



**PH 13-8 Mo PASLANMAZ ÇELİĞE UYGULANAN
YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN VE KESME
PARAMETRELERİNİN İŞLENEBİLİRLİĞİNE
ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**2025
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Can Burak ALKAN

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Halil DEMİR
Doç. Dr. Barış ÖZLÜ**

**PH 13-8 Mo PASLANMAZ ÇELİĞE UYGULANAN YAŞLANDIRMA
İŞLEMİNİN VE KESME PARAMETRELERİNİN İŞLENEBİLİRLİĞE
ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Can Burak ALKAN

**Tez Danışmanları
Prof. Dr. Halil DEMİR
Doç. Dr. Barış ÖZLÜ**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2025**

Can Burak ALKAN tarafından hazırlanan “PH 13-8 Mo PASLANMAZ ÇELİĞE UYGULANAN YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN VE KESME PARAMETRELERİNİN İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Halil DEMİR
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doç. Dr. Barış OZLU
Tez 2. Danışmanı, Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/06/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mahir AKGÜN (ASÜ)

Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Serdar GÜLDİBİ (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



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

Can Burak ALKAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PH 13-8 Mo PASLANMAZ ÇELİĞE UYGULANAN YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN VE KESME PARAMETRELERİNİN İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Can Burak ALKAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Doç. Dr. Barış ÖZLÜ

Haziran 2025, 70 sayfa

Bu çalışmada, PH 13-8Mo paslanmaz çeliğine uygulanan yaşlandırma işlemi sonrası mikroyapı ve mekanik özellikleri ile kesme parametrelerinin frezeleme operasyonları sırasındaki işlenebilirlik davranışları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla; alındığı gibi (AR), solüsyona alınmış (SHT930-1h-AC) ve iki farklı yaşlandırma işlemi uygulanmış (SHTA525-4h-AC ve SHTA621-4h-AC) deney numuneleri hazırlanmıştır. Her bir numuneye mikroyapı, mikrosertlik, ve çekme testleri uygulanmıştır. İşlenebilirlik testleri, sabit kesme derinliği (1 mm) altında üç farklı kesme hızı (80, 120 ve 160 m/dak) ve üç farklı ilerleme miktarı (0,07; 0,12 ve 0,17 mm/dev) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı, mekanik özelliklerin ve kesme parametrelerinin işlenebilirliğe etkilerini incelemek için kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınması açısından

değerlendirilmiştir. Sonuç olarak; mikroyapı incelemeleri sonucunda, AR numunesinde martenzit ve östenit fazlarının homojen dağılım gösterdiği, solüsyona alma işlemiyle tane boyutunun büyüdüğü ve martenzit fazların tane sınırlarına çekildiği gözlemlenmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı 525 °C olan numunede daha ince martenzit fazı ve çökelti belirginleşmiş, 621 °C sıcaklıkta ise beynit fazına dönüşüm meydana gelmiştir. Bu mikroyapısal değişimlerin malzeme mekanik özelliklerine doğrudan etkisi olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı (1547 MPa) ve sertlik (490 HV2), 525 °C’de 4 saat yaşlandırılmış numunede gözlemlenirken, 621 °C’de yaşlandırma uygulanan numunede bu değerlerde azalma gözlemlenmiştir. Kesme kuvveti ölçümlerinde, düşük kesme hızlarında yüksek, yüksek kesme hızlarında ise düşük değerler elde edilmiştir. En yüksek ortalama kesme kuvveti, 525 °C’de yaşlandırılmış numunede 642.1 N tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek sertlik ve ince taneli fazların kesmeye karşı direncinin artmasıyla açıklanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü açısından, ilerleme miktarının artışının pürüzlülüğü önemli ölçüde artırdığı, kesme hızının ise optimum seviyelere kadar artırılmasının yüzey kalitesini iyileştirdiği belirlenmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 0.397 µm ile 525 °C yaşlandırılmalı numunede, 120 m/dak kesme hızı ve 0.07 mm/dev ilerleme miktarında elde edilmiştir. Yüksek ilerleme miktarları ve takım aşınması, pürüzlülük değerlerinin artmasında belirleyici faktörler olmuştur. Kesme sıcaklığı ölçümleri ise 162 °C ile 338 °C arasında değişmiş ve sıcaklık artışının kesme parametrelerinin artmasıyla doğru orantılı olduğu görülmüştür. Yüksek akma dayanımı ve sertliğe sahip numunelerde daha yüksek kesme sıcaklıkları elde edilmiştir. Ayrıca, yüksek sertlik ve çözültide çökelti oluşumu, takım aşınmasını hızlandırmış ve takım ömrünü olumsuz yönde etkilemiştir. PH 13-8Mo paslanmaz çeliğinin mikroyapı ve mekanik özellikleri, uygulanan ısı işlemleriyle önemli ölçüde değişmekte ve bu değişimler frezeleme işlemleri sırasında işlenebilirlik performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle 525 °C’de 4 saat yaşlandırılan numunenin, yüksek mekanik dayanımı ve iyi yüzey kalitesi ile optimum işlenebilirlik özellikleri sunduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : PH 13-8Mo paslanmaz çelik, Yaşlandırma işlemi, Mikroyapı, Mekanik özellikler, Kesme kuvveti, Yüzey pürüzlülüğü, Kesme sıcaklığı, Takım aşınması.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EVALUATION OF THE EFFECTS ON MACHINABILITY OF AGING PROCESS AND CUTTING PARAMETERS APPLIED TO PH 13-8 MO STAINLESS STEEL

Can Burak ALKAN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisors:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Assoc. Prof. Dr. Barış OZLU

June 2025, 70 pages

In this study, the effects of microstructure and mechanical properties resulting from aging treatments applied to PH 13-8Mo stainless steel, along with cutting parameters, on machinability behavior during milling operations were experimentally investigated. For this purpose, experimental samples were prepared in four different conditions: as-received (AR), solution treated (SHT930-1h-AC), and two different aging conditions (SHTA525-4h-AC and SHTA621-4h-AC). Each specimen was subjected to microstructural analysis, microhardness measurements, and tensile testing. Machinability tests were conducted under a constant cutting depth of 1 mm using three different cutting speeds (80, 120, and 160 m/min) and three different feed rates (0.07, 0.12, and 0.17 mm/rev). To evaluate the effects of microstructure, mechanical properties, and cutting parameters on machinability, cutting forces,

surface roughness, cutting temperature, and tool wear were analyzed. As a result of the microstructural evaluations, it was observed that the AR sample exhibited a homogeneous distribution of martensite and austenite phases, whereas the solution treatment led to an increase in grain size and the segregation of martensite phases at the grain boundaries. In the specimen aged at 525 °C, finer martensite phases and distinct precipitates were observed, while the sample aged at 621 °C showed the formation of bainite phases. These microstructural transformations were found to directly influence the mechanical properties of the material. The highest tensile strength (1547 MPa) and hardness (490 HV2) were recorded in the sample aged at 525 °C for 4 hours, whereas these values decreased in the sample aged at 621 °C. In terms of cutting forces, higher values were recorded at lower cutting speeds, while lower values were observed at higher cutting speeds. The maximum average cutting force was measured as 642.1 N in the sample aged at 525 °C, which can be attributed to the increased hardness and the presence of fine grain phases, leading to greater resistance to cutting. Regarding surface roughness, it was determined that an increase in feed rate significantly deteriorated surface quality, whereas increasing the cutting speed up to an optimal point improved it. The lowest surface roughness value of 0.397 μm was obtained in the sample aged at 525 °C at a cutting speed of 120 m/min and a feed rate of 0.07 mm/rev. Higher feed rates and increased tool wear were identified as major factors contributing to increased roughness. Cutting temperatures ranged between 162 °C and 338 °C, with a positive correlation between temperature rise and increased cutting parameters. Samples with higher yield strength and hardness exhibited higher cutting temperatures. Additionally, the presence of precipitates formed during aging and increased hardness accelerated tool wear, thereby negatively affecting tool life. In conclusion, the microstructure and mechanical properties of PH 13-8Mo stainless steel were significantly altered by the applied heat treatments, and these changes had a direct impact on machinability performance during milling. Among the tested conditions, the sample aged at 525 °C for 4 hours provided the most favorable machinability characteristics due to its superior mechanical strength and surface finish.

Key Word : PH 13-8Mo stainless steel, Aging treatment, Microstructure, Mechanical properties, Cutting force, Surface roughness, Cutting temperature, Tool wear.

Science Code : 91438



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezım sürecinde, bilgi ve rehberliğiyle bana yön veren, her an desteğini esirgemeyen değerli danıőmanım Sayın Prof. Dr. Halil DEMİR'e ve 2. danıőmanım Sayın Doç. Dr. Barış ÖZLÜ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda bana altyapı sağlayan, laboratuvar çalışmalarımda her zaman yanımda olan ve değerli desteğiyle güç veren Canım Kızıma, Mustafa YİĞİT'e, Hüseyin ORUÇ'a ve Mustafa ÇUHA'ya ayrıca őükranlarımı sunarım.

Bu süreçte bana inanan, yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. PH 13-8 MO ÇELİĞİNE UYGULANAN YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARI	3
2.2. PH 13-8 MO ÇELİĞİNE ÜZERİNE YAPILAN İŞLENEBİLİRLİK ÇALIŞMALARI.....	12
BÖLÜM 3	16
PASLANMAZ ÇELİKLER	16
3.1. PASLANMAZ ÇELİK HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....	16
3.2. PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ	18
3.2.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	18
3.2.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler	19
3.2.3 Martensitik Paslanmaz Çelikler.....	20
3.2.4 Dupleks Paslanmaz Çelikler	20
3.2.5 Çökelti Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	20
3.3. PH GRUBU PASLANMAZ ÇELİKLERİN KULLANIM YERLERİ.....	21
3.4. PH GRUBU PASLANMAZ ÇELİKLERİN AVANTAJLARI VE DEZ AVANTAJLARI	22

Sayfa

3.4.1 PH Grubu Paslanmaz Çeliklerin Avantajları.....	22
3.4.2 PH Grubu Paslanmaz Çeliklerin Dezavantajları.....	22
BÖLÜM 4	24
TALAŞLI İMALAT	24
4.1. TALAŞ KALDIRMA MEKANİĞİ VE TALAŞ OLUŞUMU	24
4.2. FREZELEME	27
4.2.1 Frezelemede Kesme Kuvveti	28
4.2.2 Frezelemede Kesme Sıcaklığı.....	31
4.2.3 Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğü	31
4.2.4 Frezelemede Kesici Takım Aşınması	32
BÖLÜM 5	34
MATERYAL VE YÖNTEM	34
5.1. DENEY MALZEMESİ	34
5.1. ISIL İŞLEM PROSESİ.....	35
5.3. SERTLİK OLCUMLERİ	35
5.4. MİKROYAPI VE SEM İNCELEMELERİ.....	36
5.5. ÇEKME DENEYLERİ.....	37
5.6. KESİCİ TAKIM VE TAKIM TUTUCUSU	37
5.7. TAKIM TEZGÂHI.....	38
5.8. KESME KUVVETLERİNİN ÖLÇÜLMESİ	39
5.9. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ÖLÇÜLMESİ	39
5.10. KESME SICAKLIĞININ ÖLÇÜLMESİ	40
5.11. KESME SICAKLIĞININ ÖLÇÜLMESİ	40
BÖLÜM 6	42
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	42
6.1. MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER.....	42
6.2. KESME KUVVETLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	46
6.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	49
6.4. KESME SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ	54

Sayfa

6.5. FARKLI MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE SAHİP NUMUNELERİN TAKİM AŞINMASINA ETKİSİ.....	58
BÖLÜM 7	61
SONUÇLAR	61
7.1. SONUÇLAR	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4. 1. Denklem 1	25
Şekil 4. 2. Frezeleme süreci şeması	26
Şekil 4. 3. Yatay Freze Makinesi	27
Şekil 4. 4. Dikey Freze Makinesi	28
Şekil 4. 5. Talaşın serbest cisim diyagramı.....	29
Şekil 4. 6. Bileşik kesme kuvveti çemberi	30
Şekil 4. 7. Bileşke kesme kuvvetlerinin bileşenlerine ayrılması.....	30
Şekil 4. 8. Takım yüzeyindeki sürtünme katsayısının belirlenmesi.....	31
Şekil 5. 1. Frezeleme ve çekme deneyleri için hazırlanan numunelerin ölçüleri.....	34
Şekil 5. 2. Isıl işlem prosesi.	35
Şekil 5. 3. Buehler Micromet 5103 mikro sertlik ölçüm cihazı.....	36
Şekil 5. 4. a) Zeiss AxioCam Mrc5 optik mikroskobu, b) FEI Quanta FEG 250 Taramalı Elektron Mikroskobu	37
Şekil 5. 5. Instron marka 5982 model çekme test cihazının görseli.....	37
Şekil 5. 6. Kesici takım ve takım tutucuya ait görseller ve bilgiler.	38
Şekil 5. 7. Haas VF-2SS model 5 eksenli dik işleme merkezi.....	39
Şekil 5. 8. KISTLER 9272 A tipi dört bileşenli piezoelektrik dinamometre.....	39
Şekil 5. 9. Mitutoyo Surface SJ-210 pürüzlülük cihazı	40
Şekil 5. 10. FLIR İ60 kızılötesi kamera	40
Şekil 6. 1. PH 13-8Mo çeliğinin optik mikroskop görüntüleri. a) AR, b) SHT930-1h- AC, c) SHTA525-4h-AC, d) SHTA621-4h-AC.	43
Şekil 6. 2. SHTA525-4h-AC numunesine ait SEM görüntüsü.	43
Şekil 6. 3. Ham malzeme ve yaşlandırma uygulanmış Ph 13-8Mo paslanmaz çeliğine ait numunelerin çekme gerilimi- % uzama diyagramları.....	45
Şekil 6. 4. Ham malzeme ve yaşlandırma uygulanmış Ph 13-8Mo paslanmaz çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri.....	45
Şekil 6. 5. Kesme kuvvetlerinin kesme parametrelerine bağlı olarak değişimi.	47
Şekil 6. 6. Kesme kuvvetlerinin mikroyapıya ve mekanik özelliklere bağlı olarak değişimi.	49

Sayfa

Şekil 6. 7. PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğündeki değişimleri.	51
Şekil 6. 8. SHTA621-4h-AC numunesine ait SEM ve EDS görüntüleri.	52
Şekil 6. 9. Mikroyapı ve mekanik özelliklerin bağlı minimum ve maksimum yüzey pürüzlülüğü değişimleri.	53
Şekil 6. 10. PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı kesme sıcaklığındaki değişimler.	56
Şekil 6. 11. PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde mikroyapı ve mekanik özelliklere bağlı kesme sıcaklığındaki değişimler.	57
Şekil 6. 12. PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde mikroyapı ve mekanik özelliklere bağlı takım aşınmasındaki değişimler.	59
Şekil 6. 13. PH 13-8Mo numunelerinin aşınma deneyleri sonrası kesici takımların SEM görüntüleri.	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3. 1. Bazı paslanmaz çelik sınıfları ve özellikleri	16
Çizelge 5. 1. PH 13-8Mo paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu.....	34
Çizelge 5. 2. Deney numuneleri ve kesme parametreleri.....	41
Çizelge 6. 1. SHTA525-4h-AC numunesine ait EDS sonuçları.	44



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- $Cr_{eş}$: krom eşdeğerliliği
 $Ni_{eş}$: nikel eşdeğerliliği
Ag : gümüş
Al : alüminyum
Ar : argon
Au : altın
Cu : bakır
 H_2 : hidrojen
He : helyum
Mo : molibden
Ni : nikel
erf(z) : hata işlevi
 γ : birim hacim ağırlığı
 $\Gamma(x)$: gama işlevi
 θ : kutupsal açı
 σ : normal gerilme
 σ_c : tek eksenli basınç dayanımı

KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)
DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EN : European Norm (Avrupa Normu)

IIW : International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü)

ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge

TS : Türk Standardı



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüz imalat endüstrisinde yüksek performanslı malzeme taleplerinin artması, ileri mühendislik uygulamaları için özellikleri iyileştirilmiş alaşımların kullanımını zorunlu kılmıştır. Özellikle havacılık, savunma sanayi ve biyomedikal gibi kritik sektörlerde; yüksek dayanım, korozyon direnci ve iyi mekanik özellikleri aynı anda sunabilen özel paslanmaz çelikler yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu bağlamda, çökeltme ile sertleştirilebilen paslanmaz çelikler, mekanik dayanımlarını artırmak için kontrollü ısı işlemleriyle yapılandırılabilirler açısından önemli mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Bu sınıfa ait olan PH 13-8Mo paslanmaz çeliği, martenzitik yapı, yüksek çekme dayanımı, mükemmel tokluk ve korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde dikkat çekmektedir.

PH 13-8Mo paslanmaz çeliği, başta uçak iniş takımları, yapısal elemanlar, nükleer uygulamalar ve biyomedikal implantlar olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çelik, yaşlandırma ile mikroyapısında oluşturulan çökeltiler sayesinde istenilen sertlik ve dayanım seviyelerine ulaştırılabilir. Ancak bu tür yüksek alaşımlı çeliklerin işlenmesi, özellikle talaşlı imalat süreçlerinde önemli zorluklar yaratmaktadır. Sertlik, yapısal karmaşıklık ve aşırı aşınmaya neden olan çökelti fazları gibi mikroyapısal özellikler; takım ömrü, yüzey kalitesi ve enerji tüketimi gibi işleme parametrelerini doğrudan etkilemektedir.

Bu bağlamda, PH 13-8Mo paslanmaz çeliği gibi yüksek performanslı malzemelerin, farklı ısı işlem koşulları altında işlenebilirliğinin kapsamlı olarak değerlendirilmesi hem bilimsel açıdan hem de endüstriyel uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Çünkü bu çeliğin sahip olduğu mekanik ve mikroyapısal özellikler; sadece son kullanım performansını değil, aynı zamanda üretim maliyetlerini ve sürelerini de belirlemektedir. Bu nedenle, farklı yaşlandırma işlemleri uygulanan PH 13-8Mo

çeliğinin mikroyapı, çekme dayanımı, sertlik gibi temel özellikleri ile birlikte; frezeleme operasyonları sırasında kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasına etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Tez kapsamında yapılan bu çalışma, PH 13-8Mo çeliğine farklı ısıl işlem uygulamaları sonucunda oluşan mikroyapısal ve mekanik değişimlerin, talaşlı imalat performansına etkilerini belirlemeye yöneliktir. Frezeleme işlemleri sabit kesme derinliği altında üç farklı kesme hızı (80, 120 ve 160 m/dak) ve ilerleme miktarı (0.07; 0.12 ve 0.17 mm/dev) ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarım sonucunda kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınmaları analiz edilmiştir. Ayrıca elde edilen bulgular, mikroyapı özellikleri ile ilişkilendirilerek malzemenin işlenebilirlik karakteristiği açısından bütüncül bir değerlendirme yapılmıştır.

Bu çalışmanın özgünlüğü, PH 13-8Mo çeliği için uygulanan farklı ısıl işlem parametrelerinin hem malzeme özellikleri hem de işlenebilirlik üzerindeki etkilerinin birlikte analiz edilmesinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlar; savunma ve havacılık gibi ileri teknoloji gerektiren alanlarda kullanılan bu çeliğin üretim parametrelerinin optimize edilmesine yönelik önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca farklı ısıl işlem parametreleri ile elde edilen çökelti fazlarının, kesici takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri literatürde sınırlı sayıda çalışmayla değerlendirildiğinden, bu çalışma literatürde anlamlı bir katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. PH 13-8 MO ÇELİĞİNE UYGULANAN YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARI

Xinfeng Li ve arkadaşları, yaşlandırma işleminin PH 13-8 Mo çeliğinin hidrojen kırılabilirliği üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Munn ve Andersson yaşlandırma sıcaklığı (468-552 °C) artıkça çeliğin hidrojen gevrekleşmesine karşı duyarlılığının azaldığını ortaya koymuştur. Yüksek çekme hızında (20mm/dk) hidrojen çekme mukavemetini artırırken, hidrojen hem 0.5 mm/dk hem de 0.03 mm/dk için düşük çekme hızında mukavemeti azaldığını gözlemlemişlerdir. 650 °C 'de yaşlandırılan numune, 540 °C ile 750 °C arasındaki aşırı yaşlandırma sıcaklığı aralığında hidrojen gevrekleşmesine karşı en yüksek direnci gösterdiğini belirtmişlerdir. Hidrojen gevrekleşmesine karşı duyarlılığı sadece mukavemete değil aynı zamanda mikro yapıya da bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Çekme hızı 20 mm/dk olduğunda, 540 °C, 650 °C ve 750 °C'de yaşlandırılan numunelerin SEM fraktografisi, hidrojen yüklenmesinden bağımsız olarak çukur kırılma modu gösterdiğini gözlemlemişlerdir [1]

Andreas Rosenauer ve arkadaşları, ısıl işlem varyasyonlarının PH 13-8 Mo maraging çeliğinin mikro yapısı, mekanik özellikleri ve östenit kararlılığı üzerindeki etkisi araştırmışlar ve aşırı yaşlanma ile orta sıcaklıkta yaşlandırmayı izleyen interkritik tavlama karşılaştırmışlardır. SEM, EBSD ve HE-XRD araştırmalarının sonuçlarına göre, interkritik tavlamanın eklenmesinin PH 13-8 Mo maraging çeliklerindeki RA içeriğinde önemli bir artışa yol açtığı doğruladıklarını öne sürmüşlerdir. Oda sıcaklığına soğutulduktan sonra, mikro yapıda Ni ile zenginleştirilmiş taze oluşmuş martensit bulunduğunu belirtmişlerdir ve Ni zenginleştirmeleri, sonraki yaşlanma

sırasında RA oluşumunu desteklediğini belirtmişlerdir. Kritik tavlama sonrası RA'daki daha düşük ortalama Ni konsantrasyonuna rağmen, bu faz, aşırı yaşlanma sırasında oluşan RA'ya kıyasla martensite faz dönüşümüne karşı termal ve mekanik olarak daha kararlı olduğunu öne sürmüşlerdir. Daha düşük kararlılığın daha yumuşak martensitik matris ve çökeltilerden gelen daha düşük mukavemet katkısıyla ilişkili olduğu varsayıldığını belirtmişlerdir. Ancak, aşırı yaşlanma sonrası RA'nın sınırlı kararlılığının, TRIP etkisinin neden olduğu gelişmiş çatlak direnci nedeniyle gözlenen yüksek darbe tokluğunda önemli bir rol oynadığı düşünülmüştür [2]

Shawkat Imam Shakil ve arkadaşları, eklemeli imalat ile üretilen PH 13-8 Mo paslanmaz çelik için malzemedeki çökelme fazı dönüşümünün kinetiğini inceleyerek doğrudan yaşlandırma ısıl işlem reçetesi geliştirdiklerini öne sürmüşlerdir. Ürettikleri numunelere önerilen reçeteler uygulayarak yaşlandırma işlemine maruz bırakılarak mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Yapıldığı haliyle numunelerin mikro yapısı, ark-DED ve L-PBF işlemlerinin doğası gereği deneyimlenen soğutma hızlarındaki değişiklikler nedeniyle martensit çıta boyutu açısından önemli farklılıklar gösterdiğini belirtmişlerdir. İki numunenin farklı mikro yapıları nedeniyle çökelme fazı dönüşümlerinin kinetiğinin farklı olduğunu ortaya koymuşlardır. Önerilen ısıl işlem tarifleri kullanılarak, nano ölçekli b-NiAl kümelerinin evrimi sonucunda ark-DED-PH13-8Mo numunesinde mukavemet ve süneklik eş zamanlı olarak iyileştirdiğini ve malzemenin gerinim sertleştirme kabiliyeti de önemli ölçüde arttığını gözlemlemişler [3]

