



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ
INCONEL 718 ALAŞIMLARINDA DELİK
DELME İŞLEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Falat Hüseyin EKMEN

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2021
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Falat Hüseyin EKMEN tarafından hazırlanan “Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımlarında delik delme işlemlerinin araştırılması” adlı tez çalışması 06/05/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin GÜRBÜZ

.....

Üye

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

.....

Üye

Doç. Dr. Turgay KIVAK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2019-YL-08 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Falat Hüseyin EKMEN

Tarih: 06/05/2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

KRİYOJENİK İŞLEM UYGULANMIŞ INCONEL 718 ALAŞIMLARINDA DELİK DELME İŞLEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Falat Hüseyin EKMEK

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin GÜRBÜZ

2021, 126 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin GÜRBÜZ
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
Doç. Dr. Turgay KIVAK

Bu çalışmada, farklı kesme parametrelerinde kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış Inconel 718 iş parçalarının delik delme işlemleri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla Inconel 718 iş parçalarından birine -146 °C'de 24 saat derin kriyojenik işlem ile 2 kez temperleme işlemi (200 °C'de 2 saat) uygulanmıştır. Delik delme deneyleri, kuru kesme şartlarında 10 mm çapa sahip TiSiN kaplamalı karbür matkaplar ile 8 mm sabit kesme derinliğinde 4 farklı kesme hızı (10, 13, 16, 19 m/dak) ile 3 farklı ilerleme (0,06, 0,09, 0,12 mm/dev) parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Takım ömrü deneyleri, 8 mm kesme derinliği, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme parametreleri ile yapılmıştır. Deneylerde Inconel 718 iş parçasının delinmesinde kesme parametrelerinin ve kriyojenik işlemin etkisini görmek için kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, takım ömrü, mikrosertlik ve mikroyapı incelenmiştir. Kriyojenik işlem, Inconel 718 alaşımının mikrosertliğinin artmasına, tane boyutlarının küçülmesine, daha fazla γ'' fazının çökmesine ve karbürlerin inceliyor homojen dağılmasına neden olmuştur. Ayrıca delik delme işlemlerinde kesme kuvvetlerinin yükselmesine ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azalmasına yol açmıştır. Takım ömrü deneylerinde, kriyojenik işlem uygulanan Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takımın daha az aşındığı ve takım ömrünün arttığı görülmüştür. Delik delme deneylerinde ilerlemenin artması kesme kuvvetlerinin yükselmesine, kesme hızının artması ise kesme kuvvetlerinin önce yükseliyor daha sonra düşmesine neden olmuştur. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün artan ilerleme ile birlikte arttığı, artan kesme hızı ile birlikte önce azaldığı daha sonra arttığı görülmüştür. Takım ömrü deneylerinde kriyojenik işlem görmüş iş parçası delindiğinde kriyojenik işlem görmemiş iş parçasına göre daha yüksek ilerleme kuvvetleri elde edilirken yüzey pürüzlülüğü açısından ise kriyojenik işlem görmüş iş parçasından daha düşük değerler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Delik Delme, Inconel 718, İlerleme Kuvveti, Kriyojenik İşlem, Takım Aşınması, Yüzey Pürüzlülüğü,

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF HOLE DRILLING OPERATIONS IN CRYOGENIC TREATED INCONEL 718 ALLOYS

Falat Hüseyin EKMEN

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

Advisor: Asst. Prof. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2021, 126 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Assoc. Prof. Dr. Turgay KIVAK

In this study, the drilling operations of cryogenically treated and untreated Inconel 718 work-pieces were experimentally investigated at different cutting parameters. For this purpose, one of the Inconel 718 work-piece was applied deep cryogenic treatment at -146 °C for 24 hours and tempering process twice (2 hours at 200 °C). Drilling tests were performed in dry cutting conditions with TiSiN coated carbide drills with a diameter of 10 mm, 4 different cutting speeds (10, 13, 16, 19 m/min), and 3 different feeds (0,06, 0,09, 0,12 mm) at 8 mm constant cutting depth parameters. Tool life tests were conducted with 8 mm depth of cut, 10 m/min cutting speed and 0.06 mm/rev feed. In the experiments, cutting forces, surface roughness, tool wear, tool life, micro-hardness and microstructure were examined to see the effect of cutting parameters and cryogenic treatment on drilling of Inconel 718 work-piece. The cryogenic treatment resulted in an increase in the micro-hardness of the Inconel 718 alloy, a reduction in grain sizes, precipitation of more γ'' phases, and thinning and homogeneous distribution of the carbides. In addition, it caused the feed forces to increase and the surface roughness values to decrease in hole drilling operations. In the tool life experiments, it was observed that the cutting tool used in cryogenically treated Inconel 718 alloy was worn less and the tool life increased. In the hole drilling experiments, the increase in the cutting force caused the cutting forces to increase, and the increase in the cutting speed caused the feed forces to increase first and then decrease. In addition, it was observed that the surface roughness increased with increase in feed and decreased first with increasing cutting speed and then increased. In tool life experiments, higher feed forces were obtained when the cryogenically treated work-piece was drilled, compared to the untreated work-piece, while lower values were obtained in cryogenically treated work-pieces than the untreated work-piece in terms of surface roughness.

Keywords: Drilling, Cryogenic treatment, Feed Force, Inconel 718, Surface Roughness, Tool Wear

ÖNSÖZ

“Kriyojenik İşlem Uygulanmış Inconel 718 Alaşımlarında Delik Delme İşlemlerinin Araştırılması” başlıklı yüksek lisans tez çalışması 6 bölümden meydana gelmektedir. Bu bölümler; Giriş, Literatür Taraması, Genel Bilgiler, Materyal ve Metot, Araştırma Sonuçları ve Tartışma, Sonuçlar ve Öneriler’den oluşmaktadır. Giriş kısmında; süper alaşımlara, Inconel 718’e, kriyojenik işleme ve delik delme işlemlerine değinilmiştir ve gerçekleştirilen çalışmanın amacından bahsedilmiştir. Literatür Taraması kısmında; bu çalışmaya ilgili daha önceden yapılmış bilimsel çalışmaların özetine yer verilmiştir. Materyal ve Metot kısmında; bu çalışmada kullanılan Inconel 718 süper alaşımına, kriyojenik işlemin ve temperleme işleminin uygulanmasına, kesici takım ve kesme parametrelerine, iş parçası malzemelerinin hazırlanmasına ve deneylerde kullanılan tezgâhlara, cihazlara ve yazılımlara yer verilmiştir. Araştırma Sonuçları ve Tartışma bölümünde; kriyojenik işlem ile 2 kez temperleme işlemi uygulanmış ve herhangi bir işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçalarının mikrosertlikleri ve mikroyapıları ve bu malzemelere yapılan deneyler sonucunda oluşan kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri, takım aşınmaları ve takım ömürleri incelenmiştir. Sonuçlar ve Öneriler kısmında; yapılan bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlara ve bundan sonraki yapılacak çalışmalara kaynak olması için önerilere değinilmiştir.

Tüm tez çalışmalarım süresince bilgisini, desteğini ve tecrübesini hiç esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin GÜRBÜZ’e, çalışmalarım sırasında değerli bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Şehmus BADAY’a, laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN, Arş. Gör. Serkan BATI, Dr. Öğr. Üyesi Eyüp BAŞARAN ve tüm diğer hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım laboratuvarlarında bana yardımcı olan Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde (YETEM) ve Dicle Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DÜBTAM) bulunan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2019-YL-08 nolu proje kapsamında yaptığım çalışmalara desteklerinden dolayı Batman Üniversitesi’ne teşekkür ederim.

Yaşamımın her anında yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen anneme, babama, ablam Deniz EKMEN’e, kardeşlerim Buşra EKMEN ve Muhammed Fırat EKMEN’e, nişanlım Ayşe GÜÇLÜ ve yakın dostum Dr. Ali YILDIRIM’a ve çalışmalarım emeği geçen ablam Arb. Av. Yonca EKMEN’e minnet ve sevgilerimi sunarım.

Falat Hüseyin EKMEN
BATMAN-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. GENEL BİLGİLER.....	21
3.1. Kriyojenik İşlem	21
3.1.1. Kriyojenik işlemin gelişimi.....	22
3.1.2. Kriyojenik İşlemin Uygulanması	27
3.1.3. Kriyojenik İşlemin Etkileri	30
3.2. Süper Alaşımlar	32
3.2.1. Süper alaşımların sınıflandırılması	35
3.2.2. Inconel 718.....	46
3.3. Delik Delme	55
3.3.1. Delik delme işlemleri	56
3.3.2. Delik delme işlemlerinin yeri.....	58
3.3.3. Matkaplar	59
3.3.4. Temel tanımlar ve Formüller	61
3.3.5. Yüzey Pürüzlülüğü.....	63
3.3.6. Aşınma	64
3.3.7. Sıcaklık	66
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	68
4.1. İş Parçası Malzemesi	68
4.2. Kriyojenik İşlem Uygulanması	68
4.3. Delik Delme Deneyleri	69
4.4. Kesici Takım ve Kesme Parametreleri	70
4.5. Kesme Kuvvetleri Ölçümü	72
4.6. Takım Aşınması	75
4.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.....	78
4.8. Mikrosertlik Ölçümü.....	79
4.9. Mikroyapı.....	80
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	82

5.1. Mikroyapı Analizi	82
5.2. Mikrosertlik Analizi	88
5.3. Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi	89
5.3.1. Delik delme deneylerinde kesme kuvvetleri	89
5.3.2. Takım ömrü deneylerinde kesme kuvvetleri	94
5.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi	95
5.4.1. Delik delme deneylerinde yüzey pürüzlülük değerleri	95
5.4.2. Takım ömrü deneylerinde yüzey pürüzlülük değerleri	98
5.5. Takım Ömrü	100
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ	126

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Delme açılarına göre takım ömrü: (a) uç açısı; (b) boşluk açısı	4
Şekil 2.2. Inconel 718 yüzey altı mikroyapısı; (a) delik delmeden kaynaklanan mikroyapı. (b) freze ile delmeden kaynaklanan mikroyapı	8
Şekil 2.3. Inconel 718 süper alaşımının mikroyapısı: (a) işlenmemiş, (b) CT-1 ve (c) CT-2	15
Şekil 2.4. Inconel 718 süper alaşımı mikrografları: (a) işlenmemiş, (b) CT-1 ve (c) CT-2	16
Şekil 3.1. Kriyojenik gelişmeler	23
Şekil 3.2. Collins helyum sıvılaştırıcısı	25
Şekil 3.3. Kontrollü bir şekilde uygulanan kriyojenik işlem şeması	27
Şekil 3.4. Kriyojenik işlem aşamaları	28
Şekil 3.5. Farklı sıcaklıklarda kriyojenik işlem uygulanmış takım çeliklerinin aşınma direnci oranları	29
Şekil 3.6. Sıcaklıkta azalma ile atomik seviyelerde bağlanma enerjisinde artış	31
Şekil 3.7. Süper alaşımların kullanım alanları	33
Şekil 3.8. Süper alaşımların içerdikleri ana alaşım elementine göre sınıflandırılması	36
Şekil 3.9. Gaz türbininde kullanılan malzemelerin değerlendirilmesi	38
Şekil 3.10. Kullanılan malzemelerle beraber bir jet motoru kesiti	39
Şekil 3.11. Üretim yöntemlerine göre nikel esaslı süper alaşımlar	40
Şekil 3.12. GEAE’de döner ve yapısal kısımlarda kullanılan dövme malzemeler	47
Şekil 3.13. γ' ve γ'' fazlarının kristal yapıları (a) γ' ; (b) γ''	51
Şekil 3.14. Inconel 718 alaşımına ait zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramı	52
Şekil 3.15. Inconel 718 alaşımının mikroyapısında oluşan δ fazı	53
Şekil 3.16. Inconel 718 alaşımında γ' ve γ'' fazları	53
Şekil 3.17. Inconel 718 alaşımında Nb ve Ti esaslı iri karbür taneleri	54
Şekil 3.18. Farklı karbürlerin sıcaklığa bağlı sertlik değişimi	55
Şekil 3.19. Takımın ilerleme (u) ve dönme (v) hareketi	56
Şekil 3.20. Delik çapı ve boyu ilişkisi	57
Şekil 3.21. Delme işlemleri, (a) tek operasyonda delme işlemi, (b) ön delik delme işleminden sonra yapılan delme işlemi	57
Şekil 3.22. Delme işleminin diğer operasyonlar ile karşılaştırılması	59
Şekil 3.23. Matkaptaki kesici kenar ve yüzeyler	60
Şekil 3.24. Matkapta açılar	61
Şekil 3.25. Kesme ve ilerleme hızı	62
Şekil 3.26. Matkabı etkileyen kuvvetler	62
Şekil 3.27. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra)	64
Şekil 3.28. Kesici takım aşınma evreleri	65
Şekil 3.29. Matkapta aşınma türleri	66
Şekil 3.30. Matkapta serbest yüzey aşınmasının ölçülmesi	66
Şekil 3.31. Kesme işleminde ısı üretim bölgeleri	67
Şekil 4.1. Inconel 718 süper alaşımına uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme işlemleri	69
Şekil 4.2. Hartford VMC-1020 CNC Dikey İşleme Merkezi	69
Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan kesici takım	70
Şekil 4.4. Dinanometreye bağlanmış iş parçası	73
Şekil 4.5. Kistler Type 5070 Amplifikatör	73
Şekil 4.6. DAQ sinyal düzenleyici	74
Şekil 4.7. CutPro MALDAQ Modülü	75

Şekil 4.8. Olympus SZ61 mikroskobu.....	76
Şekil 4.9. Motic Images Plus 2.0 ML yazılımı	76
Şekil 4.10. Tel erezyon tezgâhına kesilen takımlar	77
Şekil 4.11. QUANTA FEG 250 Taramalı elektron mikroskobu (YETEM)	78
Şekil 4.12. QUANTA FEG 250 Taramalı elektron mikroskobu (DÜBTAM).....	78
Şekil 4.13. Hommel Tester T500 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	79
Şekil 4.14. Sertlik Ölçüm Cihazı	80
Şekil 4.15. Sertlik Ölçümü	80
Şekil 4.16. İş parçalarının tel erezyon tezgâhında kesilmesi	81
Şekil 4.17. Mikroyapı analizi için hazırlanan numuneler.....	81
Şekil 5.1. Inconel 718 alaşımlarındaki karbürler, a) İU Inconel 718, b) KİT Inconel 718	83
Şekil 5.2. Inconel 718 alaşımlarında γ'' fazları, a) İU Inconel 718, b) KİT Inconel 718	85
Şekil 5.3. Inconel 718 alaşımlarında tane boyutları, a) İU Inconel 718, b) KİT Inconel 718	86
Şekil 5.4. Kriyojenik ortamda plastik deformasyona maruz kalan Inconel 718 süper alaşımında nanokristalin oluşumunun şematik diyagramı	87
Şekil 5.5. Inconel 718 alaşımına kriyojenik işlem uygulanması ile yeni tanelerin oluşması	88
Şekil 5.6. İşlem uygulanmamış ve 2 farklı kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımlarının kuvvet-uzama eğrisi grafiği	91
Şekil 5.7. İlerlemeye bağlı olarak ilerleme kuvvetlerindeki değişim a) $V=10$ m/dak b) $V=13$ m/dak c) $V=16$ m/dak d) $V=19$ m/dak.....	92
Şekil 5.8. Kesme hızına bağlı olarak ilerleme kuvvetlerindeki değişim a) $f=0,06$ mm/dev b) $f=0,09$ mm/dev c) $f=0,12$ mm/dev.....	93
Şekil 5.9. Takım ömrü deneylerinde ilerleme kuvvetlerinin grafiği	94
Şekil 5.10. İlerlemeye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim a) $V=10$ m/dak b) $V=13$ m/dak c) $V=16$ m/dak d) $V=19$ m/dak.....	97
Şekil 5.11. Kesme hızına bağlı olarak ilerleme kuvvetlerindeki değişim a) $f=0,06$ mm/dev b) $f=0,09$ mm/dev c) $f=0,12$ mm/dev.....	98
Şekil 5.12. Takım ömrü deneylerinde delik yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği	100
Şekil 5.13. Takım ömrü deneylerinde İU Inconel 718’de kullanılan takımın sol kenarına ait mikroskop görüntüleri.....	101
Şekil 5.14. Takım ömrü deneylerinde İU Inconel 718’de kullanılan takımın sağ kenarına ait mikroskop görüntüleri.....	102
Şekil 5.15. Takım ömrü deneylerinde İU Inconel 718’de kullanılan takımın uç kısmına ait mikroskop görüntüleri.....	103
Şekil 5.16. Takım ömrü deneylerinde KİT Inconel 718’de kullanılan takımın sol kenarına ait mikroskop görüntüleri	104
Şekil 5.17. Takım ömrü deneylerinde KİT Inconel 718’de kullanılan takımından alınan EDS analizi yeri	105
Şekil 5.18. Takım ömrü deneylerinde KİT Inconel 718’de kullanılan takımın sağ kenarına ait mikroskop görüntüleri.....	107
Şekil 5.19. Takım ömrü deneylerinde KİT Inconel 718’de kullanılan takımın uç kısmına ait mikroskop görüntüleri.....	108
Şekil 5.20. İU Inconel 718’de kullanılan takıma ait SEM görüntüleri.....	109
Şekil 5.21. KİT Inconel 718’de kullanılan takıma ait SEM görüntüleri	109

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Isıya dayanıklı alaşımlarda gözlenen bileşenler	34
Tablo 3.2. Nikel esaslı alaşımların dövme sıcaklık aralıkları	40
Tablo 3.3. Inconel 718 süper alaşımına ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler	48
Tablo 3.4. Inconel 718'in kimyasal bileşim sınırları	50
Tablo 4.1. Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi	68
Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan kesici takım özellikleri	70
Tablo 4.3. Delik delme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri.....	71
Tablo 4.4. Takım aşınması deneylerinde kullanılan kesme parametreleri.....	72
Tablo 4.5. Kistler Tip 9257B teknik özellikler	72
Tablo 5.1. Mikrosertlik ölçümü sonuçları	88
Tablo 5.2. Delik delme deneylerinde ilerleme kuvvetleri (N)	90
Tablo 5.3. İşlem uygulanmamış ve 2 farklı kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımlarının çekme testi sonuçları	91
Tablo 5.4. Takım ömrü deneylerinde ilerleme kuvvetleri (N)	94
Tablo 5.5. Delik delme deneylerinde delik yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra).....	96
Tablo 5.6. Takım ömrü deneylerinde delik yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra).....	99
Tablo 5.7. Takım ömrü deneylerinde KIT Inconel 718'de kullanılan takımdan alınan EDS analizi sonucu	106
Tablo 5.8. Delik delmede tane boyutu ve sertliğin Inconel 718'in işlenebilirliğine etkisi	110

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

D	: Takım çapı, mm
f	: Devir başına ilerleme, mm/dev
Frz	: Radyal kuvvet, N
Fsz	: Kesme kuvveti, N
Fvz	: İlerleme kuvveti, N
L	: Delik Boyu, mm
n	: Devir sayısı, dev/dak
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)
Tc	: İşleme süresi, dak:
u	: Takımın ilerlemesi
v	: Takımın dönmesi
Vc	: Kesme hızı, m/dak
Vf	: İlerleme hızı, mm/dak
Q	: Talaş kaldırma oranı, cm^3/dak
γ	: Gama matris
γ'	: Gama üssü
γ''	: Gama çift üssü
σ	: Sigma
δ	: Delta
α	: serbest açı
β	: kama açısı
γ	: talaş açısı
θ	: helis açısı

ϕ : enine kesme açısı

ψ : uç açısı

Kısaltmalar

ASTM : Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (American Society for Testing and Materials)

BUE : Yığıntı Talaş (Built-Up Edge)

Cr₂O₃ : Kromyum Oksit

CuCl₂ : Bakır (II) Klorür

Al₂O₃ : Alüminyum Oksit

CEC : Kriyojenik Mühendisliği Konferansı (Cryogenic Engineering Conference)

CFD : Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)

DMLS : Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering)

DÜBTAM : Dicle Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi

EDS : Enerji Dispersiv Spektrum (Energy Dispersive Spectrometry)

FEM : Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method)

GEAE : General Electric Uçak Motorları (General Electric Aircraft Engines)

HCl : Hidroklorik Asit

HIP : Sıcak İzostatik Pres (Hot Isostatic Pressing)

HMK : Hacim Merkezli Kübik

HMT : Hacim Merkezli Tetragonal

HSP : Hegzagonal Sıkı Paket

HSS : Yüksek Hız Çeliği (High Speed Steel)

HRc : Rockwell Sertlik Değeri (Hardness Rockwell C)

HV : Vickers Sertlik Değeri (Hardness Vickers)

LN₂ : Sıvı Nitrojen (Liquid Nitrogen)

ML	: Minimum Miklarda Yağlama (Minimum Quantity Lubrication)
MÖ	: Milattan Önce
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NbC	: Niyobyum Karbür
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
Si₃N₄	: Silisyum Nitrürler
SLM	: Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting)
TCP	: Topolojik Sıkı Paket (Topologically Close-Packed)
TiC	: Titanyum karbür
TiN	: Titanyum nitrür
V_B	: Yan Yüzey Aşınması
YETEM	: Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
YY	: Yüzyıl
WC	: Tungsten karbür

1. GİRİŞ

Süper alaşım terimi, yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kaldıktan sonra mekanik özelliklerini koruyabilen alaşımları ifade etmektedir. Bu malzeme kategorisi öncelikle uçak türbin motorları ve turboşarjlar gibi uygulamalar için geliştirilmiştir. Bununla birlikte uygulamaları zaman içinde roket motorları, gaz türbinleri, kimya tesisleri ve petrol rafinerileri gibi diğer birçok endüstriyel sektöre genişletilmiştir. Süper alaşımlar bileşim açısından bakıldığında askeri, ticari ve endüstriyel uygulamalar için şimdiye kadar geliştirilen tüm metal alaşımları arasında en karmaşık olanlardan biridir. Bu karmaşıklık, metalurjistlerin farklı alaşımlar geliştirmesine ve alaşım özelliklerini çok çeşitli uygulamalar için uyarlamasına olanak tanımaktadır (Kishawy ve Hosseini, 2019).

Türbinler için geliştirilen ve havacılık sanayinde zorlu çalışma şartlarına maruz kalan Inconel 718 süper alaşımı, endüstriyel alanda en yaygın kullanılan süper alaşımlardan birisidir. Düşük ve yüksek (-250 °C ve 700 °C) çalışma sıcaklığı aralıklarında sağladığı üstün mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde uzay, otomotiv, nükleer enerji, petrol, tıbbi ve kimyasal ürünler endüstrilerinde de sıkça tercih edilmektedir. Öte yandan Inconel 718 süper alaşımı, sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle plastik deformasyonu zor olan bir malzemedir. Inconel 718'in düşük ısıl iletkenlik, yüksek pekleşme eğilimi, yüksek mukavemet ve sıcak sertlik, yüksek süneklik ve bazı kesici takım malzemelerine kimyasal ilgi gibi özellikleri nedeniyle talaşlı imalatı sırasında yüksek işleme maliyetleri, düşük yüzey kalitesi ve düşük takım ömrü gibi problemler ile karşılaşmaktadır (Uçak ve Çiçek, 2018).

Kriyojenik işlem, malzemelere uygulanan konvansiyonel ısıl işlemlerden sonra yapılan ısıl işlemi tamamlayıcı özel bir işlemdir (Ersöz ve Ovalı, 2018). Bu işlem, uygulandığı sıcaklığa göre 80 °C ile -140 °C arası sığ kriyojenik işlem ve -140 °C ile -196 °C arası derin kriyojenik işlem olarak adlandırılır (Akıncıoğlu ve ark., 2015). Kriyojenik işlemde işlem uygulanan malzeme önceden belirlenen sıfırın altındaki sıcaklığa belirli bir hızda kademeli olarak soğutulur, bu sıcaklıkta bir süre bekletilir ve belirli bir hızla tekrar oda sıcaklığına çıkarılır. Malzemelere bu işlemin uygulanmasındaki amaç, minimum veya önemsiz yan etkilerle malzemeye istenilen mekanik özelliklerin kazandırılmasıdır (Thornton ve ark., 2011). Kriyojenik işlemin malzemenin mikroyapısına, performansına, fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve kriyojenik işlem parametrelerine bağlıdır.

Uygun bir şekilde sağlanan kriyojenik işlem şartlarında işlem uygulanan malzemenin mekanik ve mikro yapı özelliklerinde önemli değişimler meydana gelmektedir (Demir ve Uygur, 2017).

Talaş kaldırma işlemi; sşrtşnme ve ısı oluşumu, elastik ve plastik şekil değişikliğine dayanım, iş parçası yşzeyinin sertleşmesi, kesici takımın aşınması ve kırılması, talaş oluşumu ve kırılması gibi durumların meydana geldiği karmaşık bir fiziksel olaydır (Meral ve ark., 2011). Delik delme, talaş kaldırma işlemlerinin %33'şnş oluşturan en önemli işlemlerinden biridir. Ayrıca talaş kaldırma işlemlerine harcanan zamanın %25'ini delik delme işlemleri oluşurmaktadır. Delme işlemi, genellikle bir parçanın imalatında son adımlardan biri olarak gerçekteştirilir. Delme işleminde kesici takımın ve işlem sşrecinin, belirli işleme gşrevine, iş malzemesine, şretilecek deliğin kalitesine ve gerekli işlem gşvenilirliği seviyesine uyarlanması gerekir. Bu nedenle çok sayıda takım geometrisi ve takım malzemesi yanı sıra delik delme stratejileri geliştirilmektedir (Tşnshoff ve ark., 1994). Talaş kaldırma işlemlerinden şnce iş parçalarına uygulanan kriyojenik işlem, yşzey přrřzlřlřđř ve takım aşınması şzerinde olumlu etkiler sağlayabilmektedir (Çiçek ve ark., 2013; Palanisamy ve Senthil, 2018; Kara ve ark., 2019).

Bu çalışmanın amacı, Inconel 718 alaşımına yapılan delik delme işlemlerinde işleme maliyetlerini dşşşrmek ve işleme performansını artırmak için iş parçasına uygulanan kriyojenik işlemin ve kesme parametrelerinin, delik delme işlemi şzerindeki etkilerini araştırmak ve en uygun işleme şartlarına ulaşmaktır. Bu nedenle bu çalışmada, Inconel 718 alaşımına kriyojenik işlem uygulanmasının malzemenin mikroyapısına ve mikrosertliğine etkisi ile malzemenin delinmesi ile meydana gelen kesme kuvvetleri, yşzey přrřzlřlřđř, takım aşınması ve takım şmrş şzerindeki etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

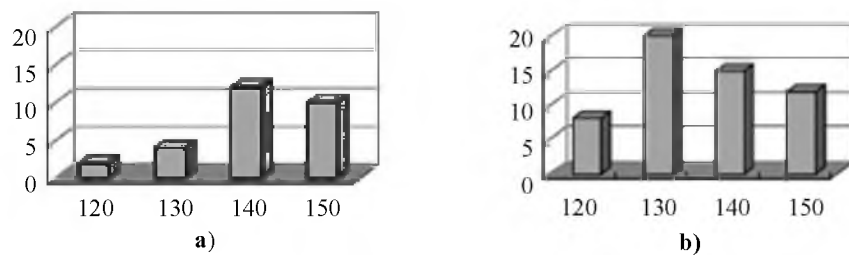
Schirra ve Viens (1994), tornalama, frezeleme ve delik delme işlemlerinde Inconel 718'in (AMS 5663) işlenebilirliğini etkileyen metalurjik faktörleri incelemişlerdir. İncelenen değişkenler arasında metal üretim süreci (dövme, hassas döküm, hassas döküm + Sıcak İzostatik Pres (HIP)), sertlik, tane boyutu ve karbon içeriği yer almaktadır. Inconel 718'in işleminde kullanılan kesme hızları ve ilerlemeler için baskın aşınma mekanizmasının abrazyon aşınması olduğu bulunmuştur. Inconel 718 alaşımlarında genel olarak sertlik artışı ile işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür. Sertliğin artmasıyla malzeme mukavemetinin de arttığını ve bunun da artan bir takım aşınma oranı ile işlenebilirlikte bir azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Sadece hassas döküm + HIP ile üretilen alaşımda, 22.5 ve 30.7 Rc sertlikteki karşılaştırmada işlenebilirliğin değişmediği görülmüştür. Sertlik artışı devam ettiğinde bu alaşımda da işlenebilirliğin düşmeye başladığı görülmüştür. Malzemenin tane boyutunun artması işlenebilirliğin azalmasına neden olmuştur. Kantitatif mikroyapısal analiz, karbon içeriğinin düşürülmesinin ortalama karbür boyutunu azaltmadığını ancak maksimum boyutu ve popülasyonu azalttığını göstermiştir. Bu sayede ortalama karbür boyutunun karbon içeriğiyle değil de katılaşma oranıyla belirlendiği anlaşılmıştır. Döküm + HIP Inconel 718'in sertliği, azalan karbon seviyesi sonucunda çökelme kuvvetlendirmesi için mevcut Nb miktarının artması nedeniyle artmıştır. Düşük karbon içeriği nedeniyle artan sertliğe rağmen karbon içeriğinin azaltılması, takım aşınmasına katkıda bulunan sert ve aşındırıcı karbürlerin miktarını azaltarak döküm + HIP Inconel 718'in işlenebilirliğini iyileştirmiştir. Yapılan testlerde, döküm + HIP Inconel 718'in karbon içeriğinin azaltılmasının, alaşımın üretilebilirlik veya mekanik özellikler üzerinde hiçbir zararlı etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Dövme Inconel 718'in işlenebilirliğinin de karbon içeriği azaltılarak artırılabilceği fakat azaltılmış karbon içeriğinin, alaşımın mekanik özellikleri üzerindeki zararlı etkileri olduğu belirtilmiştir.

