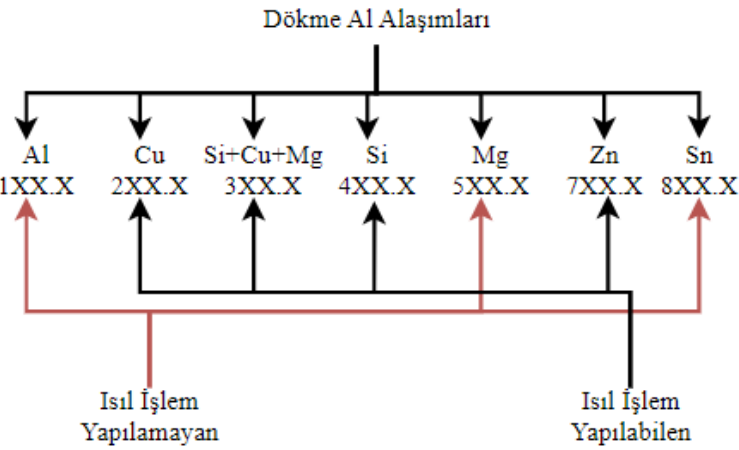
3. ISIL İŞLEM

Al, kullanım alanlarına göre istenilen mekanik, yapısal vb. özelliklerin tamamına sahip olamamaktadır. Belirli elementlerin ilavesiyle alaşımlandırma işlemi yapılarak Al'nin özellikleri geliştirilebilmektedir. Element ilavelerinin Al'nin içerisinde çökelme ve çözünmesi alaşımın özelliklerini etkilemektedir. Alaşımların sertlik, iletkenlik, işlenebilirlik, çekme dayanımı vb. özelliklerinin artırılabilmesi için malzemelere çözündürme ve çökelme işlemlerinin kontrol edilebildiği ısıl işlem uygulamaların yapılması gerekmektedir.

Al alaşımlarının aşınma direncinin, dayanımının ve diğer mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi için uygulanan en önemli yöntem ısıl işlemdir. Genel anlamıyla ısıl işlem bir metalin içyapısını ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan soğutma ve ısıtma prosesleridir. Al alaşımlarına uygulanan ısıl işlem prosesleri ise çökelme sertleşmesi esasına dayanmaktadır. Dövme Al alaşımlarından ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşım grupları Şekil 3'te gösterilmiştir. 1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serisi Al alaşımlarına ısıl işlem uygulanamamaktadır (Dağdelen ve Ulus, 2016). Bu alaşımların sertleştirilmesi şekil değiştirme (deformasyon) yöntemi ile gerçekleştirilebilmektedir. 2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi Al alaşımların sertleştirilmesi ise ısıl işlem yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir (Brooks, 1991). Dökme Al alaşımlarından ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşım grupları ise Şekil 4'te gösterilmiştir. Isıl işlem uygulanamayan alaşımlar, 1XX.X, 5XX.X ve 8 XX.X serisi Al alaşımlarıdır. Dövme alaşım gruplarında olduğu gibi bu alaşım grupları sadece şekil değiştirme (plastik deformasyon) yolu ile sertleştirilebilmektedir. 2XX.X, 3XX.X, 4XX.X ve 7XX.X serisi alaşımlarda ısıl işlem ile sertleştirme işlemi yapılabilmektedir.



Şekil 3. Dövme alüminyum alaşımlarda ısıtıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşım grupları



Şekil 4. Dökme alüminyum alaşımlarında ısıtıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşım grupları

Isıl işlem yapılırken, malzemenin içyapısında tek fazlı bir yapı elde etmek için malzemenin içyapısına uygun kimyasal bileşime sahip bir alaşım, belirlenen T1 sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Malzemenin ısıtılması belirlenen bekleme süresince devam edilmektedir. Alaşım içerisindeki tüm fazların tek faz olarak çözünme süresi bekleme süresini belirlemektedir. Bekleme süresi bittiğinde ise alaşıma ani su verilerek yaşlandırma prosesi gerçekleştirilmektedir (Geçkinli, 2002). Çökelme sertleşmesi meydana geldiğinde çökelti fazını oluşturan atomlar, birbirleri ile birleşmekte ve difüzyon mekanizmasını harekete geçirmektedir. Bu nedenle Al alaşımlarındaki çökelme sertleşmesini etkileyen önemli faktörler, difüzyon, sıcaklık ve zaman parametreleridir.

Al alaşımlarının mekanik özelliklerinin bir göstergesi ‘‘sertleştirilebilirlik (temper)’’ olarak bilinen ifadedir. Temper ifadesi alaşımın sağlamlığını, sertliğini, mukavemetini veya yüklemelere karşı gösterdiği direncini ifade etmektedir. Alaşımın üretim prosesinin parametreleri ve seviyeleri ile ilgili bilgi vermemektedir. Temper kodlaması alaşım kodlamasından hemen sonra büyük harfler kullanılarak yapılmaktadır (Örneğin; A357 T5) (Kaufman, 2000). Temper proseslerinin tanımlamasında, ilk karakter olan büyük bir harf genel işlem sınıfını göstermektedir. Bu harflerin anlamları ve uygulandıkları alaşım grupları aşağıda verilmektedir (Başer, 2013).

F: (As-fabricated) Malzeme, üretildiği şekilde kullanılmaktadır. Herhangi bir özellik elde edebilmek için deformasyon sertleşmesi veya ısıtılma işlemi uygulanmayan dövme ve döküm Al alaşımlarını simgeler. Alaşımın tel çekme, ekstrüzyon, dövme, haddeleme veya döküm ile şekillendirildiği halindeki mekanik özelliklerini betimlemektedir.

O: (Annealed) Tavlanmış dövme ve döküm Al alaşımlarını simgelemektedir. Malzemenin mekanik mukavemetinin en düşük olduğu halidir. Bunu sağlayabilmek için ürüne ısıtılma işlemleri uygulanmaktadır. Sıcak şekillendirme işlemlerinden sonra gerekli tavlanma özelliklerine ulaşan tavlanmış yapıyı ifade etmektedir. Tavlama sıcaklığı, söz konusu alaşımın yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde tutulmalıdır.

H: (Hardened) Deformasyon sertleştirilmesi uygulanarak mukavemeti artırılan Al alaşımlarını simgelemektedir. Soğuk işlem görerek şekil değiştirmiş yapıyı ifade etmektedir. Şekil değiştirme esnasında iç yapısında atomlar yer değiştirerek atomların dizilimleri bozulmaktadır. Bu nedenle, malzemenin kristal yapısında dislokasyon adı verilen hatalar meydana gelmektedir. Bu hataların yoğunluğunun artmasıyla kristal yapıda iç enerji artmakta olup malzemenin deforme edilebilirlik özelliği azalmaktadır. Bu duruma deformasyon sertleşmesi adı verilmektedir.

W: (Solution heat treated) Yalnızca çözeltiye alma prosesi uygulanarak kendiliğinden yaşlanma işlemini tamamlamış Al alaşımlarını simgelemektedir. W harfinden sonra alaşıma uygulanan doğal yaşlandırma süresi belirtilebilir (Örneğin; W ½ h.). Uygulanan ısıtılma işlem sıcaklıkları, alaşım içerisindeki intermetalikler matris faz içinde çözecek yükseklikte seçilmektedir.

T: Çökelme sertleştirilmesi uygulanmış, soğuk şekillendirilme uygulanan ya da uygulanmayan Al alaşımlarını ifade etmektedir. Isıl işlem uygulandığında bu alaşımlar, içerisinde var olan alaşım elementleri bir araya gelerek matris, yani ana faz içinde metaller arası bileşikler oluşturarak çökmektedirler. Bu çökelen fazlar, malzemenin mekanik özelliklerini artırmakta ve malzemeyi sertleştirmektedir.

H ve T harflerinden sonra yazılan rakam, temel temper işlemlerinin alt basamaklarını göstermektedir. Tablo 5'te T temper kodları ve Tablo 6'da H temper kodlarının alt basamakları gösterilmektedir.

Tablo 5. T, Temper kodları

Kod	İşlem Basamakları
T1	Sıcak şekil verme işlemi sonrasında soğutma ve doğal yaşlandırma prosesi
T2	Sıcak şekil verme işlemi sonrasında soğutma, soğuk şekil verme ve doğal yaşlandırma işlemi
T3	Çözeltili alma, soğuk şekil verme ve doğal yaşlandırma işlemi
T4	Çözeltili alma ve doğal yaşlandırma işlemi
T5	Sıcak şekil verme sonrası soğutma ve yapay yaşlandırma işlemi
T6	Çözeltili alma ve yapay yaşlandırma işlemi
T7	Çözeltili alma ve aşırı yaşlandırma işlemi
T8	Çözeltili alma, soğuk şekil verme ve yapay yaşlandırma işlemi
T9	Çözeltili alma, yapay yaşlandırma ve soğuk şekil verme işlemi
T10	Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, soğuk şekillendirme ve yapay yaşlandırma işlemi

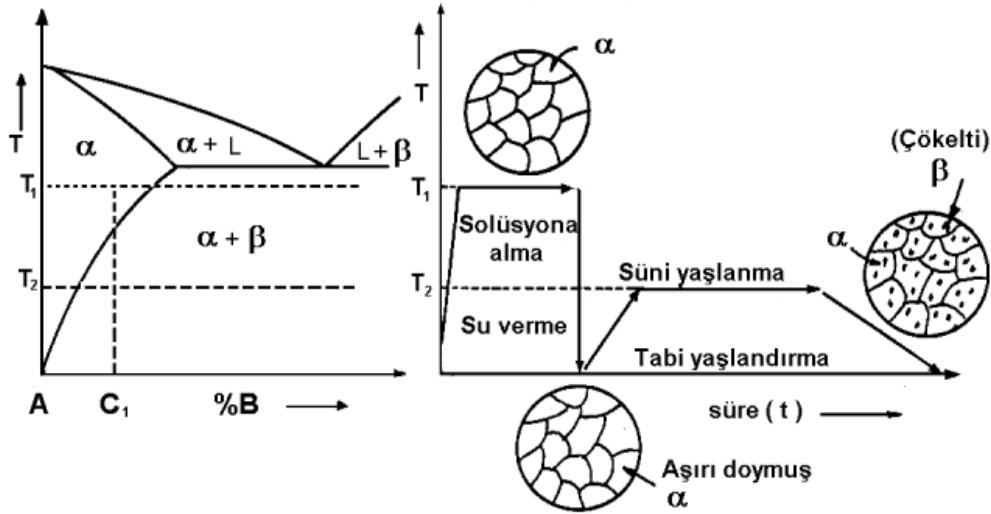
Tablo 6. H, Temper kodları

Kod	İşlem Basamakları
H1	Deformasyon sertleştirilmesi prosesi
H2	Deformasyon sertleştirilmesi ve kısmi tavlama prosesi
H3	Deformasyon sertleştirilmesi ve düşük sıcaklıkta stabilize etme işlemi
H4	Deformasyon sertleştirilmesi, vernikleme ya da boyama işlemi

Çökelme sertleşmesi üç aşamalıdır. Bunlar; çözeltili alma, soğutma ve yaşlandırma işlemleridir.

3.1. Çözeltiye Alma

Isıl işlem prosesinin başlangıcında çözeltiye alma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemde amaç katı halde bulunan çözelti içerisinde oluşabilecek en fazla alaşım elementinin çözünmesini gerçekleştirebilmektir. Çözeltiye alma işlemi, alaşımın faz diyagramında yer alan solvüs eğrisi üzerindeki herhangi bir sıcaklıkta ve uygun sürelerde bekletilmesi ile gerçekleştirilmektedir (Rashed ve Rashid, 2016). Şekil 5'te çökelme sertleştirmesinin uygulanabildiği solvüs eğrisini içeren faz diyagramı gösterilmektedir. Çözeltiye alma sıcaklığı, verilen diyagramdaki solvüs eğrisi dikkate alınarak belirlenmektedir. Malzeme, solvüs eğrisinden belirlenen sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra hızlı bir şekilde soğutulmaya bırakılmaktadır. Bu sayede aşırı doymuş halde bulunan katı eriyik yapı meydana gelmektedir. Bu aşamadaki amaç çökelme sertleştirmesi meydana getirecek elementlerin çözünerek katı çözelti içinde korunmasıdır. Yaşlandırma prosesinde çökelme işleminin gerçekleşebilmesi için ilk olarak homojen bir katı çözelti elde edilmesi gerekmektedir (ASM Handbook, 1991).



Şekil 5. Çökelme sertleştirmesinin uygulanabildiği solvüs eğrisi içeren faz diyagramı ve çökelme işleminin aşamalarını gösteren grafik

Faz diagram incelendiğinde, C1 bileşimindeki alaşım T1 sıcaklığına ısıtılarak önce tek fazlı yapının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Malzeme, bu sıcaklıkta β fazı tamamen çözününceye kadar tutulmaktadır. Bu işlem, çözeltiye alma işlemi olarak adlandırılmaktadır.

3.2. Su Verme

Su verme, ısıtma işlem aşamalarından en kritik olanıdır. Çözeltiye alma işleminden sonra su verme işlemi ile oda sıcaklığında aşırı doymuş α katı eriyiği elde edilmektedir. Ayrıca, alaşımda difüzyonun gerçekleşebilmesi için gerekli sayıdaki boşluğun oluşmasını sağlamaktadır (Rashed ve Rashid, 2016). Bu proseste, amaç alaşımın katı çözelti halini korurken oda sıcaklığına veya yakın bir sıcaklığa aniden soğutulmasını sağlamaktır.

Su verme ile oda sıcaklığına soğutma işlemi mümkün olduğunda kısa sürede tamamlanmalıdır. Hızlı bir soğutma işlemi gerçekleşmemesi durumunda alaşımda korozyon direnci ve mukavemeti olumsuz etkileyen rastgele çökelmelerin meydana gelme ihtimali artmaktadır. Alaşımlarda üç farklı su verme yöntemi mevcuttur. Bu üç yöntem, alaşımlarda istenilen özelliklerin elde edilebilmesine göre tercih edilmektedir (Chauhan, 2017).

Soğuk Suda Su Verme: Hafif dövme prosesi ile elde edilen alaşımlara soğuk su küvetlerinde su verilmektedir. Bu işlem için suyun sıcaklığı en az 30°C olmalıdır. Ayrıca, sudaki sıcaklık değişimi 10°C geçmemesi için yeterli miktarda su bulundurulmalıdır. Bu şekilde bir su verme yöntemi oldukça etkilidir.

Sıcak Suda Su Verme: Kalın kesitli ve büyük dökme malzemelere 75-100 °C’de su verilmektedir. Bu şekilde su verme, çarpılmayı en aza indirmektedir. Ayrıca homojen olmayan sıcaklık dağılımı sonucunda oluşan çatlama tehlikesini önlemektedir. Dövme alaşımlarında da bu şekilde su verme yönteminin kullanımı tercih edilmektedir. Kalın kesitli malzemelerin korozyon mukavemeti ince kesitli malzemelerde olduğu kadar kritik değildir.

Püskürterek Su Verme: Levhalar ve yüzeyi geniş parçalarda su verme işlemi yüksek hızla püskürtülerek gerçekleştirilmektedir. Bu tip su verme işlemi malzemede çarpılmayı minimum seviyelere düşürmekte ve su vermeden ötürü oluşan çatlamayı önlemektedir.

Su verme prosesinde soğutma amacı ile genellikle su kullanılmaktadır. Ancak, gerekli görülen durumlarda su içerisinde çözülebilen polimerik yağlar, glikol-su karışımları veya madeni yağlar da kullanılabilir. Al alaşımlarının ısı iletkenlik değerinin yüksek olması nedeniyle aynı parçanın kalın ve ince kısımlarında soğuma

karakteristikleri farklı olduğu için bazı deformasyonlar oluşabilmektedir. Bu nedenle, bu tür deformasyonları önleyebilmek için suyun sıcaklığı ve su verme ortamı dikkatle seçilmelidir. Bazı durumlarda su verme ortamının karıştırılması veya parçanın ortam içerisinde hareket ettirilmesi gerekmektedir.

3.3. Yaşlandırma

Isıl işlem prosesinin son aşaması olan yaşlandırma işlemi ile malzemeye su verme prosesi gerçekleştirildikten sonra malzemenin içyapısında meydana gelen çökelmenin çok uzun bir sürede oluşmasını engellemek için alaşım ortalama bir sıcaklığa ısıtılmaktadır. Çünkü, su verme işleminden sonra alaşımın oda sıcaklığında uzun süre tutulması veya oda sıcaklığının üstündeki ve solvüs eğrisinin altındaki bir sıcaklıkta tavlınması ile α katı eriyiğı içinde β fazının küçük tanecikler halinde çökmesi sağlanmaktadır (Şekil 5) (Eser, 2020). Çökelme, oda sıcaklığında meydana gelebiliyorsa bu işleme doğal (tabii) yaşlandırma işlem, solvüs eğrisi ile oda sıcaklığı arasında bir sıcaklıkta meydana geliyorsa yapay (suni) yaşlandırma işlemi olarak nitelendirilmektedir (Al-Saadi vd., 2017).

4. İŞLENEBİLİRLİK

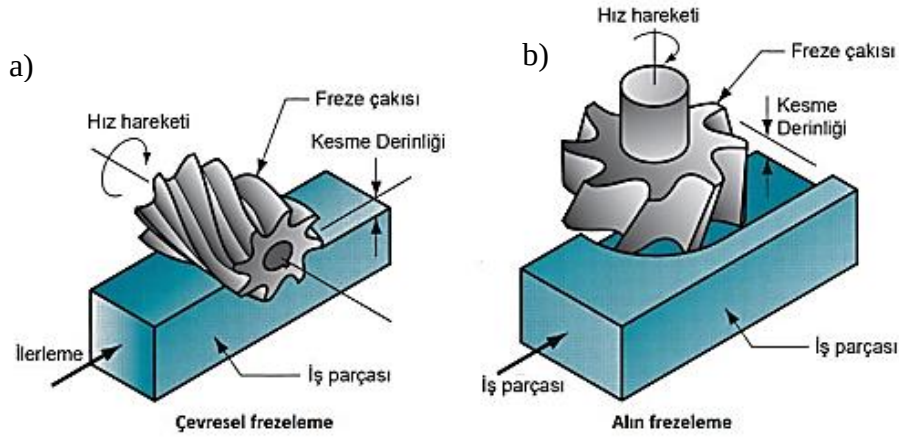
İşlenebilirlik, bir materyalin işleme teknikleri (dövme, tornalama, frezeleme vb.) kullanılarak şekillendirilme kapasitesidir. İmalat aşamasında ise işlenebilirlik; kesici takımın iş parçasını kesebilme ve iş parçasının da kesilebilme becerilerinin bileşimidir. Kısaca, bir malzemenin son ürün haline getirilebilmesi için istenilen şekil, ölçü ve yüzey kalitesinde işlenebilme yeteneğidir (Stephenson vd., 2006).

Malzemeninin işlenebilirliği, sertlik, kırılma, yoğunluk, sıcaklık, işleme tekniği, malzemenin yapısı ve diğer fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. İyi işlenebilir materyaller kolay şekillendirilmekte ve işlem sırasında hasar görmemektedir. İşlenebilirliği düşük materyaller ise zor şekillendirilmekte ve işlem sırasında kolayca hasar görmektedir (Groover, 2016). İşlenebilirliği iyi olan bir malzemenin talaşlı imalatı esnasında kısa zamanda fazla talaş miktarı ile işlenmesi ve oluşan yeni yüzeyin düşük yüzey pürüzlülüğünde olması gerekmektedir. Aynı zamanda işlemede kullanılan kesici takımın işlem esnasında aşınmanın az ve böylece kullanım ömrünün uzun olması arzu edilmektedir. Sanayide ideal işlenebilirlik, her zaman maliyet faktörünü ön planda tutarak talaşlı imalatın ekonomik olmasını ön görmektedir. İşlenebilirlikte sadece işlenen malzeme özellikleri değil işleme yöntemi ve işleme parametreleri de önemlidir (Shaw, 1989). İşlenebilirlikte istenilen özellikler, genellikle kesme proseslerine bağlı kalınarak en iyi verim alınacak şekilde belirlenmektedir. İşlenebilirlik için önemli kriterler ise kesme kuvvetleri, kesici takım ömrü, yüzey kalitesi, kaldırılan talaş miktarı ve talaş oluşumudur.

4.1. Frezeleme

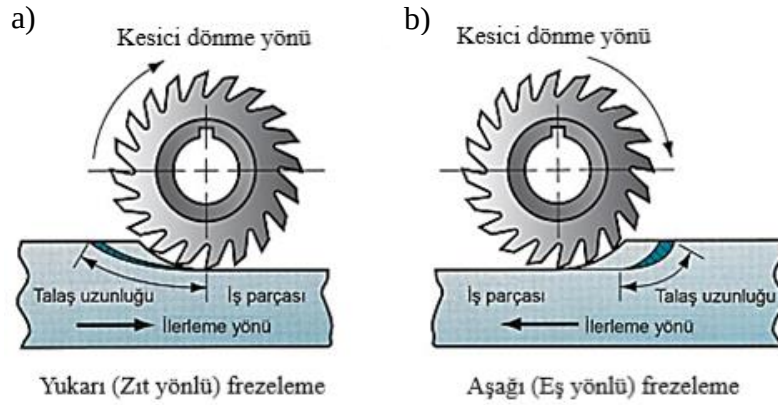
Frezeleme işlemi, parçanın ilerleme hareketi yaparken kesici takımın kendi eksenini etrafında dönmesi sonucu gerçekleştirilen kesme yöntemidir. Adını kesici takımdan alan ve freze adı verilen takım tezgâhlarında yapılmaktadır. Freze, çevresinde diş olarak adlandırılan birden fazla kesme ağzı bulunan kesici takım veya çok ağızlı takım olarak adlandırılmaktadır. Frezeleme operasyonları, yöntem olarak alın ve çevresel frezeleme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 6). Çevresel frezeleme operasyonları, kesici dişleri yan yüzeyde bulunan silindirik freze çakısı; alın

frezeleme operasyonları ise kesici dişleri alın yüzeyde bulunan freze çakısı ile gerçekleştirilmektedir (Boothroyd, 1981).



Şekil 6. Frezeleme operasyonları, (a) Çevresel frezeleme ve (b) Alın frezeleme

Çevresel frezeleme işlemlerinde iş parçasının ilerleme yönü ile freze çakısının dönüş yönü arasındaki duruma göre yukarı (zıt yönlü) ve aşağı (eş yönlü) frezeleme söz konusudur (Şekil 7). Yukarı yönlü frezeleme operasyonlarında iş parçasının ilerlemesine karşı talaş kaldırma işlemi yapılırken, aşağı yönlü frezeleme operasyonlarında iş parçasının ilerlemesiyle birlikte talaş kaldırma işlemi yapılmaktadır. Yukarı yönlü frezeleme işleminde talaş kaldırma işlemi ince olarak başlar ve devamında talaş kalınlığı sürekli artar. Aşağı yönlü frezeleme işleminde ise talaş kaldırma işlemi daha büyük talaş kesiti ile başlayarak operasyon devamında talaş kesiti azalarak devam etmektedir. Böylece meydana gelen talaşın uzunluğu aşağı yönlü frezelemede daha kısa olup kesici takım ömrü daha uzundur. Alın frezeleme operasyonlarında ise kesici takımın dönme eksenini işlenen parçanın yüzeyine diktir. Kesme işlemi kesici takımın ucunda ve dış çevresinde bulunan kesme kenarları tarafından gerçekleştirilmektedir. Uygulama yöntemine göre çeşitli türleri bulunmaktadır.