Puchhang Cui ve arkadaşları, termodinamik hesaplamalar ve TEM karakterizasyon tekniklerinin bir kombinasyonu yoluyla PH 13–8 Mo çökelme sertleştirme çeliğinin nano-çökelti evrimlerinin çeşitli ısıl işlem koşulları, oda sıcaklığında çeşitli mekanik özellikleri araştırmışlardır. PH13–8Mo çeliği aşırı yaşlanma koşullarına rağmen umut verici dengeli mekanik özellikler sergilediğini belirtmişlerdir. Bekleme süresi 593 ° C'de 0,5 saatten 5 saate uzatıldığında sertlik değeri 460,9 HV'lik tepe değerinden 360,4 HV'ye hızla düştüğü gözlemlemişlerdir. Tersine, sabit artışla ortam sıcaklığındaki darbe enerjisi aynı ısıl işlem koşulları altında ölçmüştür. Tutarlı NiAl güçlendirilmiş nano-faz, çıta benzeri martensit matrisi üzerinde dağılmıştır. Yaşlandırma sıcaklığı veya zamanının bir fonksiyonu olarak çökeltilerin büyümesi,

yaşlandırma ısı işlem durumu altında önce sabit bir büyüme ve ardından önemli bir kabalaşma (4 saat sonra) gösterdiğini belirtmişlerdir. Çökeltilerin ortalama boyutu, $593 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yaklaşık 9 nm 'de 5 saat boyunca ölçülmüştür. Ni elementiyle zenginleştirilmiş iğnemsî veya blok benzeri difüzyon kontrollü geri dönmüş östenit, büyüme eğilimiyle gözlemlendi; bu, termodinamik olarak hesaplanan sonuçla tutarlı olduğunu belirtmişlerdir.. Bu arada, östenit fazı ve martensit fazı, K-S yönelim ilişkisine uymakta olduğunu gözlemlemişlerdir [4]

Mj Benoit ve arkadaşları, eklemeli imalat ile üretilen PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğinin mikro yapısı ve yaşlandırma konularını ele almışlardır. Numuneler hem lazer toz yatak füzyonu (L-PBF) hem de ark yönlendirilmiş enerji biriktirme (arc-DED) ile üretilmiş ve hem basıldığı hem de doğrudan yaşlandırıldığı ($530 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 saat) koşullarda karakterize etmişlerdir. Eklemeli imalatın seçilmesi ile 13-8 Mo çeliğinin mikro yapısı ve özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve tek adımlı doğrudan yaşlandırma ısı işleminin L-PBF ile üretilen numuneler için uygun olduğu, ancak arc-DED ile üretilen numuneler için uygun olmadığı sonucuna varılmışlardır. Çalışma sonucunda, $530 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 3 saat boyunca tek adımlı doğrudan yaşlandırma ısı işlemi, L-PBF ile işlenmiş PH 13-8 Mo çeliğini güçlendirmek için etkili olduğunu öne sürmüşlerdir. Yaşlandırmadan sonra bir miktar (hacimce %4,6) geri dönmüş östenit gözlemlerken, bu mikro yapı iyileştirme, basıldığı gibi durumdan bir dislokasyon ağının tutulması ve nanometre ölçeğindeki β -NiAl parçacıklarının çökmesi kombinasyonu ile telafi etmişlerdir. $530 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de tek adımlı doğrudan yaşlandırma ısı işlemi, ark-DED ile işlenmiş PH 13-8 Mo çeliğinin güçlendirilmesi için uygun olmadığını belirtmişlerdir. Isıl işlem, büyük miktarda (%7,2 hacim) geri dönmüş östenit ve Cr 23 C 6 parçacıklarının oluşumuyla sonuçlanmış ve basıldığı haliyle mikro yapıda gözlemlenen δ -ferrit tanelerini gideremedilerini öne sürmüşlerdir. Sonrasında, L-PBF numunesine kıyasla daha az mikro yapı inceliği gözlemlenmiştir. 1-10 nm aralığında çaplara sahip β -NiAl parçacıkları gözlemlendi; bu, yaşlanma sırasında bazı yeni çökeltiler oluşurken, basıldığı haliyle mevcut olanların hafifçe kabalaştığını gözlemlemişler. Bu parçacıkların varlığı, geri dönmüş östenit ve Cr 23 C 6 parçacıklarının oluşumuna rağmen, yaşlanmadan sonra ark-DED numunesinin sertliğinin korunmasının ana nedeni olduğunu belirtmişlerdir [5]

Mahya Ghaffari ve arkadaşları, tel ark katkılı olarak üretilen çökeltme sertleştirilmiş (PH) 13-8Mo martensitik paslanmaz çelik, basıldığı haliyle parçada tespit edilen sütunlu yapı, denge dışı fazları (örneğin, δ -ferrit), homojen olmayan mikro yapıyı ve anizotropik sünekliği ortadan kaldırmak için çeşitli çözelti ve yaşlandırma işlemlerine tabi tutmuşlardır. 1050 °C'de çözelti işlemi, sütunlu tane yapısını başarıyla ortadan kaldırabilir ve istenmeyen kalıntı δ -ferrit fazlarını tamamen çözebilir ve tamamen martensitik bir mikro yapıyla sonuçlanabilirken, daha düşük veya daha yüksek çözelti sıcaklıkları, basılan numunede oluşan güçlü dokuyu azaltmada ve istenmeyen δ -ferrit yamalarını mikro yapıdan çıkarmada etkili olmadığını vurgulamışlardır. En düşük sıcaklıkta (400 °C) yaşlandırma işlemi ikincil fazların çökmesini tetiklemek için yeterli olmadığını, daha yüksek yaşlandırma sıcaklıkları (450 ve 500 °C) ise çekirdeklenmeye ve β -NiAl çökeltilerinin hafif büyümesine neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Genel olarak, farklı sıcaklıklarda yaşlandırma sırasında ısıl işlem görmüş WAAM PH 13-8Mo alaşımında elde edilen çeşitli sertlik, mukavemet ve süneklik kombinasyonlarının, son kullanıcılara, nihai ürünün amaçlanan servis koşuluna göre istenen mekanik özelliklere ulaşmak için optimum yaşlanma sıcaklığını seçici olarak uygulama fırsatı sağladığı sonucuna varmışlardır [6]

P.W. Hochanadel ve arkadaşları, çeşitli koşullara göre ısıl işlem görmüş yatırım döküm PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğin mikro yapısı ışık ve elektron mikroskobu, elektron prob mikroanalizi ve Mossbauer spektroskopisi kullanılarak incelemişlerdir. Mekanik özellikleri tek eksenli çekme testi, sertlik testi ve Charpy darbe testi kullanarak araştırmışlardır. β -NiAl güçlendirme çökeltileri, elektron kırınımı ile tespit edilebilmesine rağmen, düşük sıcaklıklarda (566 ~ ve altı) yaşlandırılmış numunelerde transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile çözülmesi zor olduğunu gözlemlemişlerdir. Çıta martensitik yapısında yüksek bir dislokasyon yoğunluğu gözlemlemişlerdir. Düşük yaşlandırma sıcaklıklarında gözlenen daha yüksek mukavemet ve daha düşük süneklik hem yüksek dislokasyon yoğunluğuna hem de β -NiAl çökeltisine bağlantılı olduğunu söylemişlerdir. Numuneler yüksek sıcaklıklarda yaşlandırıldığında (>566 ~) daha düşük bir dislokasyon yoğunluğu ve %15 mertebesinde geri dönmüş bir östenit fraksiyonu gözlemlemişlerdir. Mukavemet

ve sertlik seviyeleri azalırken, süneklik ve darbe enerjisi seviyeleri artan yaşlanma sıcaklığıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Döküm PH 13-8 Mo'nun mikro yapısal özellikleri, bu malzemenin genel güçlenmesi ve/veya yumuşaması için mekanizmaların açıklanmasına yardımcı olduğunu vurgulamışlardır. Düşük yaşlanma sıcaklıklarında (566 ~ ve altı), çökelme sertleşmesinin baskın reaksiyon olduğu kanıtlamışlar; yüksek yaşlanma sıcaklıklarında (>566 ~) martensit geri kazanımı ve/veya geri dönmüş östenit oluşumu mekanik davranışı önemli ölçüde etkilediğini vurgulamışlardır. Soğutma adımının ortadan kaldırılması ve yaşlanma süresinin azaltılmasının PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı gözlemlemişlerdir. Mekanik özellikler, homojenizasyon süresi ve sıcaklığının artırılmasıyla önemli ölçüde iyileştirildiğini belirtmişlerdir [7]

Ronald Schnitzer ve arkadaşları, PH 13-8 Mo maraging çeliğinin statik ve dinamik mekanik özellikleri üzerindeki etkisi çekme testi, dinamik sıkıştırma testi ve in situ X-ışını kırınımı ile araştırmışlardır. Geri dönüşümlü östenit miktarının artmasıyla, yaşlanma sırasında artan bir gerinim sertleştirme üssü gözlemlemişlerdir. Östenit, NiAl çökeltilerinden arındırılmıştır ve bu nedenle martensitik matristen çok daha yüksek bir gerinim sertleştirme üssüne sahip olduğunu vurgulamışlardır. Östenit ayrıca, çekme testi eğrilerinden değerlendirilen numunelerin enerji emilimini de etkilemiş; bu, 575°C'de yaşlandırılmış numuneler için 119MJm⁻³'ten 100 saat yaşlandırılmış numuneler için 169MJm⁻³'e yükseldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca mekanik olarak kararlı olmadığını ve yaşlanma süresinin artmasıyla geri döndürülmüş östenitin kararlılığında bir artış gözlemlemişlerdir. Statik testlere göre, geri dönmüş östenit miktarının artmasıyla birlikte azalan mukavemet gözlemlemişlerdir [8]

Mustafa Kaş ve arkadaşları, lazer metal biriktirme (LMD) yoluyla üretilen PH 13-8 Mo martensitik paslanmaz çelik parçaların mikro yapısını ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Katkılı olarak üretilen parçaların mikro yapısal özellikleri optik bir mikroskop kullanılarak analiz etmişlerdir. Mekanik özellikler sertlik ölçümleri ve tek eksenli çekme testleri yoluyla değerlendirilmiştir. Enerji yoğunluğunun ve toz biriktirme yoğunluğunun düz duvarların karakteristik geometrisi üzerindeki etkisi de araştırmışlardır. Mikro yapısal analiz, mikro yapının, tutulan östenitle yaklaşık olarak

paralel olan hücreler arası ferrit ve martensit çıtalaları içeren birincil östenit hücreleriyle, substrattan epitaksiyel olarak büyüyen sütunlu dendritlerden oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Enerji yoğunluğu 43'ten 86 J/mm²'ye çıkarıldığında (enerji yoğunluğunun iki katına çıkması), ilk katmanda ikincil dendritik kol aralığında (SDAS) yaklaşık %250 ve üst katmanda yaklaşık %90 artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Toz biriktirme yoğunluğunun 0,5'ten 1 g/dk'ya çıkarılması, gözenekliliğin %3'ten %1'in altına düşmesine ve mukavemetin 800'den 1000 MPa'nın üzerine çıkmasına neden olduğunu vurgulamışlardır. Tortuların sertliğinin 300 ila 400 HV arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Sertlikteki bu değişim, farklı yüksekliklerdeki soğutma oranlarındaki değişikliklerden kaynaklanan mikro yapıdaki farklılıklara bağlantılı olduğunu vurgulamışlardır [9]

Elham Afshari ve arkadaşları, tel ark katkı imalatı (WAAM) ile üretilen bir PH 13-8Mo paslanmaz çeliğin çizilme ve ileri geri kayma aşınma tepkisi, farklı baskı sonrası ısıtma işlem döngülerinden sonra incelenmiş ve mikro yapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. 1050 °C'de 1 saatlik çözeltiye alma ve ardından 400 sıcaklıkta 4 saatlik bir yaşlandırma döngüsünden oluşan gerçekleştirilen ısıtma işlem döngülerinin 500 °C, 500 °C ve 600 °C'de olduğu tespit etmişlerdir. Kullanılan ısıtma işlem, anizotropik mikro yapısından kaynaklanan, basılmış parçadaki anizotropik çizilme ve aşınma tepkisini ortadan kaldırmada etkili olduğunu belirtmişlerdir. Genel aşınma mikro mekanizmaları, çizilme testi sırasında sürme ve ileri geri kayan aşınma testi sırasında yapışkan, oksidatif ve üç gövdeli aşındırıcı aşınma mekanizması ile basılmış ve ısıtma işlem görmüş koşullar için benzer olduğunu vurgulamışlardır. Sonuçlar, WAAM tarafından üretilen PH 13-8Mo parçalarının, aşınma direnci gerektiren uygulamalar için dövme muadillerine alternatif olma konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir [10]

WM Garnizon ve arkadaşları, PH 13-8'deki östenit miktarını ve mekanik kararlılığını yaşlanma sıcaklığı ve zamanına bağlı olarak belirlemek ve tutulan östenitin ayrışmasının ve/veya mekanik kararlılığındaki değişikliklerin bu alayışımın yaşlanma üzerine gevrekleşmesiyle ne ölçüde ilişkili olabileceğini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çekme özellikleri ve Charpy darbe enerjileri, PH 13-8 çeliği için, söndürülmüş koşul ve 200 ila 600 °C arasındaki yaşlanma sıcaklıkları için yaşlanma

sıcaklığının bir fonksiyonu olarak ölçülmüştürler. Çekme sonuçları, yaşlanma sertleşmesinin 450 °C'de 1 saat yaşlanmanın ardından başladığını ve akma dayanımındaki maksimum değer, en az 1 saatlik yaşlanma süreleri için, 550 °C'de yaşlanmanın ardından meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Yaşlanma sıcaklığının bir fonksiyonu olarak çizildiğinde, Charpy darbe enerjisi 500 °C'de yaşlanmada minimum değer göstermektedir. Bu nedenle, yaşlanma sertleşmesiyle ilişkili gevrekleşme, akma dayanımındaki maksimum değer gözlemlendiği yaşlanma sıcaklığından biraz daha düşük yaşlanma sıcaklıklarında en şiddetli olduğunu vurgulamışlardır. 550 °C'de uzun süre yaşlandırılan östenitin mekanik kararlılığı, 600 °C'de 1 saat yaşlandırılan östenitin mekanik kararlılığından çok daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [11]

William ve arkadaşları, teknolojik iş akışının üç temel aşamasında (AB, çözeltiyeye alınmış (ST) ve yaşlandırılmış (AG) yeni bir LPBF çökelti sertleştirilmeli paslanmaz çelik (EOS SS CX) SS'nin proses-yapı-özellik etkileşimlerine ışık tutmayı ve bu evrimi kimyasal olarak benzer bir dövme alışımda meydana gelen evrimle karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmanın ilk adımı, her iki alışımın maksimum sertliğine yol açan ısı işlem koşullarını belirlemeyi amaçlamıştır. 0,5 saat boyunca 850 °C'de bir çözelti işlemiyle başlamış, ardından tamamen martensitik bir yapı üretmeye çalışarak zorlamalı hava soğutması uygulanmışlardır. Daha sonra, en büyük sertliği sağlayan süreyi belirlemek için bir yaşlandırma süresi analizi gerçekleştirilmiştir. 525 °C'de 2 saat yaşlandırmanın, üreticiler tarafından garanti edildiği gibi, her iki alışımda için de 49-52 HRC sertlik aralığıyla sonuçlandığı gözlemlenmiştir. 2 saatten uzun süre yaşlandırma, elde edilen sertlikte hafif bir azalmaya yol açtığını vurgulamışlardır. Bu özel ısı işlem prosedürü, bu çalışmadaki her iki alışımda için de kullanılmışlardır. Başlangıç durumunda, LPBF alışımda numuneleri mikro-CT ile ölçüldüğünde sınırlı miktarda gözeneklilik içeriyordu: yatayda %0,01 ve dikey numunelerde %0,003. Ortalama eşdeğer çapa sahip olan bu gözeneklerin baskın olarak yatay numunelerin çekme eksenine boyunca ve dikey numunelerin çekme eksenine dik olarak dağıldığı ve varlıklarının bu çalışmada uygulanan ısı işlem dizisinden etkilenmediği ortaya koymuşlardır. Bu özel gözenek dağılımı, işleme durumundan bağımsız olarak, dikey numunelerin yatay muadillerine

göre özellikle daha düşük süneklik olmak üzere daha düşük mekanik özellikler göstermesini vurgulamışlardır [12]

L.M. Young ve arkadaşları, PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğinin hidrojen gevrekleşmesine duyarlılığı doğrusal olmayan kırılma mekaniği yöntemleri kullanmışlardır. Numuneler havada kırılma testinden önce elektrokimyasal olarak hidrojenle yüklemişlerdir. Yüklemeden sonra, kararlı çatlak büyümesi için J -integral eğrisini üretmek üzere monotonik olarak artan bir yük hattı yer değiştirmesi uyguladıklarını belirtmişlerdir. Çatlak uzunluğu, doğru akım elektrik potansiyeli yöntemi ile izlemişler; akım anahtarlaması termal voltaj katkılarını ortadan kaldırmışlardır.. PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğinin kırılma özellikleri hidrojen tarafından ciddi şekilde bozuldu. Hidrojen yüklü koşuldaki malzeme için J_i , yüksüz koşula kıyasla %98'e kadar bozuldu. Kırılma modu, düşük yer değiştirme hızında test edilen yüklü numunelerde yüksüz numunelerde mikro boşluk birleşmesinden taneler arası çatlama doğru dramatik geçişler sergilediğini gözlemlemişlerdir. Daha yüksek yer değiştirme oranlarında gerçekleştirilen tokluk testleri daha az duyarlılık göstermiş ve transgranüler fasetler ve mikro boşluk birleşmesinin karışık bir moduyla başarısız olduğunu gözlemlemişlerdir. Oran bağımlılığı, daha yüksek yer değiştirme oranlarının hidrojenin çatlak ucu işlem bölgesine taşınmasını sınırladığının bir göstergesi olduğunu savunmuşlardır. Hidrojenin difüzyon ve dislokasyon taşınması yoluyla çatlak ucu işlem bölgesine taşınmasının katkıları tartışılmaktadır. Yer değiştirme oranı, çatlak ucu parametresini veya çatlak ucu gerilme oranını kontrol eden yerel bir faktörle ilişkili olduğunu vurgulamışlardır [13]

V. Seetharaman ve arkadaşları, PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğin çökelme davranışı, optik mikroskopi, transmisyon elektron mikroskobu ve X-ışını kırınımı teknikleri kullanarak 450 – 575 °C sıcaklık aralığında incelemişlerdir. Alaşım, çözelti işlem sıcaklığından itibaren söndürme sırasında tamamen bcc martenzite dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Bu martenzitin daha sonraki yaşlandırılması, NiAl bileşimine karşılık gelen ince, düzgün dağılmış küresel çökeltilerin oluşmasıyla sonuçlandığını belirtmişlerdir. 525 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda temperlemede, önemli miktarda geri dönmüş östenit bloklu bileşenler olarak ortaya çıktığını vurgulamışlardır. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen sertlik ölçümleri ve tek eksenli çekme testleri, en yüksek

sertleşmenin yaklaşık 525 °C'de meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Yaşlandırmadan sonra alaşımda gözlenen akış gerilimindeki artışın önemli bir kısmı, NiAl çökeltileriyle ilişkili koherens gerilmelerinden ve içindeki düzen durumundan ve matrisin ve çökeltilerin kayma modülleri arasındaki farktan kaynaklandığını savunmuşlardır. Ayrıca martensit matrisinde geri dönmüş östenitin ince parçacıklarının varlığı yaşlandırılmış alaşıma önemli bir güçlendirme sağlayabileceğini belirtmişlerdir [14]

Xingchen Yan ve arkadaşları, LC teknolojisi ile PH 13-8 Mo çeliği üzerinde yüksek performanslı NiCrBSi-WC kaplamalar üretmişlerdir. Bu çalışmada, PH 13-8 Mo çeliği üzerindeki lazer kaplamalı NiCrBSi-WC kaplamaların mikro yapısını, arayüz özelliklerini ve tribolojik özelliklerini keşfetmek için bir dizi deney ve malzeme karakterizasyonu gerçekleştirmişlerdir. PH 13-8 Mo çelik alt tabakasında XRD deseninde birkaç γ -Fe fazı (geri dönmüş östenit) ile büyük miktarda α' -Fe fazı (martensit) gözlemlemişlerdir. NiCrBSi-WC kaplamalarının XRD deseninde çok sayıda ikincil karbür [W₂C ve M₂₃C₆ (M: Ni, Cr ve Fe ile)] ve metaller arası bileşikler (Ni₃B) içeren ince γ -(Ni, Fe) sütunlu dendritler bulunabileceğini vurgulamışlardır. Mevcut çalışmada LC işleminin soğutma hızı $1,5 \times 10^6$ K/s olarak hesaplanabilir. SEM ve EDS sonuçları, PH 13-8 Mo çelik alt tabakada yalnızca kaba çığa benzeri martensitin (yani, α' -Fe fazı) tespit edilebileceğini gözlemlemişlerdir. İnce γ -(Ni, Fe) sütunlu dendritler içinde eşit şekilde oluşan ultra yüksek sertlikteki W₂C, Ni₃B ve M₂₃C₆ fazları NiCrBSi-WC kaplamalarda tespit edilebileceğini belirtmişlerdir. NiCrBSi-WC kaplamaların üstünden PH 13-8 Mo çelik alt tabakaya kadar, kaplamaların, seyreltme alanının, ısıdan etkilenen bölgenin ve alt tabakanın ortalama mikro sertliği sırasıyla $1008 \pm 48,2$ HV_{0,2}, $842 \pm 31,8$ HV_{0,2}, $386 \pm 24,4$ HV_{0,2}, $356 \pm 3,0$ HV_{0,2}'dir. NiCrBSi-WC kaplamalar, en düşük ortalama COF (0,28) ve aşınma oranı ($3,92 \pm 0,72 \times 10^{-6}$ mm³/(N•m)) ile mükemmel tribolojik özellikler sunduğunu vurgulamışlardır. Kaplama/alt tabakadaki arayüzün dinamik kararlı aşınma sürecinde bir basamak özelliği tespit edilebilir. Kaplama/alt tabaka arayüzünde, nispeten düşük ortalama COF (0,40) ve aşınma oranı ($31,83 \pm 2,12 \times 10^{-6}$ mm³/(N•m)) ile iyi tribolojik performanslar elde edilebileceğini belirtmişlerdir [15]

MJ Cieslak ve arkadaşları, yüksek homolog sıcaklıklardan su verilmiş mikroyapıların analizi ve kesintili katılaştırma deneyleri yoluyla, PH 13-8 Mo'nun katılaştırma işleminin bir sonucu olarak mikroyapının evrimini açıklamaktadır. İncelenen PH 13-8 Mo ısısı için; Y'nin 8'e dönüşümü, --~1350 °C sıcaklıkta başlayan ve ~1435 °C sıcaklıkta sona eren ısıtma ile gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Alaşım katılığı ~1447 °C ve alaşım sıvılığı ~1493'tür. 0,33 °C soğutma hızında alaşım tamamen 8'e katılır ve ~1364 °C'de başlayan 8'in y'ye katı hal dönüşümü, kalıntı 8 ile Widmanst-tten y oluşumuyla sonuçlandığını vurgulamışlardır.