Ezugwu ve ark. (1999), nikel esaslı alaşımların işlenebilirliğini incelemişlerdir. Nikel esaslı Inconel 718 ve Nimonic 75 alaşımlarının çeşitli kesme koşullarında işlenmesinde K20 sınıfı sementit karbür takımların en iyi performansı verdiği ifade edilmiştir. Nikel esaslı alaşımları işlerken farklı ortamların takım aşınma oranı üzerinde farklı etkiler yarattığını, oksijen ortamında işleme yaparken çentiklenmenin azaldığını, argon ve nitrojen ortamında ise kesme işleminin daha şiddetli hale geldiğini bildirmişlerdir. Nikel esaslı alaşımları işlemek için yüksek basınçlı kesme sıvısı

kullanılması, iyileştirilmiş talaş segmentasyonu avantajına rağmen daha kısa bir takım ömrü sağladığı belirtilmiştir. Yüksek basınçlı kesme sıvısı beslemesinin, talaş-takım temas alanında önemli bir azalmaya ve sonuç olarak kesme kenarındaki gerilmelerde bir artışa neden olduğunu dile getirmişlerdir.

Arunachalam ve Mannan (2000), özellikle en yaygın olarak kullanılan Inconel 718 üzerinde yapılan çalışmalara odaklanarak, son 15 yılda gerçekleştirilen nikel esaslı alaşımların işlenmesindeki araştırma ve geliştirme çalışmalarını gözden geçirmişlerdir. Nikel esaslı alaşımların, yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklık direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığını ve mikroyapılarındaki sert aşındırıcılar ve yüksek iş sertleşmesi kapasitesi nedeniyle işlenmelerinin zor olduğunu belirtmişlerdir. Nikel esaslı alaşımların sadece sertliğine bağlı olarak kesme koşullarının belirlenmesinin hatalı olacağını, alaşımların kimyasal bileşiminin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. Nikel esaslı alaşımlarda yüksek basınçlı kesme sıvısı beslemesinin, geleneksel soğutma sıvısına göre herhangi bir avantaj göstermediğini belirtmişlerdir. Inconel 718'i işlerken kuru kesme şartlarında seramik takımların daha iyi performans gösterdiklerini ve dolayısıyla seramik takımların hem uygun maliyetli hem de çevre dostu olma avantajına sahip olduğunu dile getirmişlerdir.

Chen ve Liao (2003), Inconel 718 süperalaşımın delinmesinde aşınma mekanizmaları üzerine çeşitli deneylerin bulunduğu bir çalışma yapmışlardır. Sert malzemeleri delmede etkili fakat Inconel 718 alaşımının delinmesinde test edilmemiş olarak belirtilen TiAlN PVD kaplamalı takımın aşınma mekanizmasını araştırmışlardır. Çalışmalarında, 10,5 mm çapında çok katmanlı TiAlN PVD kaplı tungsten karbür matkaplar ile Inconel 718 üzerinde 30 mm derinliğinde delikler açmışlardır. Inconel 718'i delme işleminde en uygun uç ve boşluk açılarını belirlemek için yaptıkları ön deneylerde, 140° uç açılı ve 8° boşluk açılı matkabın daha iyi performans verdiğini görmüşlerdir. Şekil 2.1'de çeşitli uç ve boşluk açılarına sahip takımlar ile delinebilecek delik sayısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Delme açılara göre takım ömrü: a) uç açısı; b) boşluk açısı (Chen ve Liao, 2003)

Deneylerde kesme hızı 13,2 m/dak ve ilerleme 0,1 mm/dev olarak belirlenmiştir. Delinen delik etrafındaki sertlik dağılımı test edilmiş ve sertliğin deliğin hem tabanında hem de yan duvarında 37 HRC'den 47 HRC'ye yükseldiği belirtilmiştir. Takım aşınmasının bir matkabın iki farklı kısmında olduğu, bunlardan birinin enine kesici kenara yakın düz kenarda ve diğerinin ise çevreye yakın kesme kenarında olduğu belirtilmiştir. Sürtünme kuvvetinin, takım arızasını yöneten en önemli faktör olduğu bulunmuştur. Takım durumunun gözlemlenmesine dayalı olarak aşınma dört aşamaya ayrılmış ve ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca kaplanmış ve kaplanmamış takımlar ile geleneksel ve nanopartikül katkılı kesme sıvısının kullanıldığı deneyler yapılmıştır. Inconel 718 alaşımının delinmesinde nano parçacıklı kesme sıvısı kullanılmasının, sürtünme kuvvetini etkili bir şekilde azalttığı ve takım ömrünü üç katına çıkarabildiği sonucuna varılmıştır.

Dudzinski ve ark. (2004), Inconel 718 alaşımının kuru kesme şartlarında ve yüksek hızda işlenmesine yönelik gelişmeleri gözden geçirmişlerdir. Bu çalışmada, Inconel 718'e ve son çalışmalara odaklanılmış ve bu malzemenin işlenmesi ile ilgili gelişmeler sunulmuştur. Ayrıca üretim maliyetlerini düşürmek ve işleme sürecini çevre açısından daha güvenli hale getirmek için, soğutucuların kullanımını azaltmaya yönelik bazı çözümler araştırılmış ve kuru şartlarda işlemeye doğru bir geçiş sağlamak için farklı kaplama tekniklerini incelenmiştir. Araştırmacılar yüksek hızda işlemenin, daha düşük kesme kuvvetlerine, daha yüksek talaş kaldırma oranlarına ve dolayısıyla daha düşük enerji tüketimine yol açtığını ifade etmişlerdir. Test edilen bütün takımlarda ana aşınma mekanizmasının abrazyon aşınması olduğu gözlemlenmiştir. Kesici takım üzerinde sıklıkla BUE [yığıntı talaş (Built-Up Edge)] olduğu ve BUE'nin ciddi çentiklenmeye neden olacak şekilde takımdan defalarca kaldırıldığı belirtilmiştir. İşlemede sırasında plastik deformasyon ve ısı oluşumu sonucunda metalurjik dönüşümler ve işlenmiş yüzey katmanında artık gerilmeler meydana geldiği belirtilmiştir. Artık gerilme dağılımının, işlenmiş yüzeyin yakınında yüksek çekme gerilimi ve ardından basma gerilimi sergilediği ve kesme hızı arttıkça etkilenen tabakanın derinliği ile çekme ve basma gerilmelerinin arttığı bildirilmiştir.

Krook ve ark. (2005), Inconel 718'in işlenebilirliğini etkileyen malzeme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada artan tane boyutunun daha yüksek çentik aşınmasına neden olduğu ve tane boyutu ile çentik aşınması arasında net bir korelasyon olduğu görülmüştür. Serbest yüzey aşınması ile mukavemet arasında bir korelasyon olmaması sonucunda, birincil karbürlerin işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemede γ'' ve

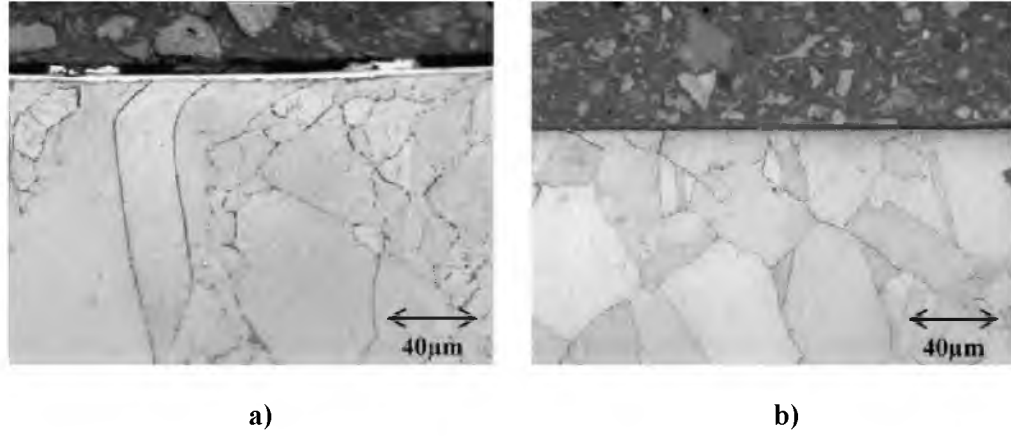
γ' fazlarından daha önemli bir role sahip olduğu anlaşılmıştır. Yapılan mikroyapı incelemelerinde birincil karbürlerin yapı içerisinde eşit bir şekilde dağılmadığı ve bunların %95'nin Nb bakımından zengin NbC karbürleri ve geri kalanı Ti bakımından zengin Ti(C,N) karbürleri olduğu tespit edilmiştir. Yerel karbür içeriğinin yüksek olabildiği ve kesici takımın bir grup karbüre maruz kalması sonucunda ise anlık büyük bir takım aşınması meydana gelebileceği belirtilmiştir. Tasarlanan malzeme üzerine yapılan çalışmada, büyük tane boyutunun küçük tane boyutuna kıyasla daha büyük takım aşınmasına yol açtığını görülmüştür. İşleme sırasında oluşan dislokasyonların tane sınırları tarafından engellendiği ve bu nedenle daha büyük tane boyutlu bir malzemede deformasyon derinliğinin daha büyük olduğu bilgisi verilmiştir. Bu durumun, büyük tane boyutuna sahip bir malzeme için daha kapsamlı bir takım aşınmasına neden olabileceği ifade edilmiştir. Yapılan analizlerde, δ fazının takım aşınması üzerinde düşük bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Daha yüksek miktarda δ fazının daha düşük miktarda γ'' fazı oluşmasına neden olacağı ve dolayısıyla mukavemetin azalması nedeniyle işlenebilirlik için faydalı olacağı yönünde olan düşüncenin, yapılan testler sonucunda doğru olmadığı sonucuna varılmıştır. Son olarak niyobyum, karbon ve titanyumun abrazyon aşınmaya neden olarak işlenebilirliği azaltan birincil karbürlerde bulunması nedeniyle işlenebilirliği etkileyen önemli elementler olduğu belirtilmiştir.

Klocke ve ark. (2006) çalışmalarında paslanmaz çeliğin tornalanması ve Inconel 718'in farklı PVD kaplamalarla kaplanmış içten soğutmalı karbür takımlar kullanılarak delinmesinden elde edilen sonuçları sunmuşlardır. Soğutma sıvısı olarak bir emülsiyon ve biyolojik olarak kolaylıkla parçalanabilen sentetik ester kullanmışlardır. Delik delme deneylerinde Inconel 718 alaşımına 6,8 mm çapa sahip takımlar ile kesme hızı 20 m/dak ve ilerleme 0,09 mm olacak şekilde 17 mm derinliğinde kör delikler açılmıştır. Takım ömrü ölçütü 0,2 mm'lik bir maksimum aşınma alanı genişliği veya 90 deliklik bir delme miktarı olarak belirlenmiştir. Deney sonucunda sentetik esterlerin, zorlu işleme operasyonlarında geleneksel su esaslı yağlayıcılara etkili bir alternatif olduğu ve PVD kaplamalı takımlar ile sentetik ester kombinasyonun, yalnızca çevre dostu işleme için gelişmiş bir sistemi temsil etmekle kalmayıp, aynı zamanda üretkenliğin artmasına da katkıda bulunacağı ifade edilmiştir.

Baldissera ve Delprete (2008), kriyojenik işlem ile ilgili son 30 yılın en önemli çalışmalarını yöntemlere, parametrelere, sonuçlara ve varsayılan mikroyapısal mekanizmalara odaklanarak özetledikleri bir derleme çalışması hazırlamışlardır. Bu

çalışmada, minimum sıcaklık ve bekleme süresi gibi kriyojenik işlem parametreleri ve kriyojenik işlemin aşınma direnci, sertlik, çekme ve eğilme dayanımı, yorulma direnci, termal yorulma direnci ve kırılma tokluğu üzerindeki etkileri birçok malzeme üzerinden incelenmiştir. Kriyojenik işlem ile ilgili belirtilen süre zarfında yapılan önemli çalışmaların büyük bir kısmının çelikler üzerine olması dikkat çekmektedir.

Sharman ve ark. (2008), Inconel 718 alaşımına yapılan delme işlemlerinde farklı kesici takımların, takım ömrü ve yüzey bütünlüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmanın amacı, ikincil işlemler olmadan farklı takımlar ile delik üretme potansiyelini değerlendirmek ve ayrıca delik delme işleminden sonra uygulanan raybalama ve freze ile delme performanslarını değerlendirmektir. Inconel 718'i delmek için üç takım üreticisi tarafından önerilen beş farklı 8 mm çaplı matkap kullanılmıştır. Deneyler 25 m/dak kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme hızı ve kesme sıvısı şartlarında yapılmıştır. Serbest yüzey aşınması $V_B = 0,25$ mm veya $V_{Bmax} = 0,5$ mm'ye ulaştığında denemeler durdurulmuştur. Delinmiş deliklerin mikroyapıda beyaz bir katman olarak görünen iş parçası bulaşması içerdiği ve bu durumun çatlaklar gibi potansiyel olarak yıkıcı yüzey kusurlarını kapatabileceğinden dolayı havacılık endüstrisinde kabul edilemeyeceği ifade edilmiştir. Delik yüzeyinin analizinden, talaşların matkap yiv kenarları ile delik duvarı arasında sıkışıp iş parçasına basınçla kaynaklandığını ve matkabın dönmesiyle yayıldığını görmüşlerdir. Oluşan şiddetli plastik deformasyonun ve termal olarak indüklenen faz dönüşümünün neden olduğu tane incilmesi sonucunda da beyaz tabakaların oluştuğu belirtilmiştir. Beyaz tabaka kalınlığının delik çapı, kesme hızı ve ilerleme hızı düştükçe azaldığı ifade etmişlerdir. Raybalama ve frezeleme işlemleri ile daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve minimum mikro yapısal deformasyona sahip deliklerin üretildiği ve beyaz tabakanın kaldırıldığı bilgisi verilmiştir. Şekil 2.2'de delik delmeden kaynaklanan kesme yönünde deforme olmuş tane sınırları ve beyaz bir tabakadan oluşan yüzey altı mikroyapısal hasar görüntüsü ile freze işlemi ardından oluşan mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.2. Inconel 718 yüzey altı mikroyapısı; a) delik delmeden kaynaklanan mikroyapı. b) freze ile delmeden kaynaklanan mikroyapı (Sharman ve ark., 2008)

Sonuç olarak, Inconel 718 alaşımının delinmesi işlemlerinde ticari olarak temin edilebilen matkaplar kullanıldığında ortaya çıkan delik kalitesinin, havacılık endüstrisinin gereksinimlerini karşılamak için yeterli olmadığı ve bu neden ikinci işlemler yapılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir. Inconel 718'i delerken düz veya içbükey kesici kenarlı ve keskin çevresi olan matkaplara kıyasla, kavisli bir kesme kenarı ve çevrede radius olan matkapların üstün performansa sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca ikinci işlem olarak raybalamaya yerine freze kullanılmasının, verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek için önemli bir potansiyele sahip olabileceği ifade edilmiştir.

Farid ve ark. (2009), Inconel 718 alaşımının delinmesinde farklı kesme parametrelerinin ve farklı kesme kenarı geometrilerinin yüzey bütünlüğüne etkisi araştırmışlardır. Deneyleri üç farklı kesme hızı (8, 13, 18 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0,05, 0,1, 0,12 mm/dev) ve üç farklı uç geometrisine (120°, 125°, 130°) sahip kaplamasız karbür matkaplarla (WC/Co) kuru kesme şartlarında yapmışlardır. Serbest yüzey aşınması $V_B = 0,25$ mm veya $V_{Bmax} = 0,5$ mm'ye ulaştığında delme denemeleri durdurulmuştur. İncelenen her koşulda yüzey pürüzlülük değerlerinin 0.6 ile 1.1 μm arasında olduğunu ve genel olarak yüzey kalitesinde en iyi sonucun 130° uç açılı takımla 18 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı ile elde edildiğini belirtmişlerdir. Üretilen son deliklere kıyasla her deneyin yeni takımlar kullanılarak açılan ilk deliğinde daha yüksek doğrulukta delikler elde edildiği görülmüştür. Son deliklerdeki çapak yüksekliklerinin, ilk kesim sırasında elde edilenlerden daha yüksek olduğu ve artan uç açısı ile çapak yüksekliğinin azaldığı anlaşılmıştır. Aşınmış aletler kullanılarak üretilen deliklerde, beyaz tabaka ve kesme yönünde deforme olmuş tane

sınırlarından oluşan yüzey altı mikroyapısal hasarın çok belirgin olduğu görülmüştür. Beyaz tabakanın, serbest yüzey aşınması ve kesme hızı ile giderek arttığı anlaşılmıştır.

Kıvak ve ark. (2010), Inconel 718 süperalaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin, talaş oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kaplamasız, TiN ve TiAlN kaplamalı karbür matkaplar ile kuru kesme şartlarında yapmış oldukları deneylerde, dört farklı kesme hızı (10, 12,5, 15, 17,5 m/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (0,05, 0,075, 0,1 mm/dev) kullanmışlardır. Deneyde 5 mm çapa sahip matkaplar ile 8 mm derinliğinde kör delikler delmişlerdir. Kullanılan tüm takımlarla elde edilen pürüzlülük değerlerinin, genel olarak ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak arttığını ve bunun beklenen bir durum olduğunu belirtmişlerdir. 0,1 mm/dev ve 0,05 mm/dev ilerleme hızlarında her üç takım da kesme hızındaki artışa bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, 15 m/dak kesme hızına kadar düştüğünü fakat 15 m/dak kesme hızından sonra bir miktar arttığını görmüşlerdir. 15 m/dak kesme hızından sonra yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu artışın kaldırılan talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılmasının zor olması, kesici takım üzerinde yüksek kesme hızlarında aşınmaların daha hızlı olması ve buna bağlı olarak sürtünmenin artması gibi nedenlerden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. En düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin 0,91 μm olduğunu ve bu değer kaplamasız matkapla 0,05 mm/dev ilerleme hızı ve 15 m/dak kesme hızında elde edildiğini belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğündeki değişimde, ilerleme hızının kesme hızına göre daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Olovsjö ve ark. (2010), dövülmüş alaşım 718'in tane boyutu ve sertliğinin, işleme sırasında sementit karbür takımların aşınması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan farklı tane boyutlarına sahip alaşımlar, orijinal ince taneli malzemelerin kontrollü bir şekilde aşırı ısıtılması sonucunda tane boyutunun artırılmasıyla elde edilmiştir. Deneylerde farklı tane büyüklüğüne ve sertliğe sahip 4 adet Inconel 718 alaşımına, 30 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/dev ilerleme hızı ile tornalama işlemleri yapılmıştır. Bu çalışmanın ana sonuçları aşağıda özetlendiği gibidir:

- Serbest yüzey aşınması sertlikle güçlü bir şekilde ilişkilidir.
- Tane boyutunun serbest yüzey aşınması üzerinde çok az bir etkisi vardır veya hiç etkisi yoktur.
- Çentik aşınması iri tanelerle güçlü bir şekilde bağlantılıdır.
- Büyük çapaklar sadece iri taneli malzemelerde üretilir.
- Çentik aşınması çapak oluşumu ile ilişkilidir.

- Deforme olan tabakanın derinliği ince taneli malzemeye kıyasla iri taneli malzemede daha fazladır
- Talaşların segmentasyonu (birim zamanda oluşan diş sayısı), kesme bölgesindeki büyük tanelerin anizotropik deformasyonundan kaynaklanmaktadır.

Rahim ve Sasahara (2011), Inconel 718'in delinmesi sırasında kullanılan palm yağı ve sentetik ester, yüzey bütünlüğü üzerindeki performansını karşılaştırmıştır. Deneyler, 3 farklı kesme hızı (30, 40 ve 50 m/dak) ve 2 farklı ilerleme (0,05 ve 0,1 mm/dev) ile yapılmıştır. Deney sonuçları palm yağının mikrosertlik, yüzey kusurları, yüzey altı deformasyonu ve yüzey pürüzlülüğü açısından tüm kesme ve ilerleme hızlarında sentetik esterden daha iyi performans verdiğini göstermiştir.

Benou ve Hulling (2012), Inconel 718 ve Ti6-4 alaşımlarının delinmesinde matkaplarda meydana gelen sıcaklığın ölçümü için bir metodoloji tanımlamışlardır. Sonuç olarak buldukları yöntemin, delme işlemleri sırasında matkabın kesici kenarında meydana gelen sıcaklıkları araştırmak için kullanılabilecek bir yöntem olduğunu ve güvenilir değerler elde etmek için önemli bir bilgisayar analizi ile birleştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Kıvak ve ark. (2012), Inconel 718'in delinmesinde kesme parametrelerinin delik kalitesi (dairesellik ve delik çapı) ve takım aşınması üzerindeki etkisini araştırılmışlardır. Kaplamasız, TiN ve TiAlN kaplamalı karbür matkaplar ile kuru kesme şartlarında yapmış oldukları deneylerde, dört farklı kesme hızı (10, 12,5, 15, 17,5 m/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (0,05, 0,075, 0,1 mm/dev) kullanmışlardır. Inconel 718'e 5 mm çapa, 135° uç açısına ve 35° helis açısına sahip matkaplar ile 8 mm derinliğinde kör delikler açılmıştır. Genel olarak her üç takım için de ilerleme hızı arttıkça delik çapları da artmıştır. Kesme hızının artmasıyla takım aşınmasında ciddi artışlar gözlemlenmiş ve en fazla aşınma türü serbest yüzey aşınması ve kesici uç aşınması şeklinde görülmüştür. Yüksek kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonlarının, aşınmanın dış köşeden keski kenarına yayılmasında etkili olduğu ifade edilmiştir. Kuru kesme şartlarında delik kalitesi açısından Inconel 718'in delinmesinde, kaplamasız sementit karbür takımların kullanılması tavsiye etmişlerdir. Ayrıca düşük ilerleme hızı kullanılarak delik kalitesinin artırılabilirdiğini belirtmişlerdir.

Çiçek ve ark. (2013), sertleştirilmiş ve kriyojenik işlem uygulanmış AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin seramik kesici takımlar ile işlenebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmalarında, geleneksel ısıtma işlemi (CHT), kriyojenik işlem (CT) ve kriyojenik işlem

ile temperleme (CTT) uygulanmış malzemelere, dört farklı kesme hızı (150, 200, 250 ve 300 m/dak), üç farklı ilerleme (0,08, 0,12 ve 0,16 mm/dev) ve 0,3 mm kesme derinliği ile tornalama işlemleri yapmışlardır. CHT, CT ve CTT numunelerinin sertlik değerleri sırasıyla 48,8 HRc, 50 HRc ve 49 HRc ölçülmüştür. Isıl işlemlerin kesme kuvveti (Fc) üzerindeki etkileri incelendiğinde, en yüksek Fc değerlerinin CT örneğinin tornalanmasında elde edildiği görülmüştür. Bu durum, CT örneğinin yüksek sertlik değerinin, artan akma dayanımı nedeniyle numunenin işlenebilirliğini zorlaştırdığını göstermiştir. CTT numunelerinin tornalanmasında ölçülen Fc'nin, CHT ve CT numunelerine göre daha düşük olduğu görülmüş ve bu durum, sertliğin azaltılmasına (1 HRc) ve temperlemeden (2 saat süreyle 565 °C) sonra CTT numunelerinin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının iyileştirilmesine atfedilmiştir. En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerini CTT örnekleri vermiş, ardından CT ve CHT örnekleri gelmiştir. Kriyojenik işlemde sonra tavlamanın homojen karbür dağılımı ve ince karbür oluşumu sağladığı ve bu nedenle Ra'nın iyileştirilmiş olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca tavlama işleminden sonra CTT numunelerinin sertliklerinin azalması ile işlenebilirliğin iyileştirildiği ve bu durum sonucunda Ra değerlerinde bir azalma meydana geldiği ifade edilmiştir. En az burun aşınması ve krater aşınması CTT numunelerinin tornalanmasında elde edilmiş ve bu durum, kriyojenik işlem ve temperlemeden sonra ince karbürlerin oluşmasına bağlanmıştır.

Beer ve ark. (2014), Inconel 718'i delirken abrazif aşınmaya karşı direnci artırmak ve termal yükleri azaltmak amacıyla kesici takım geometrisinin modifiye edilmesini araştırmışlardır. Yeni takım geometrisinin analizi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, standart bir matkabın aksine takım ömrünün modifiye edilmiş kesici takımlar ile %50'ye kadar artırılabilirliğini göstermiştir.

Demir ve Toktaş (2014), farklı bekletme sürelerinde AISI D2 çeliğine uygulanan derin kriyojenik işlemin, alaşımın yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneylerde 1 numuneye sadece klasik ısıtma işlemi (1030°C'de 30 dak sertleştirme ve 525 °C'de 2 saat temperleme) uygulanmış ve 4 numuneye ise klasik ısıtma işlemi ile farklı bekletme sürelerinde (30 dak, 4 saat, 16 saat ve 24 saat) -145°C'de kriyojenik işlem uygulanmıştır. Farklı bekletme sürelerinde uygulanan kriyojenik işlem numunelerin sertliğinde 30 dakikada %0,98, 4 saatte %1,2, 16 saatte %1,42 ve 24 saatte %0,83 azalma meydana getirmiştir. Klasik ısıtma işlem numunesine kıyasla yüzey pürüzlülüklerinin, 30 dakika kriyojenik işlemde %20, 4 saat kriyojenik işlemde %12 ve

24 saat kriyojenik işlemde %4,5 azaldığı görülmüştür. 16 saat bekletme süresinde uygulanan kriyojenik işlemin pürüzlülük üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlem ardından yapılan temperleme işleminin, malzeme sertliğini bir miktar düşürmesiyle beraber ikincil karbürlerin çökelimini arttırdığını ve sonuç olarak gerilmeleri azalttığını belirtmişlerdir. Malzemede sertliğin ve gerilmelerin azalmasının, yüzeyde çatlak oluşumu riskini ve kırılganlığı azalttığını ve bu sebeple malzemede yüzey pürüzlülüğü değerinin düştüğünü ifade etmişlerdir. Mikroyapıda en belirgin değişimin 24 saat bekletme süresinde meydana geldiği görülmüştür. Bu numunenin mikroyapısındaki karbürlerin daha küresel yapıda olduğu ve homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. Diğer bekletme sürelerinde kriyojenik işlem uygulanan numunelerin mikroyapılarında belirgin bir fark oluşmadığı görülmüştür.

Akıncıoğlu ve ark. (2015), kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımların performansı ile ilgili bir derleme çalışması hazırlamışlardır. Kriyojenik işlemin çeşitli kesici takımlara (tungsten karbür, HSS, PVD ve CVD kaplamalı karbür, vb.) yaygın olarak uygulanabilen etkili bir ısıtma işlem olduğunu ve bu yöntemin, kesici takım performansını artırarak üretim maliyetlerini düşürmeye yardımcı olabildiğini belirtmişlerdir.

Outeiro ve ark. (2015), Inconel 718 alaşımının delinmesi sırasında geleneksel metal işleme sıvıları ve kriyojenik soğutma koşullarının, takım performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, Inconel 718'in geleneksel metal işleme sıvıları için optimize edilmiş standart matkap kullanılarak kriyojenik soğutma koşullarında delinmesi sırasında oluşan takım aşınmasının, geleneksel metal işleme sıvıları kullanılarak delinmesi sırasında oluşan takım aşınmasından daha yüksek olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlar ile kriyojenik soğutma koşullarındaki matkap performansının, matkap geometrisinden büyük ölçüde etkilendiği anlaşılmıştır. Bu nedenle yazarlar, kriyojenik işlemeden yararlanmak için şu anda piyasada bulunmayan yeni bir matkap tasarımının gerekli olduğunu belirtilmiş ve bu yeni tasarımı geliştirmek için birtakım önerilerde bulunmuşlardır.

Vimalesh ve ark. (2015), Inconel 718 süper alaşımının 12 mm çapında tungsten karbür matkaplar ile delinmesinde farklı kesme hızlarının (19, 27, 43 ve 67 m/dak) ilerleme kuvveti, tork ve talaş mikroyapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde kesme hızı arttırıldıkça ilerleme kuvvetinin önce arttığını daha sonra azalmaya başladığını görmüşlerdir. Kesme hızının artmasıyla birlikte ilerleme kuvvetindeki bu artışın, Inconel 718'in yüksek iş sertleşmesi etkisinden ve yüksek

derecede sertleştirilmiş bir yüzey tabakası oluşturan düşük sıcaklıklarda süneklikten gevrekliğe geçiş yapma eğiliminden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Kesme hızı daha fazla arttırılınca ilerleme kuvvetinin azalmaya başlamasının ise, daha yüksek kesme hızlarında gevrekliğin üstesinden gelen ve gelişmiş işleme özelliklerine ve plastisiteye izin veren malzeme yumuşamasının neden olduğunu ifade etmişlerdir. Talaş morfolojilerini incelediklerinde, düşük kesme hızlarında testere dişli talaş oluştuğunu görmüşlerdir. Bu durumun, Inconel 718'in düşük kesme hızlarında iş sertleşmesi etkisinin daha yüksek olmasından ve bunun sonucunda kesme geriliminin de daha yüksek olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yüksek kesme hızlarında ise ısı yumuşama etkisinin, iş sertleşmesi etkisine hâkim olması sonucunda daha düşük kesme gerilmeleri oluştuğunu ve bu nedenle kesme hızının artmasıyla testere dişi oluşumunun azaldığını belirtmişlerdir.