Şekil 7. Frezeleme operasyonları, (a) Zıt yönlü ve (b) Eş yönlü

Frezeleme işleminde kullanılacak takımın işlenecek parçaya ve yapılacak işe uygun seçilmesi en önemli adımdır. Kullanılan kesici takımın çok ağızlı olması, malzemelerinin işlenebilirliğini etkileyen kesme kuvvetinin kesici takıma etkisini azaltmaktadır. Çünkü kesme operasyonu esnasında meydana gelen kesme kuvvetleri, eşit olarak kesme kenarlarına dağıtılmaktadır. Tek uçlu kesici takımlarda ise bu kuvvetin tamamı, kesme kenarında oluşmaktadır (Sandvik Coromant, 2005). Bunun sonucunda, kesici takımın aşınması hızlanarak takım sarfiyatı artmaktadır. Ayrıca, bu durum iş parçasının yüzey kalitesini düşürmektedir. Frezeleme operasyonunda kesme işlemi esnasında kesme kuvvetleri, frezeleme yöntemine göre kademeli olarak artmakta veya azalmaktadır. Ancak tüm frezeleme yöntemleri için kesme kenarının talaştan çıkışı hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir.

Frezeleme işleminde kesici takım, tornalama işlemindeki gibi sürekli ısı ve mekanik yüke maruz kalmamaktadır. Bu durumun etkisini azaltabilmek için kullanılacak takım talaş yüklenmesini ve sarsıntıyı karşılayacak şekilde tezgaha bağlanmalıdır. Ayrıca, frezelemede bazı parçalar tek takım ile bazı parçalar ise birden fazla takım ile işlenmektedir. Bu nedenle frezeleme işlemi yapılırken kaba, ara kaba ve son paso olmak üzere üç farklı talaş kaldırma işlemi uygulanabilmektedir.

4.1.1. Frezelemede kullanılan kesici takımlar

Kesici takımlar, frezeleme operasyonu yapılacak malzemeye göre tercih edilmektedir. Frezeleme işleminde kullanılan kesici takımların bazıları aşağıdaki gibidir (Sandvik Coromant, 1997).

- Alın freze çakısı

- Silindirik freze akısı
- Konik alın freze akısı
- Kanal açma freze akısı
- T-Kanal freze akısı
- Form freze akıları (konkav, konveks)
- Değiştirilebilir uçlu freze akıları
- Konik saplı helis kanallı parmak freze akıları
- Silindirik saplı parmak freze akıları

4.2. Frezelemede Kesme Parametreleri

Malzemenin istenilen özelliklerde yüksek verimle üretilebilmesi için üretim esnasında optimum işleme koşullarının oluşturulması gerekmektedir. İşleme şartlarını etkileyen en önemli parametreler ise kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliğidir. Bu üç değişken parametrenin takım ömrüne ve talaş kaldırma miktarına etkisi oldukça fazladır (Akkurt, 1992).

4.2.1. Kesme hızı (V_c)

Kesme hızı, parçadan talaş kaldırma işlemi sırasında, freze akısı üzerindeki bir noktadan bir dakikada metre cinsinden aldığı yoldur. Frezeleme operasyonlarında kesme hızı aşağıda verilen formül ve birimler dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/dak)} \quad (1)$$

Bu formülde; V_c : kesme hızı (m/dak), d : kesici takımın çapı (mm), n : iş parçasını işlemek için kullanılan makineye verilmesi gereken devir sayısını (dev/dak) göstermektedir.

Kesme operasyonlarında genel kural malzemeye göre uygun kesme hızının seçilmesidir. Çünkü kesme hızı, takım ömrü ve işleme zamanı açısından oldukça önemlidir. Talaş kaldırma esnasında uygulanması gereken V_c değerleri, genellikle kesici takım firmalarının kataloglarından ve literatürdeki çalışmalardan seçilmektedir. Kesici takım yüksek kesme hızlarında kullanıldığında sürtünme ve ısının etkisiyle

takım aşınması artmaktadır. Bunun sonucunda malzeme ve zaman israfı meydana gelmektedir. Kesici takım düşük kesme hızlarında kullanıldığında ise operasyon süresi artmakta ve zaman kaybına neden olmaktadır (Jeelani ve Musail, 1986). Bu nedenle frezeleme operasyonları için en iyi kesme hızı, kesici takım ömrü ve talaş kaldırma miktarını dengeleyecek şekilde seçimi gerçekleştirilmelidir. Belirli bir malzemenin işlenebilmesi için optimum kesme hızının belirlenmesinde genel olarak aşağıdaki faktörler dikkate alınmaktadır.

- Takım çapı,
- Talaş derinliği,
- Kesici takım ve iş parçası malzemesi,
- Parça için istenilen bitirme yüzeyi,
- Tezgah ve bağlama elemanlarının rijitliği

4.2.2. İlerleme (f)

Frezeleme operasyonunda üç farklı ilerleme mevcuttur. Bunlar;

- Dakikada ilerleme (mm/dak),
- Devir başına ilerleme (mm/dev) ve
- Kesici uç başına ilerleme (mm/diş)

Dakikada ilerleme (V_f), kesici takımın iş parçasına doğru bir dakikada mm cinsinden aldığı yoldur. Tabla veya tezgah ilerlemesi olarak adlandırılmaktadır. Aşağıda verilen formüle göre hesaplanmaktadır.

$$V_f = f_z \cdot n \cdot z \text{ (mm/dak)} \quad (2)$$

Eşitlik 2’de V_f : ilerleme hızı (mm/dak), f_z : diş başına ilerleme (mm), n : iş parçasını işlemek için kullanılan tezgaha verilmesi gereken devir sayısı (dev/dak), z : kesici uç sayısını göstermektedir.

Devir başına ilerleme (f), alın frezenin son işlem kapasitesinin belirlenmesi ve ilerleme değerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Kesici takımın bir devirdeki hareket miktarına eşit olan yardımcı değer olarak bilinmektedir. Aşağıda verilen formüle göre hesaplanmaktadır.

$$f = \frac{V_f}{n} \text{ (mm/dev)} \quad (3)$$

Freze çok uçlu bir kesici takımdır. Herbir ucun yeterli miktarda talaş kaldırabilmesi için optimum ilerleme değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kesici uç başına ilerleme (f_z); kesici bir kenarın parçaya girişi ile bir sonraki kesici kenarın parçaya girişi arasında geçen süre içerisinde tablanın aldığı mesafe olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle ilerleme değeri kesici takımın uç sayısı, devir sayısı ve ilerleme hızına bağlı olarak ifade edilebilmektedir. Aşağıda verilen formüle göre hesaplanmaktadır (Montgomery ve Altintas, 1991).

$$f_z = \frac{V_f}{n \cdot z} \text{ (mm/diş)} \quad (4)$$

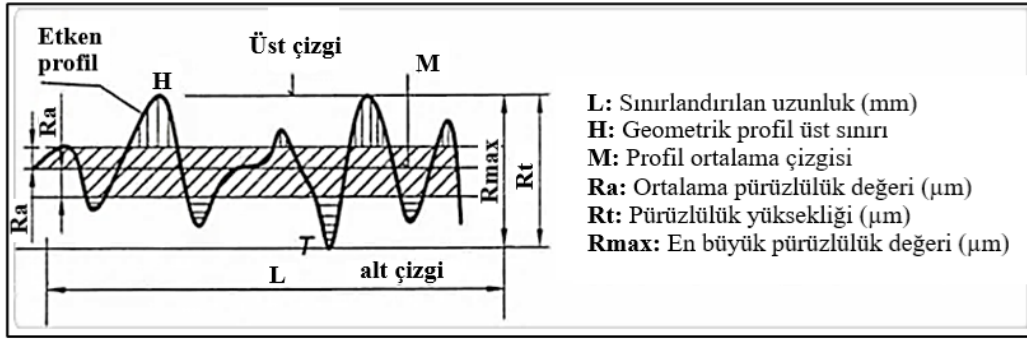
İlerleme hızı malzemenin yüzey kalitesini, kesici takımın ömrünü ve imalat süresi ile parça maliyetini etkilemektedir. Bu nedenle ilerleme hızının uygun seçilmesi frezeleme operasyonları için oldukça önemlidir. İlerleme hızının yüksek seçilmesi kesici takımın kırılmasına, düşük seçilmesi ise işlemenin uzun sürmesine sebep olarak zaman kayıplarını artırmaktadır.

4.2.3. Talaş derinliği (a_p)

Kesici takımın iş parçası içerisine frezeleme operasyonunda dikey olarak aldığı mesafedir. Bu ifade, genellikle a_p ile gösterilmektedir. Talaş derinliğinin işleme operasyonuna uygun seçilmemesi maliyeti ve işleme zamanını olumsuz etkilemektedir. Çünkü, yeterli miktarda a_p değeri verilmemesi durumunda, operasyonun bitirilebilmesi için birden fazla paso gerekmekte ve bu durum daha fazla zaman kaybına neden olmaktadır (Gezgin, 2007).

4.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Talaşlı imalat esnasında işleme operasyonlarının etkisi ile iş parçasında istenmeyen takım izleri meydana gelmektedir. Kesici takımın malzemesi, işleme metodu, işlenen malzemenin özellikleri, fiziksel, kimyasal, ısı faktörleri ve iş parçası-kesici takım arasındaki mekanik hareketlere bağlı olarak kabul edilen yüzey çizgisinin alt ve üst kısımlarında düzensiz sapmalar meydana gelmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülüğü olarak adlandırılmaktadır (Ulaş, 2019).



Şekil 8. Yüzey pürüzlülüğünün örnek gösterimi

İşleme metodu değişiklik gösterse de iş parçalarında muhakkak yüzey pürüzlülüğü oluşmaktadır. Farklı metotlarla işlenen aynı malzemelerin sayısal olarak yüzey pürüzlülükleri aynı olabilmektedir. Ancak aşınma, sürtünme, korozyon ve yorulma dirençleri farklılık göstermektedir. Bunun sebebi, iş parçası yüzeyindeki işleme izlerinin yönleri ve dağılımlarıdır (Akgün vd., 2017).

İşlenen malzemede yüzey kalitesinin en yüksek seviyede olması istenmektedir. Yüzey kalitesi ISO ve ANSI standartlarına göre pürüzlülük, dalgalık, izler ve hatalar olmak üzere üç ana unsurdan oluşmaktadır. Pürüzlülük, imalat işlemlerinden kaynaklanan ve ince düzensizliklerden meydana gelmektedir. İlerleme izleri dahil diğer belirsizlikler örnekleme uzunluğunu sınırlamaktadır. Dalgalık, büyük ve geniş aralıklı düzensizlikleri kapsamaktadır. Tezgahta meydana gelen iş parçası hareketi, sapma, titreşim, ısıl davranış ve kesici takım aşınması sonucunda oluşmaktadır. İzler ve hatalar, iş parçası üzerinde geniş aralıklı olarak oluşan düzensizliklerden oluşmaktadır. Yüzeyin üzerinde mikrodüzeyde çatlak, delik ve çizgi şeklinde görülmektedir (Thomas, 1981).

Yüzey pürüzlülüğü genellikle üretim metodunun yanı sıra takım tezgahının rijitlik durumu, takım geometrisi, kesme parametreleri, malzemenin mekanik özellikleri, takım aşınması gibi faktörlerden etkilenmektedir. Talaşlı imalat yöntemlerinde parça işlenirken genellikle yüksek kesme hızında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmektedir. Ancak, yüksek kesme hızı kesici takımda zamana bağlı olarak aşınmayı hızlandırdığı için aynı yüzey kalitesi elde edilememektedir.

Tek ağızlı kesme takımıyla yapılan talaş kaldırma işlemlerinde iş parçasının yüzeyinde elde edilen ortalama ideal yüzey pürüzlülüğü, kesici takımın ilerlemesi ve uç yarıçapına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Aşağıdaki Eşitlik 5'teki

denklemden ilerleme ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki görülmektedir (Hagiwara vd., 2008).

$$R_i = \frac{f^2}{32r} \quad (5)$$

R_i : ideal ortalama yüzey pürüzlülüğü, mm

f : İlerleme, mm/dev

r : Uç yarıçapı, mm

Yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörler nedeniyle oluşan gerçek yüzey ideal yüzey pürüzlülüğünden daha fazla olmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak ideal ve gerçek yüzey pürüzlülüğü arasında bir düzeltme faktörü geliştirilmiştir. Bu faktör, Eşitlik 6 ile ifade edilmektedir.

$$R_c = r_{ai} \cdot R_i \quad (6)$$

R_c : Gerçek yüzey pürüzlülüğü

r_{ai} : Düzeltme faktörü

R_i : İdeal yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, maksimum yüzey pürüzlülüğü " R_t " ve Ortalama yüzey pürüzlülüğü " R_a " gibi ifadelerle sembolize edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün R_a olarak matematiksel ifadesi Eşitlik 7'de gösterilmektedir. R_a : yüzey pürüzlülüğü, ve L : iş parçası üzerinde ölçüm yapılan toplam uzunluk.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L [Y(x)] dx \quad (7)$$

4.4. Takım Aşınması

Talaşlı imalat işlemlerinde kesme esnasında oluşan sıcaklık ve yüksek kesme kuvvetleri, kesici takımlarda istenmeyen durumları oluşturmaktadır. Talaş kaldırma operasyonlarında kesme kuvvetinin artmasına bağlı olarak kesici takım kırılabilir. Kesme sıcaklığı çok fazla olması durumunda kesici takım malzemesi zayıflayarak işlevini yitirebilmektedir. Yüksek kesme kuvveti ve sıcaklık artışı, talaş kaldırma operasyonlarında olmadığında da kesici takım sürekli olarak sürtünme etkisi ile doğal aşınmaya uğrayarak kesme işlevi azalabilmektedir. (Groover, 2015). Talaş kaldırma işlemi sırasında kesici takım ile iş parçasının yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı ısı oluşmaktadır. Bu ısının bir kısmı talaş ile iş parçası ve kesici takımdan uzaklaştırılmaktadır. Geri kalan kısmı ise iş parçasına ve takım üzerine

geçerek takımın ve iş parçasının ısınmasına neden olmaktadır (Alparslan ve Bayraktar, 2021).

Kesici takımlar, kırılma, yüksek sıcaklık ve sürekli aşınma durumları nedeniyle talaş kaldırma işlevini yerine getirememektedir. Takımlardaki sürekli aşınma durumu takım yan ve talaş yüzeyi olmak üzere iki bölgede meydana gelmektedir (List vd., 2005). Bu aşınma bölgelerinde meydana gelen bazı aşınma tipleri aşağıda verilmektedir.

-*Krater aşınması*: Takımın talaş yüzeyinde boşluk (krater, oyuk) şeklinde yapılar meydana gelmektedir. Kesme işlemi sırasında meydana gelen talaşın, yüzey üzerinde kayması sonucunda aşınma daha fazla oluşmaktadır.

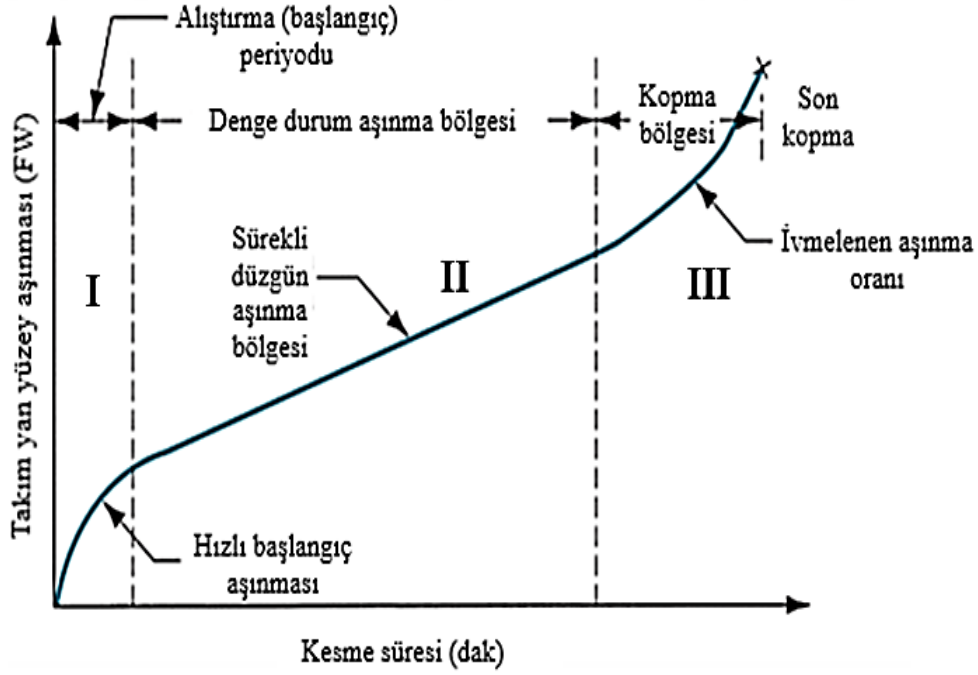
-*Yan yüzey (yanal) aşınması*: Kesici takımın boşluk açısının verildiği yan yüzeyinde meydana gelmektedir. Yan yüzey aşınması kesme işlemi sırasında kesici kenara bitişik yan yüzey ve iş parçasından talaş kaldırıldıktan sonraki oluşan yeni yüzeyin arasında meydana gelen sürtünme sonucu oluşmaktadır.

-*Çentik aşınması*: Kesilen iş parçasının işlenen yüzeyinin talaşlı imalat prosesleri, soğuk çekme işlemi sonucu oluşan sertleşmelerden, döküm işlemi esnasında parça yüzeyinde kalan kum taneciklerinden ya da başka nedenlerden dolayı parçanın iç kesimine göre daha sert ve aşındırıcı olmasından kaynaklanmaktadır.

-*Talaş yığılması*: İşleme esnasında iş parçasından ayrılan talaşların kesici takım yüzeyine yapışarak yığıntı oluşturmalarıdır. Genellikle bu aşınma tipi kesme hızının düşük olması nedeniyle kesici takımın iş parçasına uyguladığı aşırı basınçtan meydana gelmektedir (URL-3).

Kesici takım, talaş kaldırma işlemine başladığı andan itibaren aşınma sürecine girmektedir. Aşınma arttıkça kesme kuvvetleri de artmakta, bunun sonucunda daha çok ısı oluşmakta ve aşınma hızlanmaktadır. Kesici takımlarda aşınma belirli bir noktadan sonra, kesici takım uçlarının kullanılamaz hale gelmesine sebep olmaktadır. Kesici takımda oluşan aşınmalar üç aşamada değerlendirilmektedir (Şekil 9). Bunlar başlangıç, sürekli düzgün ve kopma aşamalarından oluşmaktadır. (Gülmez, 2020). Birinci bölge kesici takımın hızlı bir şekilde aşınma davranışı sergilediği hızlı başlangıç aşınmasıdır. İkinci bölge kesici takımın zamana bağlı olarak düzenli bir biçimde aşınma davranışı sergilediği ve aşınma işlemi bakımından denge durumunda olduğu sürekli düzgün aşınma bölgesidir. Üçüncü bölge ise aşınma oluşumunda artışın

yaşandığı ve sonunda kesici takımın kopması ile sonuçlanan kopma bölgesi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 9. Kesici takımın aşınma aşamaları

4.5. Kesme Kuvvetleri

Kesme kuvveti, kesici takım tarafından iş parçasından talaş kaldırma esnasında kesici takıma etkiyen kuvvettir. Bu kuvvet, takım tezgahının gücünü ve kesici takımın tasarımı ile doğrudan ilişkilidir. Üretici, kesici takım tasarımı ve üretimini, kesici takım üzerinde oluşabilecek yüklerine göre tasarım ölçütlerini düzenleyebilmektedir. Ayrıca kesme kuvveti, takım tezgahının titreşimsiz ve rijit bir şekilde çalışabilmesini sağlayan ve gerekli bir tasarım ölçütüdür (Gökkaya, 2011).

Kesme kuvvetlerinin büyüklüğü, talaş/kesici takım arasında oluşan temas uzunluğu ile ilişkilidir. İki fazlı ve kesikli talaş meydana getiren malzemelerin işlenmesinde, kesici takım ve talaş arasındaki temas uzunluğu az olduğu için çok düşük kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Düşük kesme kuvvetlerinin meydana gelebilmesi için kesme hızının artırılması gerektiği bilinmektedir. Çünkü, kesme hızının artması sonucunda kayma açısı artmakta daha ince talaş ve daha az temas uzunluğu meydana gelmektedir. Ayrıca, sınırlı temas uzunluğuna sahip kesici

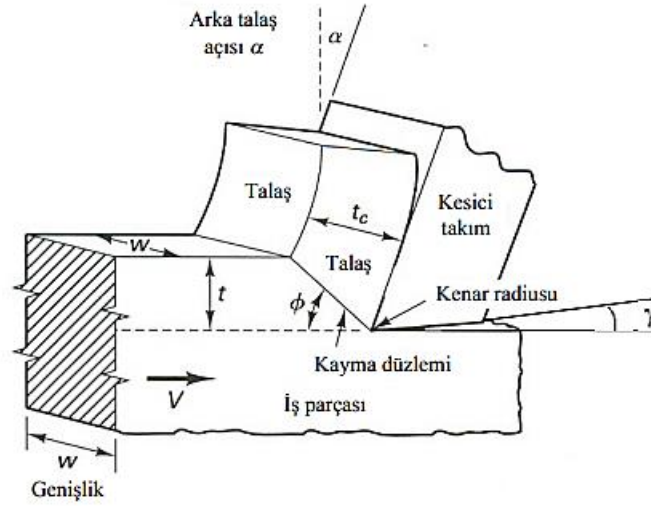
takımlarla işleme operasyonlarında takım/talaş arasındaki temas uzunluğu sınırlandırılarak kesme kuvvetleri azaltılabilmektedir (Yılmaz vd., 2014).

Deneyisel araştırmalar sonucunda, talaş kaldırma işlemi sırasında kesme kuvvetlerini etkileyen birçok faktörün olduğu belirlenmiştir. Bu faktörlerden en çok dikkat edilmesi gerekenler; kesme hızı (k_v), talaş açısı (k_y), takım aşınma (k_u) ve takım malzemesi faktörleridir (k_o).

4.5.1. Kesme modelleri

Delme, frezeleme, vargelleme ve tek bir noktadan kesme operasyonu gerçekleştirilen tornalama gibi operasyonlar eğik ve dik (ortogonal) kesme işlemleri ile gerçekleştirilmektedir. Dik kesme işleminde takımın kesici kenarı kesme hız vektörüne diktir. $\gamma=0^\circ$ olduğunda operasyon dik kesme işlemi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 10). Eğik kesme işleminde ise takımın kesici kenarı, kesme hız vektörüne göre belirli bir eğim açısına sahiptir. Eğim, talaşın akma yönünü ve takımın performansını önemli derecede etkilemektedir (Shaw, 1989).