Cr, Mo ve Al ve matris martensitine (önceki T) göre Ni bakımından tükenmiştir. 8 ~ 3' dönüşüm süreci su verme hızına duyarlıdır. Tamamen ferritik yapılar, soğuma hızına bağlı olarak kütsel olarak veya difüzyonel bir süreçle 3'e dönüşebileceğini söylemişlerdir. Al'in Hammar ve Svensson tarafından tanımlanan Creq'e katkısı için Hull'un ağırlık faktörünün kullanılması, Kujanpaa ve Moio'nun kriteri kullanılarak tamamen ferritik katılaştırmanın (gözlemlendiği gibi) tahmin edilmesiyle sonuçlandığını belirtmişlerdir. [16]

2.2. PH 13-8 MO ÇELİĞİNE ÜZERİNE YAPILAN İŞLENEBİLİRLİK ÇALIŞMALARI

Barış ÖZLÜ ve Mahir AKGÜN, PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğin tornalanmasında işleme parametrelerinin kesme kuvveti (Fc), yüzey pürüzlülüğü (Ra), kesme gücü (Pc) ve özgül kesme enerjisi (SCE) üzerindeki etkilerinin araştırılması ve optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi amaçlamışlardır. Bu amaçla, kesme hızı (Vc), ilerleme hızı (f) ve kesme derinliği (ap) gibi kesme parametrelerini farklı seviyelerde belirleyerek Taguchi'nin L32 ortogonal dizisi ile deneysel bir tasarım oluşturulmuştur. Tornalama testleri, kuru kesme koşulları altında kaplamalı karbür kesici takım kullanılarak CNC torna tezgahında gerçekleştirmişlerdir. Sinyal/Gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA), tornalama deneyleri sonrasında elde edilen Fc, Ra, Pc ve SCE değerleri üzerinde kesme parametrelerinin etkilerini belirlemek için kullanılmışlardır. Ayrıca, doğrusal ve ikinci dereceden regresyon modelleri aracılığıyla Fc, Ra, Pc ve SCE ile kesme parametreleri arasındaki korelasyonu belirlemek için regresyon analizi yapmışlardır. Çalışmanın temel bulguları, PH 13-8 Mo martensitik paslanmaz çeliğin tornalanmasında en düşük Fc (A1B1C3), Ra

(A1B1C4), Pc (A1B1C1) ve SCE (A2B4C3) değerlerinin 287,8 N, 0,59 μm , 697,16 W ve 1549,55 J/mm³ değerlerinde ölçülmesidir. ANOVA'ya göre Fc, Ra, Pc ve SCE'yi etkileyen en önemli işlem parametresi sırasıyla %85,57, %84,93, %71,10 ve %60 oranlarında ilerleme hızıdır. Test sonuçlarıyla elde edilen matematiksel model bulgularının iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Genel olarak PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğin tornalanmasında yapışma, BUE, talaş, krater, çentik, kırılma ve kesici takımında talaşlanma gibi aşınma mekanizmaları tespit etmişlerdir [17]

Oğuzhan Öndin ve arkadaşları, kuru kesme, bitkisel bazlı kesme yağı içeren saf MQL ve nanofluid-MQL (bitkisel bazlı kesme sıvısına karıştırılmış MWCNT'ler) rejimleri altında PVD TiAlN-(AlCr)₂O₃ kesici uçla PH 13-8 Mo paslanmaz çeliğin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü, yüzey topografyası, takım aşınması ve sorumlu aşınma mekanizmalarının yanı sıra istatistiksel analiz ve optimizasyonun araştırılmasına odaklanmışlardır. Deneysel ve istatistiksel sonuçları elde etmişlerdir. Kuru, saf-MQL ve MWCNT'lere dayalı nanofluid-MQL altında ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) sırasıyla 1.079 μm , 1.047 μm ve 0.949 μm olarak gözlemlerken, Ra için hesaplanan değerlerin ortalaması 0.944 μm gözlemlenmiştir. Kuru kesme rejimine kıyasla, saf-MQL ve MWCNT'lere dayalı nanofluid-MQL kullanıldığında yüzey pürüzlülüğünde bir azalma gözlemlenmiştir. Saf-MQL ve nanofluid-MQL altında sırasıyla yaklaşık %5 ve %12 daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir. Yüzey topografyası sonuçlarından, işleme izlerinin (besleme izleri) kuru kesmede oldukça belirgin olduğunu, ancak bu izlerin MQL ve nanofluid-MQL kesme ortamında önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Kesme yağının işleme sürecine dahil edilmesi nedeniyle, kesme bölgesindeki tepe sıcaklığı, kuru kesme rejimine kıyasla saf-MQL ve nanofluid-MQL ile sırasıyla yaklaşık %25 ve %38 oranında azaltıldığını öne sürmüşlerdir. İstatistiksel analize göre, ECDF'den normal dağılım eğrisinin ve sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğünün adım çizgisinin birbirleriyle uyumlu olduğunu gözlemlenmiştir. MRO sonuçlarında, en düşük yüzey pürüzlülüğüne ve sıcaklığa aynı anda yaklaşmak için ideal çözümün, MWCNT'lerin nanofluid-MQL karışımı C/L ortamı ve 167,27 m/dk kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme hızı olduğu belirlenmiştir [18]

Hakan Yurtkuran Mustafa Günay, yüksek teknik özellikleri nedeniyle işlenmesi son derece zor olan PH13-8Mo paslanmaz çeliğinin daha temiz frezelenmesinde ortaya çıkan kesme kuvvetini (Fr) ve yüzey pürüzlülüğünü (Ra) optimize etmeyi ve modellemeyi amaçlamışlardır. PH13-8Mo'nun yukarı frezelenmesinde kuru, minimum miktarda yağlama (MQL) ve kriyojenik (Cryo) ortamlarının Fr ve Ra üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneyle, değişen kesme hızlarında ve ilerleme oranlarında TiAlN kaplı uçlar kullanılarak yapılmıştır. Fr ve Ra'yı en aza indirmek için kontrol faktörleri Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz (TGRA) ile eş zamanlı olarak optimize etmişlerdir. Fr ve Ra'nın tahmini modelleri, tepki yüzey yöntemi ile geliştirilmiştir. MQL ve kriyojenik ortamlarda sırasıyla Ra'da ortalama %20,98 ve %19,86 iyileşme elde edilmiştir. Kriyojenik soğutma nedeniyle uçta artan yapışma, kırılma ve mikro çatlaklar Fr ve Ra'yı artırdığını söylemişlerdir. En yüksek Fr değeri, kuru bir ortamda $V=80$ m/dak ve $f=0,12$ mm/dev'de bulmuşlardır. MQL ve kriyo ortamlarındaki Fr değerleri, kuru frezelemeye kıyasla ortalama olarak %6,9 ve %4,9 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Optimum faktörler, MQL ortamı, 60 m/dak kesme hızı ve TGRA ile 0,04 mm/dev ilerleme oranı olarak bulmuşlardır. Geliştirilen matematiksel modellerin yüksek korelasyonları, modellerin güvenilir olduğunu gösterdiğini vurgulamışlardır. Bu nedenle, PH13-8Mo çeliğinin frezelenmesinde işlenebilirlik göstergeleri için elde edilen verilerin endüstriyel kullanımıyla sürdürülebilir işleme önemli destek sağlanacağını belirtmişlerdir [19]

Xu-Feng Cao ve arkadaşları, 13-8 paslanmaz çeliğin frezelenmesinde optimum işleme koşullarını belirlemişlerdir. Ayrıca, optimum işleme koşullarını belirlemek için Taguchi yöntemi uygulandı. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü gibi işleme özellikleri de analiz etmişlerdir. Frezenin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü, CM ile karşılaştırıldığında sırasıyla %20,1 ve %34,4 oranında azaltılmıştır. Optimum freze işleme koşulları, deneylerin tasarımı kullanılarak belirlemişlerdir. Kesme kuvvetinin S/N oranının analizi, kesme kuvvetini etkileyen en büyük faktörün DOC, ikincisinin ilerleme hızı ve üçüncüsünün mil hızı olduğunu vurgulamışlardır. Minimum kesme kuvveti, ilerleme hızı 500 mm/dak, mil hızı 2000 rpm ve DOC 0,15 mm olduğunda elde etmişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün S/N oranı analizi, kesme kuvvetini etkileyen en büyük faktörün mil hızı, ikinci olarak ilerleme hızı ve üçüncü olarak DOC olduğunu belirlemişlerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğü 200

mm/dak ilerleme hızı, 6000 dev/dak mil hızı ve 0,4 mm DOC ile elde etmişlerdir. Tepki optimizasyonu sonuçları, optimum işleme koşullarının 200 mm/dak ilerleme hızı, 6000 dev/dak mil hızı ve 0,15 mm DOC olduğunu doğruladı. (4) ANOVA sonuçları, kesme kuvveti üzerinde en büyük etkiye sahip etki faktörünün %45,2 katkıda bulunan DOC olduğunu gösterdi. Yüzey pürüzlülüğüne en büyük katkı %39,97 ile mil hızı olduğunu öne sürmüşlerdir [20]



BÖLÜM 3

PASLANMAZ ÇELİKLER

3.1. PASLANMAZ ÇELİK HAKKINDA GENEL BİLGİLER

PH çelikler, Avrupa standardı EN 10088 (İngiltere’de BS EN 10088 olarak yayınlanmıştır), minimum %10,5 krom içeriğine sahip olup korozyona dayanıklı demir-karbon alaşımı olarak isimlendirilir. İçeriğinde krom elementi içeren bazı takım çelikleri de dahil olmak üzere paslanmaz çelik kategorisinde sınıflandırılırlar. Bu paslanmaz çelikler ve çelikler arasındaki en büyük fark ise, korozyon direncini artırmak için belirli oranda krom eklenmesi ile oluşmaktadır.

Ticari olarak temini edilebilen bu paslanmaz çelikler ayrıca, içerisinde nikel, molibden, titanyum, niyobyum gibi birçok elementi değişken miktarlarda içermektedir. Elde edilen bu alaşımlar arasında en önemli elementler krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunların dışında, bakır, silisyum, alüminyum, titanyum, nitrojen, vanadyum gibi elementler ile farklı mekanik özellikler eklenebilir. İçeriğinde bulunan bu ilave elementler, yalnızca çeliğin çeliğin korozyon direncini artırmanın yanında mekanik mukavemet, sertlik, tokluk, manyetik özellikler gibi diğer özelliklerini geliştirmek veya şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi birçok çalışma özelliklerini geliştirmek için eklenir [21].

Çizelge 3. 1. Bazı paslanmaz çelik sınıfları ve özellikleri

Notlar	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Gücü (MPa)	Uzama (%)	Korozyon Direnci	Sertlik (HRB)
304	515	205	40	İyi	95
316	515	205	40	Harika	95

410	450	205	20	İlman	96
Dubleks	620	450	25	Yüksek	88

- **Krom (Cr)**, paslanmaz çeliklere temel korozyon direncini veren en önemli alaşım elementidir. Tüm paslanmaz çelikler en az %10,5 Cr içeriğine sahiptir ve korozyon direnci artan krom içeriğiyle artar. Krom ayrıca yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı direnci artırır ve ferritik bir mikro yapıyı destekler.
- **Nikel (Ni)**, ilavesinin temel nedeni, östenitik bir mikro yapıyı desteklemektir. Nikel genellikle sünekliği ve tokluğu artırır. Ayrıca aktif durumda korozyon oranını azaltır ve bu nedenle asitli ortamlarda avantajlıdır. Martensitik sınıflarda, azaltılmış karbon içeriğiyle birleştirilen nikel ilavesi kaynaklanabilirliği artırır
- **Molibden (Mo)**, korozyona karşı direnci önemli ölçüde artırır. Mekanik mukavemeti bir miktar artırır ve ferritik bir mikro yapıyı güçlü bir şekilde destekler. Ancak, molibden ayrıca ferritik, dubleks ve östenitik çeliklerde ikincil fazların oluşma riskini de artırır. Martensitik çeliklerde karbür çökmesi üzerindeki etkisi nedeniyle daha yüksek temperleme sıcaklıklarında sertliği artıracaktır.
- **Mangan (Mn)**, genellikle paslanmaz çeliklerde sıcak sünekliği iyileştirmek için kullanılır. Ferrit/östenit dengesi üzerindeki etkisi sıcaklığa göre değişir: düşük sıcaklıkta mangan bir östenitik dengeleyicidir ancak yüksek sıcaklıklarda ferriti dengeler. Mangan nitrojenin çözünürlüğünü artırır ve dubleks ve östenitik paslanmaz çeliklerde yüksek nitrojen içerikleri elde etmek için kullanılır. Mangan, bir östenitik oluşturucu olarak paslanmaz çelikteki nikelin bir kısmını da değiştirebilir [22].

PH çelikler oksidasyon direnci mükemmel olup ayrıca ısıya dayanıklı ve kriyojenik uygulamalarda da kullanılabilir.

3.2. PASLANMAZ ÇELİK TÜRLERİ

Paslanmaz çelikler özellikleri ve kullanım alanlarına göre 5 ana grupta sınıflandırılırlar;

1. Östenitik paslanmaz çelikler,
2. Ferritik paslanmaz çelikler,
3. Martensitik paslanmaz çelikler,
4. Dupleks (Duplex) paslanmaz çelikler,
5. PH (Çökmeyle sertleşebilen) paslanmaz çelikler.

3.2.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelik, paslanmaz çeliklerin en büyük ailesidir ve tüm paslanmaz çelik üretiminin yaklaşık üçte ikisini oluşturur. Östenitik bir mikro yapıya sahiptirler. Bu mikro yapı, kriyojenik bölgeden erime noktasına kadar tüm sıcaklıklarda östenitik bir mikro yapıyı korumak için yeterli nikel ve/veya manganez ve nitrojen ile alaşımlanarak elde edilir. Bu nedenle, östenitik paslanmaz çelikler tüm sıcaklıklarda aynı mikro yapıya sahip oldukları için ısı ile sertleştirilemezler. Soğuk işlemeyle güçlendirilebilmelerine rağmen, bu ince sac ve küçük çaplı çubukla sınırlıdır. Östenitik mikro yapıları onlara mükemmel şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik kazandırır ve esasen manyetik değildirler. Ayrıca kriyojenik sıcaklıklarda sünekliklerini korurlar.

Östenitik paslanmaz çelik kaliteleri 200 serisi ve 300 serisi paslanmaz çelik malzemelerden oluşmaktadır.

200 serisi, nikel kullanımını en aza indirmek için manganez ve nitrojen kullanımını en üst düzeye çıkaran krom-manganez-nikel alaşımlarıdır. Nitrojen ilavesi nedeniyle, 300 serisi paslanmaz çelikten yaklaşık %50 daha yüksek akma dayanımına sahiptirler. Tip 201 soğuk işleme ile sertleştirilebilir; Tip 202 genel amaçlı bir paslanmaz çeliktir. Nikel içeriğinin azaltılması ve manganezin artırılması zayıf korozyon direncine neden olmaktadır.

300 serisi, östenitik mikro yapılarını neredeyse sadece nikel ilavesiyle elde eden krom-nikel alaşımlarıdır. 300 serisi en büyük gruptur ve en yaygın kullanılanıdır. En iyi bilinen kalite, sırasıyla %18 krom ve %8 veya %10 nikel bileşimi nedeniyle 18/8

ve 18/10 olarak da bilinen Tip 304'tür. İkinci en yaygın östenitik paslanmaz çelik, Tip 316'dır. %2 molibden ilavesi, asitlere ve klorür iyonlarının neden olduğu lokal korozyona karşı daha fazla direnç sağlar. Düşük karbonlu versiyonlar, örn. 316L veya 304L, kaynaktan kaynaklanan korozyon sorunlarını önlemek için kullanılır. "L", alaşımın karbon içeriğinin %0,03'ün altında olduğu anlamına gelir ve bu, kaynakta yer alan yüksek sıcaklıkların neden olduğu hassasiyetin (tane sınırlarında krom karbürlerinin çökmesi) önlenmesini sağlar [23].

3.2.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelik, çok az veya hiç nikel içermeyen %10,5 ila %27 krom içeren karbon çeliği gibi bir ferrit mikro yapısına sahiptir. Bu mikro yapı, krom ilavesi nedeniyle tüm sıcaklıklarda mevcuttur ve östenitik paslanmaz çelik gibi ısı ile sertleştirilemez. Östenitik paslanmaz çelik ile aynı derecede soğuk işlemle güçlendirilemezler. Karbon çeliği gibi manyetikler. Isıdan etkilenen bölgedeki tane büyümesi nedeniyle kaynak yapılması sorunludur, bu da sünekliği azaltır ve çatlaklara neden olabilir. Krom ve molibden içeriklerinin artması, östenitik paslanmaz çelikte olduğu gibi korozyon direncini artırır, ancak bu yüksek alaşımlama, kaynak sırasında gevrekleşen intermetalik fazın çökmesine neden olur. Kaynaktan kaynaklanan bu mikro yapısal sorunlar, ferritik paslanmaz çeliğin kullanımını çok ince kalınlıklarla sınırlar ve bu nedenle büyük, kalın duvarlı kapların ve tankların ve östenitik paslanmaz çelik gibi yapıların yapımında kullanılmaz. Yaygın ferritik sınıflar şunlardır: Çamaşır makinesi tamburlarında, bulaşık makinesi iç kısımlarında ve buzdolabı dış kısımlarında kullanılan %17 krom içeren Tip 430. %11 krom içeren Tip 409, otomotiv egzozlarının üretiminde yaygın olarak kullanılır. Ferritik paslanmaz çeliğin en büyük dezavantajı, düşük tokluktur. Martensitik paslanmaz çelik gibi, ferritik paslanmaz çelik de ferromanyetikdir⁴. Ancak, ferritik paslanmaz çeliğin manyetik davranışı martensitik paslanmaz çelik kadar güçlü değildir [22].

3.2.3 Martensitik Paslanmaz Çelikler

Martensitik paslanmaz çelik, geniş bir özellik yelpazesi sunar ve paslanmaz mühendislik çeliği, paslanmaz takım çeliği, sürünmeye dayanıklı çelik olarak kullanılmaktadır. Martensitik paslanmaz çelik, %12-15 krom ve %0,2-1 molibden içerir. Martensitik paslanmaz çelik ayrıca nikel içermez ve %0,1-1 karbon içerir. Bu kombinasyon doğası gereği ferromanyetiktir. Manyetik özellikleri, uygulanan mıknatıslanma alanının gücüne bağlıdır. Martensitik paslanmaz çelik, sertleştirme işlemi sırasında mıknatıslanırsa kalıcı manyetik özellikler sergiler [22].

3.2.4 Dupleks Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelik, östenit ve ferritin karışık bir mikro yapısına sahiptir. Yüksek krom (%19-32), molibden (%5'e kadar) ve östenitik paslanmaz çeliğe göre daha düşük nikel içeriği ile karakterize edilirler. Dupleks paslanmaz çelik, östenitik paslanmaz çeliğe kıyasla yaklaşık iki kat daha fazla mukavemete sahiptir. Karışık mikro yapıları, östenitik paslanmaz çelik Tip 304 ve 316'ya kıyasla klorür gerilim korozyon çatlağına karşı gelişmiş direnç sağlar. Dupleks paslanmaz çelik, korozyona karşı mükemmel direnç ve çok yüksek mekanik mukavemet sunar. Dupleks paslanmaz çeliğin yüksek korozyon direnci, karbon çeliğinden ve geleneksel paslanmaz çelikten önemli ölçüde daha fazla çalışma süresi sağlarken, mekanik mukavemet daha hafif yapılara, daha kompakt sistem tasarımına ve daha az kaynak yapılmasına olanak tanır [22].

3.2.5 Çökelti Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Çökelti sertleşmeli paslanmaz çelik, östenitik çeşitlerle karşılaştırılabilir korozyon direncine sahiptir, ancak diğer martensitik sınıflardan bile daha yüksek mukavemetlere çökelti sertleştirilmesi yapılabilir. En yaygın olan 17-4 PH, yaklaşık %17 krom ve %4 nikel kullanır [22].

3.3. PH GRUBU PASLANMAZ ÇELİKLERİN KULLANIM YERLERİ

Paslanmaz çelikler, alaşım içeriği nedeniyle yüksek kalıntı değeri ve mükemmel dayanıklılığın bir kombinasyonuna sahiptir ve yaygın olarak yeniden kullanıma ve geri dönüşüme uygundur.

2017 yılında sektör başına kullanılan paslanmaz çelikler şu şekildedir:

1. Metal ürünler %37,5
2. Makine Mühendisliği %28,3
3. İnşaat %12,3
4. Motorlu taşıtlar ve parçaları %9,4
5. Elektrikli makineler %7,6
6. Diğer taşımacılık %4,9 [24]

Herhangi bir implant malzemesinin seçilmesindeki temel kriter, iyi biyouyumluluğa sahip olmasıdır. Metaller ve alaşımlar, iyi biyouyumlulukla gerekli mekanik mukavemeti ve makul korozyon direncini sağlayan implantlar olarak çeşitli formlarda yaygın olarak kullanılmıştır. AISI 316L paslanmaz çelikler, kobalt-krom alaşımları, ticari olarak saf titanyum ve Ti-6Al-4V alaşımları, implant cihazları için kullanılan tipik metalik biyomalzemelerdir. Östenitik paslanmaz çelikler, ortopedik uygulamalar için en yaygın kullanılan malzemedir. Paslanmaz çeliklerin üretimi ve kaynaklanması, Co-Cr alaşımlarına ve Ti ve alaşımlarına kıyasla kolaydır. Paslanmaz çelik implantlar, yapay eklemler gibi sabit implantların yanı sıra kemik iyileşmesine yardımcı olmak için geçici implantlar olarak kullanılır.

Paslanmaz çelikler, petrol endüstrisinde, özellikle aşındırıcı ortamlarda karbon çeliğine alternatif olarak çok çeşitli potansiyel uygulamalara sahiptir. Bu malzemelerle korozyon sorunlarına neden olabilen bir dizi ortam arasında, petrol sahası hizmetinde yalnızca klorür çözeltileri ve hidrojen sülfür önemlidir.

Son on yıldan bu yana dubleks (östeno-ferritik) ve süperdubleks kaliteler endüstride giderek daha fazla kullanılmakta ve genellikle teknik ve/veya ekonomik nedenlerle östenitik veya süperöstenitik kalitelerin yerini almaktadır.

3.4. PH GRUBU PASLANMAZ ÇELİKLERİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

3.4.1 PH Grubu Paslanmaz Çeliklerin Avantajları

PH grubu paslanmaz çeliklerin avantajları şunlardır;

- Paslanmaz çeliklerin en büyük avantajlarından birisi korozyon direncinin yüksek olmasıdır. Yüzeyde oluşan krom ekşit tabakası sayesinde hava, su, asitleri deniz suyu, nemli ortamlar gibi maddelere karşı dirençleri yüksektir.
- Yüzeyi pürüzsüz ve gözeneksiz olduğu için bakteri barındırmaz, bu sebeple gıda, ilaç ve sağlık sektörlerinde de tercih edilir.
- Bakım ihtiyaçları az olmakla birlikte yüksek dayanıma sahiptir ve uzun yıllar dayanıklıdır. Bu da uzun vade kullanımda ekonomik avantaj sağlar.
- Paslanmaz çeliklerin mekanik dayanımı yüksektir; darbelere ve aşınmaya karşı dirençleri yüksektir. Isıya dayanıklı paslanmaz çeliklerde mevcuttur (Örneğin 310 kalite).