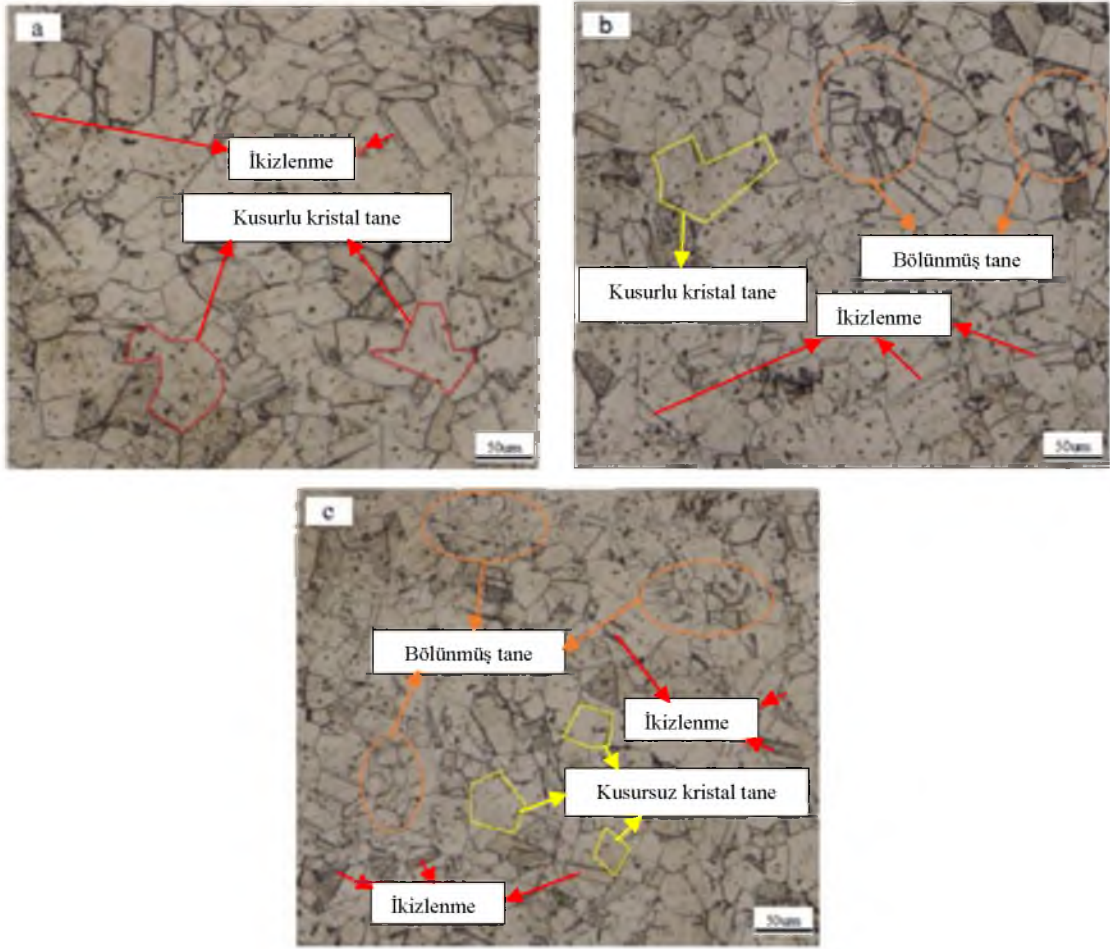
Bayraktar ve Demir (2017) farklı Inconel alaşımlarının işlenebilirliği ile ilgili literatürde yapılan çalışmaları araştırılarak, elde ettikleri sonuçları bir arada sunmuşlardır. Kesme hızının belirli bir limit değere kadar artması ile yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetinin azaldığını, fakat bu limit değerini üzerine çıktığında kesici takım aşınmasına bağlı olarak bu değerlerin artmaya başladığını belirtmişlerdir. Ayrıca ilerleme oranının artması ile yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetinin arttığı ifade etmişlerdir. Kesme bölgesinde meydana gelen ısının tahliye edilebilmesi için yüksek termal iletkenlik katsayısına sahip olan kesici takım kaplama yöntemlerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Sementit karbür kesici takımlar üzerinde plastik deformasyon, krater, yan yüzey aşınması ile birlikte BUE oluşumu gözlemlenirken, seramik kesici takımlarda ise çentik aşınmasının oluştuğunu açıklamışlardır.

Dumasia ve ark. (2017), kriyojenik işlemin metaller üzerindeki etkisi üzerine bir derleme çalışması hazırlamışlardır. Bu çalışmada, malzemelerin kriyojenik işlenmesinde yer alan işlem çeşitleri, bu işlemlerin uygulanan malzemenin özellikleri üzerindeki etkileri ve iyileştirilen özelliklerin arkasındaki nedenleri açıklamışlardır.

Li ve ark. (2017), kriyojenik işlemin Inconel 718 süper alaşımının mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde 3 adet Inconel 718 alaşımı kullanılmıştır. Numunelerden ilkinde hiçbir işlem yapılmamıştır. İkinci numuneye, CT-1 olarak adlandırılan sıvı nitrojen (-196 °C) içerisinde 2 saat bekletme ve ardından oda sıcaklığında bırakılma işlemi uygulanmıştır. Son numuneye ise CT-2 olarak adlandırılan iki defa CT-1 işlemi gerçekleştirilmiştir. CT-1 ve CT-2'ye

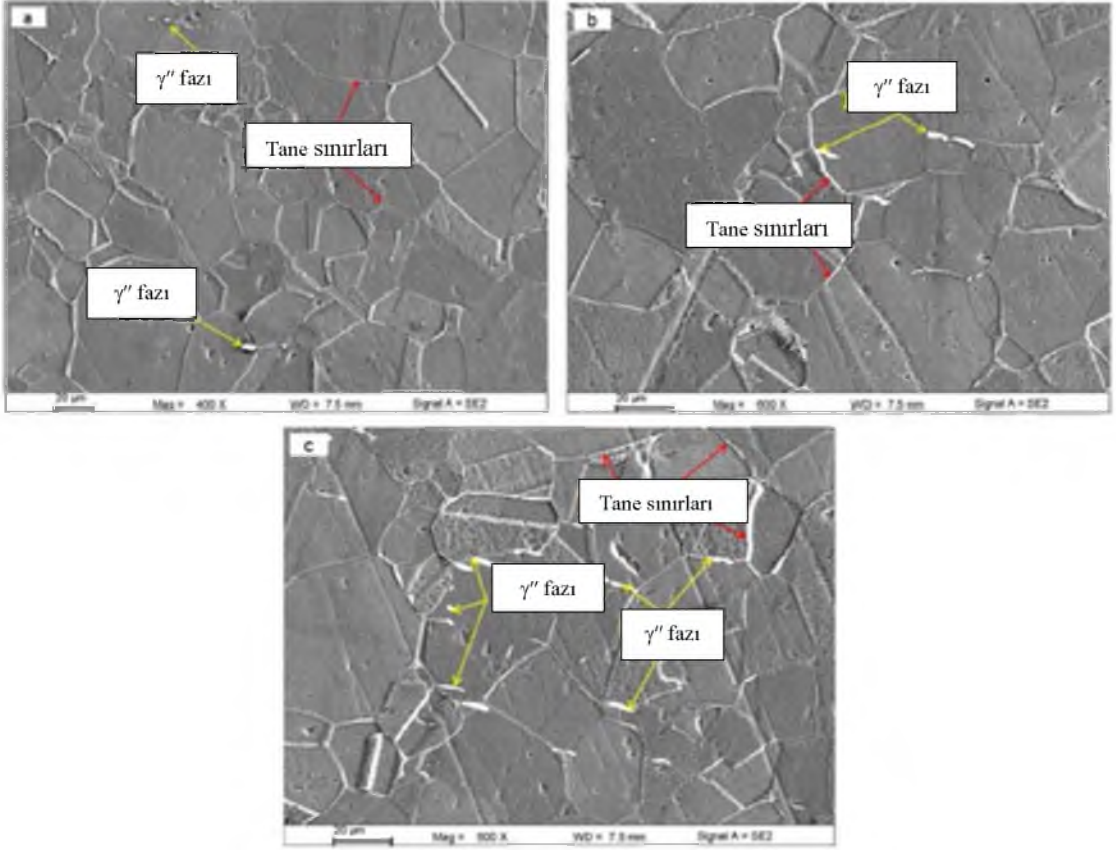
tâbi tutulan numunelerin ortalama akma dayanımı ve çekme dayanımı değerlerinin süneklik kaybı olmadan arttığı görülmüştür. Kriyojenik işlemten sonra numunelerin mukavemetinin ve sünekliğinin, işlem görmemiş numuneye kıyasla önemli ölçüde geliştirildiği ve CT-2'nin CT-1'e göre daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır

Nano-indentasyon testi sonucunda, CT-2'den sonra Inconel 718 süperalaşım numunesinin (13,23 GPa), işlenmemiş numuneye (9,12 GPa) ve CT-1 numunesine (12,78 GPa) göre daha yüksek bir nano sertliğe sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Kalıntı gerilmesi değerlendirmesi sonucunda işlem görmemiş numunenin ortalama kalıntı gerilmesi değerinin +53 MPa, CT-1 numunesinin -72 MPa ve CT-2 numunesinin -95 MPa olduğu görülmüştür. Bu değerlendirme ile kriyojenik işlemin Inconel 718 alaşımı yüzeyinde belirli bir miktarda basma kalıntı gerilmesi indükleyebileceği ve CT-2'nin neden olduğu basma kalıntı gerilmesi genliğinin daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Mikroskobik mukavemet artırıcı mekanizmalar, aşırı düşük sıcaklıkta kristallerin hacimsel küçülmesine atfedilmiştir. Şekil 2.3'te işlem görmemiş, CT-1 ve CT-2 numunelerinin yüzey mikroyapıları görünmektedir. Ortalama tane boyutunun işlem görmemiş numunede yaklaşık 55 μm , CT-1 numunesinde 48 μm ve CT-2 numunesinde ise 43 μm olduğu ASTM E112'ye göre belirlenmiştir. Şekil 2.3.c'de tanelerin daha ince hale geldiği ve tane boyutunun daha üniform olduğu görülebilmektedir. Ayrıca CT-2'den sonraki süreçte plastik deformasyonun ve iç gerilmenin sürekli artmasıyla, orijinal taneler birçok kristal taneye veya ikizlere bölünmüş ve tane sınırları genişlemiştir. CT-2'nin neden olduğu tane inceltilmesinden kaynaklanan tane sınırları miktarındaki artışın, Inconel 718'in mekanik özelliklerini eşzamanlı olarak iyileştirme kapasitesini de artırabilen dislokasyon hareket direncinin yükselmesine yol açtığı belirtilmiştir. Tane inceltmenin, süneklik kaybı olmadan aynı anda mukavemeti artıran etkili bir güçlendirme işlemi olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 2.3. Inconel 718 süper alaşımının mikroyapısı: a) işlenmemiş, b) CT-1 ve c) CT-2 (Li ve ark., 2017)

Şekil 2.4.c’teki CT-2 numunesi, Şekil 2.4.b’deki CT-1 ve Şekil 2.4.a’daki işlem görmemiş numune ile karşılaştırıldığında daha fazla sayıda uzun şerit çökeltisi sergilediği ve bunların çoğunun tane sınırı boyunca dağıldığı görülmektedir. EDS analizi sonucunda bu çökeltilerin γ'' (Ni_3Nb) fazı olduğu belirlenmiştir. Ana sertleştirici γ'' fazının, malzemenin mukavemetini, sünekliğini ve nano sertliğini geliştirmek için dislokasyon hareketini engelleyebileceği bilgisi verilmiştir. CT-2 işleminden sonra iç gerilmelerin tekrar artması nedeniyle bazı büyük ve sürekli çökelti, Şekil 2.4.c’de gösterildiği gibi ince boyutlarda yeni bir morfoloji ve tane sınırında üniform dağılım olacak şekilde çökelmiştir. Bu nedenle kriyojenik işlemin, numunelerin mikro yapıları üzerinde önemli etkileri olduğu ve CT-2’nin CT-1’e göre etkisinin daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.4. Inconel 718 süper alaşımı mikrografları: a) işlenmemiş, b) CT-1 ve c) CT-2 (Li ve ark., 2017)

Girion ve ark. (2018), Inconel 718 alaşımı, 316L östenitik paslanmaz çeliği ve 15-5PH martensitik paslanmaz çeliği malzemelerinin delinmesinde sıcaklık, ilerleme kuvveti ve torku gözlemleyerek artık gerilme oluşumunu incelemişlerdir. Delik delme işlemleri dâhilî yüksek basınçlı kesme sıvısı, harici düşük basınçlı kesme sıvısı ve kuru şartlar altında yapılmıştır. Inconel 718 alaşımına yapılan delik delme işlemlerinde 24 m/dak kesme hızı ve 10 mm/dev ilerleme değerleri kullanılmıştır. Deney sonuçlarında, ısıyı ve talaş boşaltma avantajını verimli bir şekilde birleştirerek en iyi yüzey bütünlüğünü elde etmek için dâhilî soğutma teknolojilerinin kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Palanisamy ve Senthil (2018), yaşlandırılmış ve kriyojenik işlem uygulanmış 15-5 PH paslanmaz çeliğin işlenebilirliği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde işlem uygulanmamış (AST), konvansiyonel ısıtma işlem uygulanmış (CHT) ve kriyojenik işlem uygulanmış (CT) numunelere, sabit kesme derinliği (0,5 mm), üç farklı kesme hızı (100, 150 ve 200 m/dak) ve üç farklı ilerleme değerleri (0,05 - 0,10 - 0,15 mm/dev) ile tornalama işlemleri yapılmıştır. CT numunesinin sertliğindeki artışın, CHT numunesine göre %4,19 ve AST numunesine göre ise %28,14 olduğu bulunmuştur. CT

örneğinde tane boyutunun AST ve CHT örneklerinden daha ince olduğu görülmüştür. CT numunesinin işlenmesi sırasında üretilen kesme kuvveti, CHT ve AST numunesine kıyasla geliştirilmiş mekanik özellikler ve mikroyapıda farklılıklar nedeniyle daha fazla çıkmıştır. İşlenmiş tüm numuneler için, kesme hızındaki artışla kesme kuvvetinin azaldığı ve ilerleme hızındaki artışla önemli ölçüde arttığı görülmüştür. CT numunelerinin işlenmiş yüzeyinde homojen karbür dağılımı ve daha ince karbür oluşumu sebebiyle daha düşük pürüzlülüğü elde edilmiştir.

Roy ve ark. (2018), Inconel 718 alaşımının işlenmesinde farklı işleme operasyonlarının (tornalama, frezeleme ve delme), çeşitli soğutma ortamlarının (kuru, MQL ve kriyojenik) ve soğutma sıvılarının kullanılmasını üzerine kısa bir derleme çalışması hazırlamışlardır. İnceleme sonuçlarında abrazif aşınmanın kesici takımının en önemli aşınma mekanizması olduğu görülmüş ve takım aşınmasının esas olarak işleme hızına ve ardından ilerleme ile kesme derinliğine bağlı olduğu bulunmuştur. Inconel 718'in işlenmesi sırasında kriyojenik soğutma kullanılmasının, diğer soğutma sistemlerine kıyasla daha iyi yüzey kalitesi ve daha uzun takım ömrü sağladığı anlaşılmıştır. Çeşitli işleme operasyonlarında ana tip takım arızalarının çentik aşınması, takım ucunda ufalanma, yan yüzey ve krater aşınması olduğu gözlemlenmiştir. Alaşımın işlenmesi sırasında işleme hızını artırıp, ilerleme hızını ve kesme derinliğini azaltarak gelişmiş yüzey kalitesi elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Uçak ve Çiçek (2018), Inconel 718'in delinmesinde, kriyojenik soğutmanın delme performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Delme deneylerini, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı sementit karbür matkaplar kullanarak sabit bir ilerleme (0,02 mm/dev) ve kesme hızı (10 m/dak) ile geleneksel kesme sıvısı, kriyojenik (LN₂) ve kuru şartlar altında gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde Inconel 718'e 5 mm çapa, 140° uç açısına ve 30° helis açısına sahip takımlar ile 15 mm derinlikte boydan boya delikler delinmişlerdir. Kaplama malzemesinin ve soğutma/yağlama şartlarının etkilerini, tork, aksenal kuvvet, maksimum sıcaklık, talaş oluşumu, çapak oluşumu, mikrosertlik değişimi, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yüzey altı deforme olmuş tabaka derinliği değerleri açısından incelenmişlerdir. Deney sonuçlarında, kriyojenik şartlar altında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesinin mümkün olduğunu fakat düşük sıcaklıkların işleme performansını olumsuz etkilediğini görmüşlerdir. Kaplama malzemesinin daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edilmesini sağladığını, ancak ortalama çapak yüksekliğinin artmasına ve tork ve aksenal kuvvet değerlerinin yükselmesine sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Uçak ve Çiçek (2018), soğutma/yağlama koşullarının ve kaplama malzemesinin Inconel 718'in delinebilirliği üzerindeki etkilerini, ilerleme kuvveti, tork, kesme sıcaklığı, delik kalitesi ve takım aşınması açısından değerlendirmiştir. TiAlN kaplı ve kaplanmamış karbür matkaplar ile yapılan delme testleri, 15 m/dak kesme ve 0,02 mm/dev ilerleme hızında ve kriyojenik, geleneksel kesme sıvısı ve kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Inconel 718'e uygulanan delme işleminin, alaşımın östenitik bir yapıya sahip olmasından dolayı işlenmiş yüzeyin altında deforme olmuş bölgede iş sertleşmesine neden olduğunu belirtilmiştir. Kriyojenik soğutmanın kesme sıcaklığında önemli bir azalma sağladığı ve delik kalitesini artırdığı anlaşılmıştır. Kuru koşullarda soğutma ve yağlamanın olmamasının kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklara, BUE'ye bağlı yüksek tork değerlerine, şiddetli alet aşınmasına, takım ömründe önemli bir azalmaya, aşırı çapak oluşumuna, boyut ve yuvarlaklık hatalarına, zayıf yüzey pürüzlülüğüne ve delik yüzeyinin altındaki plastik deformasyon bölgesinde ve mikro sertlik değerlerinde artışa neden olduğu görülmüştür. Kesme sıvısı koşullarında, daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri, daha düşük ilerleme kuvveti ve tork değerleri, daha iyi takım aşınması ile takım ömrü elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca TiAlN kaplama malzemesinin takım ömrünü önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir.

Kara ve ark. (2019) derin kriyojenik işlemin, AISI D2 çeliğinin işlenebilirliği, mikroyapısı ve sertliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde geleneksel ısıt işlem (CHT), derin kriyojenik işlem (DCT-36) ve tavlama ile derin kriyojenik işlem (DCTT-36) uygulanmış numunelere tornalama işlemleri yapılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde CHT numunesinin tek tip olmayan bir karbür dağılımı sergilediği, DCT-36 numunesinin tek tip birincil karbür ve neredeyse küresel ikincil karbür dağılımı sergilediği ve DCTT-36 numunesinde ise karbür boyutlarının azaldığı ve daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. Numune mikroyapıları birbirleri ile karşılaştırıldığında DCTT-36 numunesinin mikroyapısının daha ince ve daha homojen bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Mikrosertlik testleri sonucunda CHT numunesinin sertliği 618,46 HV, DCT-36 numunesinin 871,8 HV ve DCTT-36 numunesinin 748,46 HV çıkmıştır. Sertlikteki bu artışa, kriyojenik işlem ile mikroyapıda östenit-martensit dönüşümünün gerçekleşmesinin ve bunun sonucunda yapının daha kırılgan olmasının neden olduğu belirtilmiştir. DCT-36 ve DCTT-36 numuneleri, geleneksel olarak ısıt işlem görmüş CHT numunesine göre sırasıyla ortalama %7,56 ve %10 daha iyi yüzey pürüzlülüğü sağlamıştır. Takım aşınması incelemeleri sonucunda, DCT-36 ve DCTT-36 numunelerinde, CHT numunesine göre burun aşınmasında sırasıyla ortalama %5,90 ve

%21,79 oranında ve krater aşınmasında sırasıyla ortalama %121 ve %145 oranında iyileşme olduğu görülmüştür. Krater aşınmasında meydana gelen bu iyileşmenin, kriyojenik işlem ve ardından uygulanan temperleme işlemi ile sağlanan homojen mikroyapıdan kaynaklandığı belirtilmiştir.

Khanna ve ark. (2020), Inconel 718 süperalaşımının delinmesinde kriyojenik soğutmanın takım aşınması ve delik kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Deneyler, 19 m/dak kesme hızı ve 0,02 mm/dev ilerleme değerleri ile kuru ve kriyojenik soğutma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında kriyojenik soğutma ile Inconel 718'in delinmesinde takım ömrünün %87,5 artığı görülmüştür. Birincil aşınma mekanizmalarının parçacık kopması (chipping), difüzyon, BUE ve adhezyon olduğunu belirlenmiştir. Bu aşınma mekanizmalarının kriyojenik soğutma ortamına kıyasla kuru delme sırasında hızlandığı belirtilmiştir. Kriyojenik soğutma altında delik açmak için gereken torkun, kuru delme ile karşılaştırıldığında %30'a kadar azaldığı bulunmuştur. Ayrıca kriyojenik delme altında dairesellik sapmalarında %50-77, silindiriklik sapmalarında %13-51 ve yüzey pürüzlülüğünde %47'ye varan azalma görülmüştür. Kriyojenik delmenin bu daha iyi performansı, sıcaklığa bağlı takım aşınmasının daha az olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Oezkaya ve ark. (2019), Inconel 718'in delinmesinde kullanılan takımlar için daha uzun takım ömürleri sağlayan yeni bir yan yüzey tasarımı geliştirmişlerdir. Inconel 718'in delinmesinde ilerlemedeki artışın, tüm kesme kenarı boyunca önemli ölçüde daha yüksek kesme kuvvetine neden olduğu ifade edilmiştir. Yapılan testler sonucunda toplanan bulgular Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) simülasyonlarında yan yüzey modifikasyonu geliştirmek için kullanılmıştır. Daha sonra yeni tasarımın kesici takıma uygulanmasının ardından testler yapılmıştır. Sonuçlar, daha düşük takım aşınması ve dolayısıyla daha uzun bir takım ömrü elde edilebileceğini göstermiştir.

Naiju ve ark. (2019), kriyojenik işlemin doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) tekniğiyle üretilen Inconel 718 alaşımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada Inconel 718 alaşımı, -196 ° C'de üç farklı zaman aralığında kriyojenik işleme tabi tutulmuş ve alaşımın mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlemten sonra yeni alt tanelerin ve nano kristal tanelerin oluşumuna yol açan hacim küçülmesinin gerçekleştiği görülmüş ve bu etkiden dolayı malzemenin yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirtilmiştir. Ayrıca tane boyutunun inceltmesi ve faz dönüşümü nedeniyle sertliğin arttığı ifade edilmiştir. SEM analizi, kriyojenik işlem sırasında ciddi bir plastik deformasyonun gerçekleştiğini göstermiştir.

Bundan dolayı daha büyük taneler, mikro ve nano kristal taneler halinde rafine edilmiştir. Kriyojenik işlemin neden olduğu basma kalıntı gerilmesinin genliği, işlenmemiş durumdan daha yüksekti çıkmıştır.

Karabulut ve Kaynak (2020), seçici lazer ergitme (SLM) ile üretilen Inconel 718'de delme işlemini araştırmışlardır. 6,8 mm çapındaki tungsten karbür matkaplar ile 2 farklı kesme hızı (15 ve 30 m/dak) ve 3 farklı ilerleme (0,025 – 0,05 – 0,075 mm/dev) değerleriyle delme işlemleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar dövme Inconel 718'den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Her iki kesme hızı için de artan ilerleme hızıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünde önemli bir artış olduğu görülmüştür. Kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Kesme hızının artmasıyla takım-talaş temas uzunluğunun azaldığını ve bu nedenle kesme kuvvetlerinin de azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca artan kesme hızının, BUE oluşumunda bir azalmaya neden olduğu, takım ile şaftın titreşimini en aza indirdiği ve sonuç olarak delik yüzeyindeki düzensiz şekilleri azalttığı ifade edilmiştir. Artan ilerleme hızıyla birlikte talaş kaldırma oranı artarak, takım keskinliğinin azalmasına ve dolayısıyla yüksek kesme sıcaklıklarının oluşmasına neden olduğu belirtilmiştir. Delme işlemi sırasında malzeme yüksek deformasyona ve sıcaklığa maruz kalır. Bu nedenle tüm kesme koşullarında işlenen yüzeyin altında ince plastik deforme bir tabaka olduğu görülmüştür. İşlenmiş yüzeyin altındaki deforme olmuş katman kalınlığının kesme hızındaki artışla arttığı görülmüştür. Delme işleminde sıcaklık, artan kesme hızıyla artmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklık, iş parçası malzemesini yumuşatmaktadır ve dolayısıyla plastik deformasyon sırasında oluşan gerilmenin, malzemenin hacmi boyunca çok daha derinlere nüfuz etmesine neden olabilmektedir. Mikrosertlik ölçümleri sonucunda, delik delme işleminden sonra delik yüzeyinde mikro sertlikte önemli bir artış olduğu ve yüksek ilerleme hızlarında delik yüzeyinin mikrosertliğinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Kesme hızı yükseldiğinde ise mikrosertliğin nispeten yüksek çıktığı görülmüştür.

Pang ve Wang (2020), Inconel 718 süper alaşımının delinmesinde üç farklı mikro dokulu kesici takımın performansını incelemiştir. Deneyler iki farklı kesme hızı (15 ve 30 m/dak) ve iki farklı ilerleme (0,1 ve 0,2 mm/dev) değerleri ile yapılmış ve deney sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, mikro dokunun daha düşük ilerleme kuvveti, delme sıcaklığı ve takım aşınması sağladığını ve mikro doku teknolojisinin delme işlemini etkili bir şekilde iyileştirebileceğini göstermiştir.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Kriyojenik İşlem

Kriyojenik (Cryogenics) kelimesi, Yunanca soğuk anlamında olan “kryos” ve üretmek anlamına gelen “genic” kelimelerinden gelmektedir. Bu kelime ilk kez Heike Kamerlingh Onnes tarafından 1894 yılında yayımlanan “On the cryogenic laboratory at Leiden and on the production of very low temperatures” adlı makalede, çok düşük sıcaklıklar üretme sanatını ve bilimini tanımlamak için kullanılmıştır (Onnes, 1984; Patil ve Tated, 2012). Kriyojenik; basit bir ifadeyle malzeme özelliklerinin önemli ölçüde değiştiği çok düşük sıcaklıklarda, malzemelerin incelenmesi bilimidir (Kalia, 2010).

Kriyojenik işlem, malzemelerin sıfırın altındaki sıcaklıklara belirli hızlarda kademeli olarak soğutulması, bu sıfır altı sıcaklıkta bir süre bekletilmesi ve belirli hızlarda oda sıcaklığına çıkarılması işlemine denir. Kriyojenik işlemin amacı, minimum veya önemsiz yan etkilerle malzemede istenilen mekanik özelliklerin kazandırılması için mikroyapısında kalıcı değişikliklere sebep olmaktır (Thornton ve ark., 2011). Soğutma işleminin yapıldığı sıcaklığa göre sıfır altı işlemler, -80°C ile -140°C arası sığ kriyojenik işlem, -140°C ile -196°C arası derin kriyojenik işlem olarak adlandırılır (Akıncıoğlu ve ark., 2015). Düşük sıcaklıkların malzemeler üzerindeki etkileri ilk kez NASA mühendisleri tarafından, soğuk uzay boşluğundan dönen araçtaki metal parçaların çoğunun uçuş öncesine göre daha güçlü olarak geri gelmesiyle fark edilmiştir (Patil ve Tated, 2012).

Alaşımaların ve metallerin kriyojenik işlenmesi, derin bir gerilim giderme teknolojisidir. Malzeme herhangi bir üretim işlemine tabi tutulduğunda gerilime maruz kalır. Gerilim, malzemelerin kristal yapısındaki kusurların doğasında kendini gösterir. En sık gözlenen kusurlar, boşluklar, dislokasyonlar, dizilim hataları vb. şeklindedir. Gerilim seviyesi arttıkça, bu kusurların yoğunluğu artar ve bu da atomlar arası boşlukta bir artışa yol açar. Atomlar arasındaki mesafe belli bir kritik mesafeyi aştığında çatlaklar oluşur ve arıza meydana gelir (Patil ve Tated, 2012).

Termodinamiğin üçüncü yasası, mutlak sıfır sıcaklıkta entropinin sıfır olduğunu belirtir. Kriyojenik işlem, malzemedeki gerilimi azaltmak için bu prensibi kullanır. Malzemeler, denge koşullarının gelişmesine yol açan uzun bir süre boyunca son derece

düşük sıcaklıklara maruz bırakılır. Bu, malzemedeki kusurların giderilmesine ve ayrıca minimum entropi durumuna ulaşılmasına yol açar (Patil ve Tated, 2012).

3.1.1. Kriyojenik işlemin gelişimi

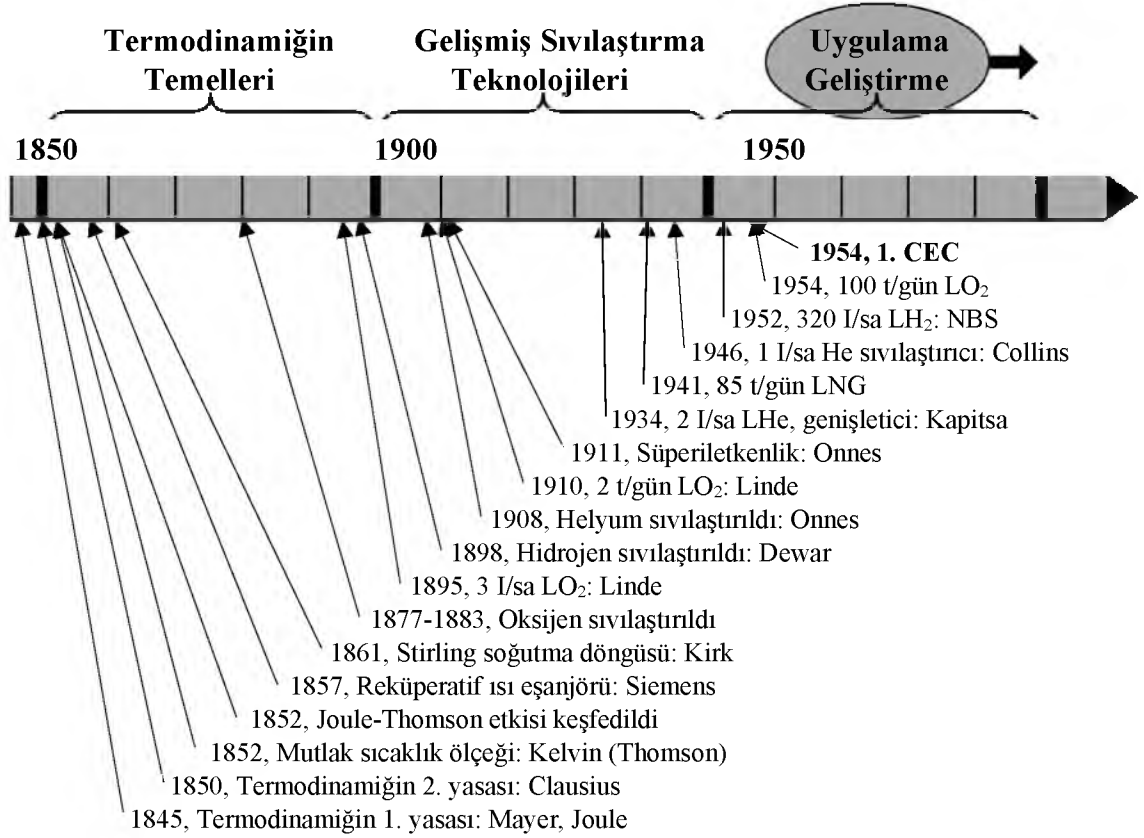
Sıcaklık, proses ve malzeme özelliklerini basınç, manyetik alan ve elektriksel alan gibi değişkenlerden daha fazla etkilemektedir. Bu sıcaklık etkilerinden yararlanma ve uygulama yeteneği, insanlığın benzersiz bir özelliğidir ve uygarlığımızdaki büyük ilerlemelere katkıda bulunmuştur. İnsanoğlu tarih öncesi zamanlardan itibaren yüksek sıcaklıkları yemek pişirme, aydınlanma ve ısınma için kullanmıştır. 20 yüzyıldan daha uzun bir süre önce ise insanlık ateşi kullanarak dövme yoluyla alet üretmeyi ve çanak çömlek yapmayı öğrenmiştir. Uygarlığın ilerlemesiyle daha yüksek sıcaklıklar elde edilebildiğinden, demir gibi daha güçlü metallere aletler üretilebilmiş ve kilin daha yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile daha güçlü çanak çömlek ve çini yapılabilmiştir. Sanayi devriminde buhar makinelerinin yapılmasıyla verimli üretim ve taşıma için yüksek düzeyde enerji üretimi mümkün olmuştur. Son yüzyılda kimyasal tepkimelerin daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesiyle çok sayıda yeni ve geliştirilmiş malzemeler üretilmiştir (Radebaugh, 2007).