Eğik kesme esnasında meydana gelen bileşke kuvvet x , y ve z yönleri olarak üç bileşene ayrılmaktadır. Dik kesme işleminde bu bileşenlerden y yönündeki kuvvet sıfır olduğundan dolayı bileşke kuvvetler, x ve z yönlerinde meydana gelmektedir. Dik kesme operasyonlarında kayma işleminin tek düzlemde gerçekleştiği ve takım boşluk yüzeyi ile iş parçası yüzeyi arasında sürtünme olmadığı kabul edilmektedir (Şekil 10) (Kalpakjian, 2003). Şekil 10'da dik kesme işlemi esnasında iş parçası belirli bir V kesme hızına sahiptir. Burada, kaldırılmamış talaş kalınlığı t 'dir. Kaldırılan talaş V_c hızı ile kesici takım talaş yüzeyinden geçmektedir. Böylelikle kayma, V_s hızında ve ϕ kayma açısında gerçekleşmektedir. İşleme sırasında kesici takım, γ boşluk açısına sahiptir. Şekil 10, talaş kaldırma işlemi esnasında talaş açısı, iş parçası davranışı, kesici takım, talaş ve yeni oluşan iş parçası yüzeyi arasındaki etkileşimleri açıklamak için kullanılmaktadır.



Şekil 10. Dik kesme işlemi

4.6. Frezelemede Oluşan Kuvvetler

Frezeleme operasyonlarında meydana gelen kuvvetler; frezeleme metodu, iş parçası ve kesici takımın malzeme çeşidi, malzeme ve takım geometrisi, kesme derinliği, ilerleme miktarı, kesici kenarlar arasındaki mesafe, eğim açısı ve aşınma gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, frezelemede talaş kaldırma süresince kesme kuvvetleri değişkenlik göstermektedir.

Pratikte teorik hesaplamaları kolaylaştırabilmek için ortalama talaş kesitine karşılık gelen ortalama kesme kuvvetleri dikkate alınmaktadır. Frezeleme operasyonlarında genellikle aynı anda birden fazla kesici uç tarafından talaş kaldırma işlemi gerçekleştiğinden kuvvetler, bir kesici uca karşılık gelen ortalama talaş kaldırma kuvveti (F_{zz}) ve onun bileşenleri olarak ifade edilmektedir. Bu bileşenler; ortalama kesme kuvveti (F_{cz}), ortalama radyal kuvvet (F_{rz}) ve ortalama ilerleme kuvveti (F_{fz})'dir.

Aynı anda iş parçasından talaş kaldıran kesici uç sayısı ve kesici takıma ait ortalama kesme kuvvetleri (F_z) Eşitlik 8-11'deki denklemler yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$Z_e = Z \cdot \frac{\varphi_s}{360} \quad (8)$$

$$F_c = Z_e \cdot F_{cz} \quad (9)$$

$$F_f = Z_e \cdot F_{fz} \quad (10)$$

$$F_r = Z_e \cdot F_{rz} \quad (11)$$

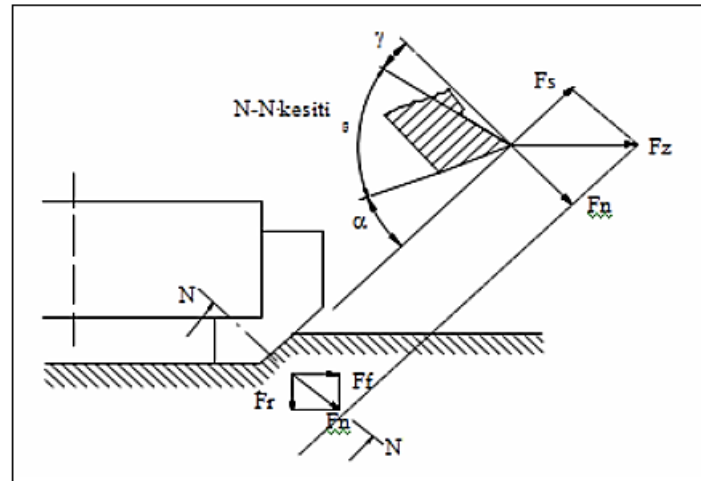
Helisel silindirik freze işlemlerinde F_c , F_r , F_f kuvvetlerine ek olarak eksenel kuvvet oluşmaktadır. F_a ile gösterilmekte ve Eşitlik 12'ye göre hesaplanmaktadır.

$$F_a = F_c \cdot \tan \lambda \quad (12)$$

Alın frezeleme işleminde kesme kuvvetleri Şekil 11'deki diyagrama göre belirlenmektedir (Brick vd., 1965). N-N kesitindeki ortalama talaş kaldırma kuvvetinin (F_z) bileşenleri, ortalama kesme kuvveti (F_c) ve normal kuvvettir (F_n). F_n normal kuvvet bileşenleri ise, ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvettir (F_r). Bir kesici ucun ortalama kesme kuvveti (F_{cz}) ve kesici takım toplam ortalama kesme kuvveti (F_s); Eşitlik 13 ve 14'e göre hesaplanmaktadır. Bu eşitliklerde, Z_e : Aynı anda talaş kaldıran kesici uç sayısı, B : Kesme genişliği, A_s : Talaş kesiti, h_m : Ortalama talaş kalınlığı, k_s : Özgül kesme kuvveti.)

$$F_{cz} = A_s \cdot k_s = B \cdot h_m \cdot k_s \quad (13)$$

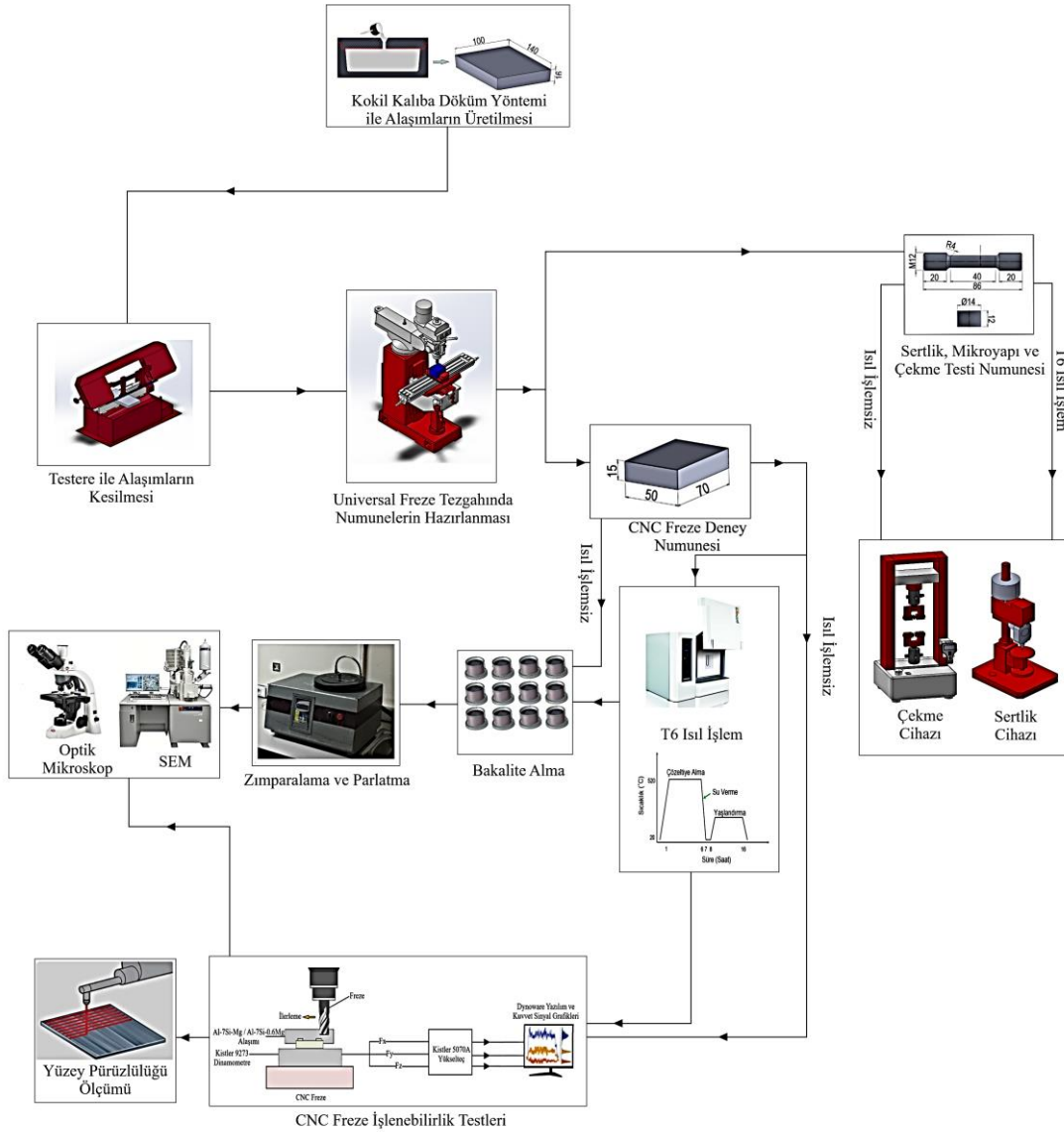
$$F_c = Z_e \cdot F_{cz} = Z_e \cdot B \cdot h_m \cdot k_s \quad (14)$$



Şekil 11. Alın frezeleme operasyonunda oluşan kuvvetler

5. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımları kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiştir. Yapılan çalışmalara ait iş akış diyagramı, Şekil 12’de verilmiştir.

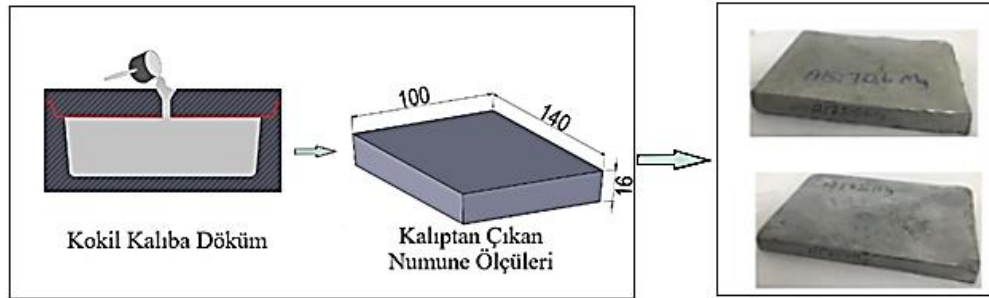


Şekil 12. İş akış diyagramı

5.1. Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg Alaşımlarının Üretilmesi

Alaşımların üretilmesi için gerekli olan elementler testere yardımı ile kesilerek hassas terazide tartılmıştır. Ağırlıklarına göre hazırlanan elementler orta frekanslı bir

indüksiyon eritme fırınında ergitildi ve ~ 775 °C sıcaklıkta oda koşullarında 140x100x16 mm ölçülerinde prizmatik dörtgen şekilli çelik kalıba dökülerek alaşımlar üretildi (Şekil 13). Alaşımların üretiminde içyapıda tane inceltme ve homojen yapı elde edebilmek için AlTiB ve Al15Sr master alaşımları kullanılmıştır. Döküm işlemi sonrasında alaşımlar, oda koşullarında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işlemi gerçekleştikten sonra alaşımlar kalıp içerisinden çıkartılarak universal frezede kaba işleme operasyonu için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 13. Alaşımların döküm yöntemi ile üretilmesi

Kullanılan alaşım elementlerinin ağırlıkça kimyasal yüzde bileşim oranları, Tablo 7’de verilmiştir.

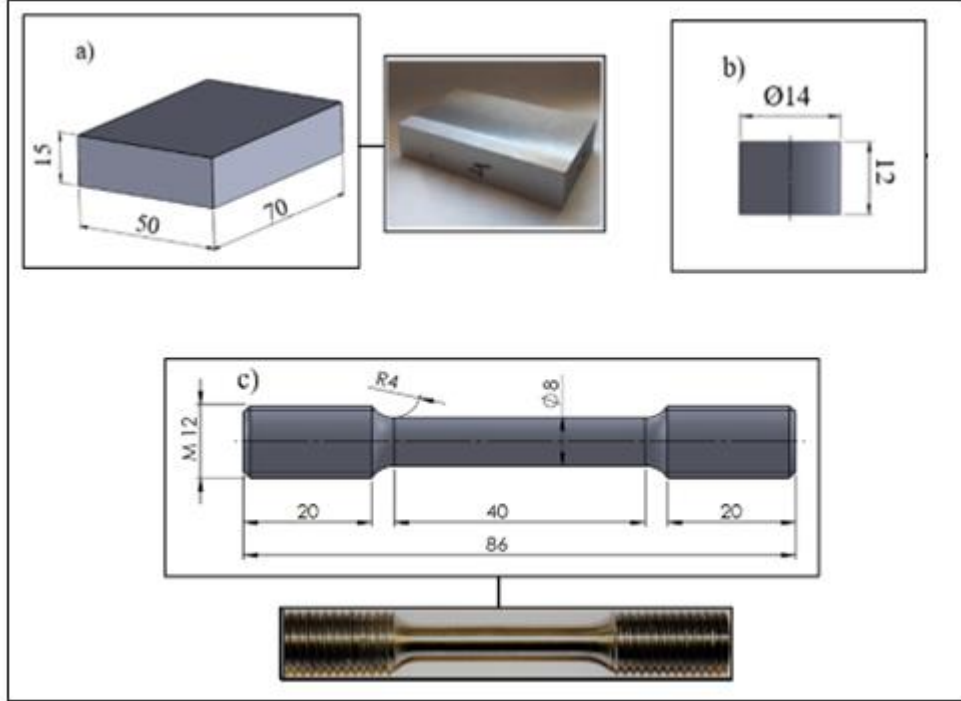
Tablo 7. Alaşımların ağırlıkça kimyasal yüzde (%) bileşim oranları

Alaşımlar		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
Al-7Si-Mg	min	6,5				0,25					0,05	Kalan
	max	7,5	0,45	0,15	0,35	0,65	0,15	0,15	0,15	0,05	0,20	
Al-7Si-0.6Mg	min	6,5				0,50					0,10	Kalan
	max	7,5	0,15	0,03	0,10	0,70	-	0,07	-	-	0,18	

5.2. Mikroyapısal İnceleme ve Mekanik Testler İçin Numunelerin Hazırlanması

Kokil kalıptan 140x100x16 mm ölçülerinde çıkartılan alaşımlar testere tezgahında işleme payı bırakılarak 72x52x16 mm ölçülerinde kesilmiştir. Kesme işlemi gerçekleştirildikten sonra universal freze tezgahında kaplamasız HSS parmak freze ile 70x50x15 mm ölçülerinde işlenerek yapısal, mekanik ve işlenebilirlik testleri için hazır hale getirilmiştir (Şekil 14). Elde edilen parçalardan mikroyapısal analiz,

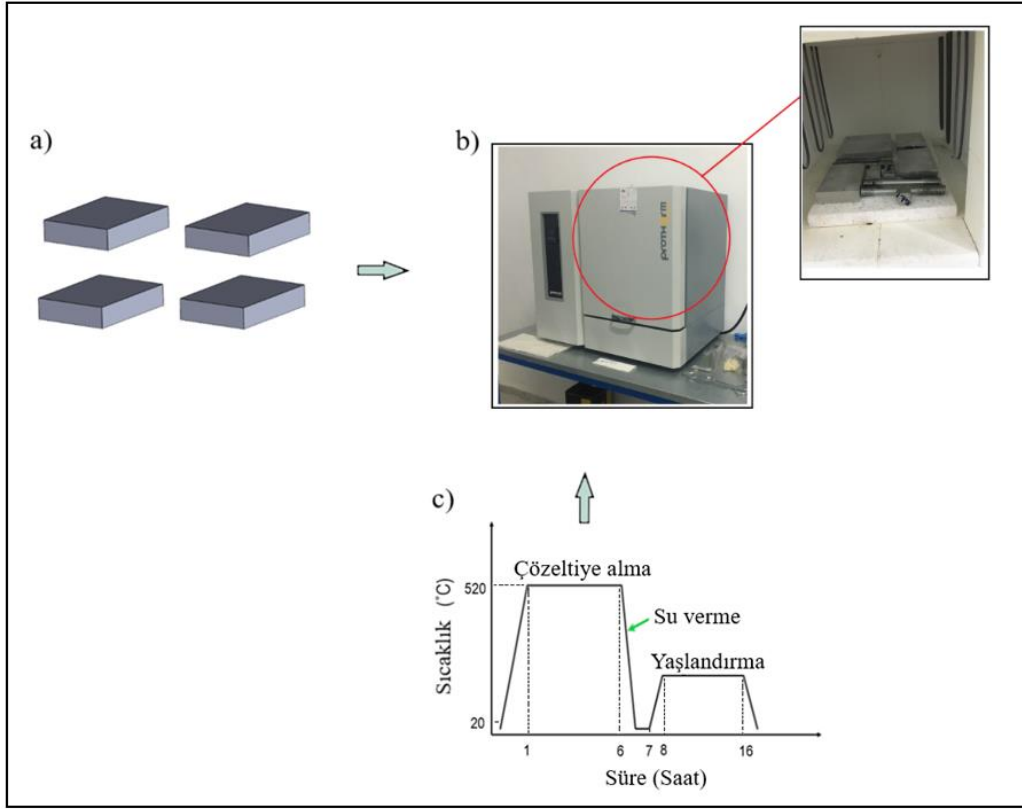
sertlik ölçümü ve çekme testleri için CNC torna tezgahında standartlara uygun olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır (Şekil 14).



Şekil 14. Mikroyapısal inceleme, mekanik ve işlenebilirlik testleri için numunelerin teknik resimleri (ölçüler mm’dir), (a) CNC frezeleme, (b) Sertlik ve mikroyapı ve (c) Çekme numuneleri

5.3. Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg Alaşımlarına T6 Isıl İşlemin Uygulanması

Yapısal, mekanik ve işlenebilirlik testleri için talaşlı imalat sonrası hazır hale getirilen numuneler (Şekil 15a), 1800 °C’a kadar çalışabilen Protherm marka Mos 170/8 model ısıtıl işlem fırınına (Şekil 15b) yerleştirilerek 520°C’de 5 saat çözeltiye alma, oda sıcaklığında 1 saat su verme ve 165°C’de 8 saat yapay yaşlandırma (Şekil 15 c) işlemleri kapsamında T6 ısıtıl işlemi uygulanmıştır (Şekil 15) (Alexopoulos vd., 2011; Costa vd., 2016; Es-Said vd., 2002; Machado vd., 2022; Pezda vd., 2016). Isıl işlem uygulanan numuneler, metalografik inceleme, mekanik ve işlenebilirlik deneyleri için hazır hale getirilmiştir.



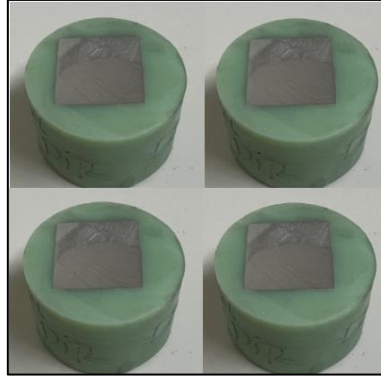
Şekil 15. Isıl işlem prosesi, (a) Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarına ait işleme numuneleri, (b) Isıl işlem fırını ve (c) Isıl işlem grafiği

5.4. Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Bu aşamada mikroyapısal özelliklerin belirlenmesi için bakalite alma, zımparalama ve parlatma, optik mikroskop ve SEM incelemesi yapılırken mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme ve sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir.

5.4.1. Bakalite alma

Zımparalama ve parlatma işlemi esnasında numunelerin kolay tutulabilmesi için gerekli olan bir aşamadır. Bu aşamada dökülmüş ve T6 ısıtım işlemi görmüş numunelerin içyapılarının incelenebilmesi için 10x10x10 mm ölçülerinde hazırlanan numuneler soğuk bakalite alınmıştır (Şekil 16). Soğuk bakalite alma işleminde 2/1 oranında bakalit tozu ve süspansiyon (sertleştirici sıvı) karışımı, delrin bakalite alma kabının içerisine yerleştirilen numune üzerine dökülmüştür. Bakalitin donması için numuneler yaklaşık 25-30 dakika bekletilmiştir. Daha sonra numuneler, bakalit kabı içerisinden çıkarılarak zımparalama ve parlatma işlemleri için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 16. Bakalite alınmış numuneler

5.4.2. Zımparalama ve parlatma

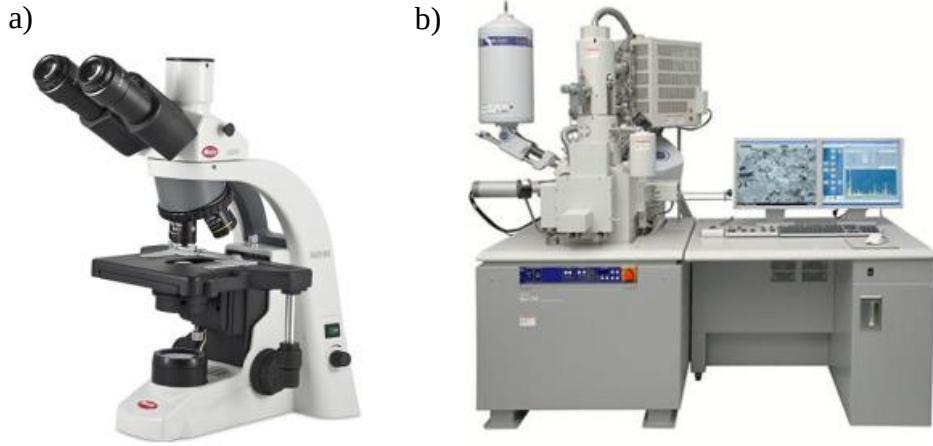
Bakalite alma işlemi gerçekleştirilen numuneler, devir kontrollü zımparalama ve parlatma makinesinde sırasıyla 220, 300, 600, 1200 ve 2000 numaralı zımparalar ile zımparalanmıştır. Zımparalama işlemleri, su kullanılarak numune yüzeyinde göz ile görülebilen çizikler giderilinceye kadar yapılmıştır. Zımparalama işlemi sonrasında numunelere 0,04 ve 3 μm parlatma keçeleri ile 0,05; 3 ve 9 μm 'luk parlatma solüsyonları kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir ( ekil 17). Zımparalama ve parlatma işleminin ardından numunelerin yüzeyleri etil alkolle temizlenerek optik mikroskop ve SEM cihazında görüntüleme işlemi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 17. Zımparalama ve parlatma işlemi

5.4.3. Optik mikroskop ve SEM incelemesi

Zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilen numunelerin içyapı görüntüleri, Nikon marka optik mikroskop altında 20X ve 50X lensler kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 18. Mikroyapı inceleme cihazları, (a) Optik mikroskop ve (b) SEM

5.4.4. Çekme deneyleri

Şekil 14’te teknik resmi verilen ısıtılmış ve dökülmüş durumdaki çekme testi numunelerinin akma ve çekme mukavemeti ile kopma uzaması değerlerinin belirlenmesinde TÜRKAK tarafından akredite edilmiş PROBO adlı firmada MTS Criterion model cihaz kullanılarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Her bir alaşım için çekme testinin gerçekleştirilmesinde $0,25 \text{ mm s}^{-1}$ ’lik sabit çene ve $5,9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ’lik ortalama deformasyon hızı değerleri kullanılmıştır. Çekme testleri gerçekleştirildikten sonra SEM cihazı kullanılarak çekme test numunelerinin kırılma yüzeyleri görüntülenmiştir.

5.4.5. Sertlik deneyleri

Şekil 14’te verilen alaşım numunelerinin dökülmüş ve ısıtılmış durumdaki sertlik değerleri, Brinell sertlik ölçme yöntemiyle $62,5 \text{ kg}\times\text{f}$ yük altında ve 2,5 mm çapında bilye uç kullanılarak her bir numune üzerinde sekiz adet sertlik ölçümü yapılarak ve elde edilen ölçümlerin aritmetik ortalaması ile belirlenmiştir.