Östenitik paslanmaz çelikler (örn. 304,316) manyetik olmadığı gibi ferritik ve martensitik türler manyetik olabilirler. [21]

3.4.2 PH Grubu Paslanmaz Çeliklerin Dezavantajları

PH grubu paslanmaz çeliklerin avantajları olmasına rağmen dezavantajları şunlardır;

- Özellikle işlenebilirliği östenitik sınıflar için işleme sırasında gereğinden fazla takım aşınmasına neden olmaktadır. Kaynaklanabilirlik konusunda özel ekipmanlar gerekebilir.
- Kesme, delme şekillendirme işlemleri diğer malzemelere göre daha zordur.
- İçerisinde bulunduğu alaşımlar nedeniyle hammaddesi daha pahalıdır (krom , nikel alaşım elementleri gibi).
- Paslanmaz çelikler, alüminyum gibi benzer malzemelere göre daha yoğun ve ağırdır. Bu da otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde kullanımını dezavantaj sağlayabilir.
- Yüzeyleri parlak olmasına rağmen çizilmeye karşı dirençleri zayıftır ve nemli ortamlarda galvaniz korozyon oluşabilir.

- Östenitik paslanmaz çelikler (örn. 304,316) manyetik olmadığı gibi ferritik ve martensitik türler manyetik olabilirler. Bu durum istenmeyen bir özellik olabilir.[21]



BÖLÜM 4

TALAŞLI İMALAT

Talaşlı imalat işlemlerinin önemi, takım maliyeti, işçilik maliyeti ve sermaye yatırım maliyeti dahil olmak üzere bu faaliyetle ilişkili toplam maliyeti göz önünde bulundurarak anlaşılabilir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, talaşlı imalat ile ilişkili yıllık maliyet gayri safi milli hasılanın yaklaşık %10'u olarak tahmin edilmiştir. Kesme işleminin önemi, karmaşık yapılarda kullanılan hemen hemen her cihazın bir veya daha fazla işlenmiş yüzeye veya deliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme işlemeye yönelik rasyonel bir yaklaşım geliştirmek için birkaç neden vardır:

1. Kesme tekniklerini iyileştirmek- üretkenlikte küçük iyileştirmeler bile yüksek hacimli üretimde büyük önem taşır
2. Daha fazla hassasiyete ve daha uzun kullanım ömrüne sahip ürünler üretmek.
3. Üretim oranını artırmak ve mevcut aletlerle daha fazla sayıda ve çeşitlilikte ürün üretmek.

En yaygın kullanılan üç ana kesme işlemi şunlardır:

- Tornalama
- Frezeleme
- Tornalama

4.1. TALAŞ KALDIRMA MEKANİZMASI VE TALAŞ OLUŞUMU

İyi yüzey kalitesi elde etmek ve talaş kaldırmayı en üst düzeye çıkarmak, herhangi bir işleme operasyonu için kesin boyutlar elde etmek kadar önemlidir. İşleme sırasında, ürünün yüzey pürüzlülüğünü ve talaş kaldırma oranını doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen çok sayıda işlem değişkeni kullanılır. Tornalama işleminde yüzey aşınması ve talaş kaldırma, en önemlileri ilerleme, hız ve kesme derinliği

olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir. Bu ideal kriterlerin tam olarak anlaşılması, işleme maliyetlerini düşürmeyi ve ürün kalitesini artırmayı kolaylaştıracaktır.

Talaş kaldırarak işleme, parça şekillendirmede hala önde gelen bir teknolojidir. Geleneksel mekanik kesme yöntemleri (ör. tornalama, frezeleme, delme) özellik tabanlı geometri işlemede yaygındır. Ancak, daha iyi tolerans ve parçalarla ilgili daha yüksek kalite talepleri nedeniyle süreçlerin ve yöntemlerin giderek daha hassas olması gerekir. Aslında, ince talaş kaldırma kesme işlemleri, hassas ve mikro parça üretimi için temel gereksinimler olarak kabul edilir. Kesme kuvveti bileşenleri, mekanik kesme işlemlerinin ana çıktı parametreleridir. Genellikle iş parçası malzemesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, kesme kenarının geometrisine ve uygulanan teknolojik parametrelere bağlıdır.

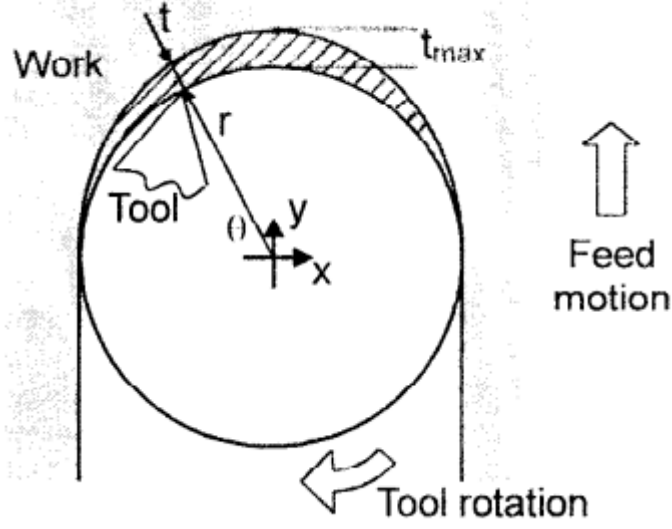
Kesme kuvvetlerinin daha genel, kesin ve esnek bir modelini üretmek için, kesme sürecini temel malzeme deformasyonu ve yüzey temas mekanizmaları seviyelerinde araştırmak ve tanımlamak tavsiye edilir.

Hem geleneksel ölçekli frezelemede hem de mikro frezelemede, malzeme kaldırma işlemi iki eşzamanlı hareketle gerçekleştirilir: Şekil 4.2.'de gösterildiği gibi ilerleme hareketi ve takımın dönüşü. Geleneksel frezeleme işleminde, diş başına radyal ilerleme genellikle kesme kenarı yarıçapından çok daha büyüktür ve takım nispeten serttir. Bu nedenle, takımın her geçişi, Denklem (I) ile tanımlandığı gibi kalınlığı uzunluk boyunca değişen bir talaş üretir.

$$t = t_{\max} \sin\theta$$

Şekil 4. 1. Denklem 1

Burada t anlık kesilmemiş talaş kalınlığıdır, tmax maksimum kesilmemiş talaş kalınlığı ve θ dişin açısal pozisyonudur.



Şekil 4. 2. Frezeleme süreci şeması

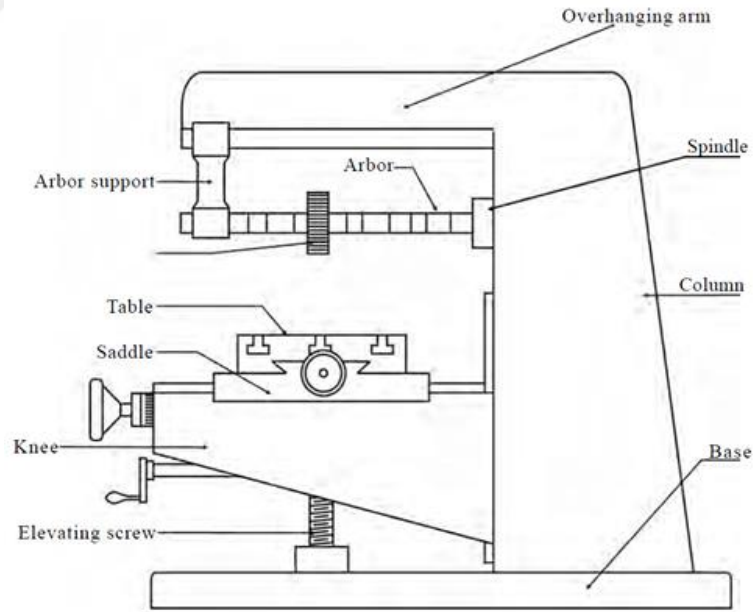
Geleneksel frezelemede, diş başına radyal ilerleme genellikle t_{max} ile çakışır. Bununla birlikte, mikro ölçekli frezelemede, takımın yapısal zayıflığı genellikle kesme kenarı yarıçapından daha küçük bir diş başına radyal ilerleme gerektirir. Minimum kesme derinliği teorisi (Yuan vd., 1996), kesme derinliği takımın kenar yarıçapından önemli ölçüde daha küçük olduğunda talaş oluşmayacağını öngörmektedir. Ayrıca, mikro frezeleme takımının küçük çapı küçük bir sertlikle sonuçlanır, bu nedenle takımlar daha kolay sapar. Takımın nispeten küçük bükülme sertliği, talaş oluşum sürecinin geleneksel durumdan daha da farklı olmasına neden olur. Bu nedenle, mikro frezelemede, maksimum kesilmemiş talaş kalınlığı, t_{max} , diş başına ilerlemeden farklı olabilir.

4.2. FREZELEME

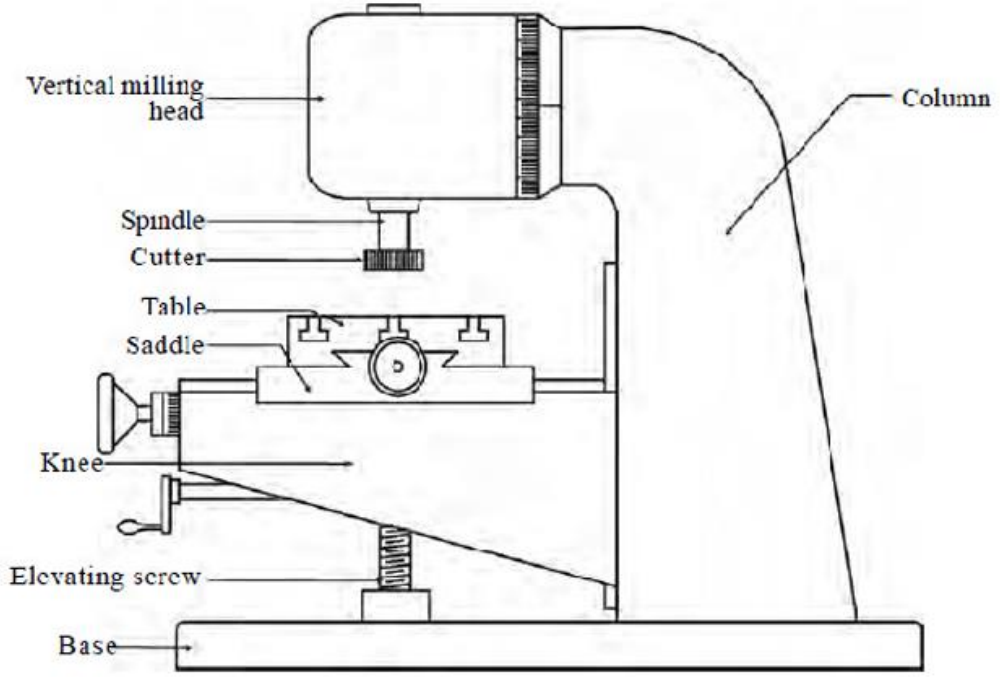
Frezeleme, iş parçasını dönen çok uçlu bir kesiciye besleyerek metali çıkarma işlemidir. Bu amaç için tasarlanan takım tezgahına freze makinesi denir. Freze makinesi düz yüzeyleri, konturlu yüzeyleri, dönme yüzeylerini, dış ve iç dişleri ve çeşitli kesitlerdeki helezon yüzeyleri işlemek için kullanılır. Bu takım tezgahıyla elde edilen yüzey kalite açısından üstündür ve daha doğru ve hassastır.

Freze makineleri makinenin genel tasarımına göre sınıflandırılır.

1. Sütun ve diz tipi
 - a) Düz freze makinesi
 - b) Üniversal freze makinesi
 - c) Çok amaçlı freze makinesi
 - d) Dikey freze makinesi
2. Masa tipi freze makinesi
3. Planya tipi freze makinesi
4. Özel tip freze makinesi



Şekil 4. 3. Yatay Freze Makinesi

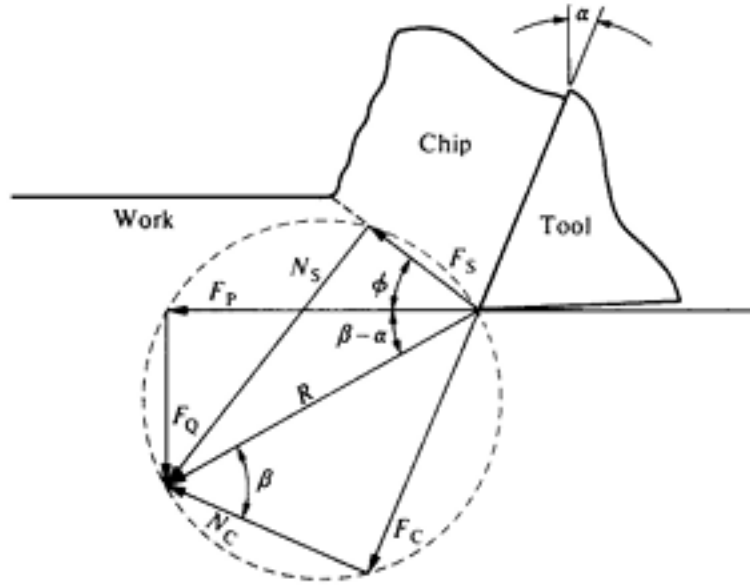


Şekil 4. 4. Dikey Freze Makinesi

4.2.1 Frezelemede Kesme Kuvveti

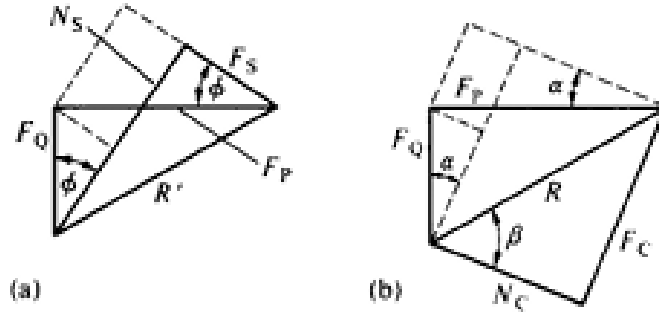
Metal malzemelerin işlenmesi sırasında, kesme kuvveti (F_c), takım-iş parçası titreşimini ve iş parçası boyut doğruluğunu etkileyen temel faktördür. Kesme kuvvetini analiz ederek doğru ve güvenilir bir kesme kuvveti modeli oluşturmak, yalnızca titreşim tahmininin temeli değil, aynı zamanda kesme parametrelerini optimize etmenin önemli bir ön koşuludur. Kesme kuvveti tahmininin doğruluğu büyük ölçüde malzemenin kesme kuvveti katsayılarına bağlıdır ve bunların tanımlanması bir kesme kuvveti modelinin çekirdeğini oluşturur. Bu nedenle, kesme kuvveti katsayıları kesme kuvveti modelindeki başlıca parametrelerdir ve bunların doğru tanımlanması, kesme işlemi araştırmaları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Talaş serbest bir cisim olarak izole edildiğinde (Şekil 3.5), yalnızca iki kuvvet dikkate alınmalıdır. Takım yüzeyi ile talaş arasındaki kuvvet (R) ve kesme düzlemi boyunca iş parçası ile talaş arasındaki kuvvet (R'). Denge için bu kuvvetler eşit olmalıdır. Kuvvetler R ve R' , Şekil 4.5'te gösterildiği gibi uygun şekilde üç bileşene ayrılır:



Şekil 4. 6. Bileşik kesme kuvveti çemberi

Kesme ve sürtünme kuvveti bileşenleri için, yatay ve düşey bileşenler (F_P ve F_Q) cinsinden analitik ilişkiler elde edilebilir; bu bileşenler genellikle deneysel olarak dinamometre yardımıyla belirlenebilmektedir.



Şekil 4. 7. Bileşke kesme kuvvetlerinin bileşenlerine ayrılması.

(a) Kesme düzlemi. (b) Takım yüzeyi.

Şekil 4.7a'dan açıkça görülmektedir.

$$F_S = F_P \cos \varphi - F_Q \sin \varphi$$

$$N_S = F_Q \cos \varphi + F_P \sin \varphi = F_S \tan (\varphi + \beta - \alpha)$$

Benzer şekilde, Şekil 3.7b'de görülmektedir.

$$F_C = F_P \sin \alpha + F_Q \cos \alpha$$

$$N_c = F_p \cos \alpha - F_q \sin \alpha$$

Takım yüzeyindeki bileşenler önemlidir çünkü bunlar, takım yüzeyindeki sürtünme katsayısının ($\mu = \tan \beta$, burada β Şekil 4.5'te gösterilen sürtünme açısıdır) belirlenmesini sağlar.

$$\mu = \frac{F_c}{N_c} = \frac{F_p \sin \alpha + F_q \cos \alpha}{F_p \cos \alpha - F_q \sin \alpha} = \frac{F_q + F_p \tan \alpha}{F_p - F_q \tan \alpha}$$

Şekil 4. 8. Takım yüzeyindeki sürtünme katsayısının belirlenmesi

4.2.2 Frezelemede Kesme Sıcaklığı

Zor işlenen malzemeler, yüksek dayanım-ağırlık oranı ve korozyon direnci nedeniyle farklı havacılık, otomotiv ve medikal endüstrilerde kullanılmaktadır. Zor işlenen malzemelerin işlenmesi sırasında yüksek mekanik ve termal yüklemeler meydana gelir; bu durum kesici takım ömrünü azaltır ve üretim maliyetlerini artırır. Sonuç olarak, zor işlenen malzemelerin frezeleme işlemlerinde kesme sıcaklığının analiz edilmesi ve düşürülmesi, daha yüksek malzeme kaldırma hızları ve daha uzun takım ömrü sağlayarak alıştırma işleme verimliliğini artıracaktır.

4.2.3 Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, mekanik parçaların performansını ve üretim maliyetini büyük ölçüde etkilediğinden, ürün kalitesinin önemli bir göstergesidir. Yüzey pürüzlülüğü; yorulma davranışı, korozyon direnci gibi mekanik özellikler ile sürtünme, aşınma, ışık yansımaları, ısı iletimi ve elektriksel iletkenlik gibi fonksiyonel özellikler üzerinde etkili olur. Yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi ve istenilen düzeyde yüzey kalitesi elde etmek için kontrol parametrelerinin optimize edilmesi konusunda birçok araştırma geliştirilmiştir; çünkü yalnızca uygun kesme parametrelerinin seçimiyle daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilebilir.

İmalat sanayilerinde, daha iyi bir ürün elde etmek amacıyla iş parçasından malzeme kaldırmak için çeşitli talaşlı imalat işlemleri uygulanmaktadır. Bu işlemler arasında, malzemeyi daha hızlı bir şekilde ve makul bir yüzey kalitesiyle kaldırabilme yeteneği sayesinde, frezeleme işlemi en önemli ve yaygın metal işleme operasyonlarından biridir. Son zamanlarda, frezelemede tam otomasyonun sağlanması amacıyla bilgisayarlı sayısal kontrollü (CNC) takım tezgâhları uygulanmaya başlanmıştır; çünkü bu tezgâhlar, üretkenlikte önemli artışlar sağlamakta, işlenen parçaların kalitesini artırmakta ve daha az operatör müdahalesi gerektirmektedir.

4.2.4 Frezelemede Kesici Takım Aşınması

Talaşlı imalat işlemlerinde mekanik enerji, plastik deformasyona dönüşür ve bu durum, kesici takım ile iş parçası arasında sürtünmeye ve artan ısı oluşumuna neden olur. Kesici takımlar, yüksek sürtünme ve temas nedeniyle zamanla zorlanır ve yıpranır. Takım aşınması, talaşlı imalat sürecinde meydana gelen mekanik, kimyasal ve termal gerilmeler sonucunda kesici takımlarda oluşan doğal bir durumdur. Takım aşınması, talaş oluşumu sırasında kesici takımın sürekli kullanımıyla meydana gelen ilerleyici bozulmadır ve bu durum kesme kuvvetinin artmasına, daha fazla işleme hatasına ve işlenmiş yüzey kalitesinin düşmesine neden olabilir.

Takım aşınmasını etkileyen birçok parametre vardır; bunlar arasında kimyasal bileşim, mikro yapı ve ısıl işlem gibi faktörler yer alır. Aşınmanın başlıca iki kaynağı bulunmaktadır: birincisi, aşındırma veya erozyon gibi mekanik sınırlamalar; ikincisi ise, malzemeye zarar veren korozyon gibi kimyasal etkileşimlerdir.

Kesici takım aşınması hem malzemenin şekillendirilebilirliği hem de nihai ürünün üretim maliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Oluşan kalıntı gerilmeler, plastik deformasyon (şekil değiştirme), yüzey altı enerji birikimi ve işlenmiş yüzey kalitesi gibi birçok parametre, takım aşınmasından etkilenir. Artan takım aşınması, malzemelerin yumuşamasına ve aşınmanın hızla artmasına neden olur; bu da takım ömrünü, işleme verimliliğini ve hassasiyeti olumsuz etkiler. Sürekli kesme işlemlerinde, işleme hızı arttıkça takım sıcaklığı da yükselir. Takım aşındıkça, işlenmiş yüzeyin altında kalan kalıntı gerilme ve şekil değiştirme miktarları da artış gösterir.

Artan kesme basınçları, yükselen kesme sıcaklıkları, kötü yüzey pürüzlülüğü, tamamlanan parçanın hassasiyetinde azalma, takım kırılması ve takım geometrisinin değişmesi, takım aşınmasının tüm sonuçlarıdır. İşleme sırasında yağlayıcı ve soğutucuların kullanılması, takım aşınmasını azaltmaya yardımcı olabilir.



BÖLÜM 5

MATERYAL VE YÖNTEM

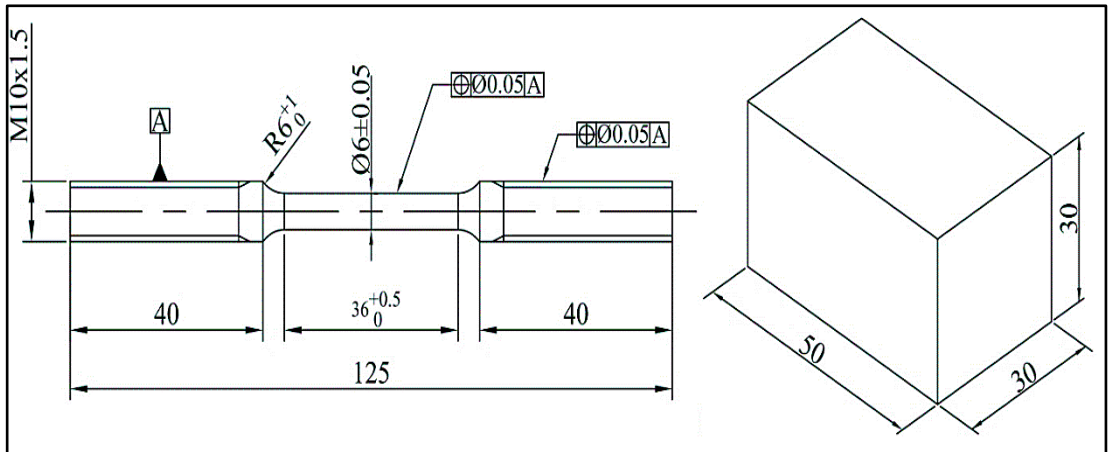
5.1. DENEY MALZEMESİ

Deneyleerde iş parçası olarak çökeltme ile sertleştirilen paslanmaz çelik ailesinin en iyi temsilcilerinden biri olan PH 13-8Mo paslanmaz çeliği seçilmiştir. PH 13-8Mo paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5. 1. PH 13-8Mo paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu.