Yüksek sıcaklık uygulamaları, yüksek sıcaklıkları elde edebilme kolaylığı sebebiyle uygarlığın başlangıcından beri geliştirilmektedir. Buna karşılık düşük sıcaklık üretimin zorluğu, insanoğlunun düşük sıcaklık uygulamalarındaki gelişiminin çok fazla gecikmesine neden olmuştur. Düşük sıcaklığın kullanıldığı uygulamalar, yüzyıllarca doğal olarak oluşan buzların kullanımıyla sınırlı kalmıştır. Doğal buz, MÖ 2500 gibi erken bir tarihte Mısırlılar tarafından yaralanmaları ve iltihaplanmaları tedavi etmek için ve MÖ 2000 civarında Çinliler tarafından yiyeceklere katılmak için kullanılmıştır. Buz ilk kez yapay olarak laboratuvar koşullarında 1755 yılında üretilmiştir. Yapay buzun göllerden kesilip kullanılan doğal buzun yerini alabilecek miktarlarda üretilebilmesi, 1800'lerin ortalarında sanayi devrimi ile buhar makineleri ve kompresörlerin kullanılmaya başlamasına kadar mümkün olmamıştır. O zamana kadar doğal buzla elde edilen düşük sıcaklıkların kullanımı, gıdaların korunması ve birkaç tıbbi işlemle sınırlı kalmıştır (Radebaugh, 2007).

Termodinamik bilimi 19. yy ortalarında gelişmeye başlamıştır. Mutlak sıfır kavramı 18. yy ortalarında ortaya konmasına rağmen 0 °C altındaki sıcaklıklara ulaşma yolları, termodinamik ve yüksek basınçlı pistonlu kompresörlerin gelişmesine kadar

mümkün değildi ve bilinmiyordu. Bu nedenle düşük sıcaklığa dair neredeyse tüm bilgi ve kullanımlar, 19. yy ortalarından günümüze kadar ortalama 150 yıl kadar sürede meydana gelmiştir (Radebaugh, 2007).

Şekil 3.1’de özetlenerek gösterilen 150 yıllık düşük sıcaklıktaki gelişmeler 3 ayrı zaman dilimine ayrılmaktadır. Her biri kendine özgü özelliklere sahip bu zaman dilimleri bize gelecekteki gelişmelerin ne denli hızlı olabileceği hakkında fikir verebilmektedir. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere ilk yarım yüzyılda termodinamik temellerinin geliştirilmesi kriyojenikteki ilerlemelere ilk katkıyı sağlamıştır. Bu yarım yüzyıldaki ilerlemeler sadece bilim insanlarının ilgisini çekmekteydi ve suyun donma noktasının altındaki sıcaklıklara inen neredeyse hiçbir uygulama bulunmamaktaydı (Radebaugh, 2007).



Şekil 3.1. Kriyojenik gelişmeler (Radebaugh, 2007)

Reküperatif karşıt akışlı ısı eşanjörü kavramı Gorrie tarafından 1851 yılında geliştirildi ve 1857 yılında Siemens tarafından iyileştirildi. 1852 yılında Joule-Thomson etkisi keşfedildi. Rejeneratif ısı eşanjörü (rejeneratör), salınımlı akışlı bir motorda kullanılmak üzere 1816 yılında Robert Stirling tarafından icat edildi. Dönemin buhar makinelerinden çok daha güvenli olma avantajına sahip olan Stirling motoru, ilk olarak

su pompalamak için bir taş ocağında kullanıldı. John Herschel 1834 yılında döngüyü tersine çevirmeyi ve buz üretmek için bir buzdolabı olarak kullanmayı önerdi ve Alexander Kirk 1861'de bu kavramı uygulamaya geçirdi. Kirk, Stirling soğutucusunun yüksek verimliliğine rağmen hiçbir zaman yaklaşık $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklara ulaşmak için herhangi bir girişimde bulunmadı ve yaklaşık 80 yıl boyunca Stirling soğutucusunda başka bir çalışma yapılmadı (Radebaugh, 2007).

Oksijen ilk olarak 1877 yılında Faraday ve Perkins'in eski teknikleri bir dizi ön soğutma banyoları ile beraber kullanılarak, birbirlerinden bağımsız olan Louis Paul Cailletet ve Raoul Pictet tarafından farklı metodlarla sıvı formunda sıvılaştırıldı. Özelliklerini incelemeye yetecek kadar sıvı azot ve sıvı oksijen ilk kez Zygmunt Wróblewski ve Karol Olszewski tarafından 1883 yılında üretildi. James Dewar 1898 yılında hidrojeni sıvılaştırdı ve saklanması için kendi icadı olan vakum şişesini kullandı (Radebaugh, 2007).

Hidrojen sıvılaştırıldıktan sonra kriyojenik bilim topluluğunun dikkati sıvılaştırılamamış tek kalıcı gaz olan helyuma dönmüştü. 10 Temmuz 1908 tarihinde Heike Kamerlingh Onnes $4,2\text{ K}$ sıcaklıkta yaklaşık 100 ml sıvı helyum üretmeyi başardı. Toronto Üniversitesi'nden John Cunningham McLennan, 1923 yılında Onnes'in helyum sıvılaştırma sistemine benzer bir sistem oluşturana kadar hiçbir laboratuvar sıvı helyum üretmeyi başaramadı. Ayrıca 2 K sıcaklığa ulaşabilme kabiliyeti sayesinde Onnes, 1911 yılında $4,2\text{ K}$ sıcaklıkta yüksek saflığa sahip cıvada süperiletkenliği keşfetti (Radebaugh, 2007).

1900 ve 1950 yılları arasında sıvılaştırma teknolojisinde, verimlilik ve güvenilirlik üzerine önemli ilerlemeler elde edilmiştir ve sıvılaştırma oranlarında büyük ölçüde artış sağlanmıştır. Sıvı oksijen incelendiğinde, sıvılaştırma oranının 1895 yılında 3 l/sa, 1910 yılında 2 t/gün ve 1954 yılında ise 100 t/gün olduğu görülmektedir. Oksijen sıvılaştırma miktarındaki bu hızlı büyüme, ilk ticari kriyojenik kullanımı olan, oksijen-asetilen kaynağı için oksijenin kullanılması sayesinde sağlanmıştır (Radebaugh, 2007).

1934 yılında Cambridge'de çalışan Pyotr Kapitsa, Claude çevrimine dayanan bir helyum sıvılaştırıcı tasarladı. Kapitsa'nın bu tasarımı yaklaşık 1.7 l/sa sıvı helyum üretebilme kapasitesine sahipti. 1941'de Cleveland şehrinde 75 t/gün kapasiteli büyük bir doğal gaz sıvılaştırma tesisi kuruldu. 1935 yılında Samuel Cornette Collins, Claude çevrimi ve pistonlu genleşme motorlarını kullanarak bir helyum sıvılaştırıcısı üzerinde çalışmaya başladı. 2. Dünya Savaşı sebebiyle çalışması yarıda kalan Collins, 1946 yılında helyum sıvılaştırıcısını tamamladı. Ticari bir kompresörle çalışan sıvılaştırıcı

yaklaşık 1 l/sa sıvılaştırma oranına sahipti. Bu verimli helyum sıvılaştırıcısı daha sonra Collins Helyum Kriyostatı olarak anılmaya başlandı. Daha sonra bu sıvılaştırma sisteminin ticarileştirilmesiyle, dünyanın her yerindeki laboratuvarlara düşük sıcaklıklar konusunda çalışmaları için sıvı helyum üretme imkânı sağlanmış oldu. Şekil 3.2’de gösterilen 1950 yılında üretilmiş ilk ticari sıvı nitrojen ön soğutmalı helyum sıvılaştırıcısı, yaklaşık 4 l/sa üretim kapasitesine sahipti ve 1947 ile 1970 arasında 365 adet satılmıştır (Radebaugh, 2007).



Şekil 3.2. Collins helyum sıvılaştırıcısı (Radebaugh, 2007)

1950’li yıllarda kriyogeni üzerine yapılan önemli araştırmalar kriyojenik sıvıların kullanımı üzerineydi. Bu kriyojenleri elde etmek için tasarlanan sıvılaştırma teknolojileri ise 1850 ve 1900 yılları arasında geliştirilmiştir. Sıvılaştırma teknolojisinin endüstride yer edinmesi ve sıvılaşma oranlarının hızlı bir şekilde artışı da 1900 ve 1950 yılları arasında meydana gelmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, kriyojeninin ilk kullanımı kaynak endüstrisinin ihtiyaçlarını karşılamak için oksijen üretimi ile başlamıştır. Bu uygulama günümüzde de devam etmektedir. 1950’li yıllarda geliştirilmiş sıvılaştırma sistemleri 50 yıl öncesine göre çok daha güvenilir olsalar da günümüz ile kıyaslandığında çok geride kalmaktadır (Radebaugh, 2007).

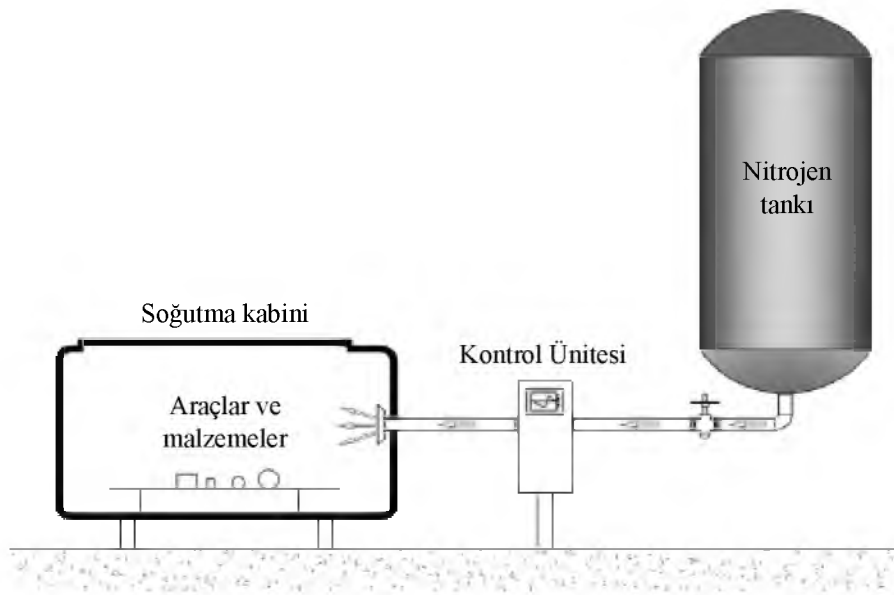
1950 yılında dönemin ABD Başkanı Harry S. Truman, termonükleer (hidrojen) bomba üretilmesi ve bazı kritik testlerin yapılması için talimat verdi. Yapılan termonükleer füzyon çalışmaları sonucunda sıvı döteryuma ihtiyaç duyulduğu belirtildi ve hidrojen sıvılaştırıcıları bu gelişme için kritik bir öneme sahipti. Atomik Enerji Komisyonu, 1904 yılında Dewar'ın hidrojen sıvılaştırma sistemini satın alması sonucu kriyojenik ile ilgili kapsamlı deneyimi olan Ulusal Standartlar Bürosu'nu (NBS), kriyojenik mühendisliği çalışmaları yapılacak bir laboratuvar kurması için yetkilendirdi. Colorado eyaletinde 1951 Mayıs ayında başlanan tesisin yapımı, araştırma binasının yapılması ve hidrojen, helyum ve azot sıvılaştırma sistemlerinin kurulmasıyla 1952 Mart ayında bitti. Tamamlanan tesiste bulunan hidrojen sıvılaştırma sistemi 320 l/sa sıvı hidrojen ve 240 l/sa sıvı parahidrojen üretebiliyordu. Bu girişim, 1954 yılında Colorado'daki Ulusal Standartlar Bürosu'nda yapılan ilk Kriyojenik Mühendisliği Konferansı'nda (CEC) tanıtıldı (Radebaugh, 2007).

İlk kriyojenik işleme 1953 yılında soğutucu olarak sıvı karbondioksit kullanan Bartle tarafından yapıldı (Yap ve ark., 2015; Bartle, 1953). Kriyojenik işlem sistemi Ed Busch tarafından 1960'ların sonlarında geliştirildi ve Peter Paulin tarafından çok düşük sıcaklıklara kadar etkili ve çatlaksız kriyojenik işlem yapılabilecek şekilde iyileştirildi (Baldissera ve Delprete, 2009). İşlemede soğutucu olarak sıvı azot kullanımı ise ilk kez 1960'ların ortalarında belgelendi. Grumman Aircraft Manufacturing'deki araştırmacılar 1965 yılında, titanyumun işlenmesinde soğutma sıvısı olarak sıvı azot ve karbondioksit kullanılmasının talaş kaldırma oranını arttırdığını bildirdi (Ghosh, 2006). Daha sonra kriyojenik işlemle ilgili araştırmalar, sertlik ve dayanıklılıkta kayda değer artış gösteren makine aletleri üzerindeki ilk sonuçlar ile 1980'lerde doğrulanmıştır (Barron, 1982; Baldissera ve Delprete, 2009).

1990'lı yıllardan günümüze kadar kriyojenik işlem birçok farklı bileşene uygulanmıştır. Günümüzde pek çok şirket, özellikle ABD ve Kanada'da kriyojenik işlem hizmetleri sunmaktadır ve bazı durumlarda, bileşen ömründe herhangi bir iyileşme elde edilmemişse geri ödeme sözü vermektedir. İyileştirmenin arkasındaki mekanizma tam olarak açıklığa kavuşturulmamış olsada, literatürde mikroyapısal gözlemlerle uyumlu farklı hipotezler öne sürülmüştür (Baldissera ve Delprete, 2008).

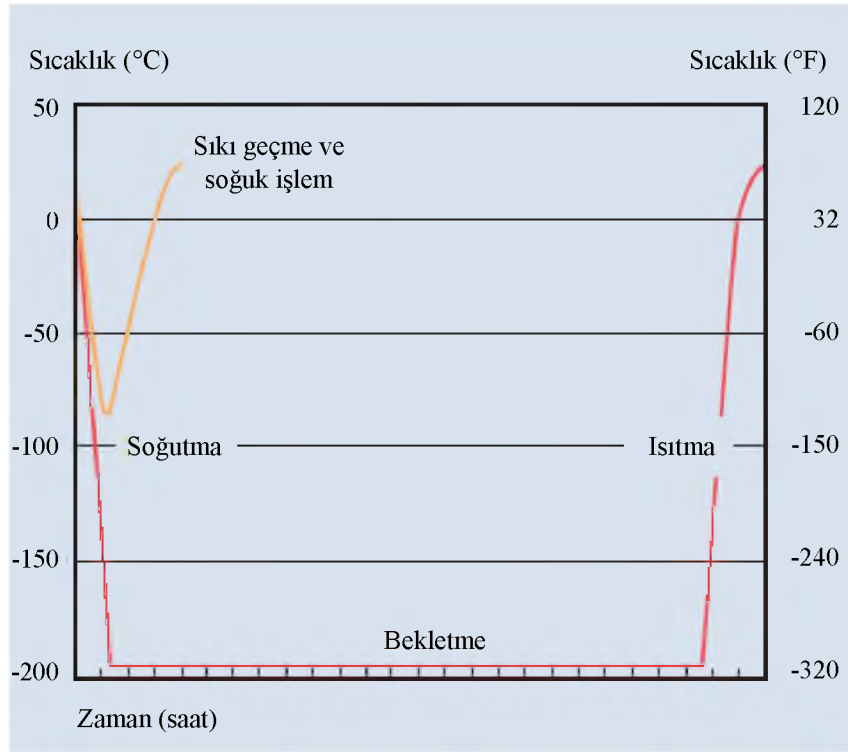
3.1.2. Kriyojenik İşlemin Uygulanması

Kriyojenik işlemin uygulanan malzemenin fiziksel, mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi, malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve kriyojenik işlem parametrelerine bağlıdır (Nalbant, 2018; Das, 2011). 1960'lı yılların sonuna kadar kriyojenik işlem, malzemelerin doğrudan sıvı azotun içerisine daldırılması ile gerçekleştirilmekteydi ve ani ısı değişimi etkisiyle termal şoklara maruz kalan malzeme üzerinde çatlaklar meydana gelmekteydi (Baldissera ve Delprete, 2008). Teknolojinin ilerlemesiyle sıcaklığın kademeli olarak düşürülmesini sağlayan bilgisayar kontrollü sistemler geliştirilmiş ve bu sayede kriyojenik işlemin uygulanması daha sorunsuz hale gelmiştir (Nalbant, 2008). Kontrollü bir şekilde kriyojenik işlem sağlayan bir sistemin şeması Şekil 3.3'de verilmiştir (Akıncıoğlu ve ark., 2015).



Şekil 3.3. Kontrollü bir şekilde uygulanan kriyojenik işlem şeması (Akıncıoğlu ve ark., 2015)

Kriyojenik sıvı, fırın içerisine gaz fazında aktarılır ve işlem uygulanan malzemeye direk olarak teması engellenir. Böylece termal şok etkisi ortadan kaldırılarak malzeme üzerinde oluşabilecek çatlakların önüne geçilir. Sistemde bulunan kontrol paneli sayesinde, işlem uygulanan malzemenin cinsine ve yapılmak istenen soğutma işlemine göre sıcaklık değerlerinin kademeli olarak değiştirilmesi ve bekletme sürelerinin ayarlanması sağlanır (Kalia, 2010). Kriyojenik işlem soğutma, bekletme ve ısıtma olmak üzere toplam üç aşamada gerçekleştirilir. Şekil 3.4'te kriyojenik işlem aşamaları görülmektedir (Linde Gas, 2010).

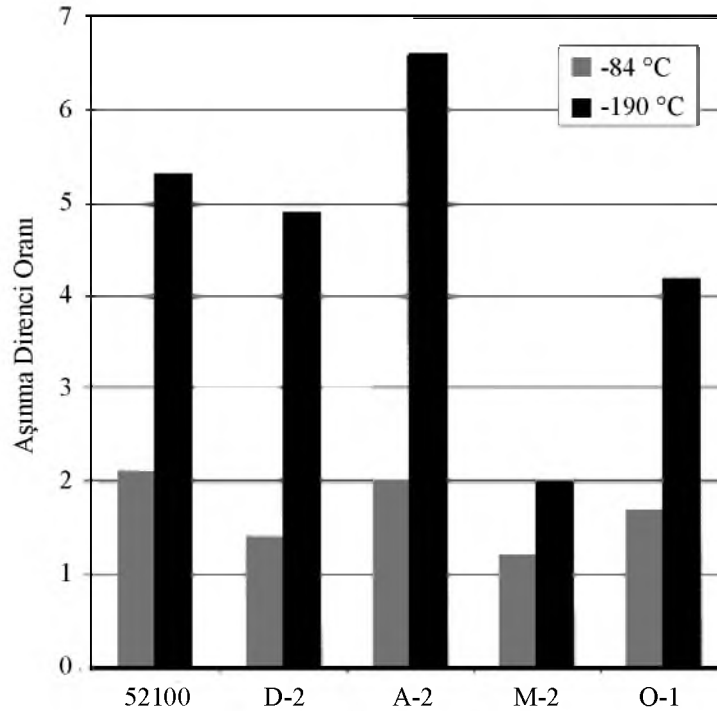


Şekil 3.4. Kriyojenik işlem aşamaları (Linde Gas, 2010)

Kriyojenik işlem sistemleri, malzemelerin sıcaklığını istenilen düşük sıcaklığa belirli hızlarla düşürebildiği gibi tekrar oda sıcaklığına yükseltebilmektedir. Kriyojenik işlemin başarıyla sonuçlanabilmesi için soğutma ve ısıtma hızlarının kontrolü çok kritik bir konudur (Demir ve Uygur, 2017). Kriyojenik işlemdeki tipik süreç parametreleri; soğutma hızı, minimum sıcaklık, bekletme süresi ve ısıtma hızıdır. En uygun parametre değerlerinin seçimi, her malzeme için özel araştırmalar gerektirir (Baldissera ve Delprete, 2008). Kriyojenik işlem ile çeliklerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde en önemli parametrelerin sırasıyla; bekletme sıcaklığı, bekletme süresi, soğutma hızı ve temperleme sıcaklığı olduğu ortaya çıkmıştır (Darwin ve ark., 2007; Darwin ve ark., 2008; Gill ve ark., 2010).

Kriyonik işlem uygulanan malzemeler, soğutma aşamasında ortam sıcaklığından istenilen kriyojenik sıcaklıklara belirli bir zaman aralığında soğutulmaktadır. Yapılan bazı araştırmalarda soğutma hızının işlem uygulanan malzemenin özelliklerini etkilediği anlaşılmıştır (Dobbins, 1995; Gill ve ark., 2009). Ayrıca işlem süresiyle beraber maliyeti de düşürmek için, malzemelerin termal şoklara neden olmadan işlem sıcaklığına mümkün olduğunca hızlı bir şekilde soğutulması tavsiye edilmektedir (Yıldız ve ark., 2011).

Kriyojenik işlemde minimum sıcaklık için önerilen en düşük değer, atmosfer basıncında sıvı nitrojenin kaynama sıcaklığı olan $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Şekil 3.5'te -84 ve $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ de bekletilmiş farklı takım çelikleri örneklerinin aşınma direnci oranları görülmektedir. Bu grafik incelendiğinde, daha düşük minimum sıcaklık değerinde uygulanan kriyojenik işlem ile aşınma direnci üzerinde daha fazla iyileşme sağlanabildiği görülmektedir (Barron, 1974; Reitz ve Pendray, 2001; Gill ve ark., 2010).



Şekil 3.5. Farklı sıcaklıklarda kriyojenik işlem uygulanmış takım çeliklerinin aşınma direnci oranları (Barron, 1974; Reitz ve Pendray, 2001; Gill ve ark., 2010)

Bekletme aşamasında malzeme, içinde bulunan atomların yeni konumlarına yayılımı için belirlenen sürelerde kriyojenik sıcaklıklarda bekletilmektedir. Kriyojenik sıcaklıklarda bekletme süresinin, malzemenin nihai özellikleri açısından önemli olduğu belirtilmiştir. Difüzyon, kriyojenik sıcaklıklarda çok yavaş gerçekleştiği için bekletme aşamasına genellikle uzun bir süre ayrılması önerilmektedir. (Reitz ve Pendray, 2001). 36 saatin üzerindeki bekletme süreleri önemli gelişmeler sağlamamakta ve çoğu durumda sonuç almak için 24 saat yeterli gelmektedir (Baldissera ve Delprete, 2008)

Birçok kriyojenik sistemde ısınma hızı yakından kontrol edilememektedir ve ısınma aşamasında karbür çökmesi ile ilgili önerilen bazı hipotezlere rağmen literatürde bu parametreye çok az önem verilmektedir (Baldissera ve Delprete, 2008). Uygun bir soğutma hızıyla başlayıp, kriyojenik sıcaklıklarda yeterli bir süre bekletilip

ve yine uygun bir ısıtma hızı ile tamamlanan kriyojenik işlem, ardından uygulanan temperleme işlemi ile beraber birçok malzeme özelliğinde iyileşmeler sağlamaktadır (Collins ve Dormer, 1997; Nalbant, 2008). Kriyojenik işlemden sonra uygulanan temperleme işleminin, aşırı soğutma nedeniyle malzemede meydana gelen iç gerilmeleri azaltma, yüzey çatlaklarını giderme, sünekliği artırma, tokluğu artırma, boyutsal stabilite sağlama, ince karbür dağılımı elde etme gibi etkileri bulunmaktadır (Gill ve ark., 2010; Patil ve Tated, 2012; Akıncıoğlu ve ark., 2014). Temperleme işlemi tek, çift veya üçlü döngüler halinde, malzeme karakteristiğine ve istenilen özelliklere bağlı olarak yapılabilir. Herhangi bir temperleme işleminin, nihai etki için kriyojenik işlemden önce yapılması tavsiye edilmemektedir. En iyi faydanın sağlanabilmesi için kriyojenik işlemin, su verme (sertleştirme) ve temperleme işlemleri arasında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. (Carlson, 1991; Collins, 1998; Nalbant, 2008). Fakat tavlama işleminin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu işlem, özellikle uzun süreler uygulandığında malzeme yumuşamasına, tane yapısının kabalaşmasına ve başka istenmeyen etkilere neden olabilmektedir (Çakır ve Çelik, 2017).

Kriyojenik işlemde kullanılan sıvılaştırılmış gazlar, kriyojenik sıvılar veya kriyojenler olarak bilinmektedir (Patil ve Tated, 2012). Kriyojenik işlem için nitrojen, oksijen, helyum ve neon gibi gazlar kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan kriyojenik soğutucu, sıvı nitrojendir (LN_2). Nitrojen atmosferin önemli bir bölümünü (% 78.03) oluşturmaktadır. Kriyojenik işlemin imalat, havacılık, elektronik, otomotiv, sağlık ve gıda işleme gibi sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahip olması, bu işlemde yaygın olarak bulunan bir elementin kullanılmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Erime noktası $-210,01\text{ }^\circ\text{C}$ ve kaynama noktası $-195,8\text{ }^\circ\text{C}$ olan nitrojen gazı renksiz, kokusuz ve tatsızdır (Akıncıoğlu ve ark., 2014).

3.1.3. Kriyojenik İşlemin Etkileri

Kriyojenik işlem metaller, alaşımlar, plastikler ve kompozitler gibi malzemelerin, fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde etkilidir (Kalia, 2010). Bu işlem üzerine yapılan çalışmalarda, kriyojenik işlemin farklı malzemelerin mikroyapılarında genellikle aşağıdaki değişiklikleri meydana getirdiği gözlemlenmiştir:

- Kalıntı östenit fazı oranında düşme ve martenzit fazı oranında yükselme (Paulin, 1993; Baldissera ve Delprete, 2008)
- İnce dağılmış karbür çökeltisi (Baldissera ve Delprete, 2008),

- Homojen karbür dağılımı (Huang ve ark., 2003)
- Kalıntı gerilmelerin giderilmesi (Baldissera ve Delprete, 2008)
- Kristal kafes yapısında incelme (Kalia, 2010)

Kriyojenik işlemle, bir alaşımı oluşturan tüm bileşenler en kararlı durumlarına yerleştirilir ve bu bileşenler daha sonra çevreleriyle en uygun şekilde hizalanır. Ayrıca moleküler bağlar kriyojenik işlemle güçlendirilir. Parçacık hizalanması ve tane incelmesi sayesinde parça arızasına katkıda bulunabilecek iç gerilmelerde azalma meydana gelir. İşlem sırasında aşırı derecede düşük sıcaklık atomik seviyelerde hareketi yavaşlatır, moleküler bağlanma enerjisini artırır ve dolayısıyla malzeme boyunca saf bir yapısal denge sağlar (Şekil 3.6). Sonuç olarak, son derece homojen, rafine edilmiş ve yoğun bir mikroyapı elde edilmesi ile fiziksel ve mekanik özelliklerde iyileşme sağlanmış bir malzeme elde edilir (Kalia, 2010).



Şekil 3.6. Sıcaklıkta azalma ile atomik seviyelerde bağlanma enerjisinde artış (Kalia, 2010)

Avantajlarıyla beraber kriyojenik işlemin kendine özgü problemleri de bulunmaktadır. Kriyojenik işlem sonucu oluşan martenzit, düşük sıcaklıklarda malzeme yapısında genişlemesini kolayca konumlandıramayıp, yüksek iç gerilmeler yaratabilmektedir. Oluşum sünek-gevrek geçiş sıcaklığı civarında veya altında gerçekleştiğinden dolayı çatlama olasılığı da bulunmaktadır. Zaten su verilmiş yapının kendisinde bulunan iç gerilmeler, kriyojenik işlemin uygulanmasıyla iyice artıp riskli boyutlara ulaşabilir ve malzemeyi çatlatabilir. Bu nedenle, örneğin kriyojenik işlem uygulanacak olan çelik parçalara, işlemden önce 150 °C - 250 °C sıcaklıkları civarında kısa bir gerilim giderme tavlı verilmesiyle çatlama olasılığı azaltılabilir (Tekin, 1982; Höke, 2014).