5.5. İşlenebilirlik Deney Düzenekinin Hazırlanması ve Frezeleme Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

Dökülmüş ve T6 ısıtılmış durumdaki numuneler üzerinde CNC dik işleme merkezinde frezeleme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, üçer farklı kesme hızı (50, 80 ve 110 m/dak), ilerleme (0,08; 0,16 ve 0,24 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (1 mm) parametreleri kullanılarak yapılmıştır (Sadiq vd., 2019; Wang vd., 2012; Sekmen

vd., 2015; Uddin vd., 2021). Kesici takım olarak, Dormer marka Z2 S9226.0 ve S9026.0 ISO standartında, 19 mm kesme ve 57 mm toplam uzunluğa, 0,13 mm 45° pahlı köşelere, 30° helis ve 12° talaş açısına sahip Ø6 ölçüsünde 2 ağızlı kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür parmak frezeler kullanılmıştır (URL 4 ve URL 5). Her bir deney için yeni kesici takım kullanılarak kesme parametreleri, kesici takım ve malzeme şartlarına göre toplam 72 adet deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 19’da işlenebilirlik testleri için kullanılan deney düzeneği verilmiştir. Bu düzenekte kesme esnasındaki X, Y ve Z yönlerindeki sırasıyla ölçülen F_x , F_y ve F_z kuvvetlerin değerleri dinamometre ile yükseltece aktarılmakta ve buradan da Dynoware yazılımında sayısal değerlere dönüştürülmektedir. Bu grafiklerden elde edilen kuvvet değerlerinin bileşkesi hesaplanarak ISO 3002’ye göre bileşke kesme kuvvetleri (F_r) tespit edilmiştir.



Şekil 19. İşlenebilirlik testleri için deney düzeneği

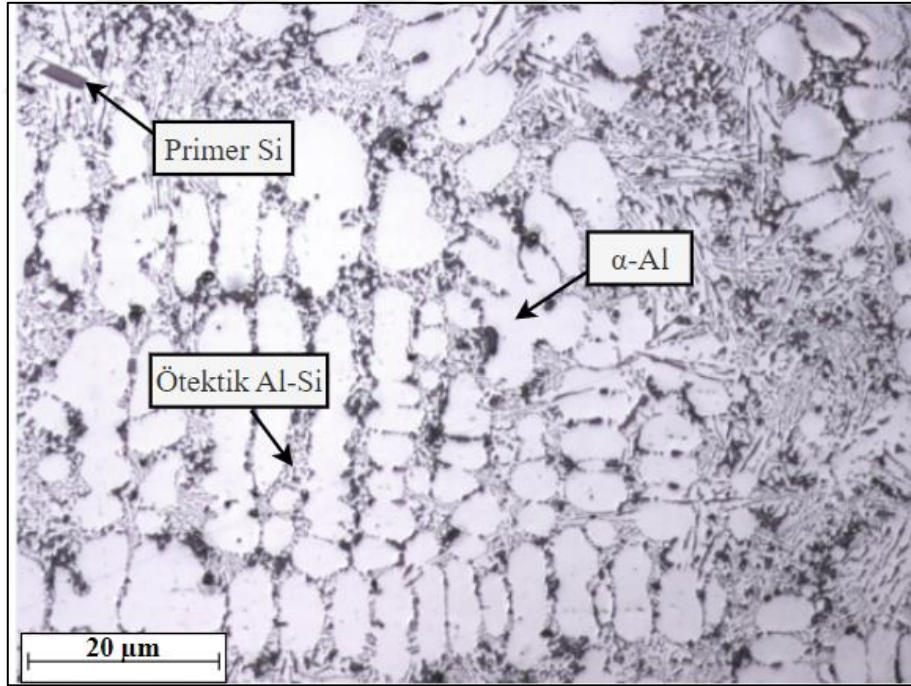
5.6. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Alaşımların frezelenmesi esnasında işlenmiş yüzeylere ait ortalama yüzey pürüzlülükleri, ISO 4287’ye göre Mahr Perthometer izleyici uçlu yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı ile kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler, beşer kez tekrarlanarak nihai pürüzlülük değeri bu ölçümlerin aritmetik ortalaması ile belirlenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü, $R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx$ eşitliğine göre hesaplanmıştır. Burada L , ölçme uzunluğunu ve y ise ölçülen değeri ifade etmektedir.

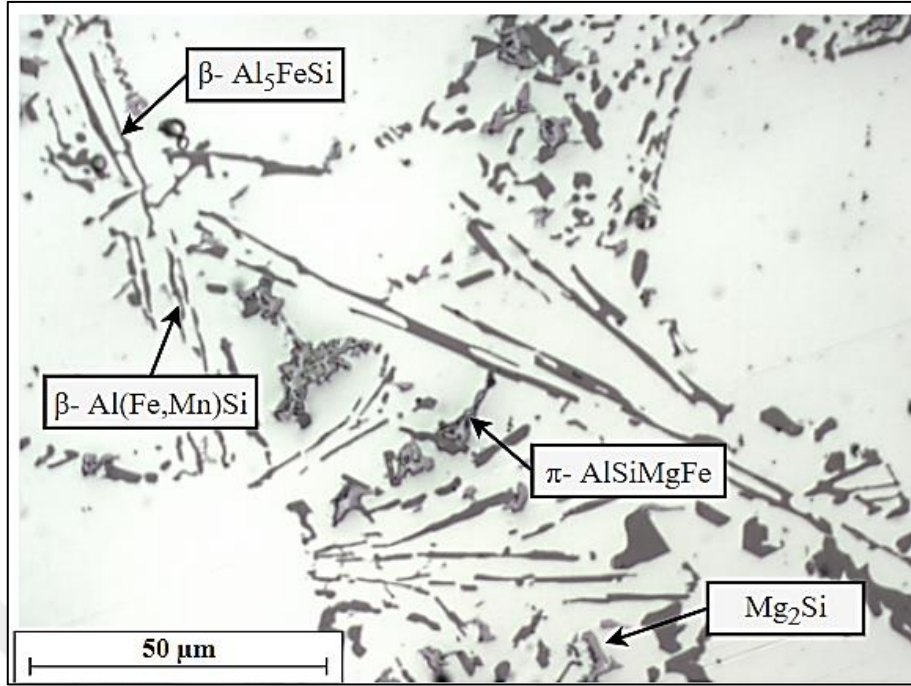
6. BULGULAR

6.1. İçyapı İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular

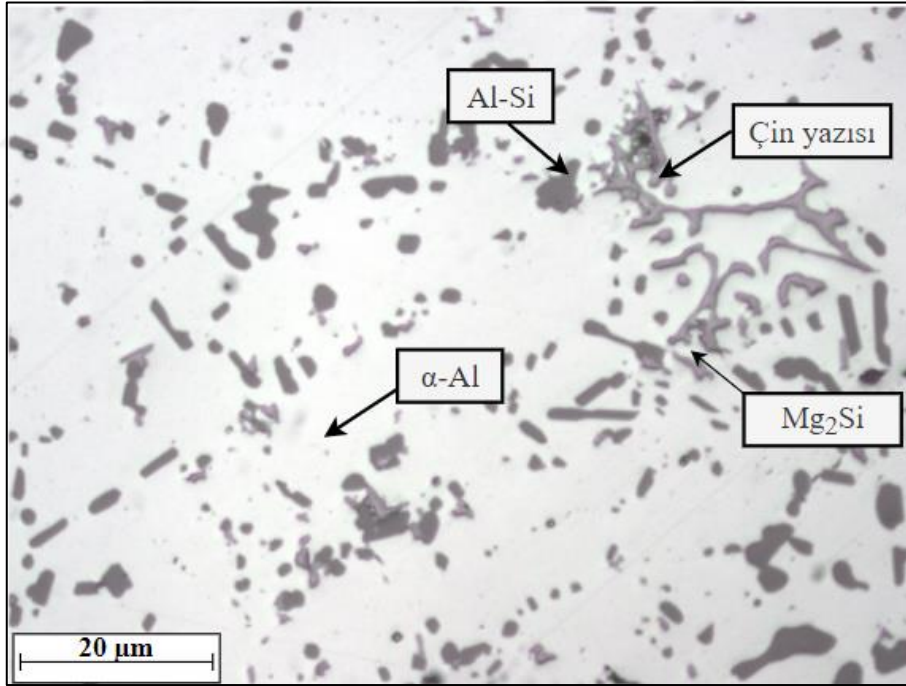
Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının dökülmüş ve T6 ısıl işlem görmüş durumdaki içyapıları, optik mikroskop ve SEM ile görüntülenmiştir (Şekil 20-27). Al-7Si-Mg alaşımının mikroyapısının Al bakımından zengin α -Al, primer Si, ötektik Al-Si, β -Al₅FeSi, β -Al(Fe,Mn)Si ve π -Al-SiMgFe fazlarından oluştuğı gözlenmiştir (Şekil 20 ve 21). Alaşıma uygulanan T6 ısıl işlem ile primer ve ötektik Si fazlarının küreselleştiğı ve çin yazısı morfolojisinin oluştuğı tespit edilmiştir (Şekil 22 ve 23). Al-7Si-0.6Mg alaşımının içyapısının α -Al, primer Si, ötektik altı Al-Si, π -Al-SiMgFe, AlFe-Si ve β -Al₉Fe₂Si₂ fazlarından meydana geldiğı görülmüştür (Şekil 24-26). Bu alaşıma T6 ısıl işlem uygulanması sonucunda α -Al, ötektik Si, π -Fe π -Al-SiMgFe ve β -Fe(Al₅FeSi) fazlarının oluştuğı ve mevcut fazların dökülmüş durumdaki alaşımlara göre küreselleştiğı belirlenmiştir (Şekil 27).



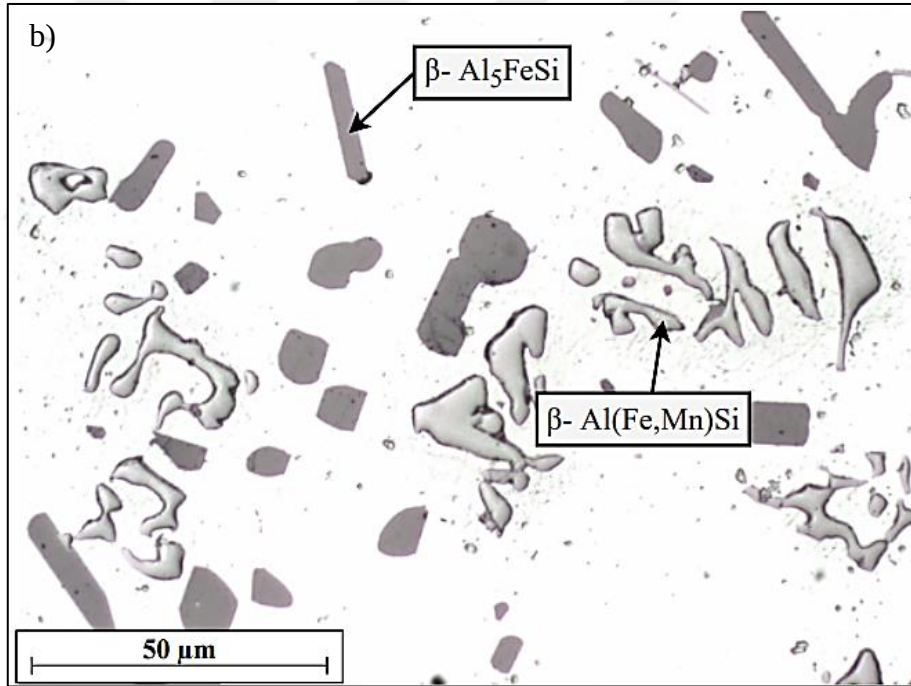
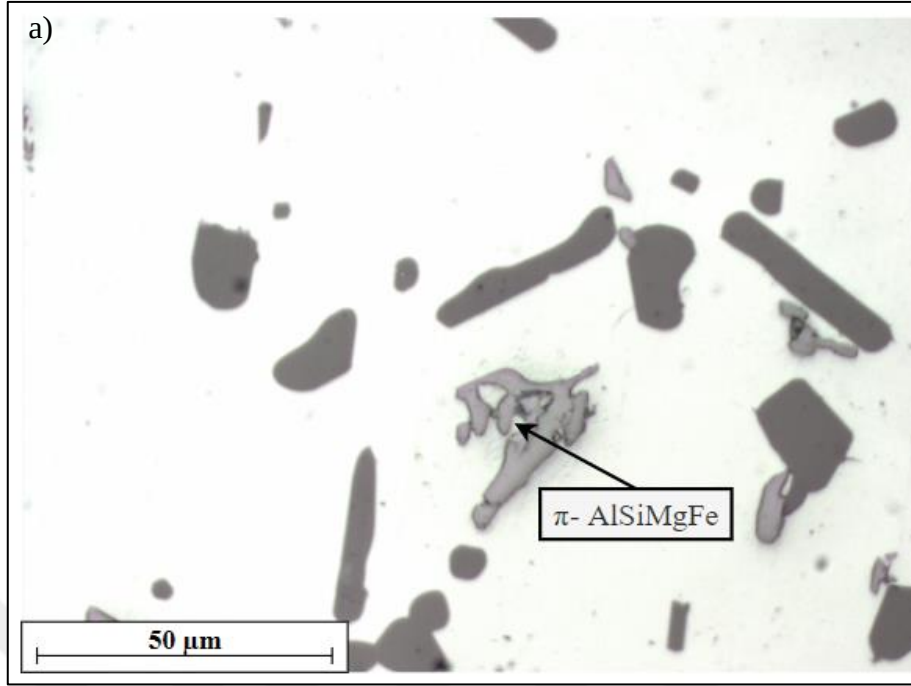
Şekil 20. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımının içyapı görüntüsü (20X büyütme)



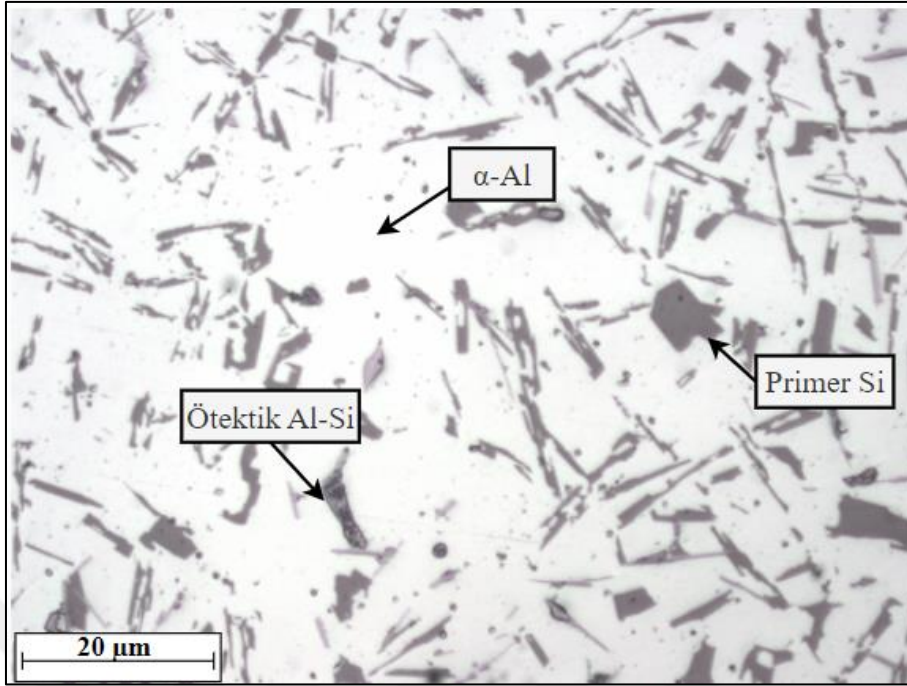
Şekil 21. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımlarının içyapı görüntüsü (50X büyütme)



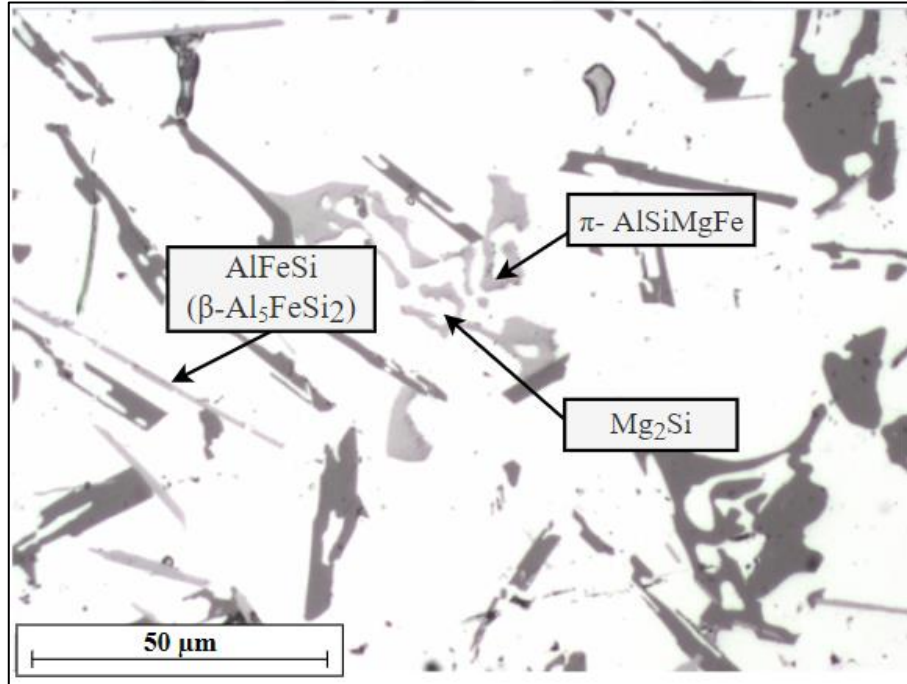
Şekil 22. T6 ısıtıl işlem görmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımlarının içyapı görüntüsü (20X büyütme)



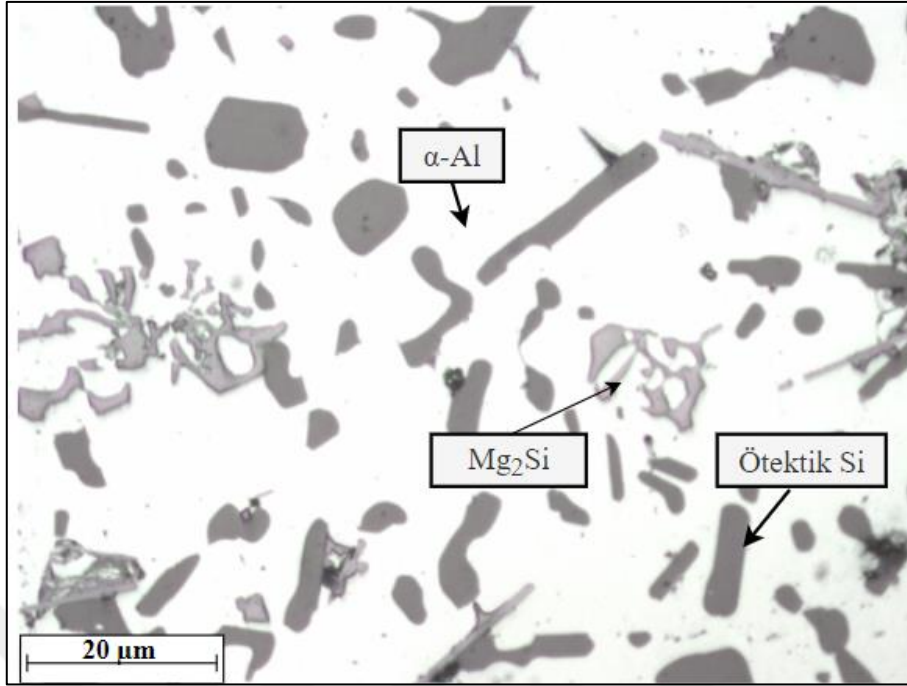
Şekil 23. T6 ısıt işlem görmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımlının içyapı görüntüsü, a) π fazı ve b) β fazı (50X büyütme)



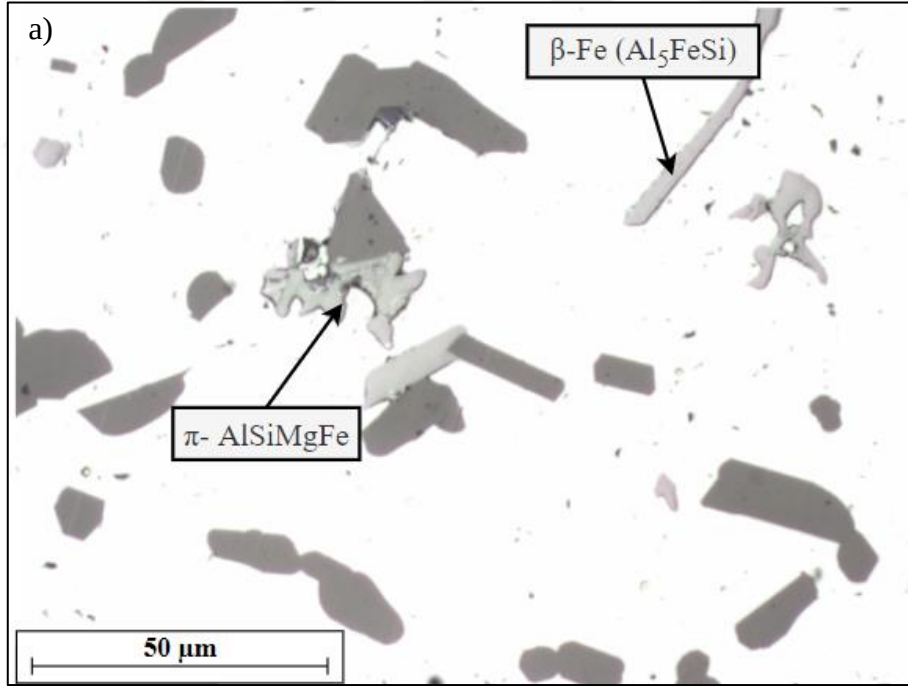
Şekil 24. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımlının içyapı görüntüsü (20X büyütme)

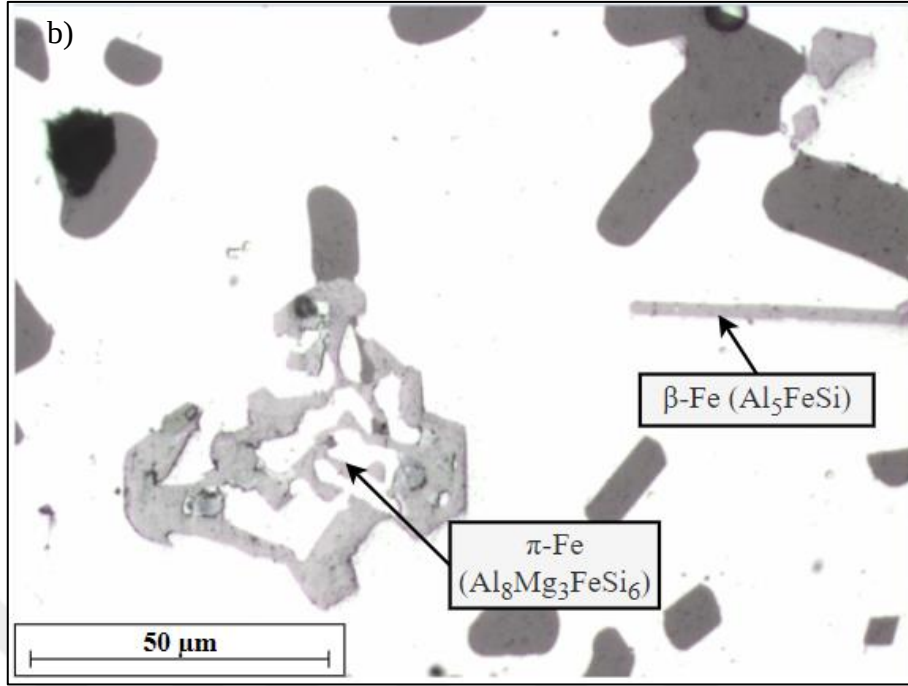


Şekil 25. Dökülmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımlının içyapı görüntüsü (50X büyütme)