Elementler										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Nb	S	N
Wt%	0.0328	0.0472	0.0231	12.75	2.17	8.26	1.07	0.0115	0.001	0.0105

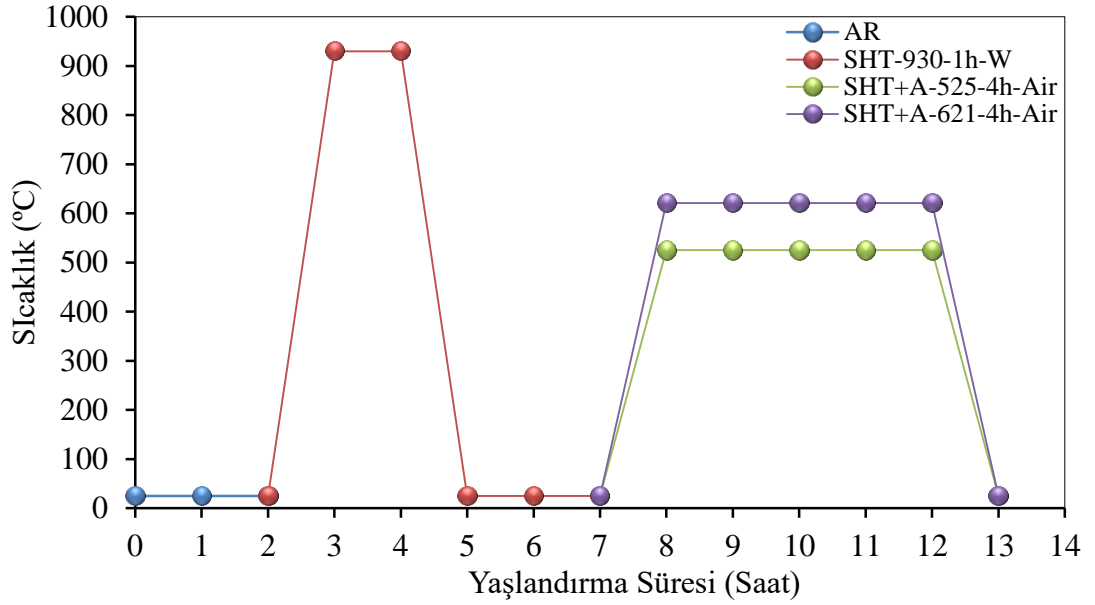
Frezeleme ve çekme deneyleri için hazırlanan numunelerin ölçüleri Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5. 1. Frezeleme ve çekme deneyleri için hazırlanan numunelerin ölçüleri.

5.1. ISIL İŞLEM PROSESİ

Çekme ve işlenebilirlik testleri için alındığı halde (AR) birer numune ayrıldı. Diğer tüm numuneler 930 °C’de 1 saat fırında bekletip havada soğutularak (SHT930-1h-AC) solüsyona alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalan numunelerin 1 tanesi 525 °C’de 4 saat fırında bekletip havada soğutma işlemi (SHTA525-4h-AC) ve diğer numune 621 °C’de 4 saat fırında bekletip havada soğutma işlemi (SHTA621-4h-AC) uygulanarak yaşlandırma işlemi tamamlandı. Yapılan yaşlandırma işleminin şematik görünümü Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 2. Isıl işlem prosesi.

5.3. SERTLİK OLCUMLARI

Ham malzemenin ve yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerin mikro sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi laboratuvarında bulunan Buehler marka Micromet 5103 model mikro sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri HV2 yükü 15 saniye süre ile numune üzerine uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her numune yüzeyinden 5 farklı ölçüm gerçekleştirilerek bun ölçümlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak numunelerin mikro sertlik değerleri

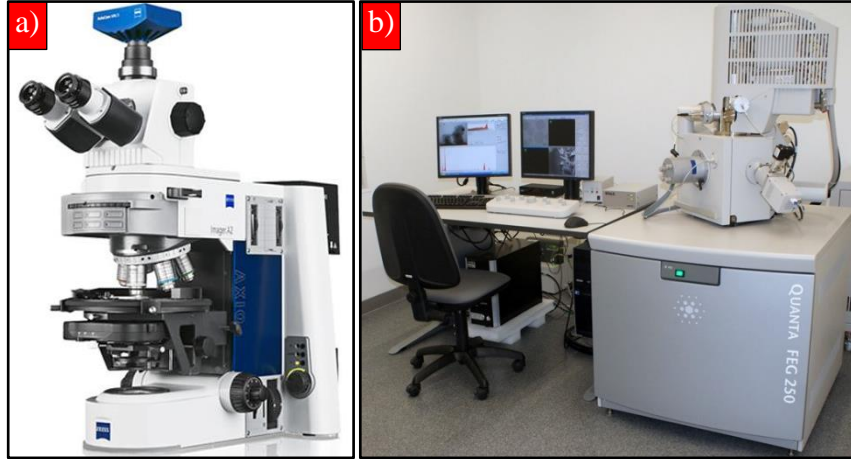
belirlenmiştir. Mikro sertliklerin gerçekleştirildiği Buehler marka Micromet 5103 model mikro sertlik ölçüm cihazı Şekil 5:2’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 3. Buehler Micromet 5103 mikro sertlik ölçüm cihazı.

5.4. MİKROYAPI VE SEM İNCELEMELERİ

Metalografik incelemeler için bakalite gömülen numuneler farklı meshlere sahip zımparalar kullanılarak pürüzler yok edilinceye kadar zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi sonrası yüzeyler elmas pasta ile parlatılarak dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Son olarak mikroyapı incelemeleri için numuneler Marble çözeltisi kullanılarak dağlama işlemi yapılarak yüzeyler alkolle temizlenmiştir. Mikroyapı incelemeleri Zeiss AxioCam Mrc5 metal mikroskopu ile farklı büyütmelerde görüntüler alınarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin SEM incelemeleri ve EDS analizleri FEI marka Quanta FEG 250 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Optik ve taramalı elektron mikroskoba ait görseller Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5. 4. a) Zeiss AxioCam Mrc5 optik mikroskobu, b) FEI Quanta FEG 250 Taramalı Elektron Mikroskobu

5.5. ÇEKME DENEYLERİ

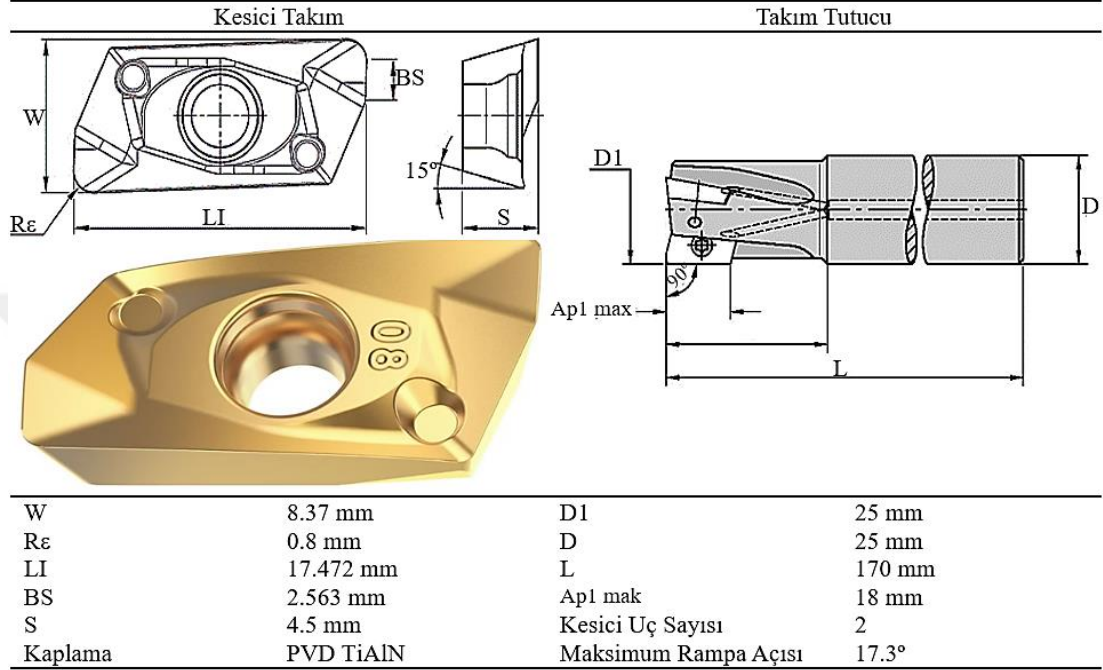
Çekme test numunelerinden üç adet hazırlanarak çekme testleri üç tekrarlı Instron marka 5982 model çekme test cihazında yapılmıştır. Yapılan testlerin ortalamaları hesaplanarak ortalama akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzamaları belirlenmiştir. Instron marka 5982 model çekme test cihazının görseli Şekil 5.4'de sunulmuştur.



Şekil 5. 5. Instron marka 5982 model çekme test cihazının görseli.

5.6. KESİCİ TAKIM VE TAKIM TUTUCUSU

Frezeleme testlerinde Kennametal firmasının ürettiği PVD TiAlN kaplı karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Kesici takımlar ISO standardına göre EDPT140408PDSRGD KC725M olarak kodlanmıştır. Kesici takımların bağlanması aynı firma tarafından üretilen 25A02R050A25SED18-170 tipi 2 ağızlı takım tutucu kullanılmıştır. Kesici takıma ve takım tutucuya ait bilgiler Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 6. Kesici takım ve takım tutucuya ait görseller ve bilgiler.

5.7. TAKIM TEZGÂHI

İşlenebilirlik deneyleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan 22,4 kW tezgâh gücüne, 12.000 rpm iş miline sahip olan Haas firması tarafından üretilen VF-2SS model 5 eksenli dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Haas VF-2SS model 5 eksenli dik işleme merkezine ait görsel Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5. 7. Haas VF-2SS model 5 eksenli dik işleme merkezi.

5.8. KESME KUVVETLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

İşleme sırasında kesme kuvvetlerinin ölçülmesinde KISTLER firması tarafından üretilen 9272 A tipi dört bileşenli piezoelektrik dinamometre kullanılmıştır. Ölçümler sırasında dinamometreden gelen sinyaller RS-32 veri aktarma kablosu ile Amplifier aktarılmıştır. Verilerin işlenmesi ve grafiklerin elde edilmesi için KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı ile kullanılmıştır. KISTLER 9272 A tipi dört bileşenli piezoelektrik dinamometreye ait görseş Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 8. KISTLER 9272 A tipi dört bileşenli piezoelektrik dinamometre.

5.9. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ÖLÇÜLMESİ

İşlenmiş yüzeylerin pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo Surface SJ-210 model pürüzlülük cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler işleme yönüne dik 4 ölçümün ortalaması hesaplanarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır. Mitutoyo Surface SJ-210 pürüzlülük cihazı görseli Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5. 9. Mitutoyo Surface SJ-210 pürüzlülük cihazı

5.10. KESME SICAKLIĞININ ÖLÇÜLMESİ

Kesme boyunca kesme sıcaklıkları FLIR İ60 marka kızılötesi kamera ile ölçülmüştür. Kesme sırasında alınan beş sıcaklık ölçümünün ortalaması ile ortalama kesme sıcaklıkları belirlenmiştir. FLIR İ60 marka kızılötesi kameranın görseli Şekil 5.10’da sunulmuştur.



Şekil 5. 10. FLIR İ60 kızılötesi kamera

5.11. KESME SICAKLIĞININ ÖLÇÜLMESİ

Yapılan çalışmada kullanılacak kesme parametreleri kesici takım kataloğu ve literatürde daha önce yapılmış çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Çalışmada

ham malzemenin ve yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş numunelerin frezelenmesinde üç farklı kesme hızı (80, 120 ve 160 m/dak) üç farklı ilerleme miktarı (0,07; 0,12; 0,1 ve 0,17 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (1mm) seçilmiştir. Söz konusu çalışma ile farklı mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip Ph 13-8Mo paslanmaz çelik için ideal kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneyleerde kullanılan numuneler ve bu numunelerin işlendiği kesme parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5. 2. Deney numuneleri ve kesme parametreleri.

Deney No	Numuneler	Vc (m/dak)	f (mm/dev)	Deney No	Numuneler	Vc (m/dak)	f (mm/dev)
1	AR	80	0,07	19	SHT+A-525-4h-F	80	0,07
2	AR	80	0,12	20	SHT+A-525-4h-F	80	0,12
3	AR	80	0,17	21	SHT+A-525-4h-F	80	0,17
4	AR	120	0,07	22	SHT+A-525-4h-F	120	0,07
5	AR	120	0,12	23	SHT+A-525-4h-F	120	0,12
6	AR	120	0,17	24	SHT+A-525-4h-F	120	0,17
7	AR	160	0,07	25	SHT+A-525-4h-F	160	0,07
8	AR	160	0,12	26	SHT+A-525-4h-F	160	0,12
9	AR	160	0,17	27	SHT+A-525-4h-F	160	0,17
10	SHT-930-1h-W	80	0,07	28	SHT+A-621-4h-F	80	0,07
11	SHT-930-1h-W	80	0,12	29	SHT+A-621-4h-F	80	0,12
12	SHT-930-1h-W	80	0,17	30	SHT+A-621-4h-F	80	0,17
13	SHT-930-1h-W	120	0,07	31	SHT+A-621-4h-F	120	0,07
14	SHT-930-1h-W	120	0,12	32	SHT+A-621-4h-F	120	0,12
15	SHT-930-1h-W	120	0,17	33	SHT+A-621-4h-F	120	0,17
16	SHT-930-1h-W	160	0,07	34	SHT+A-621-4h-F	160	0,07
17	SHT-930-1h-W	160	0,12	35	SHT+A-621-4h-F	160	0,12
18	SHT-930-1h-W	160	0,17	36	SHT+A-621-4h-F	160	0,17

BÖLÜM 6

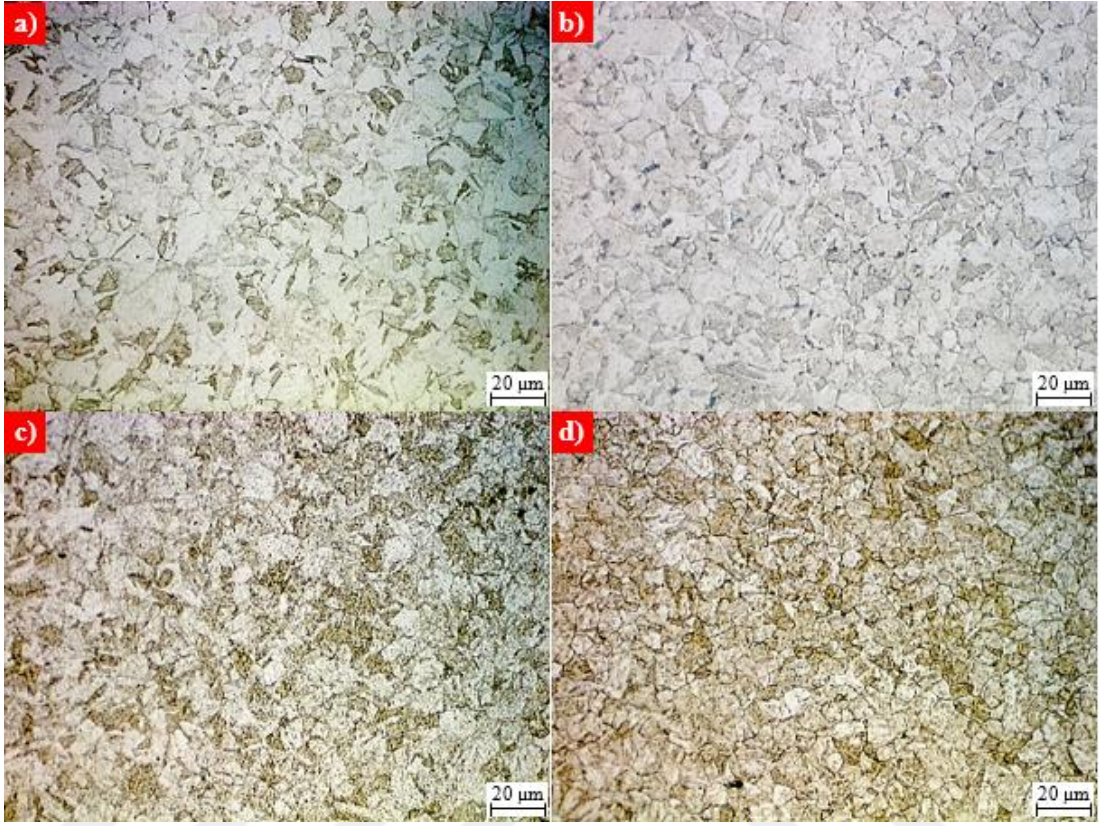
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

6.1. MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLER

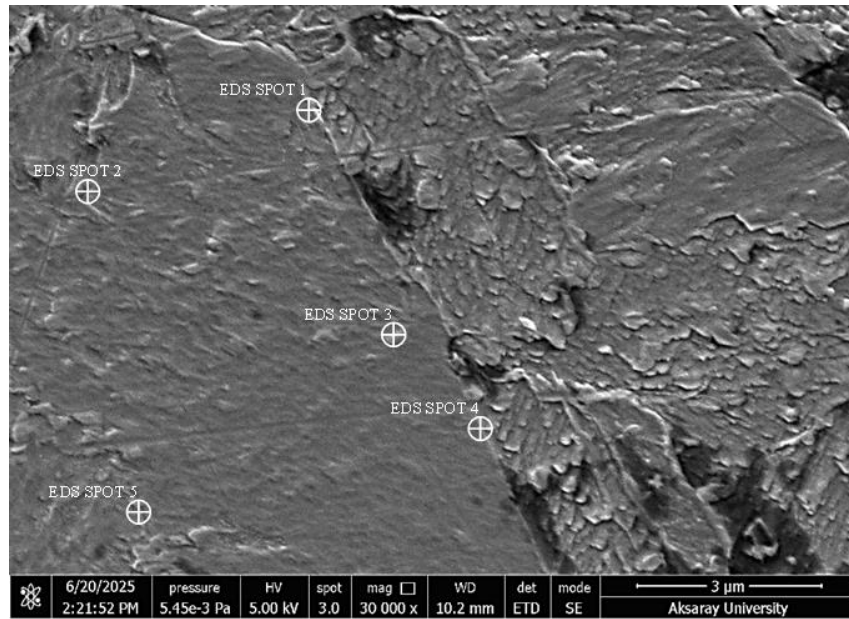
AR ve yaşlandırma işlemi uygulanan PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde oluşan kesme kuvvetini, yüzey pürüzlülüğünü, kesme sıcaklığını ve takım aşınma mekanizmalarındaki farklılıkları daha iyi açıklayabilmek için numunelerdeki mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki farklılıkları incelemek gerekmektedir. Bu nedenle AR, SHT930-1h-AC, SHTA525-4h-AC ve SHTA621-4h-AC numunelerinden optik mikroskopla elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

Şekil 6.1-a incelendiğinde AR numunesinin mikroyapısında martenzit ve östenit fazların homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Şekil 6.1-b'de solüsyona alma işlemi sonrası SHT930-1h-AC numunesinin mikroyapısı verilmiştir. SHT930-1h-AC numunesinin mikroyapı görüntüsü incelendiğinde östenit fazın tane boyutunun arttığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyon hareketleri yüksek olduğu için beklenen bir sonuçtur. Çeliklerde küçük tanelerin birleşmesi tane boyutunun artmasına sebep olmaktadır [25]. Ayrıca martenzit fazların küçülerek tane sınırlarında biriktiği görülmektedir. Şekil 6.1-c'de SHTA525-4h-AC numunesinin mikroyapısında daha ince taneli martenzit fazı gözlenmiştir. Yaşlandırma sıcaklığının düşürülmesi ve süresinin artırılması kaba taneli martenzitler çözülerek daha ince hale geldiği görülmüştür. Martenzitin çözünmesi, martenzit fazından karbonun sürekli reddedilmesinden veya matris fazı içinde ters östenit oluşmasından kaynaklanıyor olabilir [26]. Ayrıca Şekil 6.2'de verilen SEM görüntüsünde tane sınırlarında NiAl, MnC, NiMo, MoC ve CrC çökeltilerinin oluştuğu görülmektedir. Şekil 6.1-d'de SHTA621-4h-AC numunesinin mikroyapısı incelendiğinde uzun süre

yüksek sıcaklıklarda yaşlandırma yapıldığında beynit fazının oluştuğu görülmektedir. Bu sonuç literatürde yapılan çalışma ile paralellik göstermektedir [27].



Şekil 6. 1. PH 13-8Mo çeliğinin optik mikroskop görüntüleri. a) AR, b) SHT930-1h-AC, c) SHTA525-4h-AC, d) SHTA621-4h-AC.

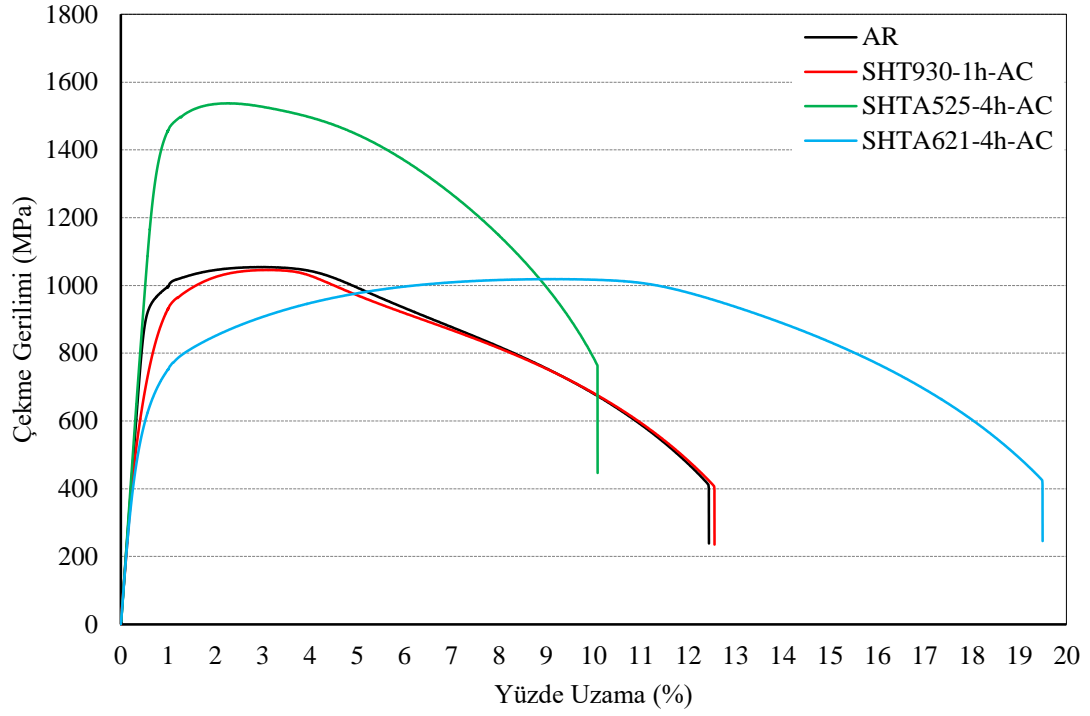


Şekil 6. 2. SHTA525-4h-AC numunesine ait SEM görüntüsü.