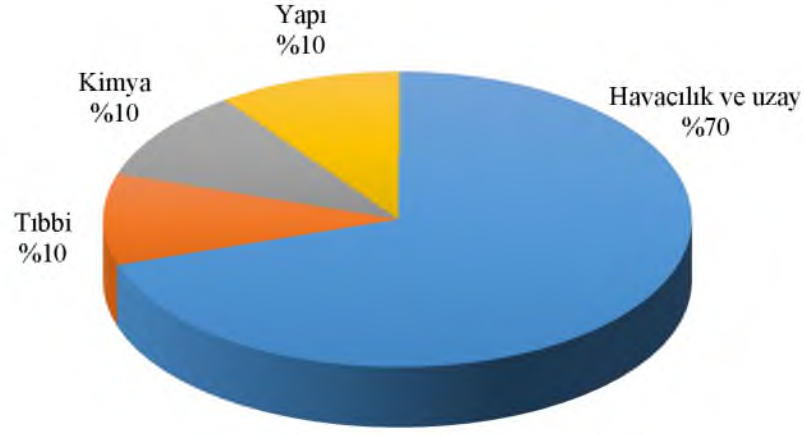
Kriyojenik işlem birçok malzemede olumlu sonuçlar vermektedir. Uygulanan malzemeye bağlı olarak kriyojenik işlem ile genellikle aşağıdaki özelliklerin bazılarında iyileşmeler elde edilebilmektedir (Zhisheng ve ark., 2003; Alava, 2008; Kara, 2014):

- Aşınma direnci
- Yorulma ömrü
- Gerilim giderme ve boyutsal kararlılık

- İşlenebilirlik
- Sertlik
- Korozyon direnci
- Elektrik iletkenlik
- Termal iletkenlik
- Çekme mukavmeti
- Süneklik
- Malzemelerin uzaması
- Kırılma tokluğu
- Takım ömrü
- Çatlak başlangıcı ve yayılması

3.2. Süper Alaşımlar

Metaller ve metal alaşımları yüksek sıcaklığın, korozyonun ve aşınmanın mevcut olduğu bazı zorlu çalışma şartlarında istenilen ihtiyacı karşılayamayabilmektedir. Arzu edilen niteliklere sahip yeni malzeme grupları, bu zorlu çalışma şartlarında kullanılmak üzere devreye girmektedir. Süper alaşımlar bu malzeme gruplarının başında gelmektedir. Günümüz teknolojisindeki gelişmeler sayesinde hem ekonomik yönden elverişli hem de teknik açıdan ihtiyacı karşılayan süper alaşımlar üretilmektedir. Süper alaşımlar diğer malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir. Süper alaşımların tercih edilmesine sebep olan bu yüksek sıcaklıktaki mükemmel performansları sadece sahip oldukları kimyasal bileşenlerden kaynaklı olmayıp, üretim süreçlerine bağlı olarak mikroyapılarına, mikroyapısal hatasızlığa ve ikincil fazlara dayanmaktadır. Süper alaşımların metal ve metal alaşımlarına göre üstün yönleri; yüksek aşınma dayanımına, yüksek özgül mukavemete ve yüksek elastik modüle sahip olması ve ayrıca yüksek sıcaklıkta bile bu özellikleri muhafaza edebilmesidir (Ezugwu ve ark., 2003; Karabulut, 2006). Süper alaşımlar, sahip oldukları bu özelliklere bağlı olarak havacılık, savunma, elektronik, ortopedi, nükleer reaktörler, petrokimya tesisleri, denizcilik donanımları, kirlilik kontrol cihazları, gıda işleme donanımları ve ısıtım donanımları gibi birçok farklı yerde kullanılmaktadır. Şekil 3.7’de süper alaşımların genel kullanım alanları görülmektedir (Ezugwu, 2005).



Şekil 3.7. Süper alaşımların kullanım alanları (Ezugwu, 2005)

Süper alaşımlar, diğer alaşımlara kıyasla yüksek sıcaklıklarda iyi oksidasyon ve korozyon direnci ile üstün kopma ve sürtünme dayanımına sahip nikel, demir-nikel veya kobalt esaslı alaşımlardır (Choudhury ve El-Baradie, 1998). Bu alaşımların önemli özelliklerinin başında 650 °C'nin üstündeki sıcaklıklara uzun süre dayanabilmeleri ve sıcaklığa bağlı erozyona ve korozyona karşı olan dayanımları gelmektedir (Karabulut, 2006). Yüksek dayanım ve sürünme dirençlerinin elde edilmesi için, alaşımı oluşturan elementlerin yüksek sıcaklıklarda oldukça dengeli bir yapı oluşturması gerekmektedir. Süper alaşımların yüksek sıcaklık dayanımları, içyapılarında bulunan karbürlerin veya diğer ana bileşiklerin oldukça kararlı olmasından kaynaklanır (Bargel ve Schulze, 1980; Askeland, 1998; Dursun, 2007). Tablo 3.1'de bu alaşımların içerisinde bulunan başlıca bileşenler gösterilmiştir (Voort ve ark., 2004).

Tablo 3.1. Isıya dayanıklı alaşımlarda gözlenen bileşenler (Voort ve ark., 2004)

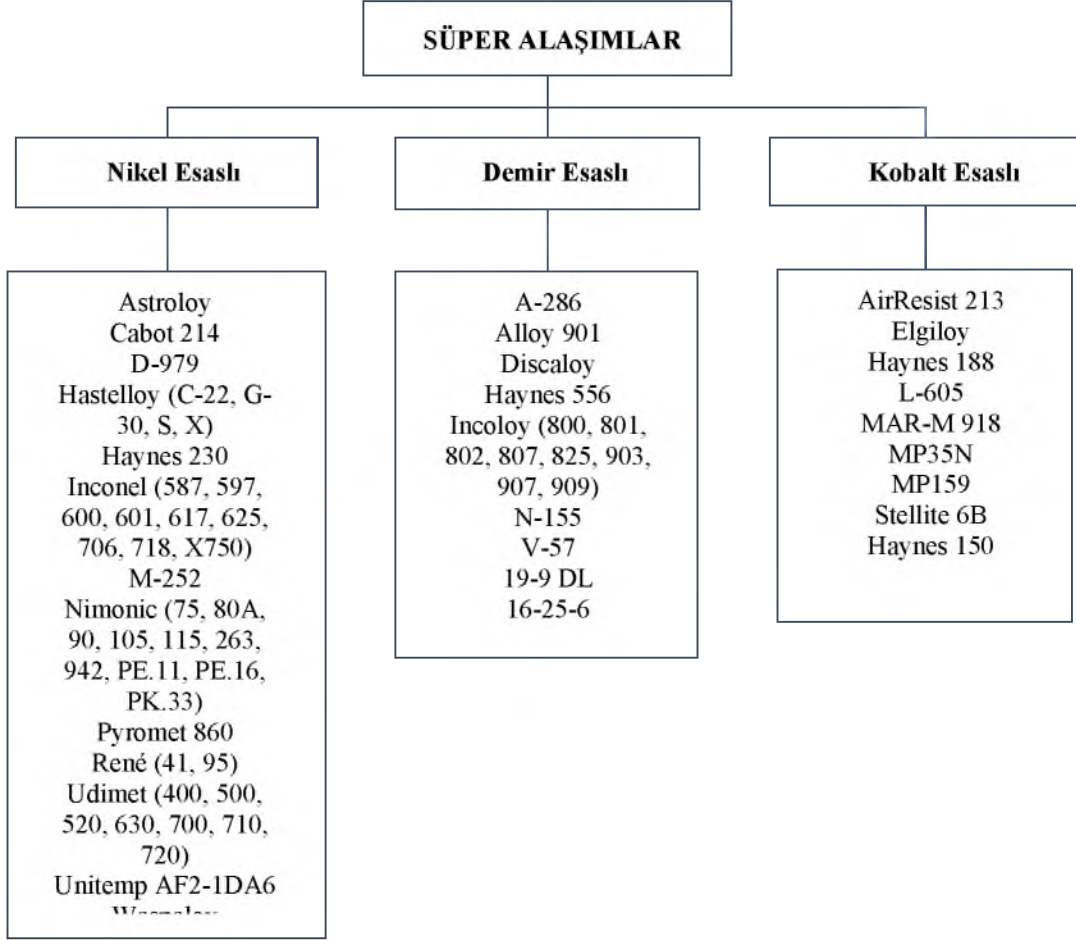
Faz	Kristal yapı	Formül	Açıklamalar
γ'	YMK	Ni_3Al $Ni_3(Al, Ti)$	Birçok nikel ve demir-nikel süperalaşımının temel mukavemetlendirme fazıdır. Kristal kafes boyut olarak (%0-0.5) östenit matristen biraz farklıdır. Kübikten küresele değişik şekillerde ve sıcaklık ile zamanın etkisiyle de değişik boyutlarda bulunabilir.
η	HSP	Ni_3Ti (diğer elementler için çözünürlük yok)	Uzun süre kullanıma maruz kalan yüksek alüminyum/titanyum oranlarına sahip demir, nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlarda bulunur.
γ''	HMT	Ni_3Nb	Inconel 718'in ana mukavemetlendirme fazıdır. Uyumlu disk şeklindeki parçacıklardır. Yarı kararlı bir fazdır.
$Ni_3Nb(\delta)$	Ortorombik	Ni_3Nb	Aşırı yaşlanmış Inconel 718'de gözlemlenir. 815 ve 980 °C arasında oluşturulduğunda sivri bir şekle sahiptir.
MC	Kübik	TiC NbC HfC	Titanyum karbür, nitrojen, zirkonyum ve molibden için bir miktar çözünürlüğe sahiptir. "M" elementleri titanyum, tantal, niyobyum, hafniyum, toryum veya zirkonyum olabilir.
$M_{23}C_6$	YMK	$Cr_{23}C_6$ (Cr, Fe, W, Mo) $_{23}C_6$	Genellikle tane sınırlarında oluşur. "M" elementi genellikle kromdur ancak nikel-kobalt, demir, molibden ve tungsten elementleri de olabilir.
M_6C	YMK	Fe_3Mo_3C , Fe_3W_3C , Fe_4W_2C , Fe_3Nb_3C , Nb_3CO_3C , Ta_3Co_3C	Rastgele dağılan karbürlerdir. "M" elementleri genellikle molibden veya tungstendir. Krom, nikel-niyobyum, tantal ve kobalt için bir miktar çözünürlüğe sahiptir.
M_7C_3	Hegzagonal	Cr_7C_3	Genellikle taneler arasında blok şeklinde gözlemlenir. 1000 °C'nin üzerinde sıcaklıklara maruz kalan Nimonic 80A gibi alaşımlarda ve bazı kobalt esaslı alaşımlarda gözlemlenir.
M_3B_2	Tetragonal	Ta_3B_2 , V_3B_2 , Nb_3B_2 , (Mo, Ti, Cr, Ni, Fe) $_3B_2$, Mo_2FeB_2	Yaklaşık % 0,03 veya daha fazla bor içeren nikel ve demir-nikel alaşımlarında görülür. Bor türler karbürler benzer görünürler fakat tercihli karbür dağılayıcılardan etkilenmez. "M" elementleri molibden, tantal, niyobyum, nikel, demir veya vanadyum olabilir.
MN	Kübik	TiN, (Ti, Nb, Zr)N, (Ti, Nb, Zr)(C,N), ZrN, NbN	Nitrür; titanyum, niyobyum veya zirkonyum içeren alaşımlarda gözlenir. Ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda çözünmez. Kare veya dikdörtgen bir şekle sahiptir.
μ	Rombohedral	Co_7W_6 , (Fe, Co) $_7$ (Mo, W) $_6$	Genellikle yüksek seviyelerde molibden veya tungsten içeren alaşımlarda gözlenir. Kaba ve düzensiz Widmanstättten plakaları olarak görünür ve yüksek sıcaklıklarda oluşur.
Laves	Hegzagonal	Fe_2Nb , Fe_2Ti , Fe_2Mo , Co_2Ta , Co_2Ti	En çok demir ve kobalt esaslı süper alaşımlarda yaygındır. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra düzensiz şekilli kürecikler veya ince uzun bir yapıda görülür.
σ	Tetragonal	$FeCr$, $FeCrMo$, $CrFeMoNi$, $CrCo$, $CrNiMo$	Çoğunlukla demir ve kobalt esaslı süper alaşımlarda ve daha az yaygın olarak nikel esaslı alaşımlarda gözlenir. Düzensiz şekilli kürecikler hâlinde ya da ince uzun bir yapıda görülür. 540 ila 980 arasındaki sıcaklıklara uzun süre maruz kaldıktan sonra oluşur.

Uzay çağı metalleri veya süper alaşımlar, çoğunlukla bu alaşımlar için kullanılan terimlerdir. Zorlu çalışma şartlarında kullanılmak üzere geliştirildiklerinden dolayı işlenebilirlikleri oldukça düşüktür. Bu tür alaşımlar yüksek kesme kuvvetlerine sebep olan yüksek kayma mukavemeti, yığılma kenar oluşumuna sebep olan bazı kesici takımlara kaynak olma eğilimi, daha yüksek gerilmelere, kesme kuvvetlerine ve aşınmaya sebep olan deformasyon sertleşmesi eğilimi ve yüksek kesici kenar sıcaklıklarına sebep olan düşük ısı iletkenlik gibi özelliklere sahiptir (Karabulut, 2006; Çakır, 1999).

Süper alaşımların kimyasal kompozisyonu uygun olanları dövülebilir, haddeleme ile levha hâline getirilebilir ya da birçok farklı şekilde üretilebilir. Çok daha yüksek oranda alaşımlandırılmış içerikler genelde döküm yöntemiyle üretilir. Fabrikasyon yapılar sert lehimlemeyle veya kaynak yapılar üretilir. Fakat yüksek miktarda sertleşme fazı içeren ve yüksek oranda alaşımlandırılmış kompozisyona sahip olanların kaynak yapılması zordur (İnanır, 2012).

3.2.1. Süper alaşımların sınıflandırılması

Süper alaşımların sınıflandırılması, içerdikleri ana bileşenlere göre yapılmaktadır. Nikel, demir ve kobalt esaslı olmak üzere toplam 3 ana grup bulunmaktadır. Süper alaşımların türünü belirleyen bu 3 element dışında niyobyum, molibden, tantal ve tungsten gibi refrakter elementler ile alüminyum, titanyum, krom, karbon, bor ve zirkonyum gibi birçok element süper alaşımların yapısında bulunabilmektedir (Reed, 2006). Şekil 3.8’de süper alaşımların içerdikleri ana alaşım elementine göre sınıflandırılması gösterilmiştir (Stoloff, 1990).



Şekil 3.8. Süper alaşımların içerdikleri ana alaşım elementine göre sınıflandırılması (Stoloff, 1990)

Nikel esaslı süper alaşımlar, yapılarında yüzde olarak en fazla nikel elementi bulundurduklarından dolayı adlarını bu elementten almaktadır. Bu alaşımların yüksek sıcaklıklardaki mukavemetleri oldukça iyidir ve korozyona karşı da oldukça dirençlidirler. Yaklaşık olarak 650-1100 °C sıcaklıkları arasında kullanılabilen nikel esaslı süper alaşımlar, bu sıcaklıklarda kullanılabilen malzemeler arasında yapısı en iyi bilinen alaşım türüdür (Karabulut, 2006).

Demir esaslı süper alaşımlar adlarını yapılarında yüzde olarak en fazla bulunan demir elementinden almaktadır. Mekaniksel özellikleri oldukça iyi olan bu alaşımlar, 700°C sıcaklığa kadar aşınma direncine ve oksidasyona karşı iyi özellik göstermektedir. Ayrıca termal şoklara karşı da dirençlidirler. Demir esaslı süper alaşımların en büyük avantajı, fiyatlarının diğer süper alaşımlara kıyasla daha ucuz olmasıdır (Karabulut, 2006).

Kobalt esaslı süperalaşımlar, yapılarında yüzde olarak en fazla kobalt bulundurduklarından dolayı adlarını bu elementten almaktadır. Bu alaşımlar ortalama

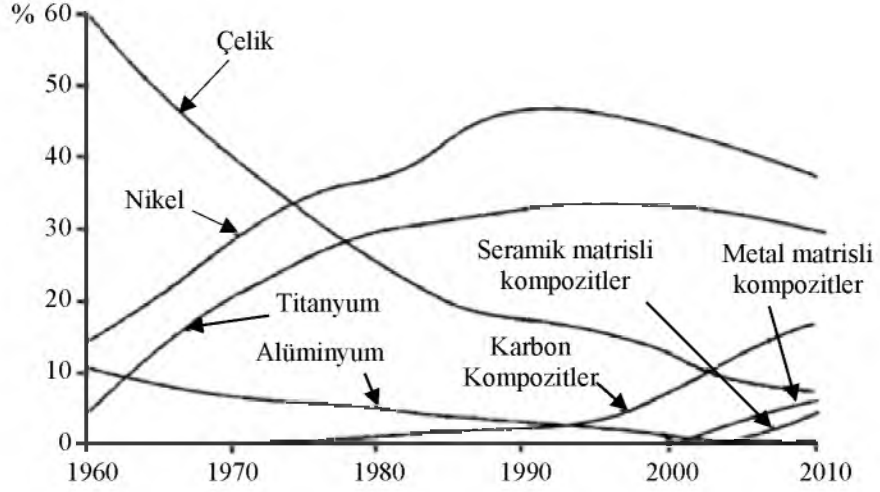
1175 °C sıcaklığa kadar yüksek mukavemete ve mükemmel oksidasyon direncine sahiptir. Düşük stres istenen yerlerde ve sıcak korozyona maruz kalınan ortamlarda dengeyi daha iyi koruyabildikleri için, nikel esaslı süper alaşımlardan daha iyi sonuç vermektedirler. Kobalt esaslı süper alaşımlar özellikle dönen ve yüksek sıcaklıklarda çalışan parçalarda tercih edilir. Bu alaşımların dezavantajı fiyatlarının yüksek olmasıdır (Karabulut, 2006).

Ergime sıcaklıkları yüksek olan nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar, demir esaslı süper alaşımlara kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha iyi dayanım gösterir. Bu nedenle daha uzun ömürlü ve yüksek mekanik zorlamaların bulunduğu uygulamalarda, nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar tercih edilmektedir. Düşük sıcaklık uygulamalarında ve ihtiyaç duyulan mukavemete göre, demir esaslı süper alaşımlar maliyetlerinden ötürü diğer süper alaşımlara kıyasla daha çok kullanılır (Donachie ve Donachie, 2000; İnanır, 2012).

Nikel, demir ve kobalt süper alaşımların matris yapısını oluşturdıklarında, östenitik yüzey merkezli kübik kristal yapıda bulunmaktadır. Fakat saf metal olarak ele alındıklarında demir ve kobalt, oda sıcaklığında yüzey merkezli kübik yapıda değildir. Demir ve kobalt diğer elementler ile yapmış oldukları alaşımlarda veya yüksek sıcaklıklarda, allotropik dönüşüme uğrayarak yüzey merkezli kübik yapıya dönüşmektedir. Nikel ise bütün sıcaklıklarda sahip olduğu yüzey merkezli kübik yapısını korumaktadır (Davis, 1997; Donachie ve Donachie, 2000; İnanır, 2012).

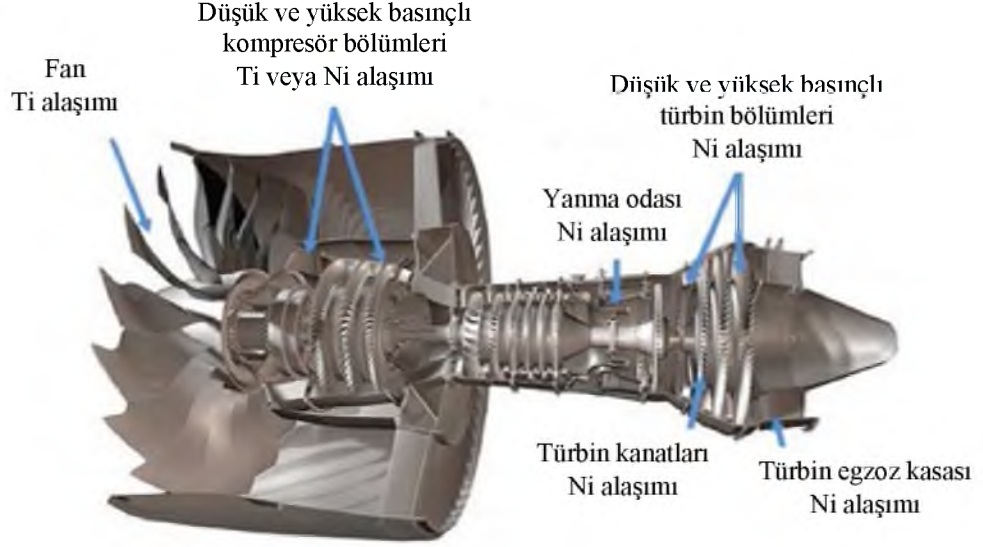
A- Nikel esaslı süper alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar, en çok kullanılan süper alaşımlardır. Bu alaşımların yüksek sıcaklıklarda korozyona, termal ve mekanik yorulmalara, termal ve mekanik şoklara, sürünmeye ve erozyona karşı yüksek direnç göstermeleri, zorlu çalışma şartlarında kullanılabilmelerini sağlar. Bu özellikler, nikel esaslı süper alaşımların kullanıldığı alanlarda verimli ve etkili hizmet performansları için gereklidir. Bu alaşımlar uçak motorlarında, özellikle daha yüksek basınç ve sıcaklıkta çalışan türbin kanatlarının imalatında kullanılır. Şekil 3.9’da tipik bir gaz türbinli uçak motorunda bulunan malzemelerin ağırlık yüzdeleri gösterilmektedir. Nikel esaslı alaşımlar, kullanımları çok sık ve daha küçük bileşenlerle sınırlı olan çelikle karşılaştırıldığında, bazı zorlu şartlarda gerekli olan kriterleri daha iyi bir şekilde karşılamaktadır (Ezugwu ve ark., 2003).



Şekil 3.9. Gaz türbininde kullanılan malzemelerin değerlendirilmesi (Ezugwu ve ark., 2003)

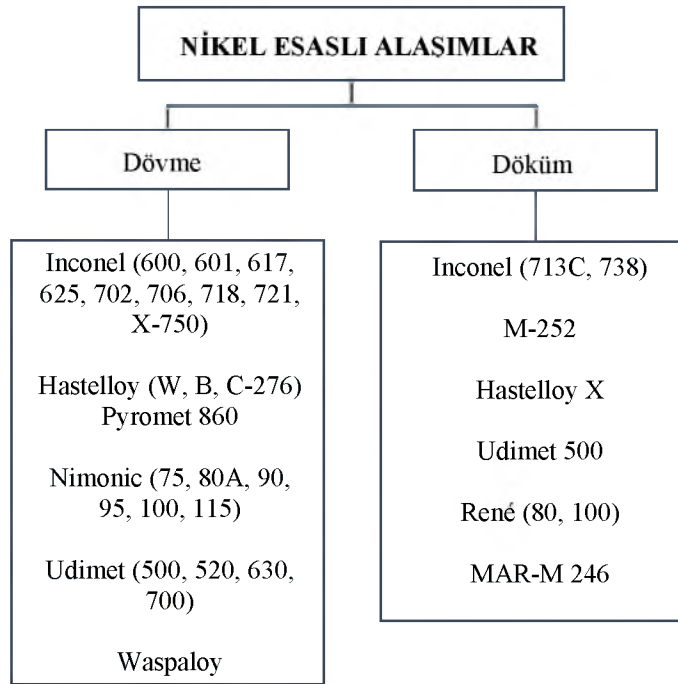
Nikel esaslı süper alaşımlar, titanyum alaşımlar ve kompozit malzemeler gibi mühendislik malzemeleriyle birlikte uçak motoru üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle gaz türbini bölmesinde kullanılan nikel esaslı süper alaşımlar, havacılık motorlarında kullanılan malzemelerin ağırlıkça yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır (Ezugwu ve ark., 2003). Şekil 3.10'da verilen jet motoru kesitinde, motor bölümlerinde kullanılan alaşımlar gösterilmektedir (Ulutan ve Özel, 2011). Uçak gaz türbinleri ve uzay araçlarında kullanılan nikel alaşımları ayrıca buhar türbinli enerji santralleri, pistonlu motorlar, metal işleme, tıbbi uygulamalar, ısı işlem donanımları, nükleer enerji sistemleri, kimya ve petrokimya endüstrileri, kirlilik kontrol donanımları, metal işleme fabrikaları, kömür gazlaştırma ve sıvılaştırma sistemleri, selüloz ve kâğıt fabrikaları gibi korozyon direnci veya ısı direnci içeren çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Zwilsky ve Langer, 1992).



Şekil 3.10. Kullanılan malzemelerle beraber bir jet motoru kesiti (Ulutan ve Özel, 2011)

Yüksek sıcaklık uygulamalarında nikel esaslı süper alaşımların kullanılmasının sebepleri şu şekilde sıralanabilir: Öncelikle nikel, yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapıya sahip olması sebebiyle atomlar arası bağların oluşturduğu artan kohezif enerjiyle beraber süneklik ve tokluk sağlar. Bununla beraber nikel, YMK biçiminde oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar kararlılık gösterir ve bu şartlarda faz dönüşümünün gerçekleşmemesi, nikelin yapıda yüksek sıcaklık bileşeni olarak kullanılmasını sağlar. Nikel gibi YMK yapıya sahip metallerin difüzyon hızları düşüktür ve bu durum sayesinde alaşımda yüksek sıcaklıklarda mikroyapısal kararlılık sağlanır (İnanır, 2012; ; Donachie ve Donachie, 2000; Reed, 2006).

Nikel esaslı süper alaşımlar uygulama ve bileşimlerine bağlı olarak dövülebilir veya dökülebilir (Başaran, 1998). Şekil 3.11’de bazı nikel esaslı süper alaşımlar, üretim yöntemlerine göre gruplandırılmış bir şekilde verilmiştir (İnanır, 2012; Donachie ve Donachie, 2000). Bunlar arasında Inconel 718 en sık kullanılan nikel esaslı süper alaşımdır (Ezugwu ve ark., 2003).



Şekil 3.11. Üretim yöntemlerine göre nikel esaslı süper alaşımlar (İnanır, 2012; Donachie ve Donachie, 2000)

Türbin diskleri, jet türbin kanatçıkları, valflerin ve pompaların gövdeleri, egzoz valfleri, ısı dönüştürücülerinin başlıkları ve zincir kancaları gibi yerlerde kullanılan nikel esaslı alaşımlar, kapalı kalıp dövme yöntemleriyle imal edilir. Tablo 3.2’de en yaygın kullanılan nikel esaslı süper alaşımların emniyetli dövme sıcaklık aralıkları verilmiştir. Sıcaklık aralığının düşük kısımlarının kullanılması, çekme özelliklerinin iyileşmesini sağlayacaktır (Başaran, 1998).

Tablo 3.2. Nikel esaslı alaşımların dövme sıcaklık aralıkları (Başaran, 1998)

Alaşımlar	Dövme Sıcaklığı (°C)						
	535	650	760	870	980	1090	1200
Nikel 200							
Duranikel 301							
Monel 400							
Monel K-500							
Inconel 600							
Inconel 625							
Inconel 718							
Inconel 722							
Inconel X-750, 751							
Incoloy 800							
Incoloy 825							

Nikel esaslı alaşımlar işlenebilirliği zayıf malzemelerdir. Bu alaşımların işlenebilirliğini zayıflaştıran özellikler şu şekilde özetlenebilir (Ezugwu ve ark., 1999):

- Yüksek sıcaklık özellikleri nedeniyle işleme sırasında mukavemetlerinin büyük bir kısmı korunur ve bundan dolayı işlenmeleri zorlaşır.
- İşleme sırasında hızlı bir şekilde iş sertleşmesi meydana gelir. Bu, kesme derinliğinde çentiğe ve kesici takımında çentik aşınmasına neden olan önemli bir faktördür.
- Kesici takımlar, bu süper alaşımların yapısında bulunan sert aşındırıcı karbürlerin varlığı nedeniyle işleme sırasında yüksek düzeyde abrasif aşınmaya maruz kalır.
- İşleme sırasında yüksek sıcaklıklarda kimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve bu da yüksek oranda difüzyon aşınmasına neden olur.
- Nikel esaslı alaşımların işlenmesi sırasında kesici takım üzerinde sıklıkla adezyon meydana gelir ve bu durum kesici takımında çentik ve pullanma oluşmasına neden olur.
- İşleme sırasında kontrol edilmesi zor olan sert ve sürekli bir talaşın oluşması, kesici takımın kraterleme gibi nedenlerle bozulmasına katkıda bulunur.
- Nikel esaslı alaşımların zayıf termal iletkenliğine sahip olması nedeniyle, genellikle işlem sırasında takım ucunda yüksek sıcaklıklar meydana gelmektedir ve kesici takımında yüksek sıcaklık gradyanları oluşmaktadır.

Kısa takım ömrü ve işlenmiş iş parçası yüzeyindeki hasarın derecesi, nikel esaslı alaşımların işlenebilirliğini bozan en önemli hususlardır. İşleme sırasında meydana gelen yüzey değişiklikleri (artık gerilmeler gibi), işlenmiş bileşenin mekanik özelliklerini ve gerilim korozyonu özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle işleme sırasında bileşenin yüzey bütünlüğünü sağlamak için çok dikkatli olunmalıdır. Nikel esaslı alaşımlar işlenirken elde edilen takım ömrü ciddi ölçüde yetersizdir. İşleme sırasında yeterli takım ömrünü elde etmek için işleme yöntemi, ilerleme, kesme hızı, kesme derinliği, takım malzemesi ve takım geometrisi gibi başlıca parametreler kontrol edilmelidir (Ezugwu ve ark., 1999). Kimyasal bileşimin, döküm ve dövme tekniklerinin ve ısıtma işlemlerinin neden olduğu malzeme mikroyapılarındaki farklılıklar, işlenebilirlikte de birtakım değişikliklere yol açabilmektedir (Krook ve ark., 2005)

Modern uçak motorlarının artan karmaşıklığı ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışması ile nikel esaslı süper alaşımlar, daha zorlu çalışma koşullarını karşılamak için

basit nikel-krom matrisinden günümüzün çok elementli, çok fazlı sistemlerine doğru geliştirilmiştir. Nikel esaslı süper alaşımlar artık daha yüksek performans vermek için krom, titanyum, alüminyum, molibden, kobalt ve diğer elementleri çeşitli miktarlarda içermektedir. Bu tür bileşime sahip olan bir malzemede, işleme sırasında kısa takım ömrü ve iş parçasındaki metalürjik hasar sorunları daha belirgin hâle gelmektedir. Nikel esaslı alaşımlar son derece sert olmamalarına rağmen sahip oldukları yüksek sıcaklık dayanımı ve aşırı tokluk özellikleri, işleme sırasında iş sertleşmesi eğilimi nedeniyle yüksek kesme kuvvetlerine ve çapak oluşumuna neden olarak iş parçalarının işlenmesi zorlaştırır (Ezugwu ve ark., 1999).