Şekil 26. T6 ısıtıl işlem görmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımlının içyapı görüntüsü (20X büyütme)





Şekil 27. T6 ısıt işlem görmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının içyapı görüntüsü, a) π fazı ve b) β fazı (50X büyütme)

6.2. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

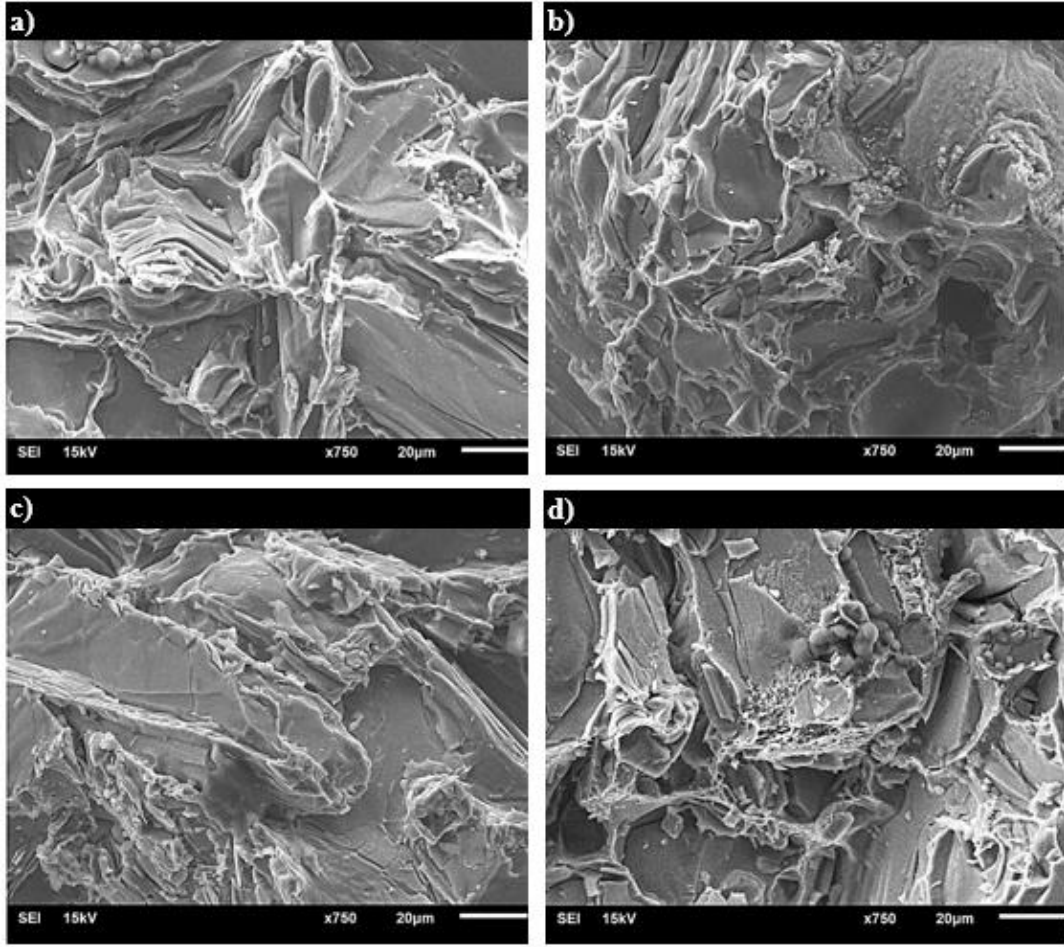
6.2.1. Çekme ve sertlik testleri

Dökülmüş ve T6 ısıt işlem görmüş durumdaki Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarına sertlik, akma ve çekme mukavemetinin tespiti için 23 °C'lik oda sıcaklığında çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinin gerçekleştirilmesinde 0,25 mm s⁻¹ 'lik sabit çene ve 5,9 x 10⁻³ s⁻¹ 'lik ortalama deformasyon hızı değerleri kullanılmıştır. Her bir alaşımdan üçer adet numune ile çekme testleri gerçekleştirilerek elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması ile nihai sonuçlar tespit edilmiştir. Her bir numuneye uygulanan sertlik testi ASTM E 10-17 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Brinell sertlik ölçme yöntemiyle 62,5 kg×f yük altında ve 2,5 mm çapında bilye uç kullanılarak numuneler üzerinde sekiz farklı bölgeden sertlik ölçümleri yapıldı. Bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak nihai sertlik değerleri tespit edilmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda elde edilen sertlik, kopma uzaması, akma ve çekme mukavemeti değerleri, Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Çekme test numunelerine ait mekanik özellikler

Alaşımlar	Durum	Brinell sertlik (HB10)	Çekme mukavemeti (N/mm ²)	Akma mukavemeti (N/mm ²)	Kopma uzaması (%)
Al-7Si-Mg	Dökülmüş	55	110	65	2,2
	T6 Isıl İşlemli	84	150	95	1,7
Al-7Si-0.6Mg	Dökülmüş	67	135	80	1,3
	T6 Isıl İşlemli	90	196	110	1,1

Dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumdaki Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının kırılma yüzeylerinin çekme doğrultusuna dik yöndeki kesitini gösteren SEM görüntüleri, Şekil 28'de verilmiştir. Kırılma yüzey görüntüleri incelendiğinde kırılma yüzeylerinin sırt, çukur ve klivaj düzlemlerinden oluştuğu ve karışık tipte kırılma (sünek ve gevrek) yüzeylerinin meydana geldiği görülmektedir. Kırılmaların dendrit sınırlarını takip ettiği ve sert primer Si, β ve π fazlarının etkisi ile transgranüler gevrek kırılma karakteristikleri sergilediği görülmüştür (Şekil 28). T6 ısıtıl işlemin alaşımların kopma uzamasındaki azalmaya bağlı olarak dökülmüş durumdaki alaşımlara göre daha gevrek kırılma özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 28 b ve d).



Şekil 28. Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarına ait kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri, (a) Al-7Si-Mg ısıt işlemsiz, (b) Al-7Si-Mg/T6 ısıt işlemlı, (c) Al-7Si-0.6Mg ısıt işlemsiz ve (d) Al-7Si-0.6Mg/T6 ısıt işlemlı

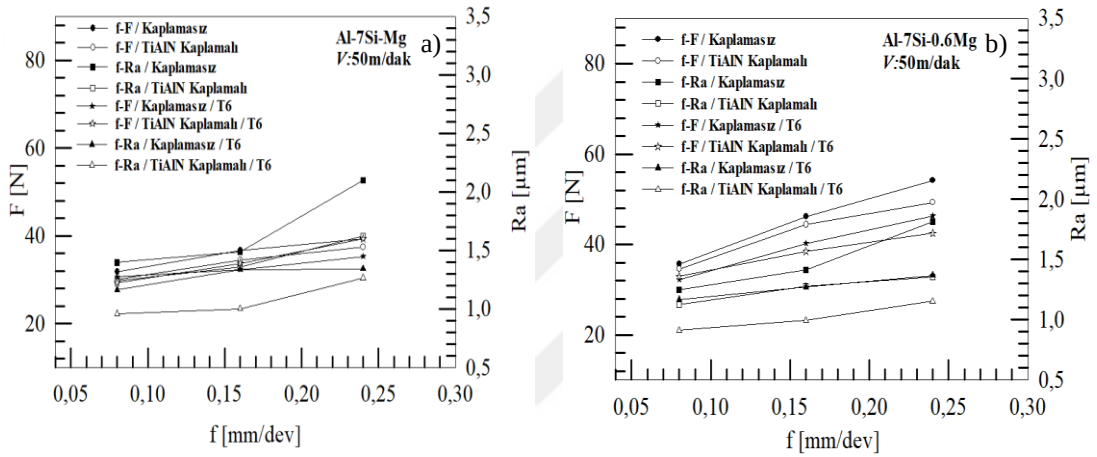
6.3. İşlenebilirlik Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış alaşımlara ait CNC dik işleme tezgahında frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İşleme operasyonları sırasında iki farklı takım, üçer farklı kesme hızı ve ilerleme ile sabit kesme derinliği değerleri kullanılarak kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü (Şekil 29-34) değerleri, tespit edilmiştir. Ayrıca, kesici takımlardaki YK ve YT oluşumları dijital mikroskop yardımı ile görüntülenmiştir.

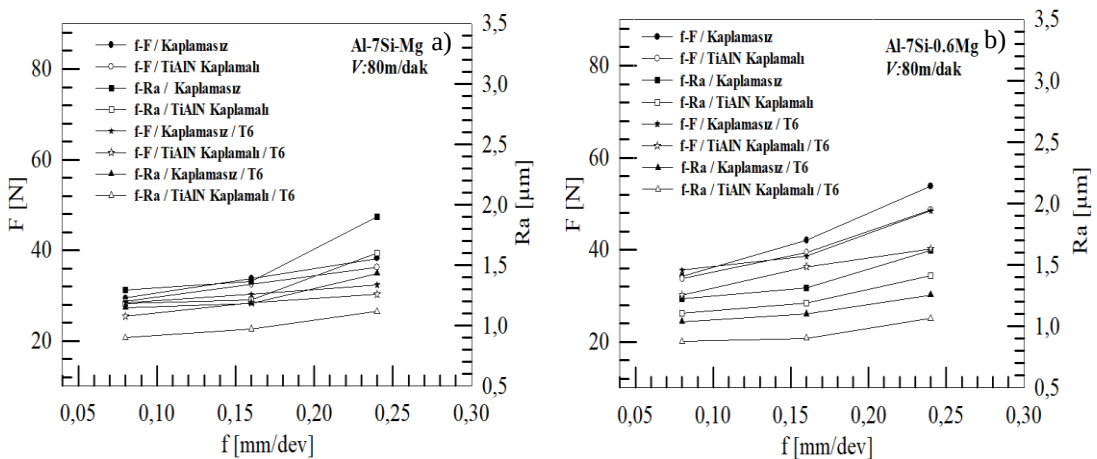
Sabit kesme hızı değerlerinde tüm deneylerde ilerlemenin artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. TiAlN kaplamalı karbür kesiciler ile kaplamasız kesicilere göre daha düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü belirlenmiştir. Alaşımlara T6 ısıt işlem uygulanması ile

kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve alaşımlar arasında Al-7Si-0.6Mg alaşımının daha düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sergilediği görülmüştür (Şekil 29-31).

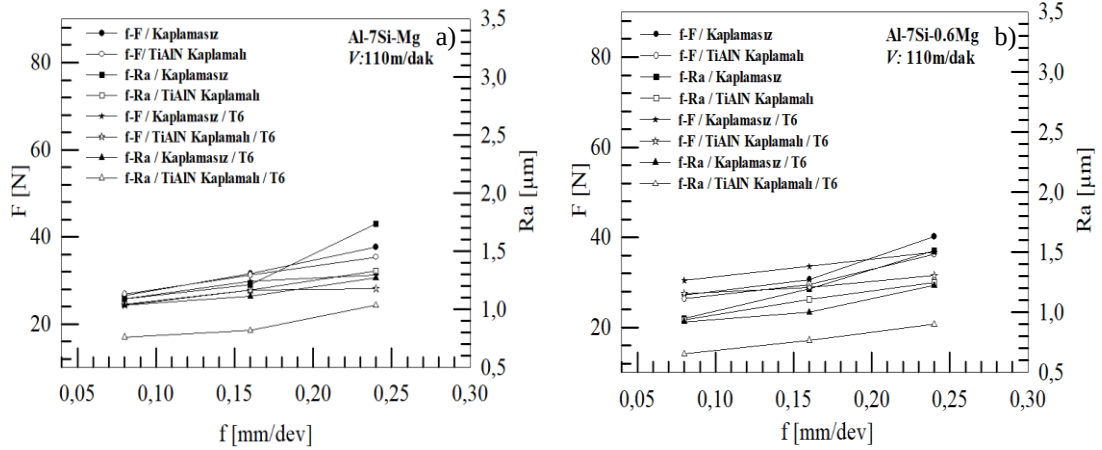
Sabit ilerleme değerlerinde tüm deneylerde kesme hızının artması ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Isıl işlem ile alaşımların işlenebilirlik özelliklerinin iyileştiği, Al-7Si-0.6Mg alaşımında Al-7Si-Mg alaşımına göre daha düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü ve TiAlN kaplamalı kesicilerin kaplamasız kesicilere göre daha yüksek işlenebilirlik performansı gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 32-34).



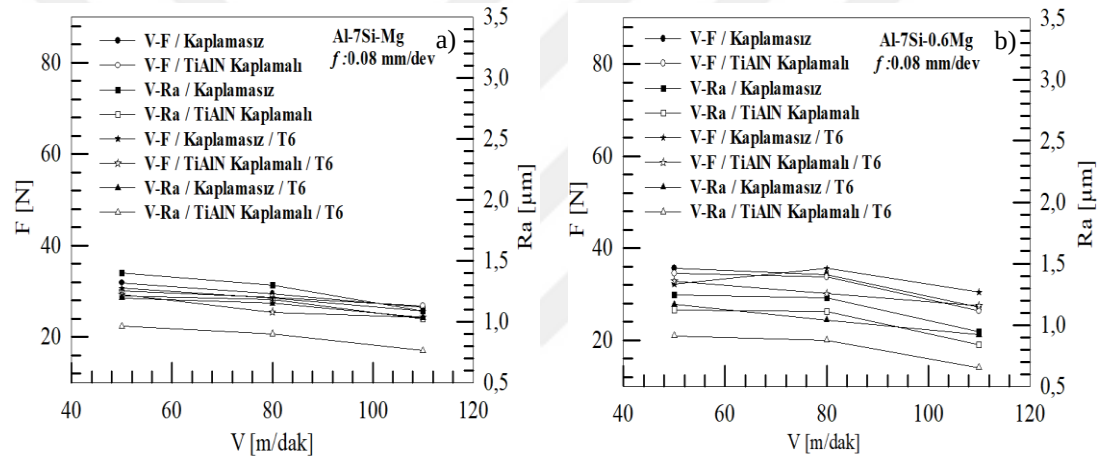
Şekil 29. Dökülmüş ve T6 ısıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımların, V:50 m/dak kesme hızında, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde f-F ve f-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg



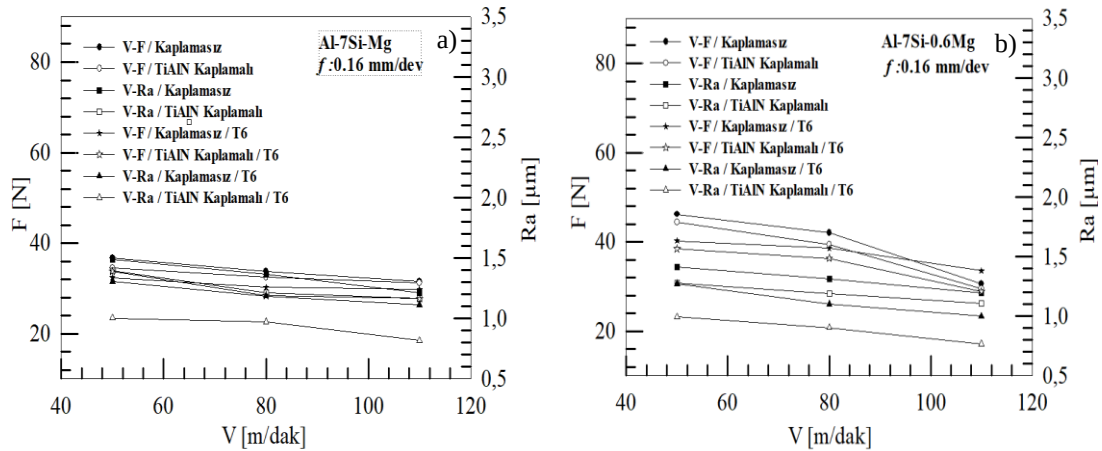
Şekil 30. Dökülmüş ve T6 ısıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımların V:80 m/dak kesme hızında, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde f-F ve f-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg



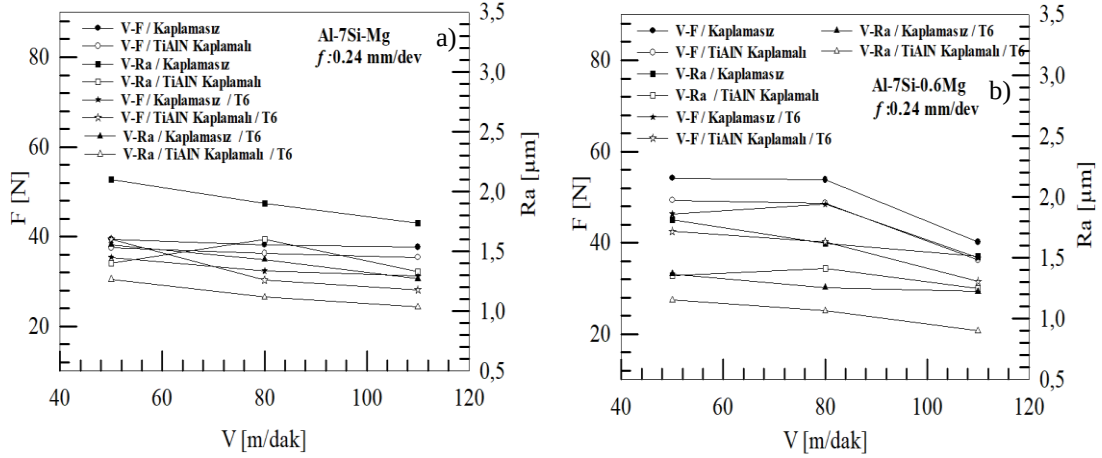
Şekil 31. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki alaşımların V:110 m/dak kesme hızında, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde f-F ve f-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg



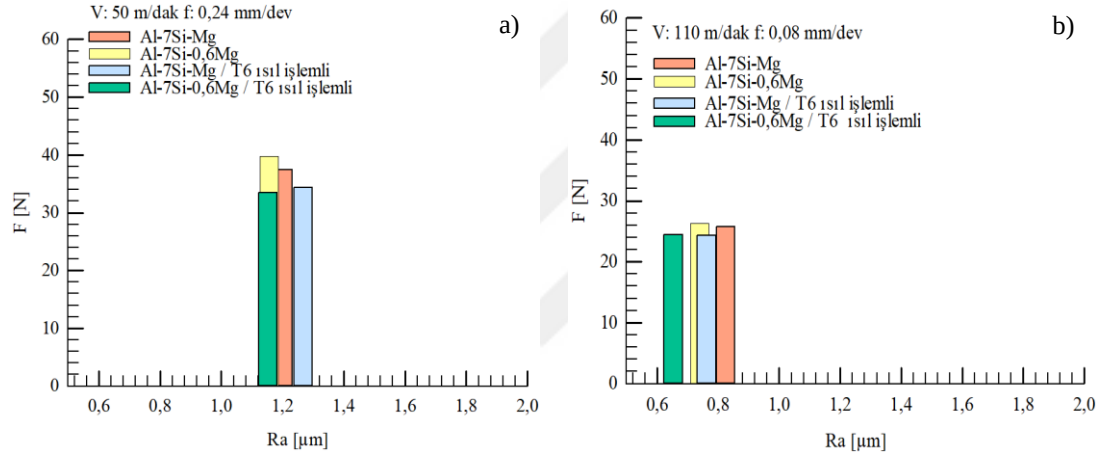
Şekil 32. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki alaşımların f:0,08 mm/dev ilerlemede, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde V-F ve V-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-Si-0.6Mg



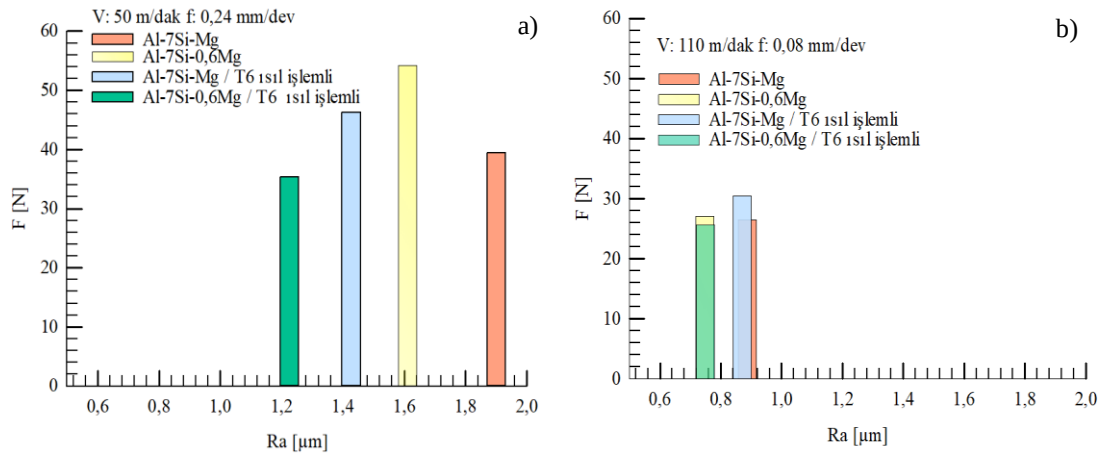
Şekil 33. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki alaşımların f:0,16 mm/dev ilerlemede, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde V-F ve V-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-Si-0.6Mg



Şekil 34. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki alaşımların $f:0,24$ mm/dev ilerlemede, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı takımlar ile frezelenmesinde V-F ve V-Ra ilişkisi, (a) Al-7Si-Mg ve (b) Al-7Si-0.6Mg

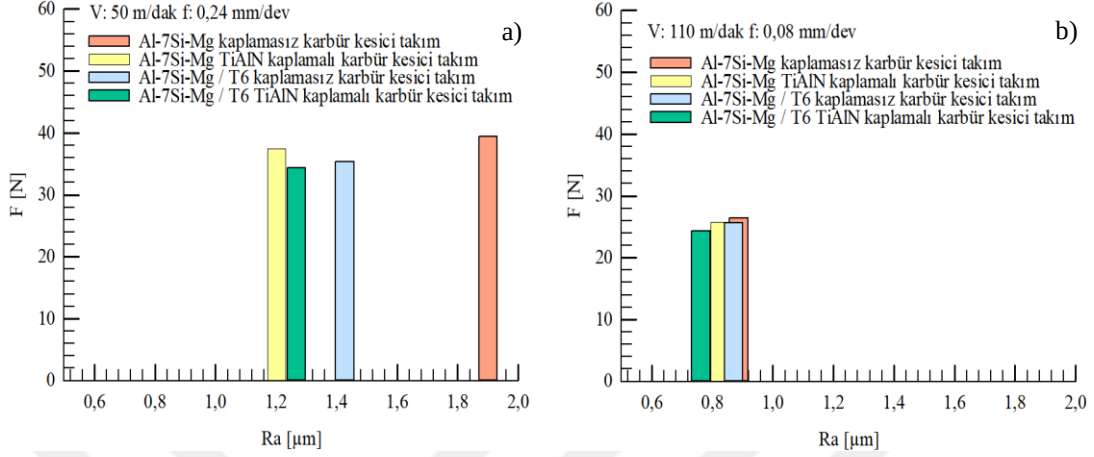


Şekil 35. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki alaşımların TiAlN kaplamalı karbür takımlar ve farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde F ve Ra'daki değişim, (a) V: 50 m/dak- $f: 0,24$ mm/dev ve (b) V:110 m/dak- $f: 0,08$ mm/dev