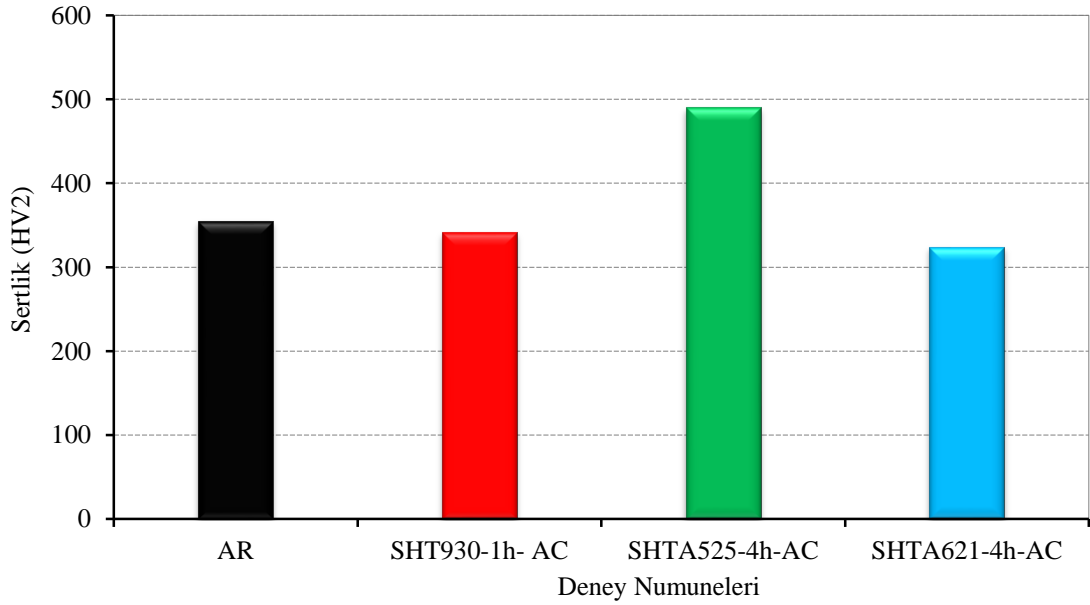
Çizelge 6. 1. SHTA525-4h-AC numunesine ait EDS sonuçları.

EDS Spots	C	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
EDS Spot 1	2,83	0,93	0,76	12,21	4,62	60,37	7,85	10,43
EDS Spot 2	7,71	2,63	0,82	11,42	8,26	59,15	6,61	3,4
EDS Spot 3	2,11	0,72	0,21	9,11	3,68	71,63	6,93	5,61
EDS Spot 4	2,17	1,69	0,41	9,5	2,25	73,79	5,8	4,39
EDS Spot 5	3,88	3,17	0,12	8,79	5,32	64,77	6,54	7,41
Ortalama	3,74	1,83	0,46	10,21	4,83	65,94	6,75	6,25

Farklı yaşlandırma koşulları altında elde edilen PH 13-8Mo numunelerine uygulanan çekme ve sertlik test sonuçlarındaki değişim sırası ile Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 incelendiğinde AR numunesinin çekme ve sertlik test sonuçları sırası ile 1057 MPa ve 355 HV2 ölçülmüştür. Solüsyona alınan SHT930-1h-AC numunesinin çekme ve sertlik test sonuçları AR numunesine göre sırası ile %1,14 ve %3,7 oranlarında azalma olmuştur. SHT930-1h-AC numunesinin AR numunesine göre çekme ve sertlik test sonuçlarının azda olsa düşük çıktığı görülmüştür. Bu durum solüsyona alma işleminden sonra yapıda oluşan kaba taneli östenit fazın oluşması çekme dayanımını ve sertlik değerlerinin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir [28,29]. Maksimum çekme ve sertlik test sonuçları sırası ile 1547 MPa ve 490 HV2 ile SHTA525-4h-AC numunesinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar bize, SHTA525-4h-AC numunesinin sertlik test sonuçlarının AR ve SHT930-1h-AC numunelerine göre sırası ile ortalama %38 ve %43,3 oranında arttığını göstermiştir. Benzer şekilde SHTA525-4h-AC numunesinin çekme test sonuçlarının AR ve SHT930-1h-AC numunelerine göre sırası ile ortalama %46,4 ve %48 oranında arttığını göstermiştir. Yapılan yaşlandırma işlemi ile çekme ve sertlik değerlerindeki bu artış matris fazı içerisinde oluşan NiAl, MnC, NiMo, MoC ve CrC gibi çökeltilerle açıklanabilir [30-32]. Buda Şekil 6.2’de ve Çizelge 6.1’de SHTA525-4h-AC numunesinden alınan SEM görüntüsünde ve EDS görünen NiAl, MnC, NiMo, MoC ve CrC çökeltileri desteklemektedir. Yaşlandırma sıcaklığının artırıldığı SHTA621-4h-AC numunesinin çekme ve sertlik test sonuçları AR numunesine göre sırası ile %3,7 ve %8,7 azalmıştır. Mekanik özelliklerindeki bu azalma yapıda oluşan beynit fazın sertliği ve çekme gerilmesinin azalmasına neden olurken yüzde uzamasının artmasına neden olmuştur.



Şekil 6. 3. Ham malzeme ve yaşlandırma uygulanmış Ph 13-8Mo paslanmaz çeliğine ait numunelerin çekme gerilimi- % uzama diyagramları.

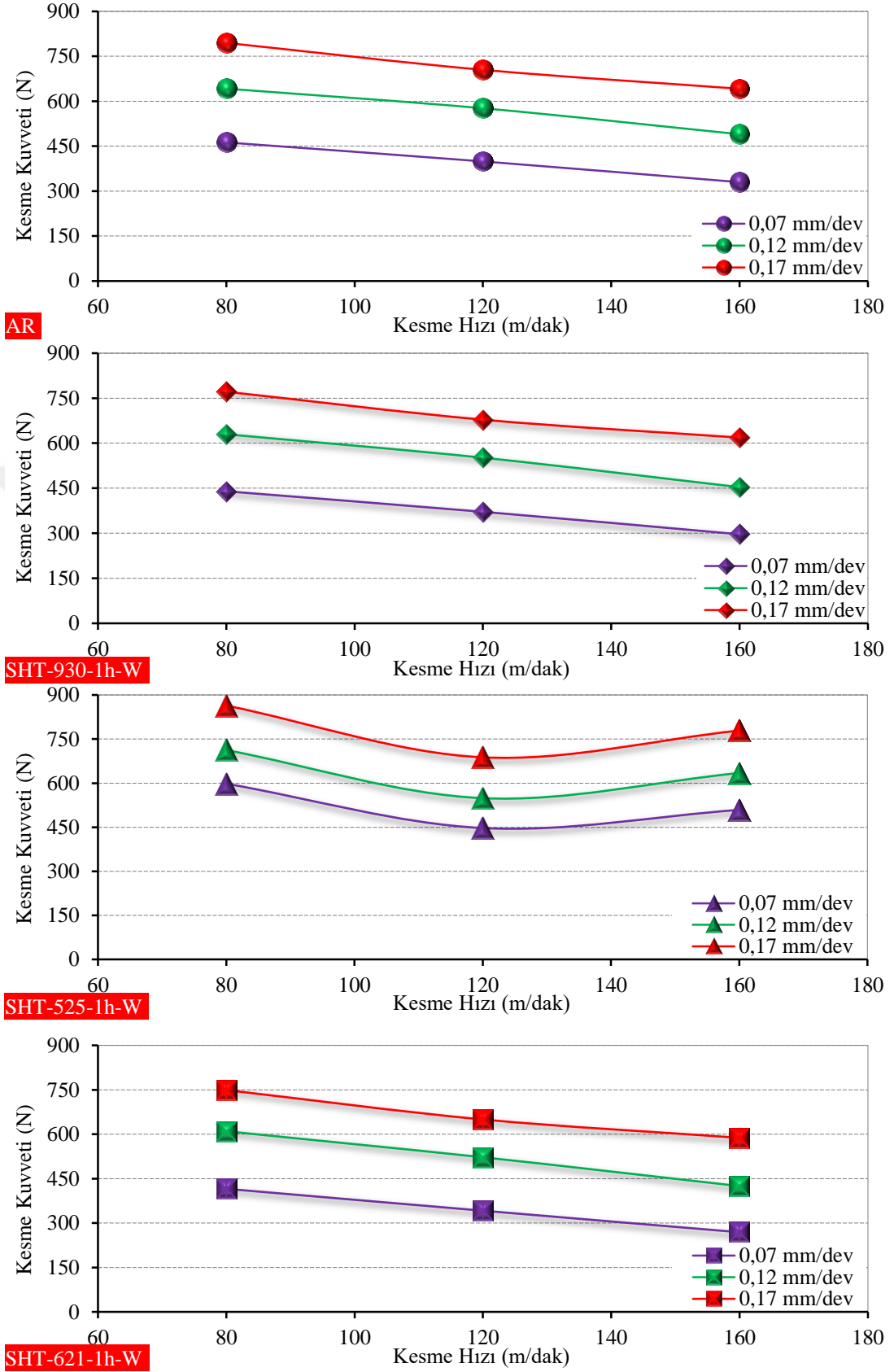


Şekil 6. 4. Ham malzeme ve yaşlandırma uygulanmış Ph 13-8Mo paslanmaz çeliğine ait numunelerin sertlik değerleri.

6.2. KESME KUVVETLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İşleme sırasında oluşan kesme kuvvetleri önemli bir kalite göstergesidir. Kesme boyunca oluşan kesme kuvvetleri kesici takım üzerine gelen yükleri ve tezgâhın tükettiği gücün belirlenmesinde kullanılır. Ayrıca kesme bölgesinde oluşan ısı ve takım-iş parçası sürtünmesi ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek kesme kuvvetleri yüzey pürüzlülüğünü, kesme sıcaklığını ve takım aşınmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle PH 13-8Mo çeliğine uygulanan yaşlandırma sonrası yapılan frezeleme deneyleri sırasında mikroyapıdaki ve mekanik özelliklerdeki değişimle kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkileri değerlendirilmiştir.

Şekil 6.5’de PH 13-8Mo çeliğinin frezelenmesinde mikroyapı, mekanik özelliklere ve kesme parametrelerine bağlı kesme kuvvetindeki değişler gösterilmiştir. Şekil 6.5 incelendiğinde yapılan deneyler sonucu kesme kuvveti değerleri 268,88 N ile 863,56 N arası değişmiştir. Deney numunelerinin düşük kesme hızı (80 m/dak) değerinde işlenmesi sonucu en yüksek kesme kuvveti değerlerinin oluştuğu görülmektedir. Düşük kesme hızlarında düşük kesme sıcaklıklarının oluşması iş parçasında termal yumuşamanın olmamasına neden olmaktadır. Bu da işleme sırasında yüksek kesme kuvvetlerinin oluşmasının neden olarak bildirilmiştir [33]. AR, STH-930-1h-W ve SHT+A-621-4h-F numunelerinin 80 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarlarında işlenmesinde kesme kuvveti sırası ile 462,28 N, 439,82 N ve 415,26 N ölçülmüştür. Kesme hızının 80 m/dak’dan 160 m/dak kadar çıkarılması ile kesme kuvvetlerinde ortalama %28,71, %32,52 ve %35,25 oranlarında azalmıştır. İlerleme miktarının 0.07 mm/dev’den 0.17 mm/dev çıkarılması ile kesme kuvvetlerinde ortalama %71,9, %75,5 ve %80,3 oranlarında artışın olduğu görülmüştür. SHT+A-525-4h-F numunesinin 80 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarlarında işlenmesinde kesme kuvveti 597,66 N ölçülmüştür. Kesme hızının 120 m/dak çıkarılması ile kesme kuvveti %25,22 oranında azalmıştır. İlerleme miktarının 0,12 mm/dev ve 0,17 mm/dev kadar çıkarılması ile de kesme kuvvetinde sırası ile %19,2 ve %44,5 artma olmuştur. Kesme hızının artması ile birlikte birinci ve ikinci deformasyon bölgelerinde artan sıcaklık işlenen malzemenin akma dayanımının azalmasına neden olmaktadır.

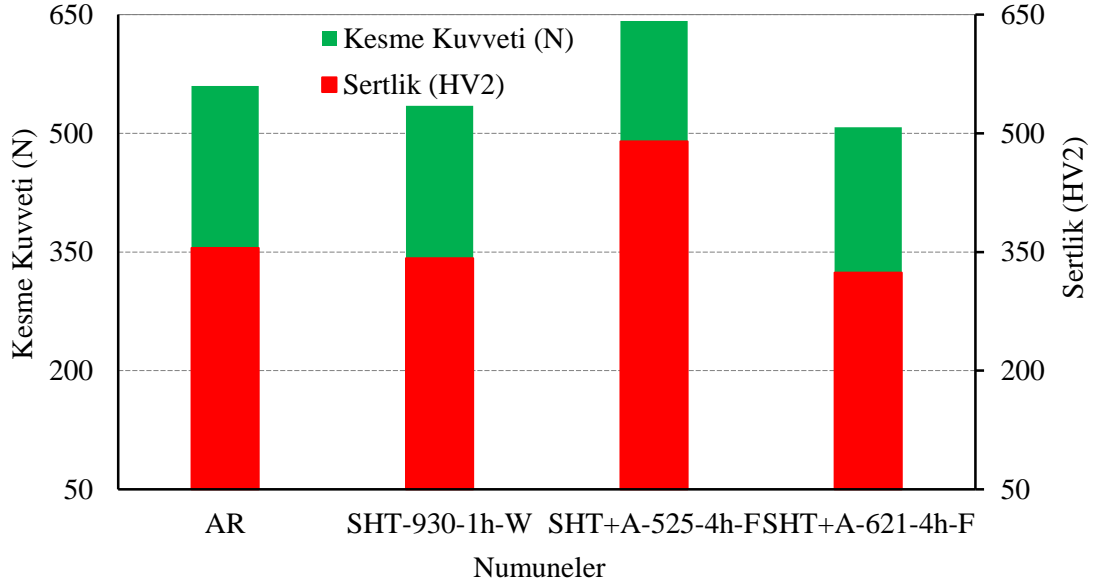


Şekil 6. 5. Kesme kuvvetlerinin kesme parametrelerine bağlı olarak değişimi.

Ayrıca artan kesme hızı birlikte artan sıcaklık talaş kıvrılma çapının küçülmesine ve takım-talaş temas mesafesinin azalması neden olmaktadır. Bu sonuçlar ışığında kesme hızındaki artışa paralel kesme kuvvetlerinin azalacağı daha önce yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [34-36]. Ancak SHT+A-525-4h-F numunesinin işlenmesinde kesme hızının 120 m//min'dan 160 m/dak çıkarılması ile kesme kuvvetinde %13,83 oranında artma olmuştur. Bu durum işleme sırasında artan kesme hızının kesici takım üzerine gelen yüklerin artmasına, takım-talaş arayüzeyinde yüksek kesme sıcaklıklarının oluşmasına ve bunlara bağlı olarak kesici takımın hızla aşınarak kesme kabiliyetini yitirmesiyle açıklanabilir [37].

Şekil 6.6'da her numune için farklı kesme parametrelerinde ölçülen kesme kuvveti sonuçlarının ortalaması alınarak mikroyapı ve mekanik özelliklerin kesme kuvvetine etkileri değerlendirilmiştir. 1057 MPa çekme dayanımına, 964 akma dayanımına ve 355 HV2 sertliğe sahip AR numunesinde ortalama kesme kuvveti 599,88 N hesaplanmıştır. STH-930-1h-W ve SHT+A-621-4h-F numunelerinin işlenmesinde kesme kuvvetleri AR numunesine göre %4,5 ve %9,4 oranlarında azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni solüsyona alma ve yaşlandırma işlemi sonrası STH-930-1h-W ve SHT+A-621-4h-F numunelerinin mikroyapılarında farklı fazların oluşması ile açıklanabilir. Ayrıca STH-930-1h-W ve SHT+A-621-4h-F numunelerin solüsyona alma ve yaşlandırma işlemi sonrası sertliğinin, çekme ve akma dayanımı gibi değerlerinin AR numunesine göre azalması kesme kuvvetlerinin düşük çıkmasının diğer bir nedenidir. Literatürde işleme sırasında artan kesme sıcaklığının iş parçalarında termal yumuşamaya neden olduğu bildirilmiştir. Buda iş parçasının akma dayanımının azalmasına ve kesme açısının artmasına neden olduğundan kesme kuvvetlerinin de azalmasına yol açabileceği rapor edilmiştir [38,39]. SHT+A-525-4h-F numunesinin işlenmesinde 642,1 N ile maksimum ortalama kesme kuvveti elde edilmiştir. Bu değer bize SHT+A-525-4h-F numunesinin ortalama kesme kuvveti değerinin AR numunesine göre %14,7 oranında arttığını göstermektedir. Bunun nedeni SHT+A-525-4h-F numunesinin mikroyapısında daha küçük tane boyutuna sahip fazların oluşması işleme deneylerinde yüksek kesme kuvvetlerine neden olacağı ifade edilmiştir [40]. Ayrıca mikroyapıda oluşan NiAl çökeltilerinin yüksek kesme kuvvetlerinin oluşmasının diğer bir nedeni olduğu düşünülmektedir. Ayrıca

bu numunede ulaşılan maksimum sertlik, çekme ve akma dayanımı değerlerinde kesme kuvvetinin yüksek çıkmasının diğer bir nedenidir. Daha önceki yapılmış çalışmalarda da yüksek sertliğin ve akma dayanımı değerlerinin maksimum kesme kuvveti oluşturacağı bildirilmiştir [41,42].



şekil 6. 6. Kesme kuvvetlerinin mikroyapıya ve mekanik özelliklere bağlı olarak değişimi.

6.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜğÜNÜN DEğERLENDİRİLMESİ

Talaşlı imalat yöntemleriyle şekillendirilen parçaların pürüzlülük seviyeleri, nihai ürünler için kritik öneme sahiptir. Üretilen parçalarda yüksek yüzey kalitesi yorulma dayanımını, korozyon direncini ve sürtünme ömrünü önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle havacılık endüstrisinin kritik bileşenlerinde kullanılan PH 13-8Mo çeliğinin işlenmesinde istenen boyutsal doğruluğun ve yüzey kalitesinin elde edilmesi esastır [42,43]. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde, yaşlandırma işlemi uygulanan PH 13-8Mo çeliğinin frezelenmesinde mikroyapısının, mekanik özelliklerinin ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir.

Yaşlandırma işlemi sonrası farklı mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip PH 13-8Mo çeliğine ait numunelerin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğündeki değişimler şekil 6.7'de verilmiştir. şekil 6.7 incelendiğinde kesme

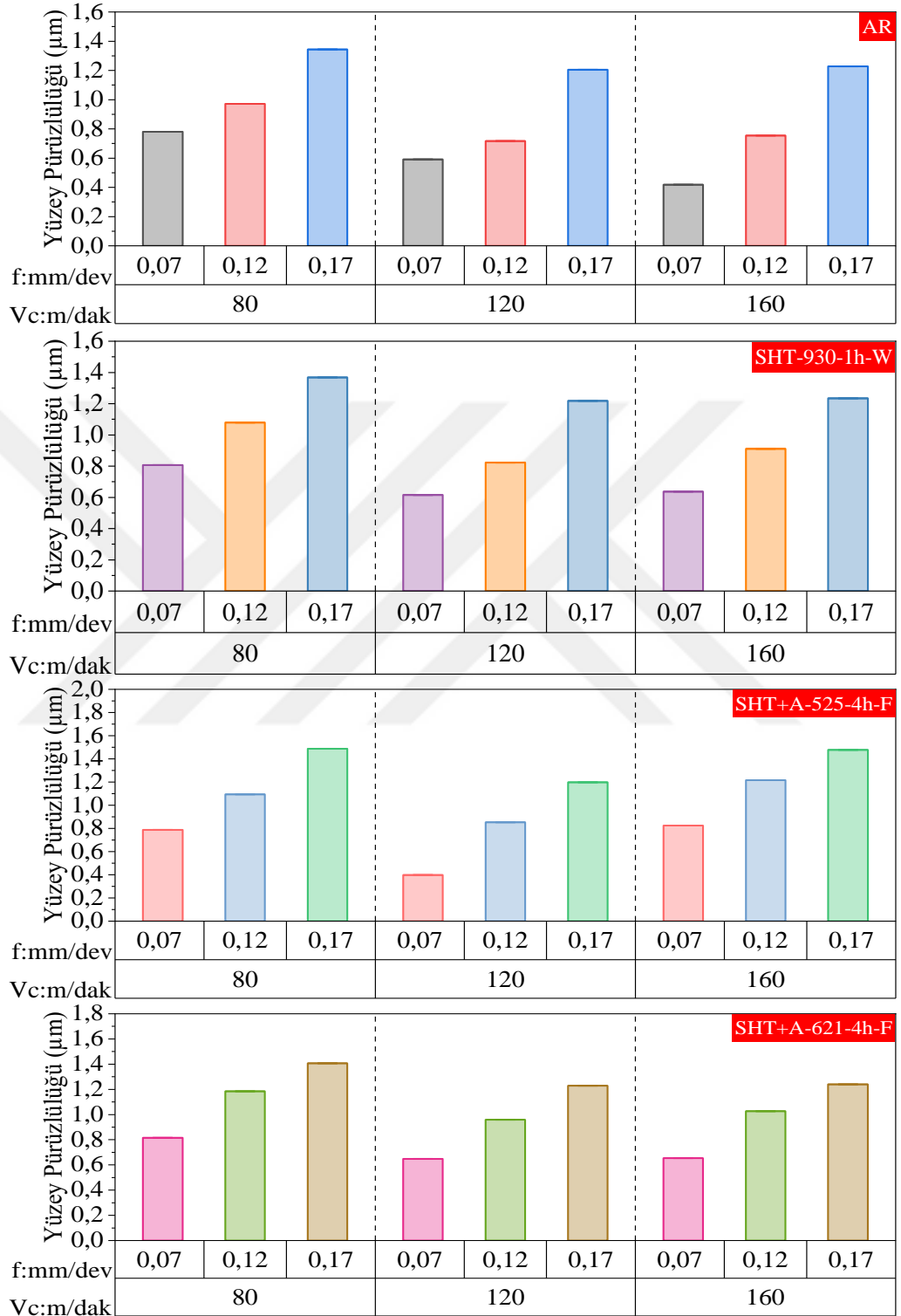
parametrelerine bağı yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,397 µm ile 1,488 µm arasında değiştiği görülmektedir. Frezeleme deneylerinde minimum yüzey pürüzlülüğü SHT+A-525-4h-F numunesinin 120 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesi sonucu 0,397 µm ölçülmüştür. Maksimum yüzey pürüzlülüğü 80 m/dak kesme hızında ve 0,17 mm/dev ilerleme miktarında SHT+A-525-4h-F numunesinin işlenmesinde 1,488 µm ölçülmüştür. Genel olarak Şekil 6.7 incelendiğinde kesme parametreleri arasında ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkin parametre olduğunu söylemek mümkündür. Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme miktarının artışına bağı önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Örneğin, AR numunesinin 80 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülük değeri 0,781 µm ölçülmüştür. İlerleme miktarının 0,17 mm/dev çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değerinde %70,1 artışla 1,344 µm çıktığı görülmüştür. Eşitlik 6.1'de de görüldüğü üzere ilerleme miktarı yüzey pürüzlülüğünün bir fonksiyonu olduğundan, ilerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artması beklenir. Eşitlik 6.1'de ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değeri ilerleme miktarının (f) karesi ile doğru orantılı olup, uç yarıçapı (r_{ϵ}) ile ters orantılı olduğu görülmektedir [33]. Ayrıca artan ilerleme miktarı ile birim zamanda kaldırılan talaş hacmi artmaktadır.

$$Ra = f^2 / (32 * r_{\epsilon})$$

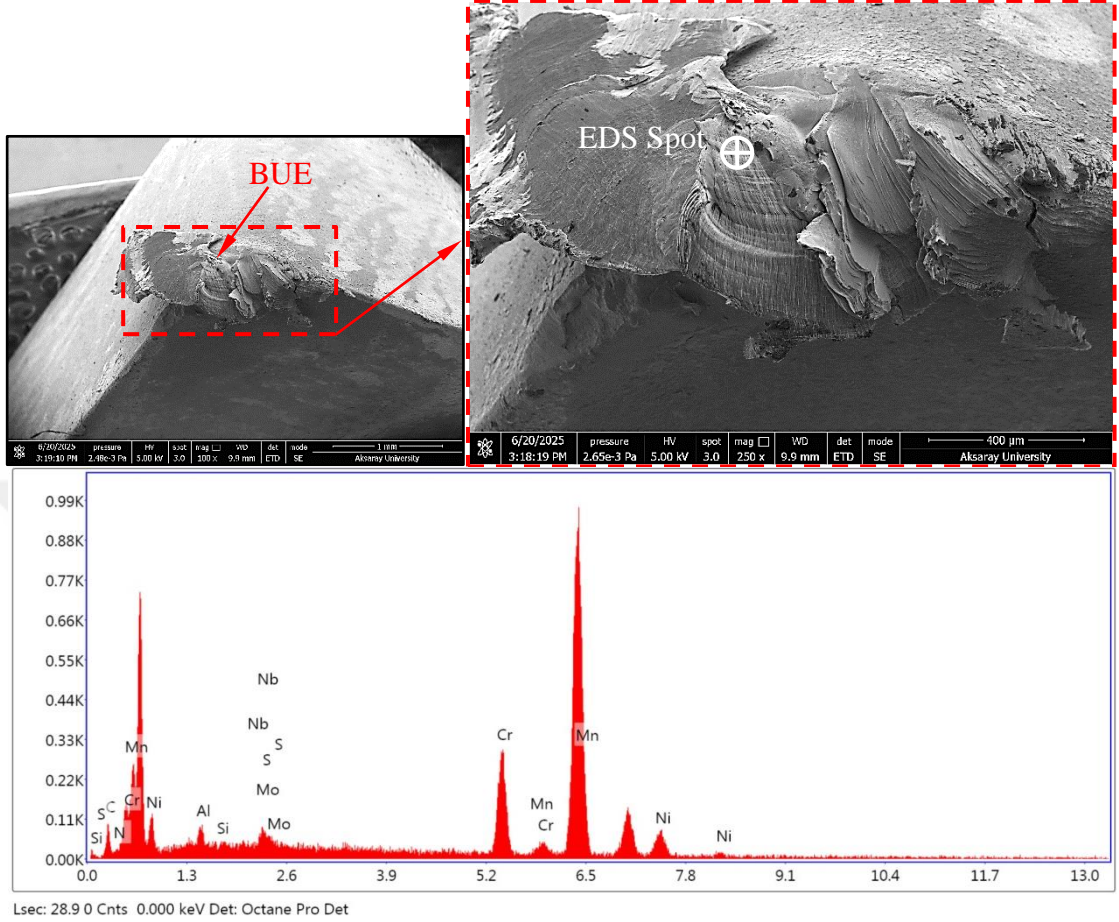
(6.1)

Birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasına paralel kesme kuvveti ve titreşim dolayısı ile yüzey pürüzlülüğünün de artacağı rapor edilmiştir [44]. Daha önce literatürde yapılmış olan çalışmalarda, ilerleme miktarının azaltılması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi yaygın olarak uygulanan bir uygulama olduğu görülmüştür [32,34-38,44]. Genel olarak kesme hızının 80 m/dak'dan belli bir değere kadar artırılmasıyla (120 m/dak) yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmektedir. Örneğin; SHT+A-525-4h-F numunesinin 80 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülük değeri 0,787 µm ölçülmüştür. Kesme hızının 120 m/dak çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değeri %49,6 azalarak 0,397 µm olmuştur. Literatürde yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi için kesme hızının artırılması kullanılan en yaygın yöntemdir [45,46]. Düşük kesme

hızlarında oluşan BUE'nin (Şekil 6.8) artan kesme hızı ile BUE oluşum eğiliminin azalması yüzey pürüzlülüğünün azalmasının nedeni



Şekil 6. 7. PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğündeki değişimleri.