Nikel esaslı süper alaşımlarda alaşım elementleri

Genel olarak nikel esaslı alaşımların kimyasal bileşimi ağırlıkça %38 ile %76 arasında nikel, %27'ye kadar krom ve %20 kobalttan oluşmaktadır. Ayrıca dayanımlarını ve oksidasyon özelliklerini geliştirmek için ilave edilen tungsten, tantal ve molibden gibi refrakter elementler de içerebilirler. Alaşımda mevcut olabilecek oksijen, nitrojen, fosfor, kükürt ve silikon gibi elementlerin konsantrasyonları uygun eritme işlemi ile kontrol edilir (Ezugwu ve ark., 2003).

Nikel alaşımları yüksek sıcaklıkta oksidasyonuna karşı çok az doğal dirence sahiptir. Oksitleyici bir ortamda ısıtıldığında krom ilavesi, malzemenin yüzeyinde Cr_2O_3 içeren yapışkan koruyucu tabaka oluşturur. Nikel-krom alaşımlarında en uygun oksidasyon direnci, %15-30 aralığındaki krom içeriği ile elde edilir. Ayrıca krom, malzemenin yüksek sıcaklıklarda güçlendirilmesinde önemli bir rol oynayabilen krom karbürleri oluşturur (Ezugwu ve ark., 1999).

Alüminyum, titanyum ve niyobyum, γ' (gama üssü, $(Ni_3(Al,Ti))$) oluşumu ile malzemeyi güçlendirmek için yapıya eklenir. Niyobyum, γ' fazında bir dereceye kadar titanyum veya alüminyum yerine geçebilir veya niyobyum miktarı yeterince yüksek ise (% 4'ün üzerinde) ayrı bir sertleşme fazı olan Ni_3Nb oluşturabilir. Ayrıca titanyum ve niyobyum da karbür oluşturabilir. Alüminyum, yüksek sıcaklıklarda oksit tabakada kararlı Al_2O_3 oluşturduğundan dolayı oksidasyon direnci üzerinde faydalı bir etkiye sahiptir. Tabakada Al_2O_3 veya Cr_2O_3 oluşumu, alaşımdaki iki elementi göreceli miktarlarına bağlıdır. Yüksek sıcaklık alaşımlarının geliştirilmesi sırasında, sürünme kopma özelliği elde etmek ve mikroyapısal stabiliteyi koruma amacıyla daha fazla γ' elementleri(alüminyum, titanyum ve niyobyum) ekleme için krom içeriğinin

düşürülmesinin gerekli olduğu düşünülmüştür. Düşük krom içeriğinden kaynaklanan oksidasyon direncindeki kayıp ise alüminyum içeriğinin artırılması ile telafi edilmiştir (Ezugwu ve ark., 1999).

Inconel 718 ve Nimonic 901 gibi bazı süper alaşımlar yüksek (ağırlıkça %18-36) demir içeriğine sahiptirler. Nikel esaslı alaşımlarda demir içeriğinin artması, oksit tabakasının daha az yapışması nedeniyle oksidasyon direncinin azalmasına neden olur (Ezugwu ve ark., 1999).

Kobalt ilavesi, az miktarda katı çözelti sertleşmesi sağlar ve nikel-krom YMK östenitik matristeki alüminyum ile titanyumun çözünürlüğünü azaltır. Böylece γ' solvus sıcaklığını artırır ve bu durum, yüksek sıcaklıkta mukavemetin korunmasına yardımcı olur. Ayrıca kobalt, karbon için nikelden daha fazla çözünürlüğe sahiptir. Bu, daha fazla karbonun tolere edilebileceği veya eşdeğer karbon içeriği için daha az karbür bulunacağı anlamına gelir (Ezugwu ve ark., 1999).

Tungsten, tantal ve molibden öncelikle yüksek sıcaklıkta katı çözelti sertleşmesi sağlamak için kullanılır. Ayrıca bu elementler karmaşık karbürler oluştururlar ve özellikle tantal γ' içinde çözünür (Ezugwu ve ark., 1999).

Bor ve zirkonyum sürünme dayanımı ve sünekliği iyileştirmek için eklenir. Bu elementlerin tane sınırlarında ayrıldığı ve sonuç olarak tane sınırı karbürlerinin oluşumunu değiştirdiği iyi bilinmektedir. Nikel alaşımlarında bor ve zirkonyumun varlığı, kaynaklanabilirliği olumsuz yönde etkileyebildiği için tam olarak faydalı değildir. Karbür oluşumuna bağlı olarak sürünme mukavemetini arttırmak için sınırlı miktarda karbon eklenir. İşlenebilirlik ve oksidasyon direnci gibi özellikleri iyileştirmek için kasıtlı olarak eklenen diğer eser elementler kalsiyum, magnezyum ve itriyumdur. Başta döküm alaşımlarına olmak üzere az miktarlarda hafniyum ilavesinin faydalı olduğu, düşük ve orta sıcaklıklarda süneklik ile mukavemette iyileştirmeler sağladığı ve yönlü katılaşmada sıcak yırtılma direncini arttırdığı bulunmuştur (Ezugwu ve ark., 1999).

Nikel esaslı süper alaşımların mikroyapısı

Alaşım elementleri ve mikroyapıları üzerine sürekli olarak çalışılması, nikel esaslı alaşımların gelişmesine yol açmıştır. Genel olarak bakıldığında nikel esaslı alaşımların, mikro yapılarını veya fazlarını geliştirme eğilimi gösteren bazı alaşım

elementleri ile karakterize edildiği ve güçlendirildiği söylenebilir (Ezugwu ve ark., 1999). Nikel esaslı alaşımlarda bulunabilecek ana fazlar şunlardır:

1. Gama matris (γ): Sürekli matris, YMK nikel esaslı manyetik olmayan östenitik bir fazdır. Genellikle yüksek oranda demir, kobalt, krom, molibden ve tungsten gibi katı çözelti elementleri içerir. Tüm nikel esaslı alaşımlar matris olarak bu fazı içerir (Ezugwu ve ark., 1999; Stoloff, 1990).

2. Gama üssü (γ'): Östenitik gama matrisi ile uyumlu bir şekilde çökelen YMK γ' ($\text{Ni}_3\text{Al}, \text{Ti}$) fazını çökeltmek için gerekli miktarlarda alüminyum ve titanyum eklenir. Diğer elementler, özellikle niyobyum, tantalum ve krom da γ' fazına girer. Bu faz, malzemenin sürünme direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı için gereklidir (Stoloff, 1990)

3. Gama çift üssü (γ''): Nikel ve niyobyum, demir varlığında birleşerek gama matrisi ile uyumlu olan hacim merkezli kübik (HMK) γ'' (Ni_3Nb) fazını oluştururken, % 2,9 düzeyinde büyük uyumsuzluk türlerini de içerir. γ'' fazı, düşük ve orta sıcaklıklarda çok yüksek mukavemet sağlar ancak yaklaşık 650 °C üzerindeki sıcaklıklarda kararsızdır. Bu çökeltir nikel-demir alaşımlarında bulunur (Stoloff, 1990).

4. Tane sınırı γ' : Daha güçlü alaşımlarda tane sınırları boyunca oluşan γ' filmi, hizmet sırasında veya geliştirilen ısıtım işlem teknikleri ile meydana gelir. Bu filmin birçok alaşımda kopma özelliklerini iyileştirdiği düşünülür (Ezugwu ve ark., 1999; Stoloff, 1990).

5. Karbürler: Karbon %0,05-0,2 oranında eklenir ve genellikle birincil metal MC karbürleri oluşturmak için mevcut reaktif ve refrakter elementlerle reaksiyona girer. MC karbürler, ısıtım işlem ve hizmet sırasında parçalanma ve tane sınırlarında oluşma eğiliminde olan M_{23}C_6 ve M_6C gibi başka karbürler oluşturma eğilimindedir (Ezugwu ve ark., 1999; Stoloff, 1990).

6. Borürler: Bunlar, bor tane sınırlarına ayrıldığında oluşan ve nispeten düşük yoğunluklu borür parçacıklarıdır (Stoloff, 1990)

7. Topolojik Sıkı Paket (TCP) fazı: Bazı bileşimlerde belirli koşullar altında oluşabilen σ , μ ve Laves gibi plaka veya iğne benzeri fazlardır. Bu fazlar sünekliğin ve kopma mukavemetinin azalmasına neden olur (Ezugwu ve ark., 1999; Stoloff, 1990).

B- Demir esaslı süper alaşımlar

Östenit paslanmaz çeliklerden yola çıkılarak geliştirilen demir esaslı süper alaşımlar, sıkı paketlenmiş bir YMK matriste hem katı çözelti sertleştirmesi hem de

çökelti oluşturan elementler içerir. Östenitik matris nikel ve demire dayanır ve YMK yapının kararlı olması için en az %25 oranında nikel içermesi gerekir. Krom gibi diğer alaşım elementleri katı çözelti sertleştirilmesi için yapıda bulunur. Sertleştirici çökelti öncelikle γ' Ni₃Al, η Ni₃Ti ve γ'' Ni₃Nb gibi intermetalik bileşiklerdir ancak karbürler ve karbonitrürler de olabilir. Bor ve zirkonyum gibi tane sınırlarına ayrılan elementler, nikel esaslı alaşımlardakine benzer bir işlevi yerine getirir. Yani tane sınırı kırılması, sürünme kopması koşulları altında bastırılır ve bu da kopma ömründe önemli artışlara neden olur (Davis, 1997).

Yüksek miktarda demir elementi içeren birçok süper alaşım olmasına karşın, bunların hepsi demir esaslı süper alaşımlar grubuna girmemektedir. Çünkü bu süper alaşımlar nikel, demir, kobalt, krom, az miktarda molibden, niobiyum ve tungsten gibi elementlerin karmaşık birleşimidir. γ'' ile mukavemetlenen %52,5 nikel ve %18,5 demir içeren INCO 718 ile katı-eriyik dayanımlı %49 nikel ve %16 demir içeren Hastelloy X alaşımları bu duruma örnek olarak verilebilir. Bu alaşımlar, demir içeren nikel esaslı süper alaşımlardır (Çay ve Ozan, 2005).

Demir esaslı süper alaşımların 504 °C üzerindeki sıcaklık uygulamaları için en önemli özellikleri YMK yapıda olmalarıdır. Çünkü kapalı paketli kafes daha dirençli olmaktadır. İntermetalik bileşik çökelti ile mukavemetlenen demir esaslı alaşımların ilk kullanım alanları gaz türbin motorlarındaki bıçaklar, diskler ve bağlayıcılarıdır. Bazı demir esaslı süper alaşımlar gaz türbin motorları, türbin diskleri, jantlar ve turbin kutularında kullanılmaktadır (Çay ve Ozan, 2005).

C- Kobalt esaslı süper alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşımlar, diğer süper alaşımların aksine bağdaşık ve düzenli bir çökelti ile güçlendirilmez (Davis, 1997). Diğer alaşımlardaki γ' ve γ'' fazları bağdaşık fazlardır. Bunlar yerine, karbürlerin ve katı çözelti sertleştiricilerinin birleşimi ile mukavemetlendirilirler. Nikel veya demir-nikel esaslı süperalaşımlardaki γ' çökeltisi ile aynı fayda derecesine sahip hiçbir intermetalik bileşiğin, kobalt esaslı alaşımlarda etkin olduğu görülmemiştir. Bu alaşımlardaki temel ayrım dövme ve döküm yapılar arasındadır. Dövme alaşımlar Alloy 25 (L605) ile ve döküm alaşımlar ise X-40 ile tiplendirilir (Davis, 2000).

Kobalt, 417 °C derecenin altında hegzagonal sıkı paket (HSP) yapıda kristalleşir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise YMK yapıya dönüşür. Hizmet sırasında bu dönüşümü

engellemek için neredeyse tüm kobalt esaslı alaşımlara nikel eklenir. Bu sayede oda sıcaklığı ile ergime noktası arasında YMK yapı korunmuş olur (Davis, 1997).

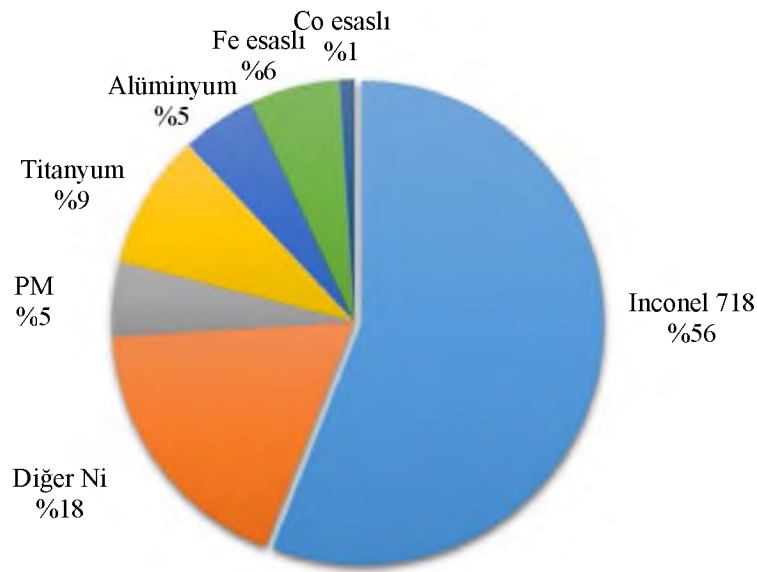
Kobalt esaslı alaşımlar, nikel esaslı alaşımlara göre genellikle daha iyi kaynaklanabilirlik ve ısı yorulma direnci sergiler. Kobalt esaslı alaşımların diğer bir avantajı, alüminyum ve titanyum reaktif metallerini içeren nikel esaslı veya demir-nikel esaslı alaşımlar için gerekli olan vakum ergitmenin aksine, havada veya argonda ergitilme kabiliyetidir. Ancak katı çözelti içinde alaşım elementleri için yüksek toleransa sahip olan nikel esaslı alaşımların aksine kobalt esaslı alaşımların, istenmeyen σ , Laves ve benzer TCP fazlarını çökeltme olasılığı daha yüksektir (Davis, 1997). Kobalt esaslı süper alaşımlar nükleer reaktör parçalarında, gaz türbinlerinin yüksek sıcaklığa maruz kalan kısımlarında, cerrahi implantlarda, fırın parçalarında, buhar türbinlerinde, statik kanat uygulamalarında ve soğuk çalışma şartlarında kullanılır (Çay ve Ozan, 2005).

3.2.2. Inconel 718

Inconel 718 süper alaşımı (Alloy 718, UNS N07718, W.Nr. 2.4668 (Special Metals Corporation, 2007)), 1950'lerde International Nickel Corporation tarafından geliştirilmiş ve türbin bileşeni olarak birçok uygulamada yer almıştır. Süper alaşımların tokluk ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi birçok avantajı vardır. Bunlar dışında oksidasyon direnci, korozyon direnci, ısı yorulma dayanımı, dövülebilirlik, kaynaklanabilirlik ve lehimlenme özellikleri Inconel 718'in avantajları arasında yer almaktadır (Kuo ve ark, 2009). Inconel 718, yavaş γ'' çökeltme kinetiği, nispeten yüksek demir içeriği ve geniş ergime aralığı sayesinde tüm metal şekillendirme teknikleriyle (hassas döküm, soğuk ve sıcak işleme, kalıp dövme, kaynak montajı vb.) kolayca imal edilebilir olması ve kullanımının ekonomik olması gibi benzersiz özelliklere sahiptir (Schirra ve Viens, 1994).

Inconel 718, düşük ve orta sıcaklıklardaki (-250 ile 700 °C) mükemmel mekanik özellikleri sebebiyle havacılık, uzay, (Oezkaya ve ark., 2016). Inconel 718, General Electric Uçak Motorlarında (GEAE) en petrol ve nükleer enerji endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen ve Liao, 2003). Havacılık endüstrisinde türbinler için geliştirilen bu alaşım, en sık kullanılan süper alaşımlardan birisidir çok kullanılan süper alaşımdır ve kanat profilleri, kritik döner parçalar, basınçlı kaplar ve destek yapılarında

kullanılmaktadır. Şekil 3.12’de 2000’li yıllarda GEAE’de döner ve yapısal kısımlarda kullanılan dövme malzeme türleri görülmektedir (Schafrik ve ark, 2001).



Şekil 3.12. GEAE’de döner ve yapısal kısımlarda kullanılan dövme malzemeler (Schafrik ve ark, 2001)

Inconel 718, kullanım alanının sürekli büyümesini sağlayan hem teknik hem de ticari birtakım özelliklere sahiptir. Bunlar (Schafrik ve ark, 2001):

- Ücretsiz üretim lisansının olması: Bu durum, büyük bir malzeme tedarikçi ve imalatçı tabanının gelişmesine izin vermektedir.
- Elverişli çökelme kinetiği: Bu özellik, dökülebilirlik ve kaynaklanabilirlik olmak üzere önemli avantajlar sağlamaktadır.
- Göreceli üretim kolaylığı: Bu durum, birden fazla üretim sürecinin ve ürün formunun gelişmesine izin vermektedir.

Inconel 718 süper alaşımına ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.3’te verilmiştir. Tablodaki değerler tipik değerler olup, malzemenin bileşimine ve uygulanan ısı işlemlere göre değişiklik göstermektedir (Special Metals Corporation, 2007).

Tablo 3.3. Inconel 718 süper alaşımına ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler (Special Metals Corporation, 2007)

Yoğunluk (gr/cm³)	
Tavlama	8,193
Tavlama + yaşlandırma	8,221
Ergime Aralığı (°C)	
1260 - 1336	
Özgül Isı (J/kg °C)	
21 °C'de	435
Elastisite Modülü (young modülü, Gpa)	
21 °C'de	199,948
1093 °C'de	98,595
Termal İletkenlik (W/mK)	
21 °C'de Tavlama	11,098
Tavlama + yaşlandırma	11,386
1093 °C'de Tavlama	28,249
Tavlama + yaşlandırma	28,682
Çekme Dayanımı (Mpa)	
Oda sıcaklığında	1241,057 - 1275,53
649 °C'de	965,266 - 999,74
Akma Dayanımı (%0,2 ofset, Mpa)	
Oda sıcaklığında	1034,214
649 °C'de	861,845

Inconel 718, sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikler nedeniyle plastik deformasyonu zor olan bir malzemedir. Bunlar; düşük ısı iletkenlik, yüksek mukavemet, yüksek sıcak sertlik, yüksek süneklik, yüksek pekleşme eğilimi ve bazı kesici takım malzemelerine kimyasal ilgi gibi özelliklerdir (Uçak ve Çiçek, 2018). Ayrıca Inconel 718'in talaş yığılmasına (BUE) karşı belirgin bir eğilimi ve yapısındaki karbürlerin ve intermetalik fazların aşındırıcı etkisi vardır (Klocke ve ark., 2006). Bu nedenlerle Inconel 718 süper alaşımının talaşlı imalatı sırasında yüksek işleme maliyetleri, istenmeyen yüzey kalitesi ve düşük takım ömrü gibi problemlerle karşılaşmaktadır (Uçak ve Çiçek, 2018). Inconel 718'in üretim maliyetinin yüksek olması nedeniyle işleme sırasındaki hatalar ciddi maddi kayıplar yaşatabilmektedir (Kıvak ve ark., 2010). Inconel 718 gibi nikel esaslı alaşımların işlenmesi için kullanılacak kesici takımların iyi termal şok özelliğine, yüksek sıcaklıklarda yeterli kimyasal kararlılığa, yüksek sıcaklık sertliğe, iyi aşınma direncine, yüksek mukavemete ve yüksek tokluğa sahip olması gerekmektedir (Ezugwu ve ark., 1999).

Inconel 718, çoğu uygulama için solüsyona alma ve çökeltme sertleşmesi ile hazırlanır. Bu süper alaşım, ikincil fazların (γ' ve γ'') metal matris içine çökeltilmesiyle sertleştirilir. Bu nikel (titanyum, alüminyum, niyobyum) fazlarının çökeltmesi, 593 °C

ile 816 °C sıcaklık aralığında ısıtılma işlemi sağlanır. Bu metalurjik reaksiyonun düzgün bir şekilde gerçekleşmesi için, yaşlanan bileşenlerin (alüminyum, titanyum, niyobyum) çözelti içinde (matriste çözünmüş) olması gerekir. Eğer bu bileşenler başka bir faz olarak çökeltirirse veya başka bir şekilde birleştirilirse, doğru şekilde çökelmeyecektir ve alaşımın tam mukavemeti gerçekleşmeyecektir. Bu işlevi gerçekleştirmek için malzeme önce solüsyona alma işlemine tabi tutulmalıdır (Special Metals Corporation, 2007).

Inconel 718 süper alaşımına genellikle aşağıda belirtilen şekillerde ısıtılma işlemleri uygulanır (Special Metals Corporation, 2007):

- Alaşıma 927-1010 °C’de solüsyona alma ısıtılma işlemi uygulanır. Ardından genellikle suda hızla soğutulur ve 718 °C’de 8 saat süreyle çökelme sertleşmesi uygulanır. Fırın içerisinde 621 °C’ye kadar soğutulup, bu sıcaklıkta toplam 18 saatlik yaşlandırma süresi için tutulur ve ardından hava ile soğutulur.
- Alaşıma 1038-1066 °C’de solüsyona alma ısıtılma işlemi uygulanır. Ardından genellikle suda hızla soğutulur ve 760 °C’de 10 saat süreyle çökelme sertleşmesi uygulanır. Fırın içerisinde 649 °C’ye kadar soğutulup, bu sıcaklıkta toplam 20 saatlik yaşlandırma süresi için tutulur ve ardından hava ile soğutulur.

Alaşıma elementleri ve etkileri

Inconel 718 önemli miktarda demir, niyobyum ve molibden ile az miktarda alüminyum ve titanyum gibi elementler içeren çökelme sertleştirmeli bir alaşımdır (Thomas ve ark., 2006). Alaşıma kimyasal bileşim sınırları genel olarak Tablo 3.4’te gösterildiği gibidir (Special Metals Corporation, 2007).

Tablo 3.4. Inconel 718'in kimyasal bileşim sınırları (Special Metals Corporation, 2007)

Element	%
Nikel (+ Kobalt)	50 - 55
Krom	17 - 21
Demir	Dengeli
Niyobyum (+ Tantal)	4,75-5,50
Molibden	2,80-3,30
Titanyum	0,65-1,15
Alüminyum	0,20-0,80
Kobalt	maks. 1,00
Karbon	maks. 0,08
Manganez	maks. 0,35
Silisyum	maks. 0,35
Fosfor	maks. 0,015
Kükürt	maks. 0,015
Boron	maks. 0,006
Bakır	maks. 0,30

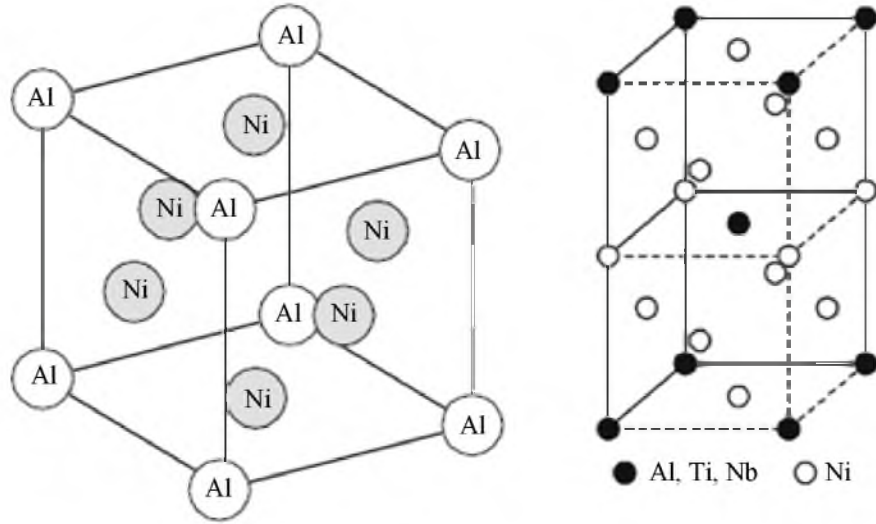
Nikel ve krom, alaşım yapısında YMK γ' fazı olarak kristalleşir ve yüksek sıcaklıklarda korozyon, oksidasyon, karbürleme ve diğer hasar mekanizmalarına karşı direnç sağlar. Niyobyum, tetragonal kristal yapıya sahip yarı kararlı intermetalik γ'' (Ni_3Nb) bileşiğinin oluşturulması için yapıya eklenir. Alüminyum ve titanyum, γ'' parçacıklarından daha düşük sertleştirme etkisine sahip olan basit kübik kristal yapıdaki intermetalik γ' ($\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$) şeklinde çökelmeleri için yapıya eklenir. Karbon MC karbür ($\text{M} = \text{Ti}$ veya Nb) formunda çökmesi için eklenir. Karbon miktarı, titanyum ve niobyumun γ' ve γ'' formunda çökmesine izin verecek kadar düşük olmalıdır. Molibden, katı çözelti sertleştirilmesi ile mekanik direnci artırmak için Inconel 718'de sıkça kullanılmaktadır (Thomas ve ark., 2006).

Inconel 718, genellikle mekanik ve korozyon direncinin artırılması için alüminyum, titanyum, niobyum, kobalt, bakır ve tungsten ile ekstra alaşımlandırılır. Demir %1 ile %20 arasında değişen miktarlarda alaşımın yapısında bulunabilir (Thomas ve ark., 2006). Demir elementi ana sertleştirici faz olan γ'' nin oluşması için katalizör görevi görmektedir. Düşük miktardaki zirkonyum ve % 0,003 ile % 0,03 arası bir miktarda eklenen bor alaşımın sıcak işlenebilirlik ve gerilme-kopma özelliklerini geliştirmeye yardımcı olmaktadır. Az miktarda eklenen bor ve karbon sünekliliği ve tane sınırı mukavemetini arttırmaktadır (Klopp, 1995; Davis, 1997; İnanır, 2012).

Mikroyapı özellikleri ve faz dönüşümleri

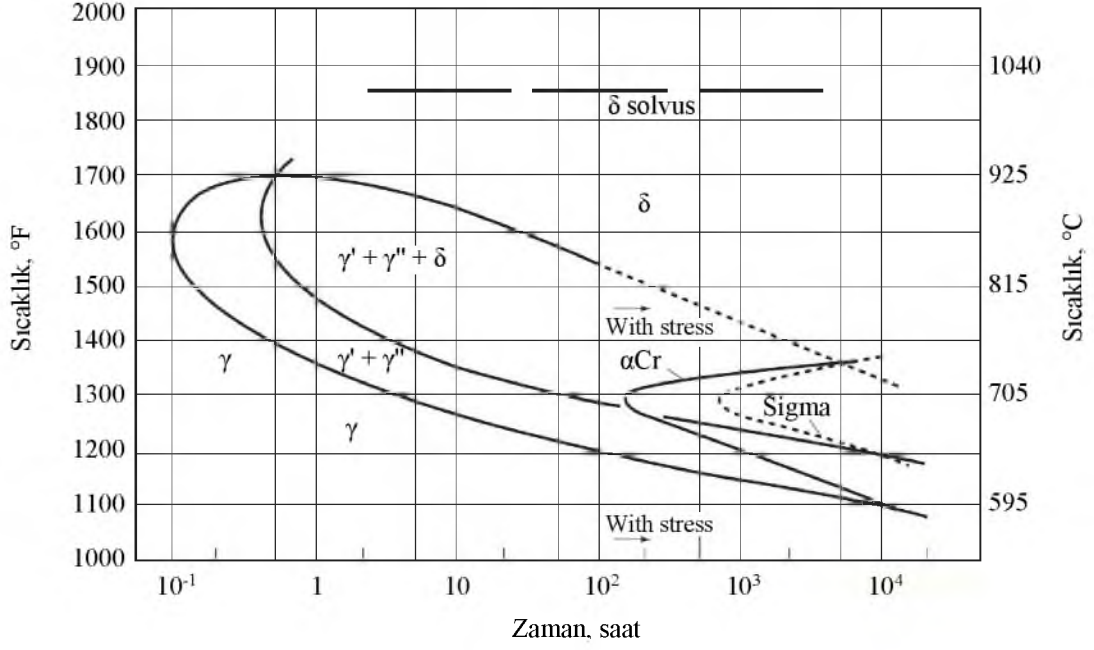
Inconel 718 eşeksenli ve polikristalli bir mikroyapıya sahiptir (Kıvak ve ark., 2010). Ayrıca çökme davranışı ve yaşlanma etkileri açısından alaşımların en karmaşık

olanıdır (Swindeman ve Swindeman, 2008). Inconel 718'de çökeldiği bilinen başlıca intermetalik fazlar, yarı kararlı γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$) ve γ'' (Ni_3Nb) fazları ile δ (delta) (Ni_3Nb) fazıdır. γ' , yaklaşık olarak % 4'lük bir hacim oranı ile YMK kafes yapısına sahip uyumlu bir fazdır (Kalluri ve ark., 1994). γ' , Inconel 718 alaşımında ikincil güçlendirme fazıdır (Belan ve ark., 2017). Inconel 718 öncelikle YMK matriste elipsoidal ve disk şeklindeki parçacıklar halinde uyumlu bir şekilde çökelen hacim merkezli tetragonal (HMT) kristal yapıya sahip γ'' fazı ile sertleştirilir. Ortorombik δ fazı, tane sınırlarında çekirdeklenir ve matris içindeki düzlemler boyunca plakalar halinde büyür. Ayrıca Laves, birincil MC karbürler ve TiN (Titayum nitrür) fazlarının oluşumu Inconel 718'de görülmektedir (Kalluri ve ark., 1994). Laves fazının bir katılma fazı olduğu ve normal olarak homojenleştirilmiş malzemede bulunmadığı kabul edilmektedir (Basile ve Radavich, 1991). Şekil 3.13'te L_{12} kristal yapısına sahip γ' ve DO_{22} kristal yapısına sahip γ'' fazlarının yapıları görülmektedir (Pineau ve Antolovich, 2009). Inconel 718 alaşımının yüksek sıcaklık dayanımına sahip olması, temel olarak γ'' çökeltilerinin sertleştirme etkilerinden ve ayrıca küçük ölçüde γ' çökeltilerinin etkilerinden kaynaklanmaktadır (Olovssjö ve ark., 2010).