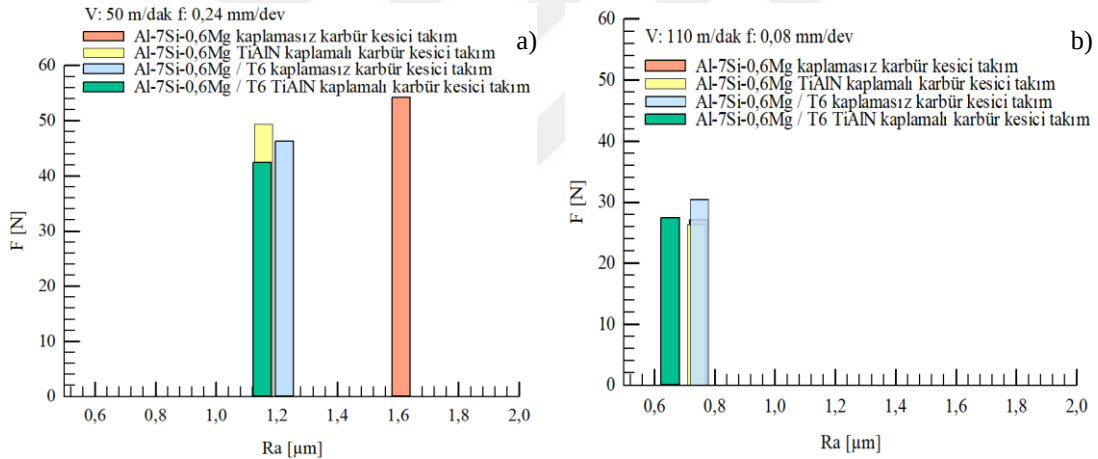


Şekil 36. Dökülmüş ve T6 ısıt işlem uygulanmış durumdaki alaşımların

kaplamasız karbür takımlar ve farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde F ve Ra'daki değişim, (a) V: 50 m/dak- f: 0,24 mm/dev ve (b) V:110 m/dak- f: 0,08 mm/dev



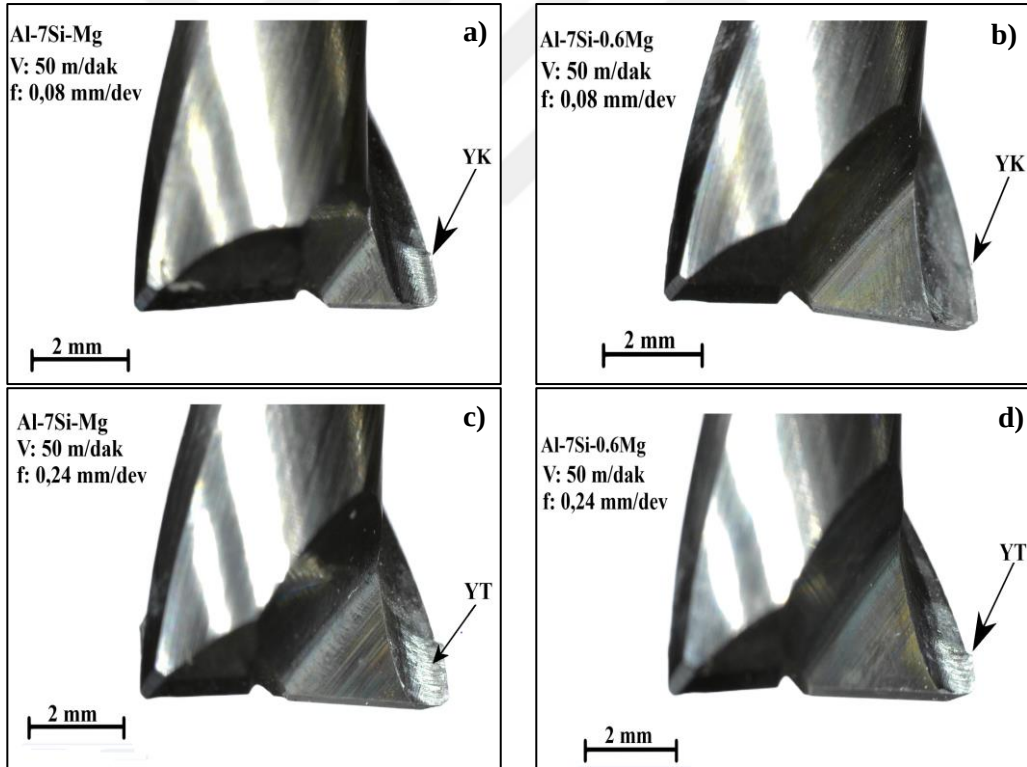
Şekil 37. Dökülmüş ve T6 ısıtılmış Al-7Si-Mg alaşımının kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür takımlar ve farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde F ve Ra'daki değişim, (a) V: 50 m/dak- f: 0,24 mm/dev ve (b) V: 10 m/dak- f: 0,08 mm/dev



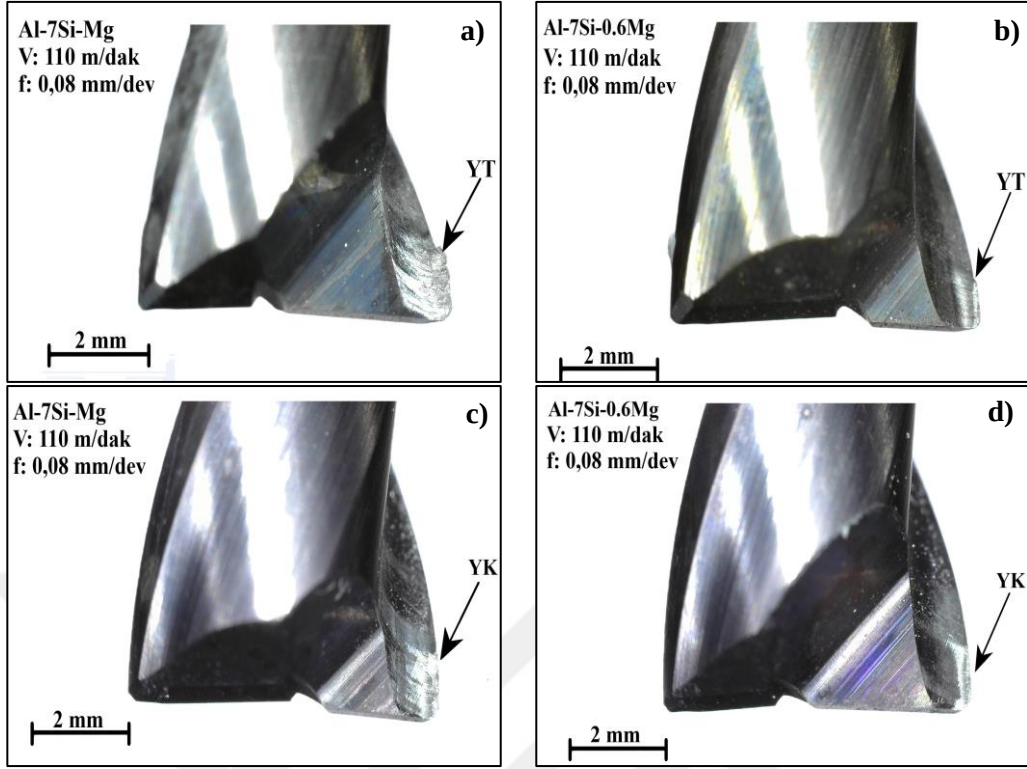
Şekil 38. Dökülmüş ve T6 ısıtılmış Al-7Si-0.6Mg alaşımının kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür takımlar ve farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde F ve Ra'daki değişim, (a) V: 50 m/dak- f: 0,24 mm/dev ve (b) V: 10 m/dak- f: 0,08 mm/dev

Alaşımların ısıtılmış, kesici takım ve kesme parametreleri bakımından kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını gösteren grafikler, Şekil 35-38'de verilmiştir. En düşük kesme hızı (V:50 m/dak)- en yüksek ilerleme (f:0,24mm/dev) ve en yüksek kesme (V:110 m/dak)- en düşük ilerleme (f:0,08mm/dev) değerleriyle yapılan deney sonuçları incelendiğinde en düşük kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü T6 ısıtılmış Al-7Si-0.6Mg alaşımının TiAlN kaplamalı takım ile frezelenmesinde ölçülmüştür (Şekil 35-38).

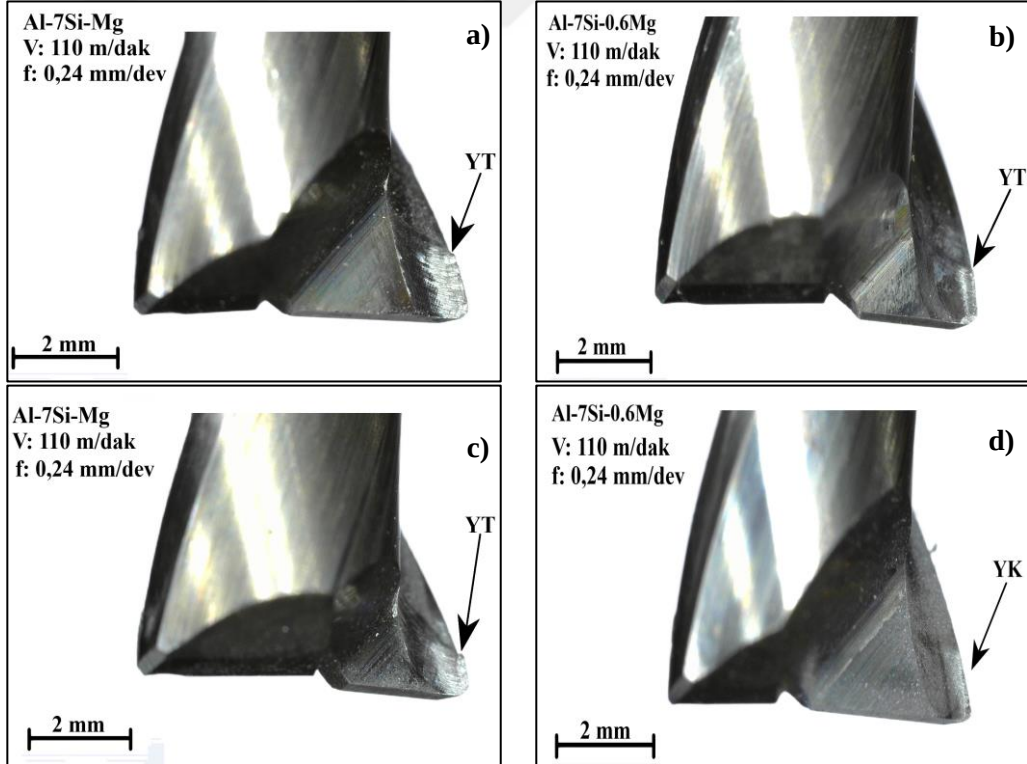
Frezeleme operasyonları sonucunda, kesici takım kesme kenarında YK ve YT oluşumu gözlenmiştir (Şekil 39-42). Aşınma durumları incelendiğinde, Al-7Si-0.6Mg alaşımının işlenmesinde tüm deneylerde YK ve YT oluşumunun Al-7Si-Mg alaşımına göre daha az olduğu tespit edilmiştir (Şekil 39-42). Sabit kesme hızında ilerlemenin artması ile kesici takımlarda meydana gelen YK ve YT oluşumunun arttığı (Şekil 39), sabit ilerlemede kesme hızının artması ile YK ve YT oluşumunun azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 39 ve 40). Dökülmüş durumundaki her iki alaşımın işlenmesinde kesici takımda YK ve YT oluşumunun T6 ısıtılmış durumundaki alaşımlara göre (Şekil 41 c ve d) daha fazla olduğu gözlenmiştir. TiAlN kaplamalı takımlarda aynı kesme şartlarında daha az YK ve YT oluşumu tespit edilmiştir (Şekil 40 ve 42). Tüm deneylerde en düşük YK ve YT oluşumunun T6 ısıtılmış Al-7Si-0.6Mg alaşımında en yüksek kesme hızı (110 m/dak) ve en düşük ilerleme (0,08 mm/dev)'de TiAlN kaplamalı karbür kesiciler ile elde edilmiştir (Şekil 46 d).



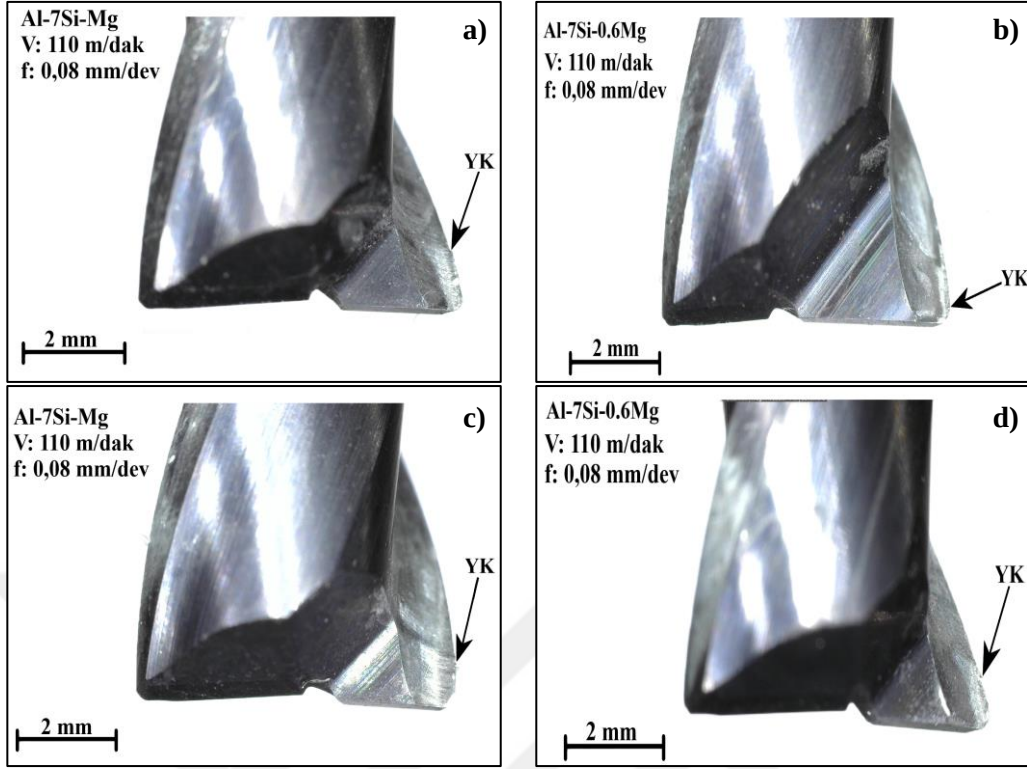
Şekil 39. V:50 m/dak ve f: 0,08 mm/dev parametrelerinde kaplamasız kesici takımında YK ve YT oluşumları, (a) Al-7Si-Mg, (b) Al-7Si-0.6Mg ve V:50 m/dak ve 0,24 mm/dev parametrelerinde kaplamasız kesici takımında YK ve YT oluşumları, (c) Al-7Si-Mg, (d) Al-7Si- 0.6Mg



Şekil 40. V:110 m/dak ve f : 0,08 mm/dev parametrelerinde kesici takımlarda YK ve YT oluşumları, (a) Kaplamasız/Al-7Si-Mg, (b) Kaplamasız/Al-7Si-0.6Mg, (c) TiAlN Kaplamalı/Al-7Si-Mg ve (d) TiAlN Kaplamalı/Al-7Si-0.6Mg



Şekil 41. V:110 m/dak ve f : 0,24 mm/dev parametrelerinde kaplamasız kesici takımında YK ve YT oluşumları, (a) Al-7Si-Mg, (b) Al-7Si-0.6Mg, (c) Al-7Si-Mg/T6 ve (d) Al-7Si-0.6Mg/T6



Şekil 42. V:110 m/dak ve f : 0,08 mm/dev parametrelerinde TiAlN kaplamalı kesici takımda YK ve YT oluşumları, (a) Al-7Si-Mg, (b) Al-7Si-0.6Mg, (c) Al-7Si-Mg/T6 ve (d) Al-7Si-0.6Mg/T6

7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

7.1. Mikroyapısal Özelliklerin Değerlendirilmesi

Dökülmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımlarının mikroyapısının ötektik Al-Si, primer Si parçacıkları, Al bakımından zengin α -Al, $\alpha+\beta$ (Mg_2Si) ötektik bir karışım, iğnemsiz β - Al_5FeSi , β -Al(Fe,Mn)Si fazları ile π -AlSiMgFe intermetalik fazlarından meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 20 ve 21) (Dybowski vd., 2015; Roy vd., 2017). Döküm esnasında alaşım içerisindeki α -Al dendritleri çekirdeklenerek büyümeye başlamakta ve içyapıda Al-Si ötektik reaksiyonu oluşmaktadır. Sıcaklığın daha da azalması ile Al, Si, β - Al_5FeSi ortaya çıkarak üçlü ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir. Daha sonraki aşamada β fazı yarı-peritektik reaksiyon yoluyla kısmen π -AlSiMgFe fazına dönüşmektedir. Diğer bir ifade ile yazı benzeri (Script-like) veya iğnemsiz (Rod-like) morfolojiye sahip olan π -Fe fazı Fe bakımından zengin yuvarlak (Rounded) intermetaliklere bölünmektedir. En son aşamada ise içyapıda Al, Si ve Mg_2Si 'yi oluşturan üçlü bir ötektik yapı meydana gelmektedir (Wu vd., 2019; Jana vd., 2010). Al-7Si-Mg alaşımına uygulanan T6 ısıtma işlemi ile alaşımda bulunan Si parçacıklarında şekil düzensizliği ortaya çıkmaya başlamakta ve bu parçacıklar küresel parçacıklara bölünmektedir. Bu aşamada ısıtma işlemi ile içyapıda bulunan Si parçacıkları parçalanmaktadır. Sonuç olarak Si tane boyutunun kritik hacimden daha büyük olmasına bağlı olarak tane kabalaşmasından dolayı Si parçacık tane boyutu artmaktadır (Alliche vd., 2021). Bu durumun oluşmasında alaşım içerisindeki Si elementinin belirli bir kısmının α -Al fazı içerisinde Mg elementi ile Mg_2Si (β) çökeltisi oluşturmalarının etkili olduğu düşünülmektedir. Isıtma işlemi ile alaşım yapısında bulunan Si tane boyutlarının çeşitliliğine bağlı olarak içyapıda parçalanma ve kabalaşma aşamaları aynı anda meydana gelebilmektedir. Ayrıca, ısıtma işlemi ile Mg_2Si fazının çözünmesine bağlı olarak içyapıda intermetalik β - Al_5FeSi , β -Al(Fe,Mn)Si, π -AlSiMgFe fazlarının çökeldiği, bu intermetalik fazların boyutunun azaldığı ve homojen bir dağılım ile küreselleştiği tespit edilmiştir (Şekil 22 ve 23) (Alliche vd., 2021; Santos vd., 2019; Möller, 2011). Dökülmüş durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının mikroyapısında Al-7Si-Mg alaşımında olduğu gibi α -Al dendritleri, primer Si, ötektik Al-Si, π -AlSiMgFe ve β - Al_5FeSi fazlarının olduğu (Şekil 24 ve 25) (Pastierovičová vd., 2022) ve T6 ısıtma işlemi ile Mg_2Si fazındaki çözünmeye bağlı olarak

Si parçacıklarının küreselleştiği belirlenmiştir (Şekil 26) (Bayraktar ve Demir, 2020). Ayrıca, intermetalik β -Al₅FeSi, π -Al₈Mg₃FeSi₆ ve π -AlSiMgFe fazlarının da ısıtılma işlemin etkisi ile çözünme sonucunda çökelediği ve homojen bir dağılım ile küreselleştiği görülmüştür (Şekil 27). Fe bakımından zengin fazların içyapı içerisindeki hacmi ve miktarı, alaşımdaki Mg oranına bağlı olarak değiştiği, ağırlıkça yaklaşık %4 oranında Mg içeren alaşımlarda Fe bakımından zengin iğne benzeri β -Al₅FeSi ve ağırlıkça yaklaşık %7 oranında Mg içeren alaşımlarda ise çin yazısı morfolojisine (Chinese-script morphology) sahip β -Al₉Fe₂Si₂ fazlarının baskın olduğu düşünülmektedir (Jana vd., 2010).

7.2. Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi

Al-7Si-Mg alaışımının mekanik özellikleri üzerinde alaşımda bulunan Mg içeriği ve uygulanan ısıtılma işlem prosesi önemli etkiye sahiptir (Wu vd., 2019). T6 ısıtılma işlem uygulanmış Al-7Si-Mg alaışımının dökülmüş durumdaki alaşıma göre sertlik, çekme ve akma mukavemeti sırasıyla %34,22; 36,67 ve 46,15 oranında artarken kopma uzamasının %22,73 oranında azaldığı gözlenmiştir (Tablo 8). T6 ısıtılma işlem uygulanmış Al-7Si-0.6Mg alaışımının dökülmüş durumdaki alaşıma göre sertlik, çekme ve akma mukavemeti sırasıyla %52,53; 45,18 ve 37,50 oranında artarken kopma uzamasının %15,38 oranında azaldığı gözlenmiştir (Tablo 8). Alaşımlara uygulanan T6 ısıtılma işlemi ile su verme işleminden sonra alaışımın içyapısındaki α -Al matrisi Si ve Mg ile doyurulduğundan çökelme sertleşmesi meydana gelmektedir. Diğer bir ifade ile alaışımın yapısındaki sert fazlar kristalleşerek dökülmüş durumdaki alaşıma göre daha homojen bir yapı ile küreselleşmekte ve daha kararlı bir yapı elde edilmektedir (Santos vd., 2020). Böylelikle, T6 ısıtılma işlem ile alaşımların sertlik, akma ve çekme mukavemetleri artarken kopma uzaması azalmıştır. Bu durumun içyapıda oluşan Mg₂Si fazı ile Fe bakımından zengin intermetaliklerin etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Wu vd., 2019; Yildirim ve Özyürek, 2013; Chen vd., 2017; Caceres vd., 1999; Thirugnanam vd., 2007).

Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımları bakımından değerlendirme yapıldığında alaışım içeriğindeki Mg oranının artması ile Al-7Si-0.6Mg alaışımında daha yüksek sertlik, akma ve çekme mukavemeti değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Bu durumun içyapıda α -Al içerisinde daha fazla çökeltilinin oluşumundan

ve dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir (Wu vd., 2019; Yang vd., 2015; Patakhham ve Limmaneevichitr, 2014).