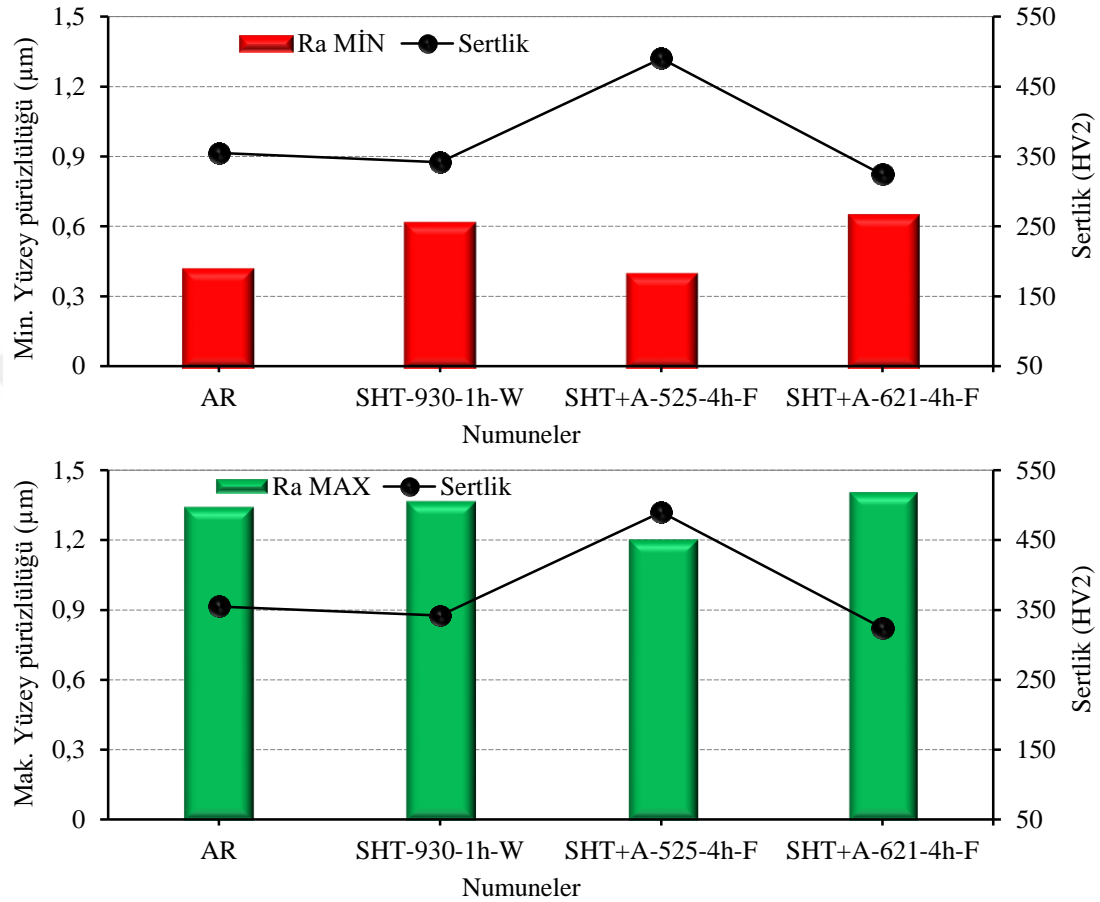


Şekil 6. 8. SHTA621-4h-AC numunesine ait SEM ve EDS görüntüleri.

olarak açıklanmıştır [47]. Kesme hızının 120 m/dak'den 160 m/dak çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü %107,6 artışla 0,824 μm olmuştur. Artan kesme hızı kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasına neden olmaktadır (Şekil 6.10). Kesme sıcaklığının artması kesici takımın iş parçasından talaşı ayırmasını sağlayan plastik deformasyona yardımcı olmaktadır. Ancak kesme sıcaklığının daha fazla artması takım aşınma hızının artmasına neden olur. Bu bağlamda artan takım aşınması yüzey pürüzlülüğünün artışına neden olmaktadır.

Her numune için farklı kesme parametrelerinde ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin minimum ve maksimum değerleri alınarak mikroyapı ve mekanik özelliklerin bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimleri Şekil 6.9'de gösterilmiştir. Şekil 6.9 incelendiğinde 1057 MPa çekme dayanımına, 12 yüzde uzamaya ve 355 HV2

sertliğe sahip AR numunesi min ve mak yüzey pürüzlülüğü sırası ile 0,418 μm ve 1,344 μm ölçülmüştür. Solüsyona alınan SHT930-1h-AC numunesinin çekme ve sertlik test sonuçları AR



Şekil 6. 9. Mikroyapı ve mekanik özelliklerin bağlı minimum ve maksimum yüzey pürüzlülüğü değişimleri.

numunesine göre sırası ile %1,14 ve %3,7 oranlarında azalırken yüzde uzaması 0,95 oranında artmıştır. Buna bağlı olarak da min ve mak yüzey pürüzlülüğü sırası ile %1,79 ve %47,13 oranlarında artmıştır. Solüsyona alınan SHT930-1h-AC numunesinin AR numunesine göre çekme dayanımının ve sertliğin azalması yüzde uzamasının artması malzemenin sünekliliğini artırmaktadır. Buna bağlı olarak işleme sırasında kesici takım üzerinde BUE oluşumunun artması yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Benzer sonuç SHTA621-4h-AC numunesinin mekanik özellikleri ile yüzey pürüzlülüğü arasında da görülmüştür. Ancak maksimum çekme ve sertlik test sonuçları sırası ile 1547 MPa ve 490 HV2 ile

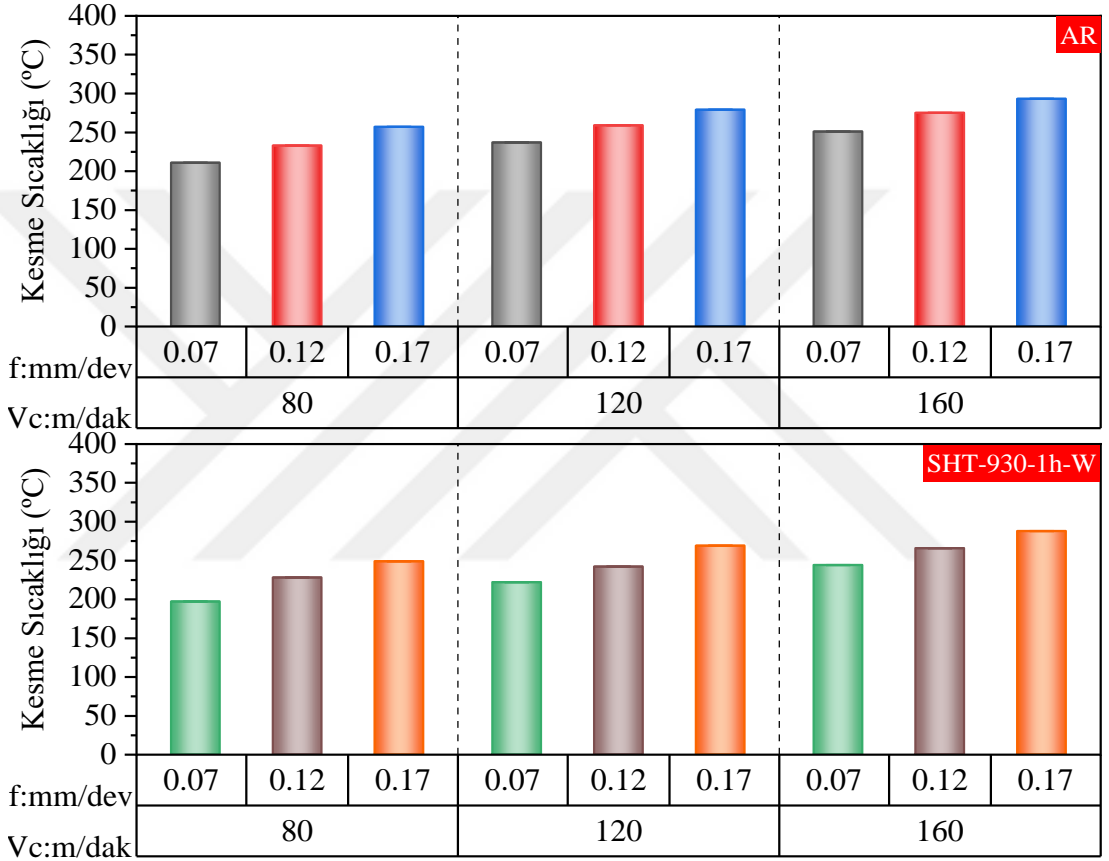
en düşük yüzde uzama 10 ile SHTA525-4h-AC numunesinde elde edilmiştir. Bu da minimum yüzey pürüzlülüğünün SHTA525-4h-AC numunesinde elde edilmesine neden olmuştur. Mak yüzey pürüzlülüğü değerlerine bakıldığında SHTA525-4h-AC numunesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artma olduğu gözlemlenmiştir. Buda sertlik değerinin ve çekme dayanımının işleme sırasında kesici takım aşınmasına neden olduğundan yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olmuştur.

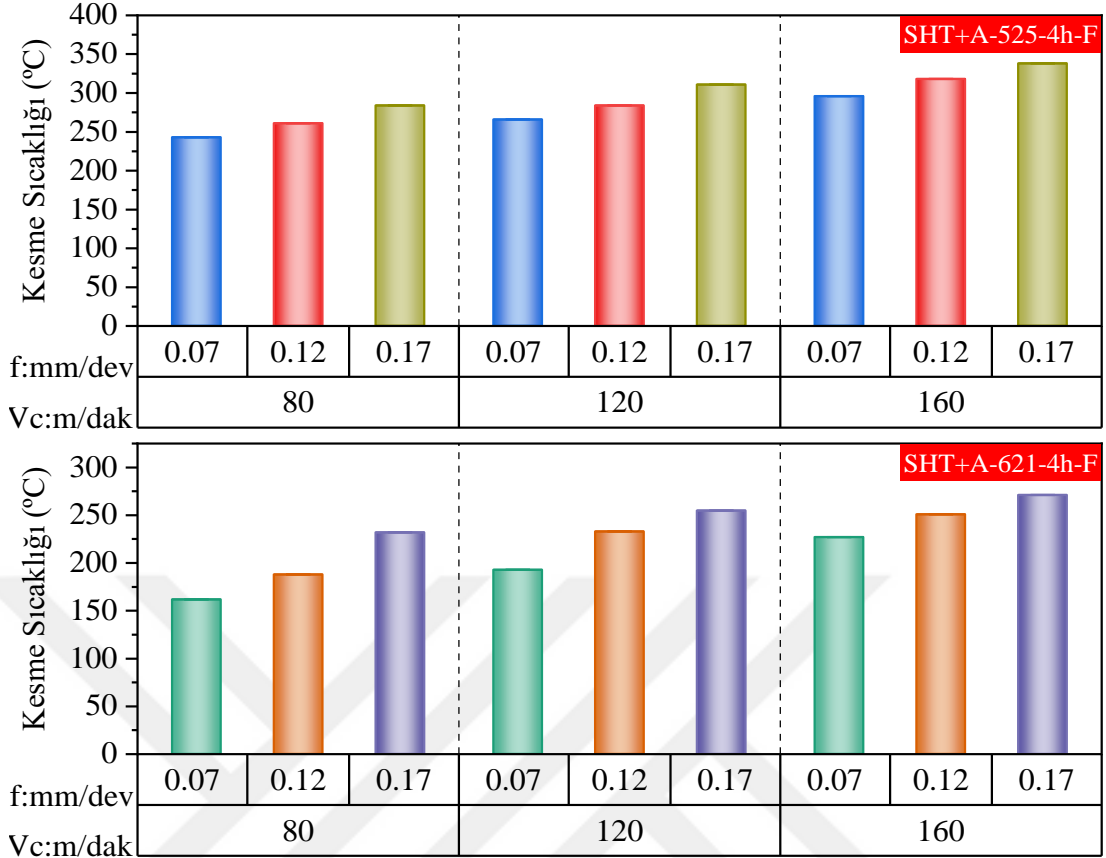
6.4. KESME SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kesme sıcaklığı talaşlı imalat operasyonlarında kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması gibi çıktı parametrelerini etkilemektedir. Metal işleme operasyonlarında, kesme sıcaklığı iş parçasının plastik deformasyonuna katkı sağlamaktadır. Ancak işleme sırasında oluşan kesme sıcaklığı belli bir noktaya kadar artması işlemeye olumlu yönde katkı sağlarken, daha fazla artması olumsuz yönde etkilemektedir [48]. Bu nedenle yaşlandırma işlemi uygulanmış PH 13-8Mo çeliğinin frezelenmesinde mikroyapısının, mekanik özelliklerinin ve kesme parametrelerinin kesme sıcaklığına etkileri incelenmiştir.

Yaşlandırma işlemi uygulanmış PH 13-8Mo çeliğine ait numunelerin farklı kesme parametrelerde işlenmesi sonucu elde edilen kesme sıcaklığı değişimleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Şekil 6.10 incelendiğinde kesme sıcaklığı değerlerinin 162 °C ile 338 °C arasında olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler sonucu SHT+A-621-4h-F numunesinin 80 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesi sonucu minimum kesme sıcaklığı 162 °C ölçülmüştür. Maksimum kesme sıcaklığı ise SHT+A-525-4h-F numunesinin, 160 m/dak kesme hızında ve 0,17 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesinde 338 °C olmuştur. Yapılan deneylerde bütün numunelerin işlenmesinde en düşük kesme sıcaklığının düşük kesme hızı ve düşük ilerleme miktarlarında ölçüldüğü görülmüştür. Örneğin; AR ve SHT-930-1h-W numunelerinin 80 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesi sonucu sırası ile kesme sıcaklığı değerleri 211 °C ve 197 °C ölçülmüştür. Düşük kesme parametrelerinde (kesme hızı ve ilerleme miktarı) birim zamanda kaldırılan talaş kesitinin ve takım/talaş arasında sürtünmenin az olması kesme

sıcaklığının düşük çıkmasının muhtemel sonucu olduğu düşünülmektedir. Tüm numunelerde sabit kesme hızında ilerleme miktarının artması ile kesme sıcaklığının arttığı görülmüştür. Örneğin; SHT+A-525-4h-F numunesinin 80 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında kesme sıcaklığı 243 °C ölçülmüştür. Sabit kesme hızında ilerleme miktarının 0,12 mm/dev ve 0,17 mm/dev çıkarılmasıyla kesme sıcaklıkları sırası ile

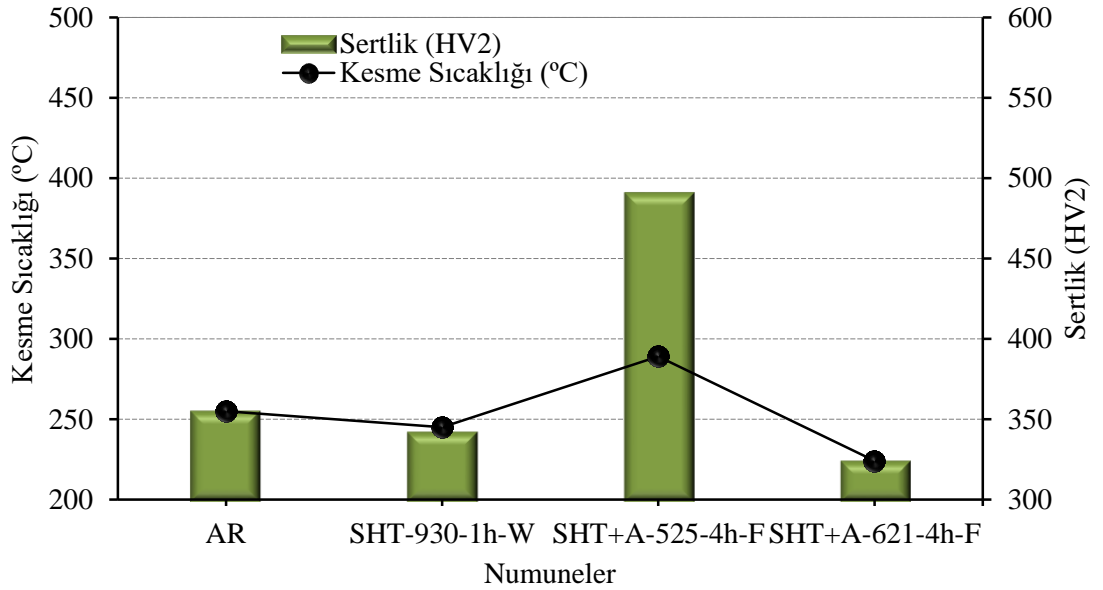




Şekil 6. 10. PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı kesme sıcaklığındaki değişimler.

%7,4 ve %16,9 artarak 261 °C ve 284 °C olmuştur. Ayrıca bütün numunelerin sabit ilerleme miktarında kesme hızının artması ile kesme sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Örneğin; SHT+A-621-4h-F numunesinin 80 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında kesme sıcaklığı 162 °C ölçülmüştür. Sabit ilerleme miktarında kesme hızının 120 m/dak ve 160 m/dak çıkarılmasıyla kesme sıcaklıkları sırası ile %19,1 ve %40,1 artarak 193 °C ve 227 °C olmuştur. Böylece kesme hızı ve ilerleme miktarının artışına paralel kesme sıcaklığı da artış göstermiştir. Kesme hızının artışı kesme sıcaklığı üzerinde ilerleme miktarının artışından daha fazla etkiye sahiptir. İlerleme miktarının artması birim zamanda kaldırılan talaş miktarının artmasına ve iş parçasının aşırı deformasyonu kesme sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca artan ilerleme miktarı ile takım/talaş arası sürtünmenin artması kesme sıcaklığının artmasının bir sonucudur [49]. Literatürde kesme hızındaki artışa bağlı deformasyon hızının artması kesme bölgesinde sıcaklık artışından sorumlu olduğu açıkça ifade edilmiştir [50,51].

Yaşlandırma işlemi uygulanmış PH 13-8Mo çeliğine ait numunelerin işlenmesinde mikroyapı ve mekanik özelliklerin kesme sıcaklığı değişimlerine etkileri Şekil 6.11’de verilmiştir. Şekil 6.11 incelendiğinde 1057 MPa çekme dayanımına, 664 MPa akma dayanımına ve 355 HV2 sertliğe sahip AR numunesinin işlenmesinde ortalama kesme sıcaklığı 255 °C hesaplanmıştır. SHT-930-1h-W numunesinin çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik değeri AR numunesine göre %1,14, %10,4 ve %3,7 oranlarında azalma olmuştur. SHT+A-621-4h-F numunesinin çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik değeri AR numunesine göre %3,7, %30,5 ve %8,7 oranlarında azalmıştır. SHT-930-1h-W ve SHT+A-621-4h-F numunelerinin AR numunesine göre mekanik özelliklerindeki bu azalışa paralel kesme sıcaklıklarında da sırası ile %3,9 ve %12,2 azalma olmuştur. AR numunesine göre SHT-930-1h-W ve SHT+A-621-4h-F numuneleri düşük mekanik özelliklere ve büyük tane yapılarına sahiptir. Buda SHT-930-1h-W ve SHT+A-621-4h-F numunelerinin işlenmesinde oluşan kesme sıcaklıklarıyla beraber akma dayanımının ve sertliğin AR numunesine göre daha da azalmasına kesme açısının artmasına neden olduğundan kesme sıcaklıklarının daha da azalmasına neden olacağı düşünülmektedir. 525 °C’de yaşlandırılan SHT+A-525-4h-F numunesinin çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik değeri AR numunesine göre



Şekil 6. 11. PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde mikroyapı ve mekanik özelliklere bağlı kesme sıcaklığındaki değişimler.