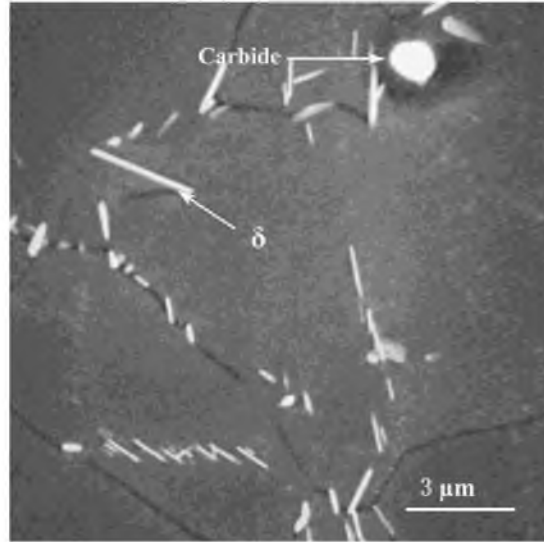
Şekil 3.13. γ' ve γ'' fazlarının kristal yapıları (a) γ' ; (b) γ'' (Pineau ve Antolovich, 2009)

Inconel 718 alaşımının zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramı Şekil 3.14'te verilmiştir (Basile ve Radavich, 1991). Yarı kararlı γ' ve γ'' fazları, diyagramda görüldüğü üzere yüksek sıcaklıklarda δ fazına dönüşmektedir (Muralidharan ve ark., 1996).



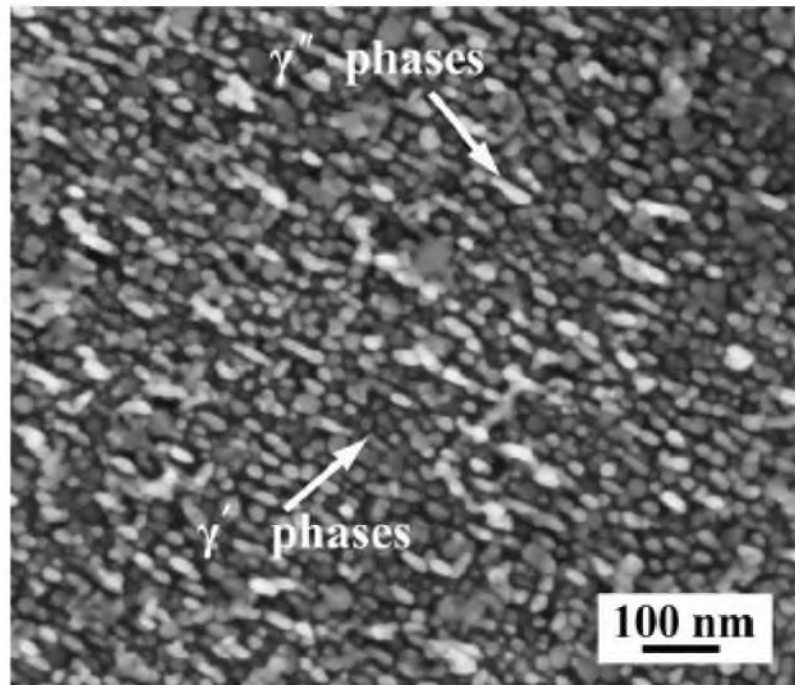
Şekil 3.14. Inconel 718 alaşıma ait zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramı (Basile ve Radavich, 1991)

δ fazının γ ile uyumsuz olması alaşım özelliklerini zayıflatır. Bu faz, çoğunlukla (111) düzlemlerinde plaka şeklinde büyür veya tane sınırlarında çekirdeklenir (Muralidharan ve ark., 1996). Döküm alaşımlarda yüksek niyobyum derişimi, tane sınırlarında δ fazının çekirdeklenmesini ve büyümesini artırır (Radhakrishna ve Rao, 1994). δ ve γ'' fazlarının her ikisinde niyobyum esaslı olduğundan δ fazının büyümesi, γ'' fazında karşılık gelen bir kayıp ile gerçekleşir. Morfolojisi nedeniyle δ fazı alaşımın sertleşmesine katkıda bulunmaz. Tam tersine yapıda bulunan γ'' fazını tüketerek sertleşebilirliği azaltır. Ayrıca bu fazın varlığı sıcak çatlamaya olan yatkınlığı da artırır. Ancak δ fazının, çözelti işlemleri sırasında tane büyümesini sınırlamada etkili olması ve uygun bir morfolojiye sahip tane sınırı δ 'nın, tane sınırı sünme kırılmasına karşı direnç sağlaması gibi bazı etkileri de vardır (Azadian ve ark., 2004). Inconel 718 alaşımının mikroyapısında oluşan δ fazı Şekil 3.15'te gösterilmiştir (Liu ve ark., 2005).



Şekil 3.15. Inconel 718 alaşımasının mikroyapısında oluşan δ fazı (Liu ve ark., 2005)

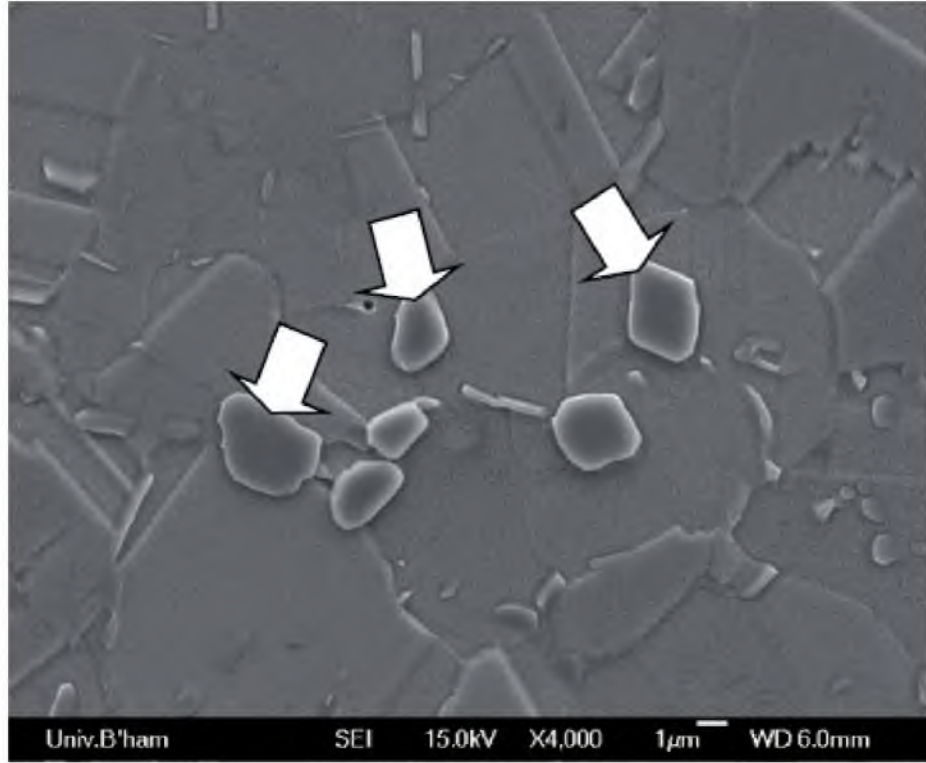
γ' ve γ'' fazları kolay tanımlanmalarına yardımcı olan belirgin şekilde farklı morfolojilere sahiptir (Muralidharan ve ark., 1996). Şekil 3.16'da Inconel 718 alaşımında bulunan plaka benzeri γ'' fazları ile küresel γ' fazları görülebilmektedir (Chen ve ark, 2019).



Şekil 3.16. Inconel 718 alaşımında γ' ve γ'' fazları (Chen ve ark, 2019)

M_6C karbürleri çok yüksek silisyum içeren Inconel 718 alaşımlarında görülmüştür. Çoğu güncel alaşımda silisyum içeriği yaklaşık %1'dir ve bu alaşımlarda

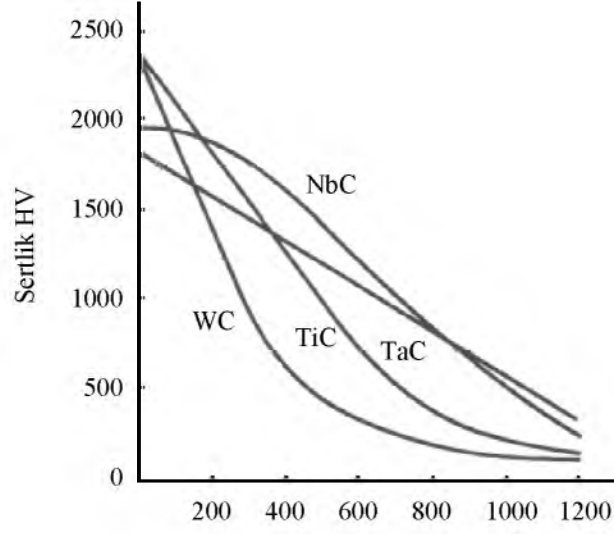
M₆C saptanmamaktadır. Modern Inconel 718 alaşımlarında bulunabilen tek karbürler MC karbürleridir (Basile ve Radavich, 1991; Niang ve ark., 2010). MC karbürler genellikle iri taneli ve yoğun şekilde paketlenmiş YMK yapıya sahiptir. Çok güçlüdürler ve yüksek çöktirme ve ergime sıcaklıkları ile doğadaki en kararlı bileşiklerden bazıları olarak kabul edilirler. Süper alaşımın katılaşmasından kısa bir süre sonra işlem sırasında çökelirler. Genellikle alaşım matrisiyle ya çok az oryantasyon ilişkisi vardır ya da hiç yoktur. Şekil 3.17’de Inconel 718 alaşımındaki Nb ve Ti esaslı karbürler görülmektedir (Kitaguchi, 2012).



Şekil 3.17. Inconel 718 alaşımında Nb ve Ti esaslı iri karbür taneleri (Kitaguchi, 2012)

İş parçasında bulunan karbür gibi sert parçacıklar takımda aşınmaya neden olur. Inconel 718'deki titanyum ve niyobyum, aşındırıcı ve iri çöktirler olan birincil karbürleri oluşturur. TiC, oda sıcaklığında 3200 °C'de bir ergime noktasına ve 2200 HV sertliğe sahiptir. Bu karbürler ergime noktalarına kadar hiçbir önemli faz dönüşümüne uğramaz ve bu nedenle mevcut en kararlı bileşiklerden bazılarıdır. Özelliklerinden dolayı üretim sürecindeki farklı dövme adımlarından önemli ölçüde etkilenmezler. Şekil 3.18’de görüldüğü üzere TiC ve NbC, şekilde sunulan tüm sıcaklıklarda sinterlenmiş karbür takımdaki WC'den daha serttir. Bu durum, iş parçasındaki karbürlerin kesme

işlemi sırasında takımındaki karbürlerden daha sert olduğu anlamına gelir (Krook ve ark., 2005).



Şekil 3.18. Farklı karbürlerin sıcaklığa bağlı sertlik değişimi (Krook ve ark., 2005)

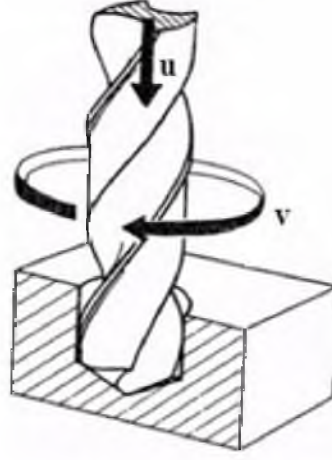
Birincil karbürler, katılaşma işlemi sırasında nitrürler üzerinde çekirdeklendiğinden dolayı nitrojen içeriği alaşım için önemli bir bileşendir. Tüm birincil karbürlerin nitrürler üzerinde çekirdeklendiğini varsayıldığında, nitrür miktarı birincil karbür miktarını ve niyobyum ile titanyum miktarı ise birincil karbürlerin boyutunu belirleyecektir. Karbürler işlenebilirliği olumsuz etkilediğinden dolayı karbür morfolojisinin kontrolü önemli bir konudur (Krook ve ark., 2005).

3.3. Delik Delme

Delik delme, malzemeden talaş kaldıran bir takımla silindirik delik açma yöntemlerinin tamamı için kullanılan bir terimdir. Delme terimi, derin veya kısa delik delme işlemleri için olduğu kadar, bunlardan sonra yapılan raybalama, broşlama, ovalama (veya parlatma), havşa yuvası açma gibi çeşitli son işlemler için de kullanılır. Bu işlemlerin ortak noktası, ana dönme hareketinin doğrusal bir ilerleme hareketi ile beraber yapılmasıdır (Çakır, 2000; Kıvak, 2007).

Delik delme, temel olarak doğrusal ilerleme ve dönme olmak üzere iki hareketin birleşiminden oluşur. Bu işlemdeki en önemli parametreler ilerleme ve kesme hızıdır. Bunlar, işlem sırasında meydana gelen kesme kuvvetlerini ve sıcaklığı doğrudan etkileyen ve kullanılan kesici takımın performansını belirleyen faktörlerdir (Kalidas ve

ark., 2001; Yıldız, 2019). Şekil 3.19’da bir takımın dönme ve malzeme üzerinde ilerleme hareketleri gösterilmiştir (Akkurt, 1998; Kivak, 2007).



Şekil 3.19. Takımın ilerleme (u) ve dönme (v) hareketi (Akkurt, 1998; Kivak, 2007)

Delme işleminin olumsuz özellikleri; dış çaptan merkeze doğru sıfıra düşen kesme hızı, talaş tahliyesinin zor olması, takım, talaş ve delik duvarı arasındaki sürtünme ve yapışma süreçleri ve soğutma işleminin dışardan uygulanması durumunda delme noktasına yetersiz erişmesi şeklinde sıralanabilir (Klocke ve ark., 2006)

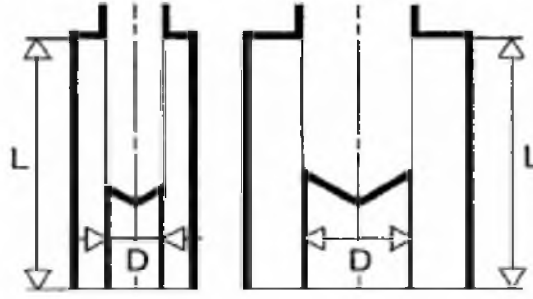
3.3.1. Delik delme işlemleri

İlke olarak tek ağza sahip takımla (planyalama, tornalama) talaş kaldırma işlemi ile matkapla talaş kaldırma işlemi arasında bir fark yoktur. Fakat delik delmede, kesme sıvısının verilmesi ve talaşın tahliyesinin daha zor olduğu, matkap ile işlenen yüzeylerin ve talaş ile helis kanalları arasında sürtünmenin daha fazla olduğu, ağız boyunca talaş açısının değişmesi ve bundan dolayı ağız boyunca farklı kesme koşullarının olduğu dikkate alındığında, matkapla talaş kaldırmanın tek ağızlı takımla talaş kaldırmaya göre çok daha karışık ve zor şartlarda meydana geldiği sonucuna varılır (Akkurt, 1998; Kivak, 2007).

Delik delmede işlemin kontrolü ve talaşın boşaltılması delik derinleştikçe zorlaşır. Derin delik delme işlemlerinde delik ve yüzey kalitesi daha büyük bir öneme sahipken, kısa deliklerde ise daha ekonomik bir işlem için daha yüksek talaş debilerinde çalışma önem kazanmaktadır. Derin delik delme işlemi ile kısa delik delme işlemi arasındaki fark yalnızca çap ve delik derinliği ilişkisiyle sınırlandırılmamıştır. Kalite,

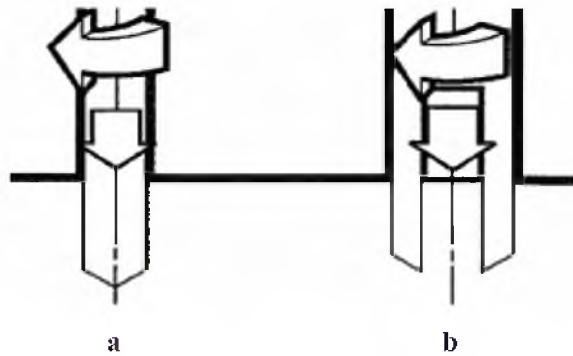
talaş debisi ve talaş boşaltma ile ilgili parametreler de kısa delik delme ile derin delik delme işlemlerini ayıran temel özelliklerdir (Kıvak, 2007).

Delme işleminde en ideal sonuçların elde edilmesi için delme boyunun, delik çapının üç katı ya da üç katından daha düşük olması gerekir (Kıvak ve ark., 2010). Delinen deliğin boyu, deliğin çapından 10 kat daha büyük ise bu delikler uzun delik olarak isimlendirilir. Bu boy-çap oranı 4 ile 10 arasında olan delikler de normal delik olarak adlandırılır. Delik boyu ve çapı oranı 3 veya daha düşük ise bunlara kısa delik denir (Şekil 3.20) (Çakır, 2000). L/d oranının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde de artış görülmektedir (El-Khabeery ve ark., 1991).



Şekil 3.20. Delik çapı ve boyu ilişkisi (Çakır, 2000)

En yaygın delik delme yöntemi, belirli çapta yekpare bir takım kullanılarak dolu bir malzemenin, tek operasyonda delinmesidir (Şekil 3.21.a). Hem dıştan hem de içten kesen bir takımın kullanıldığı çevreden kesme yöntemi ise prensipte büyük çaplı deliklerin delinmesi için kullanılan ve bir önceki delik delme işlemindeki kadar güç gerektirmeyen bir yöntemdir. Bu delme işlemi ön delik delme işleminden sonra yapılmaktadır (Şekil 3.21.b) (Çakır, 2000).

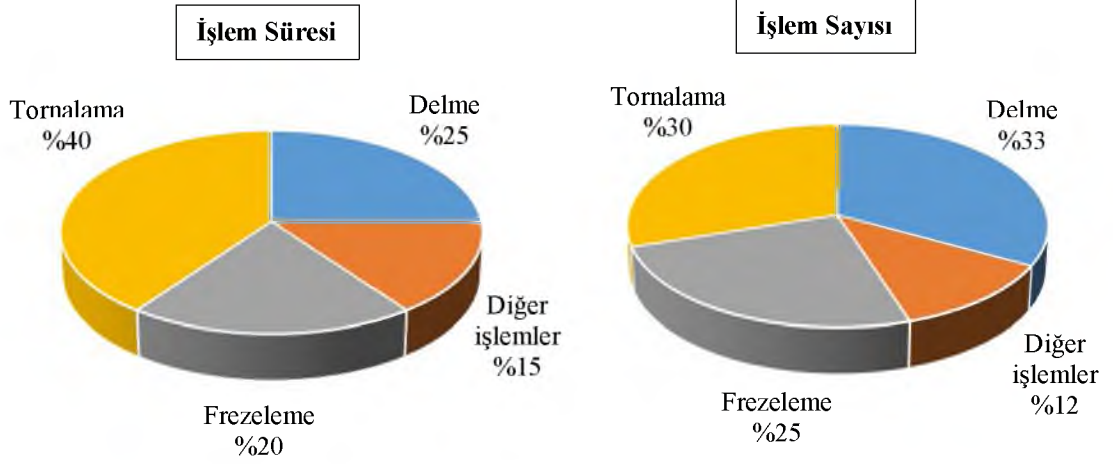


Şekil 3.21. Delme işlemleri, a) tek operasyonda delme işlemi, b) ön delik delme işleminden sonra yapılan delme işlemi (Çakır, 2000).

Bazı işlemlerde delinecek deliğin toleransı ve yüzey kalitesi iyileştirilmek istendiği zaman, delme işleminin ardından bir delik büyütme işleminin uygulanması tavsiye edilir. Bu delme yöntemi normal delik delme matkaplarıyla gerçekleştirilir ve yeterli hassasiyetin sağlanabilmesi için özen gerektiren bir yöntemdir. Kullanılan takımın asimetrik takım olması hâlinde önceden delinmiş delikler takımın eğilmesine neden olur. Normal delik delme işlemlerinde kullanılan kesici takımların birçoğu kendi kendine merkezleme özelliğine sahiptir. Önceden delinmiş bir delikte takım merkezi ararken kesici kenarlarda düzensiz yüklemelerin meydana gelmesi, takımın eğri bir yol izlemesine ve oval bir delik delmesine neden olur (Kıvak, 2007).

3.3.2. Delik delme işlemlerinin yeri

Delik delme, talaş kaldırma işlemlerinin %33'ünü oluşturan en önemli işlemlerden biridir. Ayrıca talaş kaldırma işlemlerine harcanan zamanın %25'ini delik delme işlemleri oluşturmaktadır. Delme işlemi, genellikle bir parçanın imalatında son adımlardan biri olarak gerçekleştirilir. Tornalama ve frezeleme işlemleri delme işlemi ile karşılaştırıldığında, sürecin kinematiği ve dinamiği, işlem kontrolü, talaş kaldırma ve kesme ısısının dağıtımı açısından daha basit görülebilen işlemlerdir. Öte yandan delme işlemi elverişsiz koşullar altında gerçekleşir. Talaş oluşumu kapalı alanda gerçekleşir ve görülemez. Matkabın yivlerinde sınırlı talaş kaldırma alanı vardır. Takım, talaş ve iş parçası malzemesi arasındaki sürtünme önemlidir ve üretilen yüzeylerden ısı akışı tatmin edici değildir. Son olarak, dönme ekseninde sıfır ve kesme kenarı boyunca değişken olan kesme hızı önemli bir sorundur. Bu nedenle kesici takımın ve işlem sürecinin, belirli işleme görevine, iş malzemesine, üretilecek deliğin gerekli kalitesine ve gerekli işlem güvenilirliği seviyesine uyarlanması gerekir. Bunlar, çok sayıda takım geometrisi ve takım malzemesinin yanı sıra delik delme stratejilerinin geliştirilmesinin nedenleridir. Şekil 3.22'de delik delme ve diğer talaş kaldırma işlemlerinin, işlem sayısı ve işlem süresi oranları görülmektedir (Tönshoff ve ark., 1994).



Şekil 3.22. Delme işleminin diğer operasyonlar ile karşılaştırılması (Tönshoff ve ark., 1994)

Delik delme, havacılık ve uzay endüstrisinde en önemli işlemlerden biridir. Delik delme genellikle gerçekleştirilen son işlemdir ve ortaya çıkan maliyetler nedeniyle sürecin güvenilirliği özel önem gerektirir (Sharman ve ark., 2008). Bu işlem havacılık sanayinde tüm talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık %40 kadarını oluşturmaktadır. Küçük bir jet uçağı için dahi 245 binden fazla delik delinmesinin gerekliliğı, söz konusu tahminleri desteklemektedir (Ertunç ve Sevim, 2001).

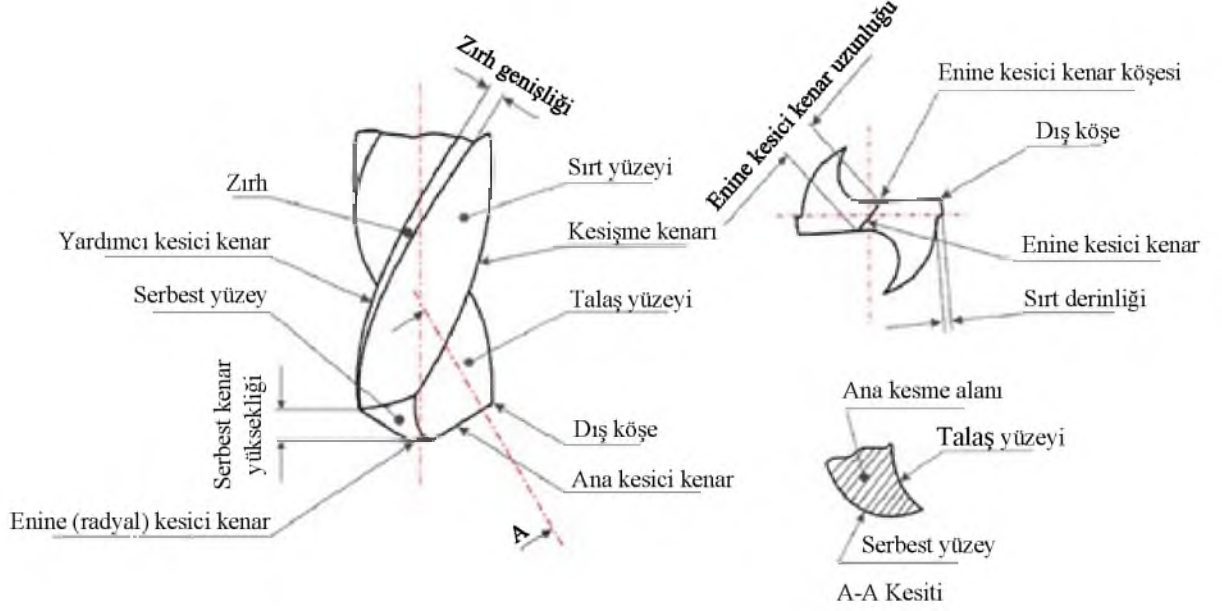
3.3.3. Matkaplar

Matkap, delik delme ve genişletme işlemlerinde kullanılan, konik bir çekirdek etrafına helisel olarak sarılmış iki veya daha fazla kesici ağza sahip bir kesici takım türüdür. Endüstride ihtiyaca uygun olarak farklı şekillerde ve malzemelerde pek çok çeşidi mevcuttur. Son yıllarda kullanımı artan matkap türleri arasında, özellikle kesici kenarlarında farklı malzemeli parçalar takılı olan takma uçlu matkaplar türleri yer almaktadır (Çakır ve ark., 2014)

Matkaplar genelde sap ve gövde olmak üzere iki kısımdan oluşur. Tutturma için kullanılan sap kısmı silindirik veya konik şekildedir. Kanallı kısım kaynakla birleştirilerek veya sap ile yekpare bir şekilde üretilmektedir. Her matkap türünde olmasa da kanal ile sap arasında boyun denilen bir bölüm vardır (Çakır ve ark., 2014).

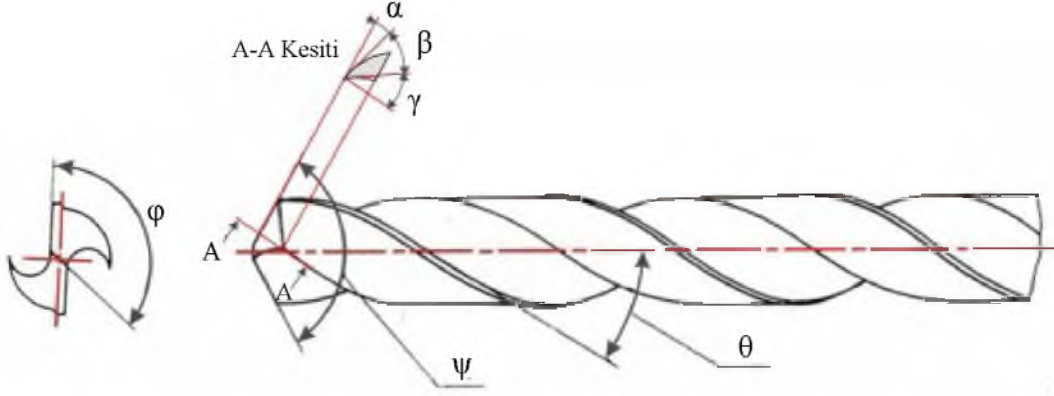
Kesici takımda asıl kesme olayı matkap ucunda gerçekleşmektedir. Matkabın ağız sayısına göre bu kısımda iki veya üç ana kesici kenar ve her bir ağzın birer serbest yüzeyi ve talaş yüzeyi bulunur. Ana ağızların meydana getirdiğı koni tam olarak sivri

değildir. Aralarında çekirdek denilen yassı bir bölüm bulunur. Enine kesici kenarı çekirdeğin uç genişliği oluşturur. Uç kısmındaki konik alana serbest yüzey denir. Sırt olarak adlandırılan kısım matkabın kanallı bölümünde iki kanal arasında kalan yüzeydir. Sırt üzerinde helisel olarak matkap kanalı boyunca uzanan yüzey zırh olarak adlandırılır. Yardımcı kesici kenar olarak adlandırılan kısım ise zırh yüzeyinin kanal tarafındaki kenarıdır. Matkap kısımları Şekil 3.23'te gösterilmiştir (Çakır ve ark., 2014).



Şekil 3.23. Matkaptaki kesici kenar ve yüzeyler (Çakır ve ark., 2014).

Tek uçlu kesici takımlara kıyasla matkaplar çok daha karmaşık bir geometriye sahiptir. Daha basite indirgenmesi için matkabın bir ağzı tek uçlu kesicilere benzetilebilir. Böylelikle tek ağızlı takımlarda olduğu gibi matkabın ana kesme ağzının geometrisi tayin edilir. Burada serbest açı (α), kama açısı (β) ve talaş açısı (γ) gibi kesme açıları vardır. Ayrıca matkapta helis açısı (θ) kanalların matkap eksenine göre konumunu, enine kesme açısı (φ) enine kesme ağzının konumunu ve uç açısı (ψ) ise iki ana kesici kenarların birbirine göre açısal konumunu belirtir. Matkaptaki bu açılar Şekil 3.24'te gösterilmiştir (Çakır ve ark., 2014).