7.3. Kırılma Yüzey Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Tüm alaşımlara uygulanan çekme deneyleri sonrasında numunelerin kırılma yüzeylerinin (Şekil 28) çukur, sırt ve klivaj düzlemlerinden oluştuğu görülmüştür. Diğer bir ifade ile sünek ve gevrek kırılma karakteristiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir. T6 ısıtıl işlem ile su verme sonrasında α -Al matrisinin Si ve Mg bakımından doyurulmasının sonucu olarak alaşımda oluşan çökelme sertleşmesinin etkisi ile içyapıda sert fazlar meydana gelmektedir. Isıl işlemin etkisine bağlı olarak kırılmanın primer Si, ötektik Al-Si, Mg_2Si fazlarının yanı sıra Fe bakımından zengin sert intermetalik fazların sınırlarını takip ederek gerçekleştiği düşünülmektedir. İç yapıdaki bu sert fazların klivaj düzlem oluşumunda etkili olduğu bilinmektedir (Bayraktar ve Demir, 2020). Diğer bir ifade ile Fe bakımından zengin π -Fe ve β -AlSiFe intermetaliklerinin tane sınırları boyunca kırılmanın devam ettiği (Şekil 28) (Dai vd., 2003) aynı zamanda üretilen alaşımlarda ısıl işlemin etkisine bağlı olarak azalan kopma uzamasının (Tablo 8), gevrek kırılma karakteristiğinin sergilenmesine neden olduğu düşünülmektedir (Bayraktar ve Demir, 2020; Bayraktar ve Afyon, 2020).

Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımları bakımından kırılma yüzeyleri değerlendirildiğinde, alaşım içeriğindeki Mg oranındaki artışa bağlı olarak Al-7Si-0.6Mg alaşımının daha düşük kopma uzamasına sahip olduğu ve bunun sonucunda da Al-7Si-Mg alaşımına göre daha gevrek kırılma karakteristiği sergilediği düşünülmektedir (Bayraktar ve Afyon, 2020).

7.4. İşlenebilirlik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Dökülmüş ve T6 ısıl işlemlili durumdaki Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının kaplamasız ve PVD-TiAlN kaplamalı karbür parmak frezeler ile frezelenmesinde oluşan kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini gösteren grafikler, Şekil 29-34'de verilmiştir. Dökülmüş ve T6 ısıl işlemlili durumdaki Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının sabit kesme hızı ile frezelenmesinde ilerlemenin artmasıyla kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir (Şekil 29-31). Kesme kuvvetindeki artış, kesme esnasında birim zamanda kaldırılan talaş hacminin

ve plastik deformasyon için gerekli gücün artmasından kaynaklanmaktadır (Bayraktar ve Demir, 2020; Hoang, vd. 2019). Yüzey pürüzlülüğündeki artışın $Ra=f^2/32r$ (Ra : Ortalama yüzey pürüzlülüğü, f : ilerleme ve r : kesici uç yarıçapı) eşitliğinde de belirtildiği gibi ilerlemedeki artıştan kaynaklandığı görülmektedir (Özel vd., 2005; Pehlivan, 2021). Sabit ilerleme değerlerinde kesme hızındaki artış ile kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür (Şekil 32-34). Kesme hızındaki artış, kesme esnasında birincil deformasyon bölgesinde takım/talaş arayüzey sıcaklığını arttırmakta ve bu sıcaklık artışına paralel olarak işlenen malzemenin akma mukavemetini düşürerek plastik deformasyon oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Machado vd., 2022; Okay vd.,2021; Acır vd., 2009; Bayraktar vd., 2020) Kesme hızındaki artışa bağlı olarak takım/talaş temas yüzey alanı azalmaktadır (Kumar vd., 2014). Azalan temas alanı, Al esaslı alaşımların talaşlı imalatında yüksek kesme hızlarının etkisi ile kesme esnasında yüksek kesme sıcaklıkları oluşmaktadır. Kesme bölgesinde oluşan yüksek kesme sıcaklıkları, talaşın plastik deformasyonunu kolaylaştırmaktadır. Plastik deformasyonun azalan kesme sıcaklıkları ile zorlaşması durumunda kesici takım ile temas durumundaki alaşım malzemesi, kesici kenara adhezyon aşınma mekanizmasının etkisi ile termo-mekanik yüklerden dolayı kaynaklanmakta ve başlangıçta YK ve daha sonra YK'nın artması ile YT oluşumuna sebep olmaktadır (Kumar vd., 2014; Sanchez ve Marcos, 1994; Gökkaya ve Nalbant, 2007). YT'nin kalınlığı kesme işlemi devam ettikçe belirli bir kritik kalınlığa kadar artabilmektedir. Bu aşamadan sonra YT plastik olarak deforme olmaya başlamakta ve takım kesme kenar yüzeyine doğru uzayabilmektedir. Bu nedenle, ilk aşamada oluşan YK kesici takım yüzeyinde alt katmanda kalmaktadır. YT oluşumundaki artışa bağlı olarak YK'nın üzeri YT tarafından örtülebilmektedir (Şekil 39-42). Bunun sonucunda kesici takımda YK ve YT oluşumları, kesici takımın geometrik yapısının bozulmasına neden olarak iş parçası yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve boyutsal toleransların bozulmasına neden olmaktadır (Gökkaya ve Nalbant, 2007).

T6 ısıt işlem görmüş durumudaki Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının frezelenmesinde dökülmüş durumdaki alaşımlara göre kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı ve işlenebilirlik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür (Şekil 42 d). Bu durumun, ısıt işlemin etkisi ile alaşımlarda sertlik değerinin artması ve kopma uzamasının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, ısıt işlem

ile içyapıda bulunan α -Al matrisi, Si ve Mg ile doyurulduğundan çökelme sertleşmesi meydana gelmektedir. Böylelikle alaşımın yapısındaki sert fazlar, parçalanarak kristalleşmekte ve dökülmüş durumdaki alaşıma göre daha homojen bir yapı elde edilmektedir. İşleme esnasında içyapıdaki sert fazlar, kırılmayı kolaylaştırarak kesme kuvveti ve işlenmiş yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ve böylelikle, alaşımların işlenebilirlik özelliklerini iyileştirdiği düşünülmektedir (Bayraktar ve Demir, 2020; Demir vd., 2009).

Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlar arasında işlenebilirlik özellikleri karşılaştırıldığında, dökülmüş ve T6 ısıtılmış her iki durumda da Al-7Si-0.6Mg alaşımının frezelenmesinde daha az kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, YK ve YT'nin olduğu gözlenmiştir. Bu durumun alaşımın içyapısında α -Al içerisinde Al-7Si-Mg alaşımına göre daha fazla çökelti oluşumundan ve Mg içeriğinin artmasına bağlı olarak kopma uzamasındaki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylelikle, kesme esnasında talaşın kolay kırılması ile kesici takıma gelen kuvvetlerin, işlenmiş yüzey pürüzlülüğünün, YK ve YT oluşumunun Al-7Si-Mg alaşımına göre daha az olmasına sebep olduğu düşünülmektedir (Bayraktar vd., 2020; Basavakumar vd., 2007; Froehlich vd., 2007).

Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarını frezelenmesinde kaplamasız ve PVD-TiAlN kaplamalı karbür parmak frezelerin kesme performansları bakımından değerlendirme yapıldığında, aynı kesme koşulları altında TiAlN kaplamalı karbür kesicilerin daha düşük kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, YK ve YT oluşumu sergilediği gözlenmiştir (Şekil 41 ve 42). Bunun nedeni, TiAlN kaplamanın yüksek oksidasyon direnci ve düşük termal iletkenlik özelliklerine (Endrino vd., 2006) sahip olmasının sonucu olarak kesici takım malzemesi olan sement karbür alt tabaka ile iş parçası malzemesi arasındaki yüzeysel plastik deformasyon ve difüzyon sürecini baskılayan daha uzun takım ömrü ile açıklanabilir (Akhavan vd., 2021; Barooah vd., 2021). Ayrıca, kaplamanın sahip olduğu sürtünme önleyici etkisinin kesme bölgesinde malzeme deformasyon yeteneğini geliştirdiği düşünülmektedir. Bu durum, TiAlN kaplı takımda yüksek mekanik özelliklerinin etkisinden dolayı aşınma direncinin daha iyi olduğunu göstermektedir (Akhavan vd., 2021; Uddin vd., 2021; Lacalle vd., 2001; Shareef vd., 2005).

Her iki alaşımin frezelenmesinde kesici takımlarda YK ve YT oluşumunun kesme hızının artması ile azaldığı görülmüştür (Şekil 39 ve 40). Bu durumun kesme hızındaki artış ile kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın artmasına bağlı olarak plastik deformasyon oluşumunun kolaylaşmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Diğer bir ifade ile bu durum, aşırı deformasyona uğrayan yapının yeniden kristalleşmesi ve sıcaklığın etkisi ile alaşım malzemesinin yumuşamasına atfedilebilir (Sekmen vd., 2015; Ciftci vd., 2004; Hekimoğlu ve Bayraktar, 2022). İlerleme parametresinin artması ile YK ve YT oluşumunun arttığı gözlenmiştir (Şekil 39 b ve d). Bu durum, yüksek basınç ve kesme kuvvetlerine neden olan birim zamanda daha yüksek hacimde talaş kaldırma oranı ve malzeme deformasyonunun etkisi ile takım/talaş arayüzey temas alanının artmasına atfedilebilir (Tash vd., 2006; Najiha vd., 2015; Atlati vd., 2015; Acır vd., 2009). TiAlN kaplamalı kesici takımlar ile yapılan deneylerde, kaplamasız karbür kesicilere göre daha az YK ve YT'nin oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 42). Bu durumun yukarıda da bahsedildiği üzere kaplama malzemesinin kesici takım/iş parçası malzemesi arasındaki yüzeysel plastik deformasyon ve difüzyon sürecini baskılama özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, kaplamasız kesici takımlara göre daha düşük sürtünme katsayısının etkisi ile alaşımın yapısında bulunan sert Si parçacıklarının yanı sıra intermetalik fazların yapışmaya neden olan sünek α -Al fazı ile birlikte kesme bölgesinden daha kolay bir şekilde transfer edilmiş olabilir. Sabit kesme şartlarında her iki kesici takımda da en az YK ve YT oluşumunun Al-7Si-0.6Mg alaşımının frezelenmesi esnasında oluştuğu görülmüştür (Şekil 40). Ayrıca, T6 ısıtılma işleminin YK ve YT oluşumunu azaltarak alaşımların işlenebilirlik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu durum, incelenen alaşımların içyapısında Mg içeriğinin artmasına ve azalan kopma uzamasına atfedilebilir. Literatürde yapılan çalışmalarda, işlenen malzemelerin süneklik özelliğinin artmasına bağlı olarak kesici takım kesme kenarında YT oluşumunun arttığı ve bunun da işlenmiş yüzeylerin kalitesini bozduğu ifade edilmektedir (Demir ve Gündüz, 2009; Yıldırım vd., 2019; Okay vd., 2021).

Kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilen Al-Si esaslı alaşımlar, otomotiv, havacılık-uzay, makine ve elektronik sektörlerinde yüksek özgül mukavemet ve hafiflik özelliklerinden dolayı yoğunlukla kullanılmaktadır. Özellikle, bu alaşımların otomotiv sektöründe kullanımı ile araçların ağırlığının azaltılmasına bağlı olarak yakıt

tasarrufu sağlanabilmekte ve CO₂ emisyonları azaltılabilmektedir. Endüstride seri imalata yönelik düşük maliyette üretim için döküm yöntemleri, bu alaşımların üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Döküm yöntemleri ile üretilen iş parçalarının mekanik sistemlerde doğrudan kullanılamamasından dolayı talaşlı imalat operasyonlarının uygulanması gerekmektedir. Böylelikle, geometrik ve boyutsal toleranslar sağlanarak işparçalarının mekanik sistemlerdeki servis ömürleri geliştirilebilmektedir. Bu amaçla bu çalışmada, kokil kalıba döküm tekniği ile üretilen Al-7Si-Mg ve Al-7Si-0.6Mg alaşımlarının yapısal, mekanik ve frezeleme operasyonunda işlenebilirlik özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, aşağıda verilmiştir.

- Dökülmüş durumdaki Al-7Si-Mg alaşımın iç yapısının α -Al, primer Si, ötektik Al-Si, Mg₂Si, β -Al(Fe, Mn)Si, β -Al₅FeSi ve π -AlSiMgFe fazlarından, Al-7Si-0.6Mg alaşımın iç yapısında ise mevcut fazlara ilave olarak β -Al₈Mg₃FeSi₆ fazının oluştuğu görülmüştür.
- Her iki alaşıma uygulanan T6 ısıt işlem ile içyapıda bulunan fazların küreselleştiği ve bu fazların içyapıda homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir.
- Al-7Si-Mg alaşımına uygulanan ısıt işlem ile sertlik, akma ve çekme mukavemeti sırasıyla %34,22, 36,67 ve 46,15 oranında artarken, kopma uzamasının %22,73 oranında azaldığı gözlenmiştir.
- Al-7Si-0.6Mg alaşımına uygulanan ısıt işlem ile dökülmüş durumdaki alaşıma göre sertlik, akma ve çekme mukavemeti sırasıyla %52,53, 45,18 ve 37,50 oranında artarken, kopma uzaması %15,38 oranında azalmıştır. Al-7Si-0.6Mg alaşımın Al-7Si-Mg alaşımına göre daha iyi mekanik özellikler sergilediği gözlenmiştir.
- Çekme testleri sonucunda her iki alaşımda oluşan kırılma yüzeylerinin karışık tipte kırılma (sünek ve gevrek) olduğu gözlenmiştir. T6 ısıt işlem ile alaşımların kopma uzamasındaki azalmaya bağlı olarak daha gevrek kırılma karakteristiklerinin sergilendiği belirlenmiştir.
- Her iki alaşımın frezelenmesinde kesme hızının artması ile kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, YK ve YT oluşumu azalırken, ilerleme oranının artması ile artmıştır.

- Al-7Si-0.6Mg alaşımının sabit kesme koşulları altında frezelenmesinde Al-7Si-Mg alaşımına göre daha düşük kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, YK ve YT oluşmuştur.
- T6 ısııl işlemin alaşımların işlenebilirlik özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir.
- TiAlN kaplamalı karbür parmak frezelerin kaplamasız karbür parmak frezelere göre daha iyi işlenebilirlik performansı sergilediği belirlenmiştir.
- İdeal kesme koşullarının T6 ısııl işlemli durumdaki Al-7Si-0.6Mg alaşımının en yüksek kesme hızı (110 m/dak) ve en düşük ilerleme (0,08 mm/dev) parametrelerinde TiAlN kaplamalı karbür parmak frezeler ile elde edildiği grlmştir.

Yapılan alışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre bundan sonraki çalışmalarda, alaşımların farklı bağımsız değişken değerleri kullanarak tribolojik özellikleri araştırılabilir. Farklı kesici takım kaplama malzemeleri (TiN, TiCN, AlTiN vb.), farklı soğutma teknikleri ve nano boyutlu katı yağlayıcı soğutma sıvıları (MoS₂, Al₂O₃, grafit vb.) kullanılarak işlenebilirlik özellikleri incelenebilir. Ayrıca, alaşımların işlenmesinde optimum bağımsız değişkenlerin tespitine yönelik Taguchi, yüzey yanıt metodu, yapay zekâ ve çok kriterli karar verme teknikleri gibi istatistiksel yöntemler kullanılabilir.

KAYNAKÇA

- Aamir, M, Giasin, K, Tolouei-Rad, M, and Vafadar, A, 2020. A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 12484-12500.
- Acır, A, Turgut, Y, Übeyli, M, Günay, M, and Şeker, U 2009. A study on the cutting force in milling of boron carbide particle reinforced aluminium composite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 16(3), 187-196.
- ACS (American Chemical Society) National historic chemical landmarks 2001. *Hall Process: Production and Commercialization of Aluminum*. Pittsburgh, Pennsylvania.
- Akgün, M, Özlü, B, Demir, H, 2017. Döküm yöntemiyle üretilmiş Al-12Si alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu. 1st International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Proceedings (SITP), Tokat-Turkey, 344-348.
- Akhavan, F A, Sharif, S, and Idris, M H, 2021. Performance and wear mechanisms of uncoated, TiAlN, and AlTiN-coated carbide tools in high-speed drilling of Al-Si alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 2671-2684.
- Akkurt, M, 1992. Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgahları, Birsen Yayınevi, 2, 356.
- Akyüz, B, Şenaysoy, S, 2014. Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma işleminin mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerindeki etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 1-9.
- Alexopoulos, N D, and Stylianou, A, 2011. Impact mechanical behaviour of Al-7Si-Mg (A357) cast aluminum alloy. The effect of artificial aging. *Materials Science and Engineering: A*, 528(19-20), 6303-6312.
- Alkahtani, S A, Elgallad, E M, Tash, M M, Samuel, A M, Samuel, F H, 2016. Effect of rare earth metals on the microstructure of Al-Si based alloys. *Materials*, 9, 45-51.
- Alliche, M A, Djebara, A, Zedan, Y, and Songmene, V, 2021. Machinability of A356 cast alloys under the effect of artificial aging treatment and lubrication modes. *JMST Advances*, 3(2), 19-33.
- Alparslan, C, and Bayraktar, Ş, 2021. Tool wear in machining of wrought and cast aluminium alloys: literature review. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(3), 34-46.

- Al Saadi, H I A, ve Tunay, R F, 2017. Suni yaşlandırma işleminin alüminyum alaşımının sertliği üzerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5 (3): 525-532.
- Apelian, D, 2009. Aluminum cast alloys: enabling tools for improved performance. North American Die Casting Association, New York.
- Arrabal, R, Mingo B, Pardo, A, Mohedano, M, Matykina, E, and Rodríguez, I, 2013. Pitting corrosion of rheocast A356 aluminium alloy in 3.5 wt.% NaCl solution. *Corrosion Science*, 73, 342-355.
- ASM Handbook, 1992. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, 2, 448.
- ASM Handbook, 1991. Heat treating of aluminum alloys. Volume 4: Heat Treating, ASM International, Ohio, 841-879.
- ASM International, 2006, ASM Handbook, alloy phase diagrams. ASM International, USA, 3, 344.
- Atlati, S, Haddag, B, Nouari, M, Moufki, A, 2015. Effect of the local friction and contact nature on the built-up edge formation process in machining ductile Metals. *Tribology International*, 90, 217-227.
- Atxaga, G, Pelayo, A, and Irisarri, A M, 2001. Effect of microstructure on fatigue behaviour of cast Al-7Si-Mg alloy. *Materials science and technology*, 17(4), 446-450.
- Bakavos, D, and Prangnell, P B, 2010. Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet. *Materials Science and Engineering*, 527: 6320-6334.
- Baker, H, 1992. Introduction to alloy phase diagrams. Alloy phase diagrams, 6th ed. ASM Metals Handbook, Ohio: ASM International, 3, 25-383.
- Barakat, H, Zedan, Y, Samuel, A M, Doty, H W, Valtierra, S, and Samuel, F H, 2019. Effect of metallurgical parameters on the drilling and tapping characteristics of aluminum cast alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1), 1357-1370.
- Barooah, R K, Arif, A F M, Paiva, J M, Oomen-Hurst, S, Veldhuis, S C, 2020. Wear of form taps in threading of Al-Si alloy parts: Mechanisms And Measurements. *Wear*, 442 (203153).
- Barooah, R K, Paiva, J M, Arif, A F M, Rawal, S, Bose, B, and Veldhuis, S C, 2021. Investigation on wear mechanisms of PVD coatings for form taps in threading of Al-Si alloy. *Wear*, 464, 203528.

- Basavakumar, K G, Mukunda, P G, and Chakraborty, M, 2007. Influence of melt treatments and turning inserts on cutting force and surface integrity in turning of Al-12Si and Al-12Si-3Cu cast alloys. *Surface and Coatings Technology*, 201(8), 4757-4766.
- Başer, T A, 2013. Alüminyum alaşımları ve otomotiv edüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53 (635): 51-58.
- Bayraktar, Ş, and Afyon, F, 2020. Machinability properties of Al-7Si, Al-7Si-4Zn and Al-7Si-4Zn-3Cu alloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(4), 1-12.
- Bayraktar, Ş, Çamkerten, Ç, ve Salihoğlu, N 2020. Bakır ve Silisyum İlavelerinin Al-25Zn Alaşımının CVD Al₂O₃ Kaplamalı Takımlarla Tornalanmasında İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(1), 79-93.
- Bayraktar, Ş, ve Demir, O, 2020. Processing of T6 heat-treated Al-12Si-0.6 Mg alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 35, 354-362.
- Beroual, S, Boumerzoug, Z, Paillard, P, and Borjon-Piron, Y, 2019. Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 784, 1026-1035.
- Bhowmick, S, Banerji, A, Alpas, A T, 2015. Tribological behavior of Al-6.5%-12%-18.5% Si Alloys during machining using CVD diamond and DLC coated tools. *Surface Coating Technologies*, 284, 353-364.
- Bican, O, ve Pul, M, 2021. Farklı alüminyum alaşımlarının tornalanmasında alaşım cinsinin kesici takım davranışı, talaş biçimi ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 9-17.
- Boothroyd, G, 1981. *Fundamentals of metal machining and machine tools international student ed.* 5th Printing, McGraw-Hill, ISBN 0-07-085057- 7, New York.
- Brick, B M, Gordon, R B, Philips, A, 1965. *Structure and properties of alloy.* Third Edition, McGraw-Hill Book Company, 210-430.
- Brooks, C R, 1991. *Heat Treating of aluminum alloys.* ASM Handbook, ASM International, Ohio, USA.
- Caceres, C H, Davidson, C J, Griffiths, J R, and Wang, Q G, 1999. The effect of Mg on the microstructure and mechanical behavior of Al-Si-Mg casting alloys. *Metallurgical and materials transactions A*, 30, 2611-2618.

- Chauhan, K P S, 2017. Influence of heat treatment on the mechanical properties of aluminium alloys (6xxx series): a literature review. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 6 (3), 386-389.
- Chen, R, Xu, Q, Guo, H, Xia, Z, Wu, Q, and Liu, B, 2017. Correlation of solidification microstructure refining scale, Mg composition and heat treatment conditions with mechanical properties in Al-7Si-Mg cast aluminum alloys. *Material Science Engineering; A*, 685, 391–402.
- Chen, Y C, Bakavos, D, Gholinia, A, and Prangnell, P B, 2012. HAZ development and accelerated post-weld natural ageing in ultrasonic spot welding aluminium 6111-T4 automotive sheet. *Acta Materialia*, 60, 2816–2828.
- Ciftci, I, Turker, M, Seker, U, 2004. Evaluation of Tool Wear When Machining Sicp-Reinforced Al-2014 Alloy Matrix Composites. *Materials and Design*, 25, 251-255.
- Costa, T. A., Dias, M., Gomes, L. G., Rocha, O. L., and Garcia, A. 2016. Effect of solution time in T6 heat treatment on microstructure and hardness of a directionally solidified Al–Si–Cu alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 683, 485-494.
- Çakanyıldırım, Ç, ve Gürü, M, 2021. Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çevreye etkisi ve uygulama alanları. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 585-592.
- Çetin, A, 2017. Alüminyum döküm alaşımları. *Dökümcünün el kitabı Serisi-04, Dökümhane Akademi Projesi*.
- Dahle, A K, Lee, Y C, Nave, M D, Schaffer, P L, and StJohn, D H, 2001. Development of the as-cast microstructure in magnesium–aluminium alloys. *Journal of Light Metals*, 1(1), 61-72.
- Dai, X, Yang, X, Campbell, J, Wood, J, 2003. Effect of runner system design on the mechanical strength of Al-7Si-Mg alloy casting. *Materials Science Engineering A*, 315-325.
- Das, S, Swain, B P, 2018. Investigation of titanium aluminium nitride (TiAlN): A Review. In: Kalam, A, Das, S, Sharma, K, (eds) *Advances in Electronics, Communication and Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 443. Springer, Singapore.
- Dağdelen, E, Ulus, A, 2016. Aluminum sheet production: heat treatment of aluminium and temper designations of aluminium alloys. *18th International Metallurgy and Materials Congress (IMMC 2016)*, İstanbul.
- Demir, H, and Gündüz, S, 2009. The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. *Materials and Design*, 30(5), 1480-1483.