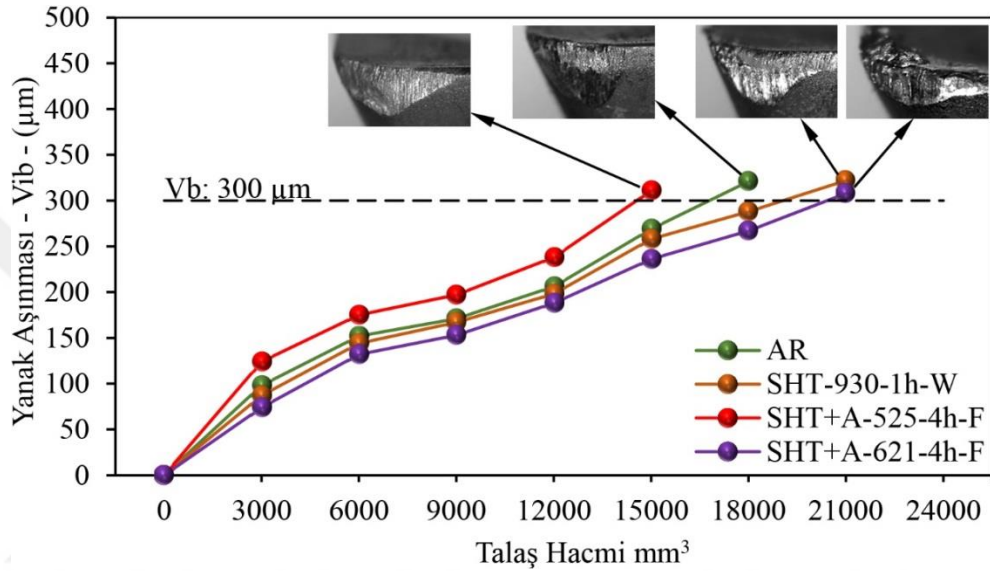
%46,4, %50,3 ve %38 artmıştır. Ayrıca SHT+A-525-4h-F numunesinde AR numunesine göre daha ince yapılı bir fazın oluşmuştur. Deney numunesinin akma dayanımı ile sertlik arasında güçlü bir ilişki vardır. Buda deney numunesinin deformasyon direnci ve kesme direncinin bir değerini vereceği ifade edilmiştir [51]. Bu bağlamda SHT+A-525-4h-F numunesinin diğer numunelere göre yüksek akma dayanımına ve sertlik değerine sahiptir. Buda SHT+A-525-4h-F numunesinin işleme sırasında diğer numunelere göre daha yüksek kesme sıcaklıklarının oluşmasının bir nedeni olduğunu göstermektedir. Ayrıca artan akma dayanımı ve sertlik değerinin artması kesme açısının azalmasına ve buna bağlı olarak kesme sıcaklığının artmasına neden olmuştur.

6.5. FARKLI MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE SAHİP NUMUNELERİN TAKIM AŞINMASINA ETKİSİ

Yapılan takım aşınma deneylerinde yanak aşınma değeri (VB) 0,3 mm kabul edilmiştir. Farklı mikroyapı ve mekanik özelliklerin takım aşınmasına etkilerini değerlendirmek için kesme hızı 160 m/dak, ilerleme miktarı 0,07 mm/dev ve kesme derinliği 1 mm alınmıştır. Çalışmada her numunenin işlenmesinde belli sürelerde kesici takım ölçülerek kesici takım aşınması 0,3 mm'ye ulaştığında takım aşınma deneyi sonlandırılmıştır. Farklı mikroyapı ve mekanik özelliklere bağlı takım aşınmasındaki değişim Şekil 6.12'de verilmiştir.

Şekil 6.12 incelendiğinde yaşlandırma işlemi sonrası farklı mikroyapı ve mekanik özelliklerin takım aşınmasını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Sertliği ve çekme dayanımı sırası ile 1057 MPa ve 355 HV2 olan AR numunesi üzerinden ortalama 18000 mm³ talaş kaldırılması ile 0,3 mm aşınma bandını geçtiği görülmektedir. AR numunesine göre çekme dayanımının %46,36 ve sertliğin %38 arttığı SHTA525-4h-AC numunesinde yapılan işlemede ortalama talaş hacmi %20'lik azalma ile 15000 mm³ azalmıştır. Bu durumda SHTA525-4h-AC numunesinin aynı işleme parametrelerinde frezelenmesinde takım ömrünün AR numunesine göre azaldığı görülmüştür. Bu duruma SHTA525-4h-AC numunesinin sertliğinin artması, çekme dayanımının artması ve mikroyapıda takım aşınmasını hızlandıran NiAl çökeltilerinin oluşması ile açıklanabilir. Ayrıca SHTA525-4h-AC

numunesinin mikroyapısının AR numunesine göre daha ince fazlardan oluşması takım aşınmasını hızlandıran diğer bir neden olduğu düşünülmektedir. AR numunesine göre sertliği sırası ile 3,7% ve %8,73 azalan, çekme dayanımının sırası ile %1,14 ve %3,7 azalan SHT930-1h-AC ve SHTA621-4h-AC numunelerinin aynı kesme parametrelerinde işlenmesinde SHT930-1h-AC ve SHTA621-4h-AC numunelerinden AR numunesine

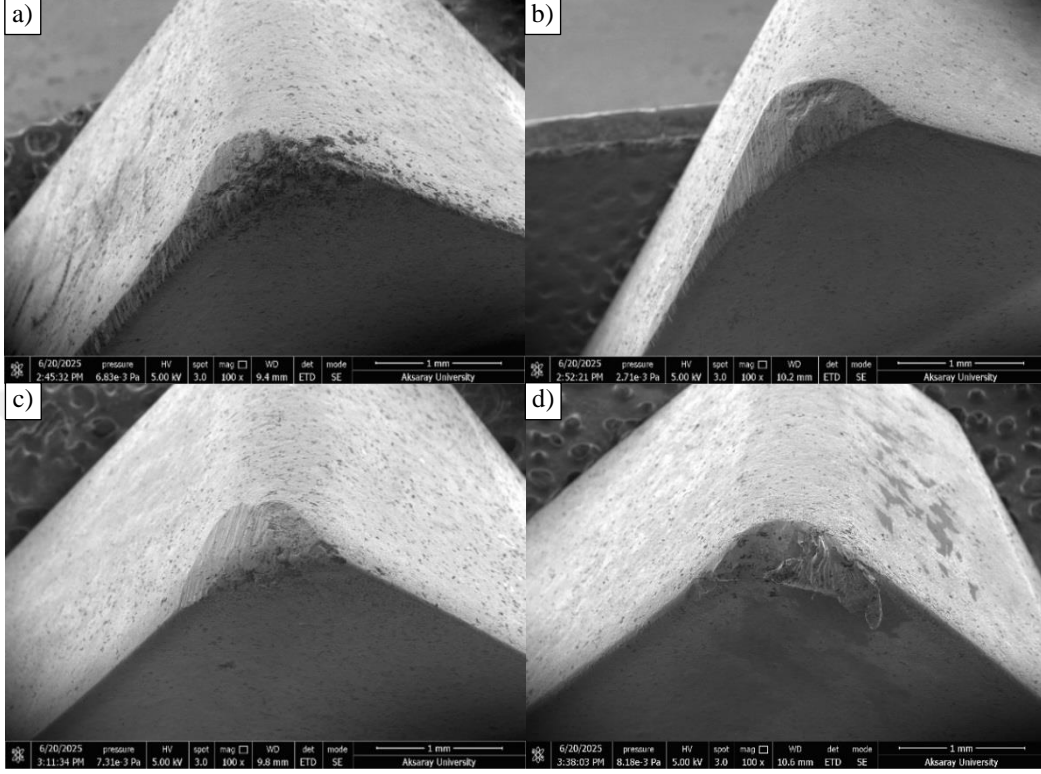


Şekil 6. 12. PH 13-8Mo numunelerinin frezelenmesinde mikroyapı ve mekanik özelliklere bağlı takım aşınmasındaki değişimler.

göre sırası ile %42.9 ve %50 oranlarında daha fazla talaş kaldırıldığı görülmektedir. Bu durumun nedeni sertliğin, çekme dayanımının azalması ve akma dayanımının artması ile açıklanabilir. Ayrıca bu numunelerin mikroyapılarındaki fazların büyümesi takım aşınmasını geciktirdiği düşünülmektedir.

Şekil 6.13'de AR, SHT930-1h-AC, SHTA525-4h-AC ve SHTA621-4h-AC numunelerinin 160 m/dak kesme hızında ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesi sonucu elde edilen takım aşınmalarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 incelendiğinde sertliğin ve çekme dayanımının maksimum olduğu numunede takım aşınması maksimum seviyeye çıktığı anlaşılmaktadır. En düşük sertliğin ve çekme dayanımının olduğu SHTA621-4h-AC numunesinde (Şekil

6.13-d) kesici takımın aşınması ile birlikte takım üzerinde yapışmaların olduğu görülmüştür.



Şekil 6. 13. PH 13-8Mo numunelerinin aşınma deneyleri sonrası kesici takımların SEM görüntüleri

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

7.1. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, PH 13-8Mo paslanmaz çeliğine uygulanan yaşlandırma işlemi sonrası mikroyapı ve mekanik özellikleri ile kesme parametrelerinin frezeleme operasyonları sırasındaki işlenebilirlik davranışları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Öncelikle yaşlandırma işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri değerlendirilmiştir. İkinci bölümde mikroyapı, mekanik özelliklerin ve kesme parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, takım aşınması üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda elde edilen temel sonuçları aşağıda verilmiştir:

1. Yaşlandırma sıcaklığı martensit fazın morfolojisini ve çökelti yapısını önemli ölçüde değiştirmiştir. Özellikle 525 °C'de 4 saat yaşlandırma, ince martensitik yapı ve yoğun çökelti oluşumu ile sonuçlanmış; 621 °C yaşlandırma ise beynitik faz oluşumu ile mikroyapıda dönüşüme neden olmuştur.
2. En yüksek çekme dayanımı (1547 MPa) ve sertlik değeri (490 HV2), 525 °C'de yaşlandırılan numunede elde edilmiştir.
3. Yüksek sertlik ve ince taneli fazların bulunduğu SHT+A-525-4h-F numunesinin 80 m/dak kesme hızında, 0,17 mm/dev ilerleme miktarında 863,56 N ile maksimum kesme kuvveti ölçülmüştür. SHT+A-621-4h-F numunenin 160 m/dak kesme hızında, 0,07 mm/dev ilerleme miktarında 268.88 N ile minimum kesme kuvveti ölçülmüştür.

4. En düşük yüzey pürüzlülüğü SHT+A-525-4h-F numunesinin 120 m/dak ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesinde 0,397 μm ölçülürken maksimum yüzey pürüzlülüğü aynı numunenin 80 m/dak ve 0,17 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesinde 1,488 μm ölçülmüştür.
5. En düşük kesme sıcaklığı SHT+A-621-4h-F numunesinin 80 m/dak ve 0,07 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesinde 162 $^{\circ}\text{C}$ ölçülürken maksimum kesme sıcaklığı SHT+A-525-4h-F numunenin 160 m/dak ve 0,17 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesinde 338 $^{\circ}\text{C}$ ölçülmüştür.
6. En sıcaklığı değerleri, 162–338 $^{\circ}\text{C}$ arasında değişmiş olup; daha yüksek sertlik ve akma dayanımına sahip numunelerde sıcaklık artışının daha belirgin olduğu görülmüştür.
7. Takım aşınması sadece gözlemleri, yüksek sertliğe sahip örneklerde takım ömrünün daha kısa olduğunu ve özellikle çökelti yapılarının takım aşındırıcı etkisini artırdığını göstermiştir.

Sonuç olarak, uygulanan yaşlandırma işlemleri PH 13-8Mo paslanmaz çeliğin mikroyapı ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmekte ve bu değişimler, frezeleme operasyonları sırasında işlenebilirlik performansını doğrudan etkilemektedir. Elde edilen bu bulgular, bu tür yüksek performanslı çeliklerin işlenmesi ve uygun ısıl işlem parametrelerinin belirlenmesi açısından literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Xinfeng L., Jin C.İ Sicong S., Gongxian Y., Tianjian W. and Xiaolong S., “Effect of aging treatment on hydrogen embrittlement of PH 13-8 Mo martensite stainless steel”, *Materials Science and Engineering: A*, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.116>
- [2] Rosenauer A., Teusl S., Landefeld A., Brandl D., Ressel G., Hönigmann T., Stadler M., Turk C., Maawad E., Stockinger M. and Schnitzer R., “Effect of intercritical annealing on the microstructure and mechanical properties of a PH 13-8 Mo maraging steel” , *Materials Science and Engineering: A*, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146220>
- [3] Shakil S., Moniruzzaman Md., Shaha K.S., Kacher J., Nasiri A., Haghshenas M. and Hadadzadeh A., “Study of direct aging heat treatment of additively manufactured PH13–8Mo stainless steel: role of the manufacturing process, phase transformation kinetics, and microstructure evolution” , *Journal of Materials Research and Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.023>
- [4] Puchang C. and Shifan Y., “Unveiling the precipitate evolutions and relationships between the nano-precipitates and mechanical properties in PH13–8Mo stainless steel”, *Materials Science and Engineering: A*, 2022.143986
- [5] Benoit M.J., Tabaie S., Waqar T., Ganton T., Amirkhiz B.S., Hadadzadeh A. and Nasiri A., “Effects of additive manufacturing processes and isothermal aging on the microstructure and properties of 13-8 Mo precipitation hardening martensitic stainless steel”, *Additive Manufacturing*, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103615>
- [6] Ghaffari M., Nemani A.V. and Nasiri A., “Microstructural evolution and mechanical performance after precipitation hardening of PH 13-8Mo martensitic stainless steel

fabricated by wire arc additive manufacturing”, *Materialia*,
<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101507>

- [7] Hochanadel P. W., Edwards G. R., Robino C. V. and Cieslak M. J., “Heat treatment of investment cast PH 13-8 Mo stainless steel: Part I. Mechanical properties and microstructure”, *Metallurgical and Materials Transactions*, Volume 25, pages 789–798, (1994)
- [8] Schnitzer R., Zickler G.A., Lach E., Clemens ., Zinner S., Lippmann T. and Leitner H., “Influence of reverted austenite on static and dynamic mechanical properties of a PH 13-8 Mo maraging steel”, *Materials Science and Engineering: A*,
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.046>
- [9] KAŞ M., Muslim T., YILMAZ O., Karagoz T., TÜREDİ E., GÜMÜŞ S. and Bayram A.,” Directed energy deposition of PH 13–8 Mo stainless steel: microstructure and mechanical property analysis”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 10.1007/s00170-024-13411-3
- [10] Afshari E., Ghaffari M., Nemani A.V. and Nasiri A., “Effect of heat treatment on microstructure and tribological performance of PH 13-8Mo stainless steel fabricated via wire arc additive manufacturing”, *Wear*,
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204947>
- [11] Garrison Jr. and Brooks J.A., “The thermal and mechanical stability of austenite in the low carbon martensitic steel PH 13-8”, *Materials Science and Engineering: A*,
[https://doi.org/10.1016/0921-5093\(91\)90787-N](https://doi.org/10.1016/0921-5093(91)90787-N)
- [12] Trottier W.T., Kreitchberg A. and Brailovski V., “Structure and Mechanical Properties of Laser Powder Bed-Fused and Wrought PH13-8Mo-Type Precipitation Hardening Stainless Steels: Comparative Study”, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, <https://doi.org/10.3390/jmmp5030067>

- [13] Young L.M. , Eggleston M.R., Solomon H.D. and Kaisand L.R., ” Hydrogen-assisted cracking in a precipitation-hardened stainless steel: effects of heat treatment and displacement rate”, *Materials Science and Engineering: A*, [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09840-2](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09840-2)
- [14] Seetharaman V., Sundararaman M. and Krishnan R., “ Precipitation hardening in a PH 13-8 Mo stainless steel “, *Materials Science and Engineering*, [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(81\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(81)90034-3)
- [15] Yan X., Chang C., Deng Z., Lu B., Chu Q., Chen X., Ma W., Liao H. and Liu M., “Microstructure, interface characteristics and tribological properties of laser clad NiCrBSi-WC coatings on PH 13-8 Mo steel”, *Tribology International*, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106873>
- [16] Cieslak M. J., Hills C. R., Hlava P. F. and David S. A., “An investigation of the high-temperature and solidification microstructures of PH 13-8 Mo stainless steel”, *Metallurgical and Materials Transactions*, Volume 21, pages 2465–2475, (1990)
- [17] Özlü B. and Akgün M., ”Evaluation of the machinability performance of PH 13-8 Mo maraging steel used in the aerospace industry “, *Institution Mechanical engineers*, <https://doi.org/10.1177/09544089231216035>
- [18] Öndin O., Kıvık T., Sarıkaya M. and Yıldırım Ç.V., “ Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel”, *Tribology International* , <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106323>
- [19] Yurtkuran H. and Günay M., “ Predictive modelling and optimization for machinability indicators in cleaner milling of PH13-8Mo using sustainable cutting environments “, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Volume 46, article number 319, (2024)

- [20] Cao X.F., Woo W.S. and Lee C.M., “A study on the laser-assisted milling of 13-8 stainless steel for optimal machining”, *Optics & Laser Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106473>
- [21] İnternet: AYDINLAR MAKİNA METAL SAN. TİC. LTD. ŞTİ. “Paslanmaz çelikler”, <https://aydinlarmakinametal.com.tr/urunler/demir-disi-metaller/paslanmaz-celikler/>
- [22] Mohamed Mohses A., “Handbook of Stainless Steel”, *Outokumpu Oyj*, (2013)
- [23] Dutta S.K., “Different Types and New Applications of Stainless Steel”, *STAINLESS STEEL*, (2018)
- [24] Mohsen S. and Arezoo B., “Cutting Tool Wear Prediction In Machining Operations, A Review”, *Journal of New Technology and Materials*, Pages 15-26 (2022)
- [25] Katiksiz, H. and Gündüz, S., “Effect of grain size and deformation temperature on mechanical properties and failure behaviour of 316L austenitic stainless steel”, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43 (5): 673-688 (2021).
- [26] Peng, X. Y., Zhou, X. L., Hua, X. Z., Wei, Z. W. and Liu, H. Y., “Effect of aging on hardening behavior of 15-5 PH stainless steel”, *J. Iron Steel Res. Int.*, 22 (7), 607-614 (2015).
- [27] Güldibi, A. S., Köklü, U., Koçar, O., Kocaman, E. and Morkavuk, S., “The effects of aging process after solution heat treatment on drilling machinability of corrax steel”, *Exp. Tech.*, 48, 239-257 (2024).
- [28] Bridge, J. E., Maniar, G.N., “Effect of reverted austenite on the mechanical properties and toughness of a high strength maraging stainless steel custom 450®” *Metallography as a Quality Control Tool*, Springer, 279-295, (1980).

- [29] Bhambroo, R., Roychowdhury, S., Kain, V., Raja, V. S., “Effect of reverted austenite on mechanical properties of precipitation hardenable 17-4 stainless steel”, *Mater. Sci. Eng., A*, 568, 127-133 (2013).
- [30] Guo, Z., Sha, W. and Vaumousse, D., “Microstructural evolution in a PH13-8 stainless steel after ageing”, *Acta Mater.*, 51, 101-116 (2003).
- [31] Strondl, A., Fischer, R., Frommeyer, G. and Schneider, A., “Investigations of MX and γ'/γ precipitates in the nickel-based superalloy 718 produced by electron beam melting”, *Mater. Sci. Eng., A*, 480, 138-147 (2008).
- [32] Ping, D. H., Ohnuma, M., Hirakawa, Y., Kadoya, Y. and Hono, K., “Microstructural evolution in 13Cr-8Ni-2.5 Mo-2Al martensitic precipitation-hardened stainless steel”, *Mater. Sci. Eng., A*, 394, 285-295 (2005).
- [33] Özlü, B., “Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Sleiþner cold work tool steel”, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 36, 1241-1251 (2021).
- [34] Ciftci, I., “Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools”, *Tribol. Int.*, 39, 565-569 (2006).
- [35] SreeramaReddy, T. V., Sornakumar, T., VenkataramaReddy, M. and Venkatram, R., “Machinability of C45 steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts”, *Int. J. Refract. Met. Hard.*, 27, 181-185 (2009).
- [36] Özçatalbaş, Y. and Baş, A., “Effects of cooling by air spraying on cutting forces and tool life in turning”, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 21, 1-6 (2013).
- [37] Kumar, K.V. and Choudhury, S.K., “Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments”, *J. Mater. Process. Technol.*, 203, 95-101 (2008).

- [38] Abukhshim, N. A., Mativenga, P. T. and Sheikh, M.A., “Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46, 782-800 (2006).
- [39] Bäker, M., “Finite element simulation of high-speed cutting forces”, *J. Mater. Process Technol.*, 176, 117-126 (2006).
- [40] Chuzhoy, L., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. and Bammann, D. J., “Microstructure-level modeling of ductile iron machining”, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 124 (2), 162-169 (2002).
- [41] Boothroyd, G., Eagle, J. M. and Chisholm, A. W. J., “Effect of tool flank wear on the temperature generated during metal cutting”, *In: Proc 8th inter machine tool design and research conf.*, 667–80 (1967).
- [42] Mesquita, R. M. D. and Marques, B. M. J. M., “Experimental determination of the dynamic shear stress in metal cutting”, *J. Mater. Process Technol.*, 33, 229-246 (1992).
- [43] Rodríguez, J., Muñoz-Escalona, P. and Cassier, Z., “Influence of cutting parameters and material properties on cutting temperature when turning stainless steel”, *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 26 (1), 71-80 (2011).
- [44] Özlü, B., Akgün, M. and Demir, H., “Evaluation of the effect of hot forging and cooling conditions on the microstructure, hardness and machinability of medium carbon DIN 41Cr4 steel”, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 38(1), 231-244 (2023).
- [45] Demir, H. and Gündüz, S., “The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy”, *Materials Design*, 30 (5), 1480-1483 (2009).

- [46] Özlü, B. and Akgün, M., “Evaluation of the machinability performance of PH 13-8 Mo maraging steel used in the aerospace industry”, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part E: J. Process*, 238 (2), 687-699 (2024).
- [47] Thamizhmanii, S., Kamarudin, K. E., Rahim, A., Saparudin, A. and Hassan, S., “Tool wear and surface roughness in turning AISI 8620 using coated ceramic tool”, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, 1157-1161 (2007).
- [48] Şirin, Ş. and Kıvak, T., “Effects of hybrid nanofluids on machining performance in MQL-milling of Inconel X-750 superalloy”, *J. Manuf. Processes*, 70, 163-176 (2021).
- [49] Gupta, M. K., Song, Q., Liu, Z., Sarıkaya, M., Jamil, M., Mia, M. and Krolczyk, G. M., “Experimental characterisation of the performance of hybrid cryo-lubrication assisted turning of Ti-6Al-4V alloy”, *Tribol. Int.*, 153, 106582 (2021).
- [50] Öndin, O., Kıvak, T., Sarıkaya, M. and Yıldırım, Ç. V., “Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel”, *Tribol. Int.*, 148, 106323 (2020).
- [51] Kıvak, T., Sarıkaya, M., Yıldırım, Ç. V. and Sirin, S., “Study on turning performance of PVD TiN coated Al₂O₃+ TiCN ceramic tool under cutting fluid reinforced by nano-sized solid particles”, *J. Manuf. Process*, 56, 522–39 (2020).

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Ankara ilinde ve lise öğrenimini Ulubey Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. 2008 yılında Selçuk Üniversitesi Ilgın Meslek Yüksek Okulu Makine Bölümünde öğrenime başlayıp 2010 yılında mezun olmuştur. 2016 yılında Dikey Geçiş Sınavı (DGS) ile Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne başlamış olduğu yüksek lisans programını 2020 yılında tamamlamıştır. Bu süre zarfında Ankara ilinde çeşitli kurum ve özel sektörde çeşitli alanlarda çalışmıştır. 2020 yılında aile şirketimiz olan RAL PROJE İNŞAAT şirketinde inşaat sektöründe mekanik tesisat projelendirme ve imalatları kısmında yönetici olarak göreve başlamış ve devam etmektedir. 2022 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı Yüksek Lisans eğitimine devam etmektedir.