- Dos Santos, G R, Da Costa, D D, Amorim, F L, and Torres, R D, 2007. Characterization of DLC thin film and evaluation of machining forces using coated inserts in turning of Al–Si alloys. *Surface and Coatings Technology*, 202(4-7), 1029-1033.
- Dybowski, B, Adamczyk-Cieślak, B, Rodak, K, Bednarczyk, I, Kielbus, A, and Mizera, J, 2015. The microstructure of AlSi7Mg alloy in as cast condition. In *Solid State Phenomena*, Trans Tech Publications, 229, 3-10.
- Edwards, G A, Stiller, K, Dunlop, G, Couper, M J, 1996. The Composition of Fine-scale Precipitates in Al-Mg-Si Alloys. In *Materials Science Forum*, 217, 713–718.
- Elmadagli, M, Perry, T, Alpas, A T, 2007. A parametric study of the relationship between microstructure and wear resistance of Al–Si alloys. *Wear*, 262, 1-2, 79-92.
- Endrino, J L, Fox-Rabinovich, G S, and Gey, C 2006. Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 200(24), 6840-6845.
- Elsharkawi, E A, Samuel, E, Samuel, A M, and Samuel, F H, 2010. Effects of Mg, Fe, Be additions and solution heat treatment on the π -AlMgFeSi iron intermetallic phase in Al–7Si–Mg alloys. *Journal of materials science*, 45(6), 1528-1539.
- Eser, E G, 2020. Investigation Of Aging Parameters in T6 Heat Treatment of Aluminum Alloys. *Surface and Coatings Technology*, 205(8-12), 1032-1053.
- Eshaghi, A, Ghasemi, H M, and Rassizadehghani, J, 2011. Effect of heat treatment on microstructure and wear behavior of Al–Si alloys with various iron contents. *Materials and Design*, 32(3), 1520-1525.
- Es-Said, O S, Lee, D, Pfost, W D, Thompson, D L, Patterson, M, Foyos, J, and Marloth, R, 2002. Alternative heat treatments for A357-T6 aluminum alloy. *Engineering Failure Analysis*, 9(1), 99-107.
- Fayomi, O S I, Popoola, A P I, and Udoeye N E, 2017. Effect of alloying element on the integrity and functionality of aluminium-based alloy. *Mechanical Behavior and Applications*, 13, 243-259.
- Fernandes, G H, Lopes, G H, Barbosa L M, Martins, P S, and Machado, Á R, 2021. Wear mechanisms of diamond-like carbon coated tools in tapping of AA6351 T6 aluminium alloy. *Procedia Manufacturing*, 53, 293-298.
- Florea, R S, Solanki, K N, Bammann, D J, Baird, J C, Jordon, J B, Castanier, M P, 2012. Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation. *Materials and Design*, 34, 624–630.

- Froehlich, A R, Jacques, R C, Strohaecker, T R, Mombru, R, 2007. The correlation of machinability and microstrutural characteristics of different extruded aluminum alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16, 784-791
- Fu, G, Jiang, L, Liu, J, Wang, Y, 2006. Fabrication and properties of Al matrix composites strengthened by in situ alumina particulates, *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 13 (3), 263-266.
- Gall, K, Yang, N, Horstemeyer, M, McDowell, D L, and Fan, J, 2000. The influence of modified intermetallics and Si particles on fatigue crack paths in a cast A356 Al alloy. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 23(2), 159-172.
- Gangil, N, Siddiquee, A N, and Maheshwari, S, 2017. Aluminium based in-situ composite fabrication through friction stir processing: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 715, 91-104.
- Geçkinli, L F, 2002. Alüminyum ve alaşımlarının ısıt işlemleri, 2. Isıt İşlem Sempozyumu, İstanbul Türkiye Şubat 7(8), 13-17.
- Gezgin, A, 2007. Prizmatik parçaların frezelenmesi esnasında, kesici uç sayısının takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 112, Ankara.
- Gilbert K J, Roo, E L, 2004. Aluminum alloy castings properties, processes, and applications. ASM International.
- Gómez-Parra, A, Álvarez-Alcón, M, Salguero, J, Batista, M, Marcos, M, 2013. Analysis of the evolution of the built-up edge and built-up layer formation mechanisms in the dry turning of aeronautical aluminium alloys. *Wear*, 302(1–2), 1209–1218.
- Górny, Z, Kluska-Nawarecka, S, Czekaj, E, Wilk-Kołodziejczyk, D, and Saja, K, 2014. Heuristic Model of the Mechanical Properties of a Hypoeutectic EN AC-42100 (EN AC- AlSi7Mg0 . 3) Silumin Alloy Subjected to Heat Treatment. *Archives of Foundry Engineering*, 14(4), 35-38.
- Gökkaya, H, 2011. AA5052 Alaşımının işlenmesinde işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(3), 295-301.
- Gökkaya, H, ve Nalbant, M, 2007. Kesme hızının yığıntı katmanı ve yığıntı talaş oluşumu üzerindeki etkilerinin SEM ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3), 481-488.

- Groover, M P, Yurdakul M. ve İç T.Y, 2016. Modern imalatın prensipleri. ISBN: 978-605-320-054-3, 1002, 475.
- Hagiwara, M, Chen, S, Jawahir, I S, 2008. Contour finish turning operations with coated grooved tools: optimization of machining performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(1), 332-342.
- Heinz, A, Haszler, A, Keidel, C, Moldenhauer, S, Benedictus, R, and Miller, W S, 2000. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 102-107.
- Hekimoğlu, A P, Bayraktar, Ş, 2022. Kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiş CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı kesici uç ile Al-12Si-(0, 02-1) Sr alaşımlarının tornalanmasında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerine deneysel çalışma. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10(1), 50-62.
- Hekimoğlu, A P, and Bayraktar, Ş, 2022. Experimental research on machinability characteristics of Al-9Si alloy: Effect of Sr and Mg additives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(13), 1807-1816.
- Hekimoğlu, A P, ve Hacıosmanoğlu, M, 2019. Bakır ve magnezyum katkılarının Al-17Si alaışımının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11 (2), 685-694.
- Hekmat-Ardakan, A, Liu, X, Ajersch, F, and Chen, X G, 2010. Wear behaviour of hypereutectic Al–Si–Cu–Mg casting alloys with variable Mg contents. *Wear*, 269(9-10), 684-692.
- Hitchcock, M, Wang, Y, Fan, Z, 2007. Secondary Solidification Behaviour of the Al–Si–Mg Alloy Prepared by the Rheo-diecasting Process. *Acta Materialia*, 55(5), 1589–1598.
- Hoang, T D, Nguyen, N T, Tran, Đ Q, and Nguyen, V T, 2019. Cutting forces and surface roughness in face-milling of SKD61 hard steel. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 65(6).
- Inoue, M, Nagao, H, Suganuma, K, and Niihara, K, 1998. Fracture properties of Fe-40 at. % Al matrix composites reinforced with ceramic particles and fibers, *Materials Science and Engineering*, 258, 298-305.
- Jana, S., Mishra, R. S., Baumann, J. B., and Grant, G. (2010). Effect of friction stir processing on fatigue behavior of an investment cast Al–7Si–0.6 Mg alloy. *Acta Materialia*, 58(3), 989-1003.

- Jana, S, Mishra, R. S, Baumann, J A, and Grant, G J, 2010. Effect of friction stir processing on microstructure and tensile properties of an investment cast Al-7Si-0.6 Mg alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41, 2507-2521.
- Jape, R K, Jadhav, S G, Wang, C, Wang, Q, 2016. CAD modeling and FEA analysis of wheel rim for weight reduction. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(6), 7404-7411.
- Javidani, M, and Larouche, D, 2014. Application of cast Al–Si alloys in internal combustion engine components. *International Materials Reviews*, 59(3), 132-158.
- Jeelani, S. and Musail, M. 1986. Dependence of fatigue life on the surface integrity in the machining of 224-T 351 aluminum alloy unlubricated conditions, *Journal of Materials Science*, Vol. 21, pp. 155-160.].
- Joseph, R D, 1993. Aluminum and aluminum alloys. Materials Park, OH: ASM International.
- Juan, C P, Emma, G, Leira, S, Maria, S S, Yoana, B, Pedro, P R, 2020. Comparision of AlSi7Mg0,6 alloy obtained by selective laset melting and investment casting processes: Micrustructure and mechanical properties in asbuilt/as-cast and heat-treated conditions. *Materials Science and Engineering A* 778, 139124, Spain.
- Kalpakkian, S, 2003. Manufacturing process for engineering materials. Addison-Wesley, New York,120-131.
- Kaufman J G, 2000. Introduction to aluminum alloys and tempers. Materials Park, OH.
- Kaufman, J G, and Rooy, E L, 2004. Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications. ASM International.
- Keleş, Ö, 2021. Alüminyum Serüveni, İstanbul.
- Kishawy, H A, Dumitrescu, M, Ng, E G, and Elbestawi, M A, 2005. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(2), 219-227.
- Kosa, A, Gacsi, Z, Dul, J, 2012. Effects of strontium on the microstructure of Al-Si casting alloys. *Materials Science and Engineering*, 37(2), 43.
- Kuczmaszewski, J, Pieśko, P, Zawada-Michałowska, M, 2018. Carbide milling cutter blades durability during machining of Al-Si casting alloy. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 1(169-175).

- Kumar, K H, Chakraborti, N, Lukas, H, Bodak, O, and Rokhlin, L, 2005. Aluminium–Magnesium–Silicon ternary alloy syst.-phase diagrams, Crystallogr. Thermodyn. Data Light Met. Syst. Part 3, 165-177.
- Kumar, K, and Davim, P J, 2020. Modern manufacturing processes. Woodhead Publishing.
- Kusyairi, I, 2017. The influence of origami and rectangular crash box variations on mpv bumper with offset frontal test examination toward deformability. Journal of Energy, Mechanical, Material and Manufacturing Engineering, 2 (2): 89-96.
- Liao, H, Wu, Y, Ding, K, 2013. Hardening response and precipitation behavior of Al–7%Si–0.3%Mg alloy in a pre-aging process Materials Science Engineering; A, 560, 811-816.
- List, G, Nouari, M, G' ehin, D, Gomez, S, Manaud, J P, Le Petitcorps, Y, Girot, F, 2005. Wear behavior of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy, Wear, 259: 1177- 1189.
- Lopez de Lacalle, L N, Lamikiz, A, Sanchez, J A, and Cabanes, I, 2001. Cutting conditions and tool optimization in the high-speed milling of aluminium alloys. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of engineering manufacture, 215(9), 1257-1269.
- Lombardi, A, Ravindran, C, and MacKay, R, 2015. Optimization of the solution heat treatment process to improve mechanical properties of 319 Al alloy engine blocks using the billet casting method. Materials Science and Engineering: A, 633, 125–135.
- Lumley, R N, 2018. Fundamentals of aluminium metallurgy recent advantages. Woodhead Publishing, Australia, 333-376.
- Machado, P A B, do Vale Quaresma, J M, Garcia, A, and dos Santos, C A, 2022. Investigation on machinability in turning of as-cast and T6 heat-treated Al-(3, 7, 12%) Si-0.6% Mg alloys. Journal of Manufacturing Processes, 75, 514-526.
- Merlin, M, and Garagnani, G L, 2009. Mechanical and microstructural characterisation of A356 castings realised with full and empty cores. Metallurgical Science and Tecnology, 27(1), 21-30.
- Molina, R, Amalberto, P, Rosso, M, 2011. Mechanical characterization of aluminium alloys for high temperature applications. Part I: Al-Si-Cu alloys. Metallurgical Science and Technology, 29(1), 5.
- Mondolfo, L F, 1976. Al-Si-Mg Alloys. Aluminium alloys structure and propoities. ISBN: 9781483144825, 982, 759-774.

- Montgomery, D, and Altintas, Y, 1991. Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 113(2), 160-168.
- Möller, H, 2011. Heat treatment of Al-7Si-Mg casting alloys. *Aluminium International Today*, 23(6), 16.
- Nair, S V, Tien, J K, and Bates, R C, 1985. SiC-reinforced aluminium metal matrix composites, *International Metal Reviews*, 30, 275-288.
- Najiha, M S, Rahman, M M, and Kadirgama, K, 2015. Experimental investigation and optimization of minimum quantity lubrication for machining of AA6061-T6. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 11, 2722.
- Narahari, P, Pai, B C, Pillai, R M, 1999. Some aspects of machining cast Al-SiCp composites with conventional high speed steel and tungsten carbide tools. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 8(5), 538–542.
- Oles, E J, Inspektor, A, Bauer, C E, 1996. The new diamond-coated carbide cutting tools. *Diamond and Related Materials*, 5(6–8), 617–624.
- Okay, F, Islak, S, and Turgut, Y 2021. Investigation of machinability properties of aluminium matrix hybrid composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 85-94.
- Ozaydin, O, Kaya, A, 2018. Influence of different Si levels on mechanical properties of aluminium casting alloys. 2. *International Conference on Engineering Technology and Innovation*, Budapest, ICETI 2018, pp 86-93.
- Pastierovičová, L, Kuchariková, L, Tillová, E, Chalupová, M, Liptáková, T, and Švecová, I, 2022. Effect of different chloride environments on corrosion behavior of secondary AlSi7Mg0.6 cast alloy with higher Fe content. *Materials Today: Proceedings*, 62, 2450-2456.
- Patakham, U, and Limmaneevichitr, C, 2014. Effects of iron on intermetallic compound formation in scandium modified Al–Si–Mg Alloys. *Journal of alloys and compounds*, 616, 198-207.
- Pezda, J, and Jarco, A, 2016. Effect of T6 heat treatment parameters on technological quality of the AlSi7Mg alloy. *Archives of Foundry Engineering*, 16(4), 95-100.
- Pezda, J, 2014. Influence of heat treatment parameters on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Si-Mg alloy. *Metalurgija*. 53(2), 221-224.
- Ramesh, C S, Pramod, S, Keshavamurthy, R, 2011. A study on microstructure and mechanical properties of Al 6061–TiB₂ insitu composites. *Materials Science and Engineering*: 528 (12), 4125- 4132.

- Rana, R S, Purohit, R, and Das, S, 2021. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2 (6), 1-6.
- Rashed, H M M A, ve Rashid, A K M B, 2016. Heat treatment of aluminum alloys. *Comprehensive Material Finishing*, Elsevier Inc., Dhaka, 2, 341-369.
- Ren, P R, Song, W, Zhong, G, Huang, W Q, Zuo, Z X, Zhao, C Z, and Yan, K J, 2021. High-cycle fatigue failure analysis of cast Al-Si alloy engine cylinder head. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105546.
- Roy, S, Allard, L F, Rodriguez, A, Watkins, T R, and Shyam, A, 2017. Comparative evaluation of cast aluminum alloys for automotive cylinder heads: part I—microstructure evolution. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(5), 2529-2542.
- Sadiq, T O, Hameed, B A, Idris, J, Olaoye, O, Nursyaza, S, Samsudin, Z H, and Hasnan, M I 2019. Effect of different machining parameters on surface roughness of aluminium alloys based on Si and Mg content. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(10), 1-11.
- Sanchez, M, Marcos, M, 1994. *Relaciones Parametricas en el Mecanizado*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cadiz, Cadiz, Spain, 1994.
- Sandvik Coromant, 2005. *Sandvik coromant el kitabı, talaşlı imalat teknik kılavuzu*, Elanders, İsveç, D5-D9.
- Sandvik Coromant Catalogues Include, *Modern metal cutting-a practical handbook* Sweden, 1997.
- Santos, J, Dahle, A K, and Jarfors, A E, 2020. Magnesium solubility in primary α -Al and heat treatment response of cast Al-7Si-Mg. *Metals*, 10(5), 614.
- Santos, J, Jarfors, A E, and Dahle, A K, 2019. Formation of iron-rich intermetallic phases in Al-7Si-Mg: influence of cooling rate and strontium modification. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50, 4148-4165.
- Sekmen, M, Günay, M, Şeker, U, 2015. Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 18, 141-148.
- Sha, G, Möller, H, Stumpf, W E, Xia, J H, Govender, G, Ringer, S P, 2012. Solute nano structures and their strengthening effects in Al-7Si-0.6Mg alloy F357 *Acta Mater.*, 60, 692-701.
- Shareef, I, Natarajan, M, and Ajayi, O O, 2005. Dry machinability of aluminum alloys. In *World Tribology Congress*, 42010, 831-832.

- Sharif, A, and Idris, S, 2021. Performance and wear mechanisms of uncoated, TiAlN, and AlTiN-coated carbide tools in high-speed drilling of Al-Si alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(9), 2671-2684.
- Shaw, M C, 1989. *Metal cutting principles*”, Oxford University Press, Oxford, 1- 9,86-95.
- Sheppard, T., *Extrusion of aluminium alloys*. Springer-Science+Business Media, B.V., Berlin, 7-24, 69-90 (1999).
- Shi, Q, Huo, Y, Berman, T, Ghaffari, B, Li, M, and Allison, J, 2021. Distribution of transition metal elements in an Al-Si-Cu-based alloy. *Scripta Materialia*, 190, 97–102.
- Stephenson, D A, Agapiou, J S, 2006. *Metal cutting theory and practice*. 2.nd Ed., Taylor&Francis.
- Tash, M, Samuel, F H, Mucciardi, F, Doty, H W, and Valtierra, S, 2006. Effect of metallurgical parameters on the machinability of heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 434(1-2), 207-217.
- Taylor, J A, John St, D H, Couper M J, 2000. An empirical analysis of trends in mechanical properties of T6 heat treated Al-Si-Mg casting alloys *International Journal of Cast Metals Research*, 12, 419-430.
- Thirugnanam, A, Sukumaran, K, Pillai, U T S, Raghukandan, K, and Pai, B C, 2007. Effect of Mg on the fracture characteristics of cast Al–7Si–Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 445, 405-414.
- Thomas, T R, 1981). Characterizing of suface roughness. *Precision Engineering*, 1-3 (2), 97- 104.
- Tiryakioğlu, M, 2006. The effect of solution treatment and artificial aging on the work hardening characteristics of a cast Al–7% Si–0.6% Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 427(1-2), 154-159.
- Uddin, G M, Joyia, F M, Ghufra, M, Khan, S A, Raza, M A, Faisal, M, ... and Zeid, I, 2021. Comparative performance analysis of cemented carbide, TiN, TiAlN, and PCD coated inserts in dry machining of Al 2024 alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 1461-1481.
- Ulaş, H B, 2019. AA 6061 Alüminyum alaşımasının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin analizi ve optimizasyonu. *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*, 14 (2), 48-56.

- URL-1, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Alüminyum Komisyonu, Alüminyum Raporu, Alınan yer: https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi137/d137_1445.pdf. 14.03.2023
- URL-2, Erman, C, (Yayın No:2). Alüminyum Üretimi, Birincil ve İkincil Üretim Süreçleri Alüminyum Alaşımları. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Alüminyum Komisyonu, Alınan yer: https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi137/d137_1445.pdf. 23.02.2023
- URL-3, Sandvik coromant, Wear on cutting edges, Alınan yer: <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>, 05.03.2021.
- URL-4, Dormer Pramet, Product, Alınan yer: <https://dormerpramet.com/tr/tr/p/5983037>, 06.06.2023.
- URL-5, Dormer Pramet, Product, Alınan yer: <https://dormerpramet.com/tr/tr/p/5982770>, 06.06.2023.
- Vatansever, F, Ertürk, A T, and Karabay, S, 2018. Alüminyum-Silisyum alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin t6 ısıl işlemi ile iyileştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 20(60), 797-803.
- Venci, A, Bobić, I, and Mišković, Z, 2008. Effect of thixocasting and heat treatment on the tribological properties of hypoeutectic Al–Si alloy. Wear, 264(7-8), 616-623.
- Voort G F V, 2004. Metallographic techniques for aluminum and its alloys. ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures, ASM International, Materials Park, USA.
- Yang, H, Ji, S, and Fan, Z, 2015. Effect of heat treatment and Fe content on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al–Si–Cu alloys. Materials and Design, 85, 823-832
- Yang, L J, 2003. The effect of casting temperature on the properties of squeeze cast aluminium and zinc alloys. Journal of Materials Processing Technology, 140(1-3), 391-396.
- Yıldırım, M, and Özyürek, D, 2013. The effects of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys. Materials & Design, 51, 767-774.
- Yıldırım, Ç V, Sarıkaya, M, Kıvak, T, Şirin, Ş, 2019. The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of ni-based inconel 625. Tribology International, 134, 443-456.

- Yılmaz, V, Dilipak, H, Sarıkaya, M, Yılmaz, C Y, ve Özdemir, M, 2014. Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 30(4), 220-226.
- Zedan, Y, Samuel, F, Samuel, A, Doty, H, 2010. Effects of Fe intermetallics on the machinability of heat-treated Al-(7–11)% Si alloys. Journal of Materials Processing Technology, 210(2), 245–257.
- Zhao, J, Liu, Z, Wang, B, Song, Q, Ren, X, and Wan, Y, 2022. Effects of Al content in TiAlN coatings on tool wear and cutting temperature during dry machining IN718. Tribology International, 171, 107540.
- Zolotarevsky, V S, Belov, N A, and Glazoff, M V, 2007. Casting aluminum alloys (Vol. 12). Amsterdam: Elsevier.
- Wang, L, Chen, Y, Wang, C, and Wang, Q, 2011. Fatigue life analysis of aluminum wheels by simulation of rotary fatigue test. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 57(1), 31-39.
- Wang, Q G, and Davidson, C J, 2001. Solidification and precipitation behaviour of Al-Si-Mg casting alloys. Journal of materials science, 36, 739-750.
- Wang, Y G, Liu, B, Song, J Y, Yan, X P, Wu, K M, 2012. Study on the wear mechanism of pcd tools in high-speed milling of Al-Si alloy. In Advanced Materials Research, 381, 16–19.
- Warmuzek, M, (Ed.), 2004. Aluminum-silicon casting alloys: an atlas of microfractographs. ASM international.
- Wei, P, Wei, Z, Chen, Z, Du, J, He, Y, Li, J, and Zhou, Y, 2017. The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior. Applied surface science, 408, 38-50.
- Wu, M Z, Zhang, J W, Zhang, Y B, and Wang, H Q, 2018. Effects of Mg content on the fatigue strength and fracture behavior of Al-Si-Mg casting alloys. Journal of Materials Engineering and Performance, 27(11), 5992-6003.
- Wu, X, Zhang, H, Ma, Z, Tao, T, Gui, J, Song, W, and Zhang, H, 2019. Interactions between Fe-rich intermetallics and Mg-Si phase in Al-7Si-xMg alloys. Journal of Alloys and Compounds, 786, 205-214.