Şekil 3.24. Matkapta açılar (Çakır ve ark., 2014)

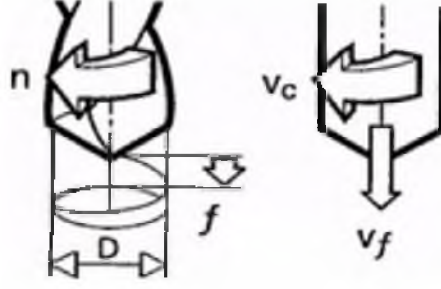
3.3.4. Temel tanımlar ve Formüller

Delme işleminde yapılacak temel tanımlar, değiştirilebilir uçlu takım için de yekpare takım için de aynıdır. Bu işlemde ana hareket iş parçası veya takım tarafından yapılan dönme hareketidir. Ana hareketi oluşturan ana mil hızı (n - dev/dak), dakikadaki devir sayısı olarak ifade edilir. Delik delme için kesme hız (V_c - m/dak), çevresel hızdan faydalanılarak belirlenir ve bu hız dakikadaki devir sayısının bilinmesi durumunda hesaplanabilir. D (mm) takım çapı olmak kaydıyla matkap bir dönüşünde, çevresi $\pi \times D$ olan bir daire çizmektedir (Şekil 2.27). Eğer çap milimetre (mm) cinsinden verilmiş ise, kesme hızının m/dak cinsinden ifade edilebilmesi için sonucun 1000'e bölünmesi gerekir (Kıvak, 2007).

$$V_c = (\pi \times D \times n) / 1000 \quad (3.1)$$

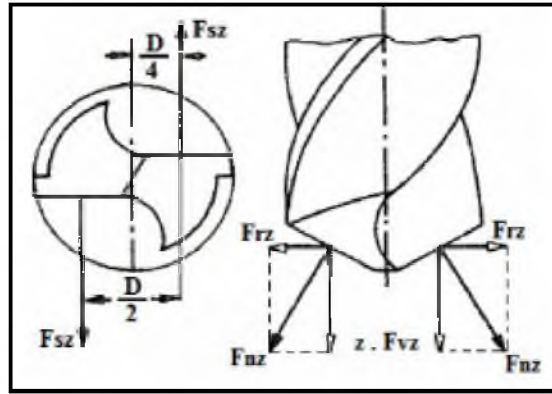
Parçaya nüfuziyet hızı veya ilerleme hızı (V_f - mm/dak), birim zamanda alınan yol olarak tarif edilir ve takımın iş parçasına veya alternatif olarak iş parçasının takıma göre ilerlemesini ifade eder (Şekil 3.25). Bu aynı zamanda tablanın veya tezgâhın ilerleme hızı olarak da bilinmektedir. Takımın veya iş parçasının bir devirdeki ilerlemesini ifade eden devir başına ilerleme (f - mm/dev), ilerleme hızını (mm/dak) hesaplamak için kullanılan bir büyüklüktür (Kıvak, 2007).

$$V_f = f \times n \quad (3.2)$$



Şekil 3.25. Kesme ve ilerleme hızı (Çakır, 2000)

Kesme kuvveti, malzemenin işlenebilirliğini belirten parametrelerden biridir. İşleme esnasında genellikle düşük kesme kuvvetleri istenmektedir. Kesme kuvveti, işlenmiş yüzeyin kalitesini ve kesici takımın ömrünü etkilemektedir. Kesme momentinin artması ise malzeme ve kesici takım arayüzünde meydana gelen ısının artmasında neden olmaktadır. Delme işleminde matkabın bir kesici ağzı dikkate alındığında, bu kısımda Şekil 3.26'da gösterildiği gibi kesme kuvveti (F_{sz}), radyal kuvvet (F_{rz}) ve ilerleme kuvveti (F_{vz}) oluşmaktadır. Her ağızda oluşan radyal kuvvetler, kesici uç konumu itibarıyla birbirini dengelemektedir. Bu sebeple delme işleminde F_{vz} ve F_{sz} kuvvetleri etkili olmaktadır (Bayraktar ve ark., 2017).



Şekil 3.26. Matkabı etkileyen kuvvetler (Bayraktar ve ark., 2017)

Başarılı bir delik delme işlemi için ilerlemenin ve delik delme hızının nasıl hesaplandığını bilmek kritik önem taşımaktadır. Aşağıda delik delme işlemleri için ihtiyaç duyulan bazı formüllere yer verilmiştir (Sandvik Coramat, 2020):

Devir başına ilerleme, (f_n) mm/dev:

$$f_n = V_f / n \quad (3.3)$$

İş mili hızı, (n) dev/dak:

$$n = (V_c \times 1000) / (\pi \times D_c) \quad (3.4)$$

Talaş kaldırma oranı, (Q) cm³/dak:

$$Q = (D_c \times f_n \times V_c) / 4 \quad (3.5)$$

İşleme süresi, (T_c) dak:

$$T_c = l_m / V_f \quad (3.6)$$

3.3.5. Yüzey Pürüzlülüğü

Boru geometrisine sahip parçaların kullanımı endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. Birbiri üzerinde hareket etmesi için tasarlanan parçaların yüzey pürüzlülüğü ve iç yüzey kalitesi bu parçaların performansında önemli bir rol oynamaktadır. Delik iç yüzeyleri bitirme işlemlerinde pek çok problemle karşılaşıldığından, üretimde zaman olarak büyük yer tutmaktadır (Akkurt, 2009).

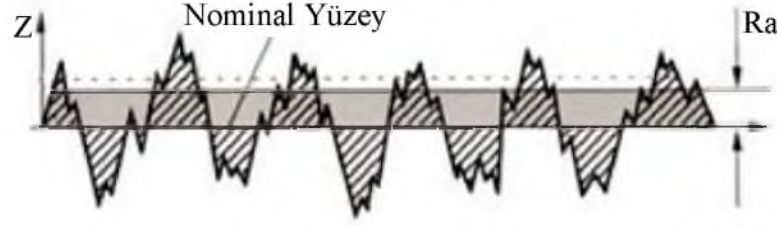
İşlenmiş parça yüzeylerinin tribolojik özellikleri, yüzey dokusundan birinci derecede etkilenmektedir. Yüzey pürüzlülüğü sadece sürtünme, yağlama ve aşınma gibi tribolojinin geleneksel konularında değil aynı zamanda hidrodinamik, sızdırmazlık, ısı iletimi ve elektrik gibi farklı alanlarda da dikkat edilmesi gereken önemli bir faktördür. Bu nedenle makina parçalarında yüzey pürüzlülük değerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Talaşlı imal usulleri kullanılarak yapılan yüzey işlemleri pek çok değişkenden etkilenebilmektedir (Çoğun ve Özses, 2002).

Yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Kaplan, 2010):

- Kesme hızı
- İlerleme miktarı
- Talaş derinliği
- Kesici takım geometrisi
- Kesici takımdaki titreşimler
- Talaşın kesici uçun üzerine yapışması (BUE),

- İşlenen iş parçasında medyana gelen titreşim ve balans
- İşlenen malzemenin süreksiz talaş vermesi

Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde ortalama değer R_a sembolü ile gösterilir. Bu değer, Şekil 3.27’de görüldüğü üzere yüzeyin nominal ölçüden artı ve eksi yöndeki çukur ve yükselti ölçülerinin ortalamasını μm cinsinden veren değerdir (Demir ve Toktaş, 2014).



Şekil 3.27. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a) (Demir ve Toktaş, 2014)

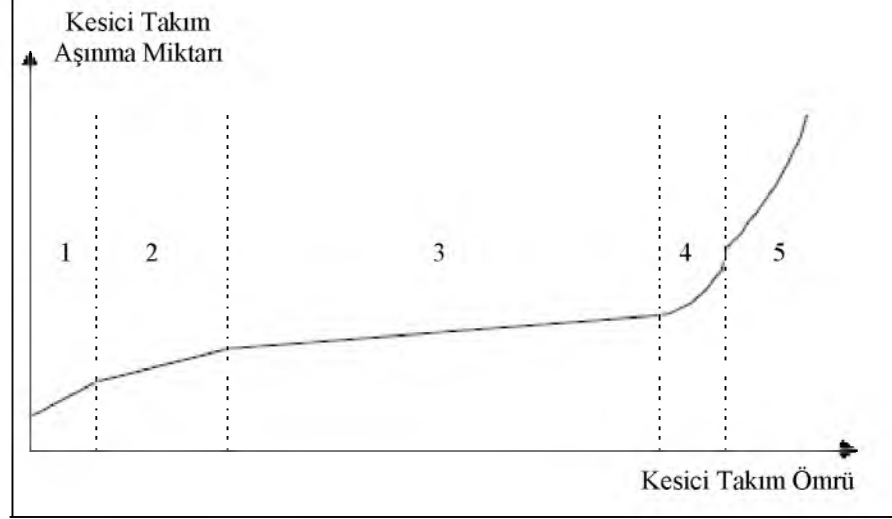
3.3.6. Aşınma

Aşınma, birbirine temas eden yüzeylerde mekanik etkilerle meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanır. DIN 50320’ye göre fiziksel olarak aşınmanın nedenleri dört ana başlık altında incelenir: Difüzyon, adhezyon, abrazyon ve metal yorulması. En sık karşılaşılan aşınma mekanizmaları abrazyon ve adhezyon tipi aşınmalar olmasına karşın, bu olayı tek başına bir nedene bağlamak yerine adları anılan dört mekanizmanın birleşimi şeklinde tanımlamak daha doğrudur (Ertunç ve Sevim, 2001).

Talaş oluşumu ile takımın yüzeyinde gerçekleşen materyal kaybı şeklinde meydana gelen aşınma abrazyon olarak tanımlanır. İş parçası ile kesici takım arasında yüksek ısıyla meydana gelen kaynaklanma sonucu, metallerin birbirinden parçacık koparmasıyla ortaya çıkan metal kaybına adhezyon denir. Metallerin benzer kimyasal özellikleri nedeniyle adhezyon sırasındaki metal transferine difüzyon denir. Belirli veya tekrarlanan hareketlerin sonucunda mekanik özelliklerin kaybedilmesiyle ortaya çıkan aşınmaya ise metal yorulması denir (Ertunç ve Sevim, 2001).

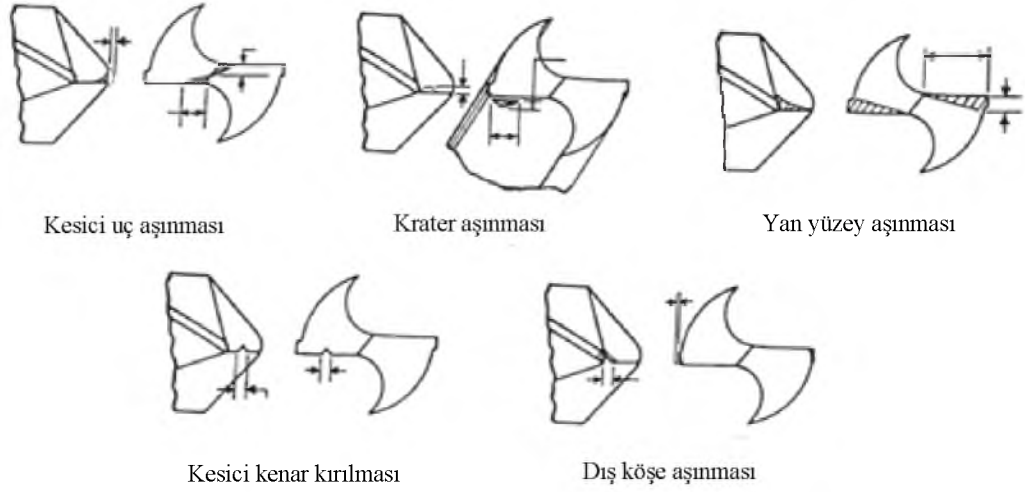
Kesici takımlarda, özellikle matkap ucunda aşınma, başlangıçta yavaş olan ve zamanla ivme kazanarak artan bir süreçtir. Kesici takım, operasyona başlandığı andan itibaren aşınma sürecine girmiş olur. Aşınma ilerledikçe kesici kuvvet değerleri artar, daha fazla ısı meydana gelir ve sonuç olarak aşınma hızlanır. Aşınma, takımın kesici

uçlarının kaybolmasına neden olur. Kesici takımındaki aşınma evreleri toplanan sensör sinyallerine bağlı olarak Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Bu aşınma evreleri; 1. Başlangıçtaki aşınma, 2. Zayıf aşınma, 3. Düzenli aşınma, 4. Aşırı aşınma, 5. Kesici takımın kırılması şeklindedir (Ertunç ve Sevim, 2001).



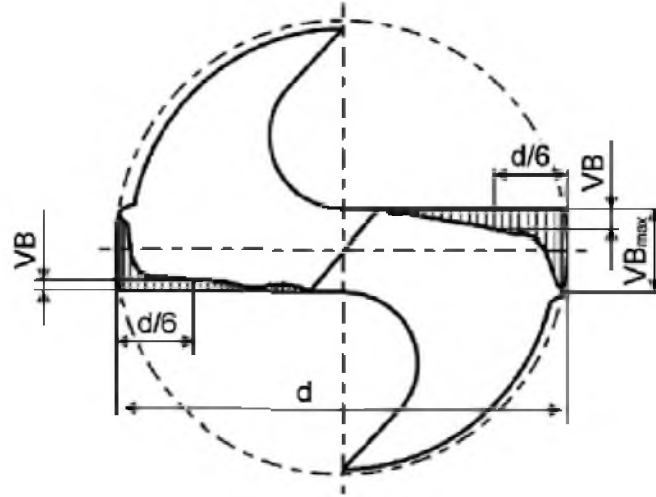
Şekil 3.28. Kesici takım aşınma evreleri (Ertunç ve Sevim, 2001)

Kesici takım üzerinde malzeme türü, ilerleme hızı ve dönme hızı gibi parametrelere bağlı olarak farklı aşınma türleri oluşabilir. Kesici takım aşınma tiplerinin her birinin sensör çıkışları (titreşim sinyalleri, ilerleme kuvveti ve dönme momenti gibi) üzerinde farklı etkileri vardır. Bu sayede aşınma tipini, ölçülen sensör sinyallerine bağlı olarak belirlemek mümkündür. Delme operasyonlarında kesici takım aşınmasını gözlemleyen araştırmacıların çoğu, dış köşe aşınmasının en etkin aşınma tipi olduğunu saptamışlardır. Çünkü kesme kenarlarının en dış köşelerinde en yüksek kesme hızı olduğundan dolayı en fazla aşınma da bu bölgede meydana gelir. Aşınmanın artması ile bu bölgedeki sürtünme artar, ısı enerjisi daha fazla ortaya çıkar ve tüm bunların sonucunda takımda aniden kırılma meydana gelir (Ertunç ve Sevim, 2001). Kesici takım aşınmaları; kesici uç aşınması, krater aşınması, yan yüzey aşınması, kesici kenar kırılması ve dış köşe aşınması olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 3.29'da bu aşınma türleri gösterilmiştir (Abu-Mahfouz, 2003).



Şekil 3.29. Matkapta aşınma türleri (Abu-Mahfouz, 2003)

Araştırmacılar genelde deneyler sırasında serbest yüzey aşınması $V_B = 0,25$ mm veya $V_{Bmax} = 0,5$ mm'ye ulaştığında denemeleri durdurur (Sharman ve ark., 2008; Farid ve ark., 2009). Serbest yüzey aşınması ölçüm yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.30'da verilmiştir (Uçak ve Çiçek, 2018).



Şekil 3.30. Matkapta serbest yüzey aşınmasının ölçülmesi (Uçak ve Çiçek, 2018)

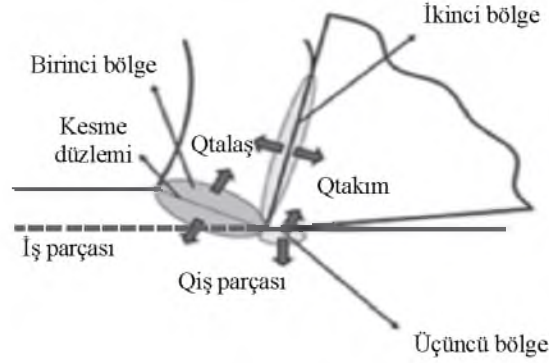
3.3.7. Sıcaklık

Talaş kaldırma işlemi için uygulanan kuvvetlerden meydana gelen mekanik enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir. Kesici takım ile talaş arayüzeyi ve kesici takım ile iş parçası arasında talaş kaldırma amacıyla harcanan enerjiden dolayı, kesici

takım üzerinde yüksek sıcaklıklar meydana gelmektedir. Bu nedenle talaş kaldırma işleminde kesme bölgesinde oluşan sıcaklık ve ısı önemli bir etkindir. Bu etken iş parçası yüzey kalitesi ve kesici takım performansı açısından önemlidir. Yüksek sıcaklıklar, öncelikle yüksek kesme hızlarında sınırlamalara ve takım ömrünün azalmasına neden olur (Şahin ve Acır, 2003).

Talaş kaldırmada iş parçası ile kesici takımda sürtünmeden dolayı meydana gelen sıcaklık, kesici takım ve iş parçası malzemesi özelliklerine bağlı olarak takım aşınmasında büyük rol oynar. Genel olarak takım geometrisi, kesme hızı, ilerleme oranı, çevresel etki gibi etkenlerin işlenebilirlik sıcaklığını artırdığı ve takım aşınmasına yol açtığı bilinmektedir (Şahin ve Acır, 2003).

Kesme ısısı üç farklı deformasyon bölgesinde üretilmektedir. Her bölgenin kendine özgü özellikleri vardır ve bu nedenle her bölgeden akan ısı miktarı farklıdır. Şekil 3.31’de kesme işleminde ısı üretim bölgeleri gösterilmiştir (Cuesta ve ark., 2016).



Şekil 3.31. Kesme işleminde ısı üretim bölgeleri (Cuesta ve ark., 2016)

Birinci deformasyon bölgesindeki sıcaklık, iş parçasının mekanik özelliklerini etkiler. İkincil deformasyon bölgesindeki sıcaklık ise takım ömrünü büyük ölçüde etkiler (Cuesta ve ark., 2016). Talaş kaldırma işlemi sırasında meydana gelene ısıнын %75-80’i talaş tarafından kesme bölgesinden uzaklaştırılır. ısıнын %5-10’luk kısmı iş parçasına ve %10-20’lik kısmı ise kesici takım üzerine nüfuz eder (Şahin ve Acır, 2003).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. İş Parçası Malzemesi

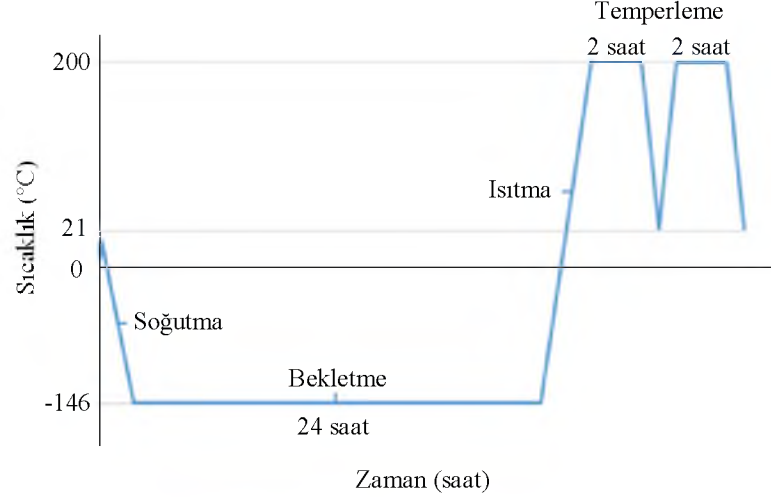
Deneylerde iş parçası malzemesi olarak 2 adet 100x100x10 mm boyutlarında Inconel 718 süper alaşımı kullanılmıştır. Inconel 718 alaşımına ait kimyasal bileşim Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi

Element	Ni	Cr	Fe	Nb + Ta	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Cu
Ağırlıkça %	53.45	18.55	17.64	5.18	5.17	2.92	0.98	0.56	0.23	0.22
Element	Mn	Si	C	P	Ta	B	S	Pb	Bi	Se
Ağırlıkça %	0.09	0.065	0.03	0.008	0.004	0.002	0.001	0.00002	<.000001	<.000001

4.2. Kriyojenik İşlem Uygulanması

Deneylerde kullanılan iki adet Inconel 718 iş parçasından bir tanesine Alper Isıl İşlem firmasında kriyojenik işlem uygulanmıştır. Firmada bilgisayar kontrollü sistemde fırın içerisine yerleştirilen iş parçası 2 saat içinde oda sıcaklığından -146 °C sıcaklığa soğutulmuştur. İş parçası bu derin kriyojenik işlem sıcaklığında 24 saat bekletilmiş ve ardından tekrar oda sıcaklığına getirilmiştir. Son olarak 200 °C’de 2 saat süreyle temperleme işlemi yapılmıştır. Uygulanan temperleme işlemi 2 döngü şeklinde gerçekleşmiştir. Inconel 718 süper alaşımına uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme işlemi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Inconel 718 süper alaşımına uygulanan kriyojenik işlem ve temperleme işlemleri

4.3. Delik Delme Deneyleri

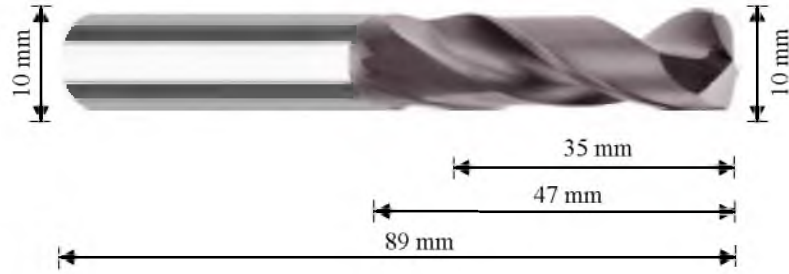
Delik delme işlemleri, Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (YETEM) laboratuvarlarında bulunan Hartford VMC-1020 CNC 4 Eksen Dik İşleme Merkezi tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Tezgâhın görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Hartford VMC-1020 CNC Dikey İşleme Merkezi

4.4. Kesici Takım ve Kesme Parametreleri

Deneylerde Akdeniz Kesici Takımlar firmasından temin edilen Meister marka TiSiN kaplamalı karbür matkaplar kullanılmıştır. TiSiN kaplama, TiN matris içerisinde Si_3N_4 nano kristalleri olan nano kompozit bir dış katmana sahip çok katmanlı bir kaplama türüdür. Bu kaplama, minimum veya sıfır yağlama şartlarında yüksek verimde ve yüksek hızda talaşlı imalat için geliştirilmiştir. Kaplama özellikleri, kesici kenarı abrazif aşınmadan, oksidasyondan ve ısı transferinden korumaktadır. Inconel 718'in kuru kesme şartlarında delinmesinde kullanılan "3DPS.10000" kodlu kesici takım Şekil 4.3'te ve kesici takıma ait özellikler Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan kesici takım

Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan kesici takım özellikleri

Çap	10 mm
Uç Açısı	140°
Helis Açısı	30°
Boşluk Açısı	10°
Kaplama Türü	TiSiN
Kaplama Yöntemi	PVD
Kaplama Kalınlığı	2-2,5 μm
Kaplama Sertliği	3500 HV
Sürtünme Katsayısı	<0,4
Oksidasyon Sıcaklığı	1100 °C

Kesme parametreleri, literatürde bulunan çalışmalar ve üretici kesici takım firmasının önerisi doğrultusunda belirlenmiştir (Farid ve ark., 2009; Kıvak ve ark., 2010; Kıvak ve ark., 2012; Meister, 2020). Deneyler, işlem sürecini çevre açısından daha güvenli hale getirmek ve maliyetleri düşürmek için herhangi bir soğutma veya

yağlama yöntemi kullanmadan kuru kesme şartlarında yapılmıştır. Deneylerde 4 farklı kesme hızı (10, 13, 16, 19 m/dak) ve 3 farklı ilerleme (0,06 - 0,09 - 0,12 mm/dev) değerleri ile iş parçalarına 8 mm kesme derinliğinde kör delikler açılmıştır. 4 farklı kesme hızı ve 3 farklı ilerleme değerlerinde, kriyojenik işlem uygulanmamış (İU) Inconel 718 alaşımına 12 adet ve kriyojenik işlem uygulanmış (KİT) Inconel 718 iş parçasına 12 adet olmak üzere toplam 24 delik delme işlemi yapılmıştır. Tablo 4.3'te deneylerde kullanılan kesme hızı ve ilerleme parametreleri ve kombinasyonları verilmiştir.

Tablo 4.3. Delik delme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri

Deney No	İşlenen Malzeme	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)
1	İU Inconel 718	10	0,06
2	İU Inconel 718	10	0,09
3	İU Inconel 718	10	0,12
4	İU Inconel 718	13	0,06
5	İU Inconel 718	13	0,09
6	İU Inconel 718	13	0,12
7	İU Inconel 718	16	0,06
8	İU Inconel 718	16	0,09
9	İU Inconel 718	16	0,12
10	İU Inconel 718	19	0,06
11	İU Inconel 718	19	0,09
12	İU Inconel 718	19	0,12
13	KİT Inconel 718	10	0,06
14	KİT Inconel 718	10	0,09
15	KİT Inconel 718	10	0,12
16	KİT Inconel 718	13	0,06
17	KİT Inconel 718	13	0,09
18	KİT Inconel 718	13	0,12
19	KİT Inconel 718	16	0,06
20	KİT Inconel 718	16	0,09
21	KİT Inconel 718	16	0,12
22	KİT Inconel 718	19	0,06
23	KİT Inconel 718	19	0,09
24	KİT Inconel 718	19	0,12

Ayrıca, sabit kesme hızı ve ilerleme değerlerinde kriyojenik işlem uygulanmış ve kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçalarında kesici takım ömrünü görmek için delik delme işlemleri yapılmıştır. Deneylerde iş parçalarına 8 mm derinliğinde kör delikler açılmıştır. Her iki iş parçasında birer takım kullanılarak yapılan deneyler $V_{Bmax} = 0,5$ mm, $V_B = 0,25$ mm veya takımda kırılma meydana gelene kadar devam ettirilmiştir. Tablo 4.4'te takım aşınması deneylerinde kullanılan kesme parametreleri verilmiştir.

Tablo 4.4. Takım aşınması deneylerinde kullanılan kesme parametreleri

Deney No	İşlenen Malzeme	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)
1	İU Inconel 718	10	0,06
2	KİT Inconel 718	10	0,06

4.5. Kesme Kuvvetleri Ölçümü

Delik delme işlemleri sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin ölçümü, üç eksenli kesme kuvvetlerini ölçebilen Kistler Tip 9257B Dinanometre ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.5'te kullanılan dinanometrenin teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.5. Kistler Tip 9257B teknik özellikler

Kuvvet Aralığı (Fx, Fy, Fz)	-5 - 10 kN
Tepki Verme	<0,01 N
Hassasiyet Fx, Fy	-7,5 pC/N
Hassasiyet Fz	-3,5 pC/N
Doğal Frekans f_0 (x,y,z)	3,5 kHz
Çalışma Sıcaklığı	0 - 70°C
Kapasitans	220 pF
20 °C'deki Yalıtım Direnci	> 1013 Ω
Topraklama Yalıtımı	> 108 Ω
Ağırlık	7,3 kg

Deneylerde kesme kuvvetlerinin ölçülebilmesi için Inconel 718 iş parçalarına ikişer adet delik açılmış ve dinanometrenin üzerine yerleştirilmiştir. Deney numunesi ile dinanometre arasında doğrudan temas sağlanması sayesinde delme işlemleri sırasında oluşan kuvvet verileri iş parçası üzerinden alınabilmektedir. Şekil 4.4'te numunenin dinanometreye bağlı durumdaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.4. Dinanometreye bağlanmış iş parçası

Dinamometreden gelen kesme kuvvetleri sinyallerinin veri okuma kartına aktarılmasında elektronik sinyalleri artırmak için kullanılan Multichannel Charge Amplifier Type 5070 kullanılmıştır. Şekil 4.5'te kullanılan amplifikatör görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.5. Kistler Type 5070 Amplifikatör

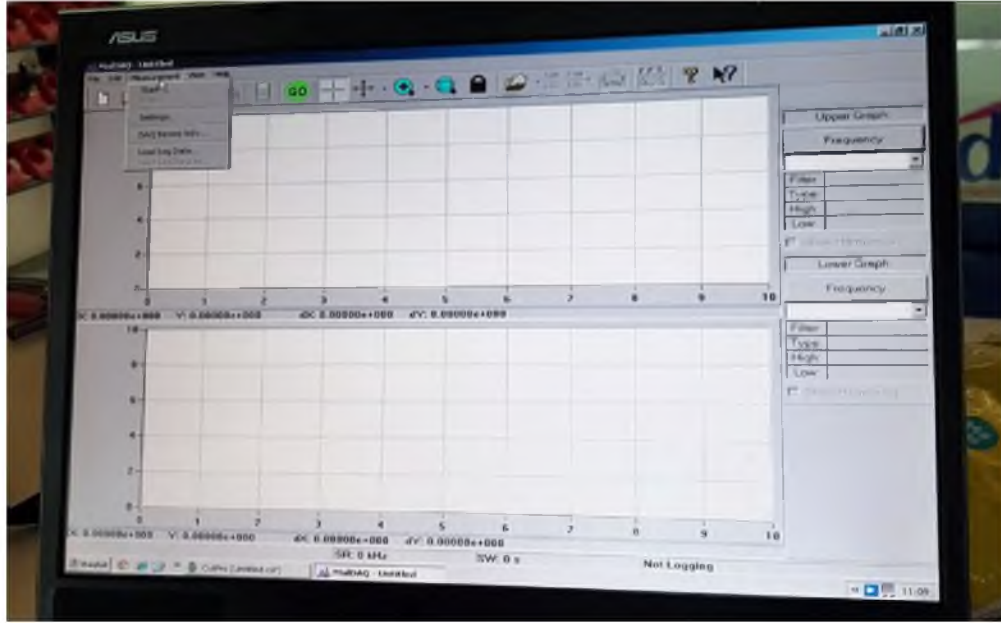
Amplifikatörden gelen kuvvet sinyalleri 4 kanallı DAQ Dynamic Signal Conditioner'e ve buradan da bilgisayara aktırılmaktadır. Bu veri toplama cihazı gelen

sinyalleri bilgisayarda görüntülenebilmesi için dijital verilere dönüştürmektedir. Şekil 4.6’da sinyal düzenleyiciye ait görüntü verilmiştir.



Şekil 4.6. DAQ sinyal düzenleyici

DAQ cihazından gelen veriler bilgisayar ortamında CutPro programının MALDAQ veri toplama modülü ile dışa aktarılmıştır. Bu sayede deneyler süresince elde edilen tüm veriler görüntülenip analiz edilmek üzere kaydedilmiştir. Şekil 4.7’de kullanılan programın görünüşü verilmiştir. Dışa aktarılan verilerle daha sonra MATLAB programında kuvvet ortalamaları alınmış ve grafikler oluşturulmuştur.



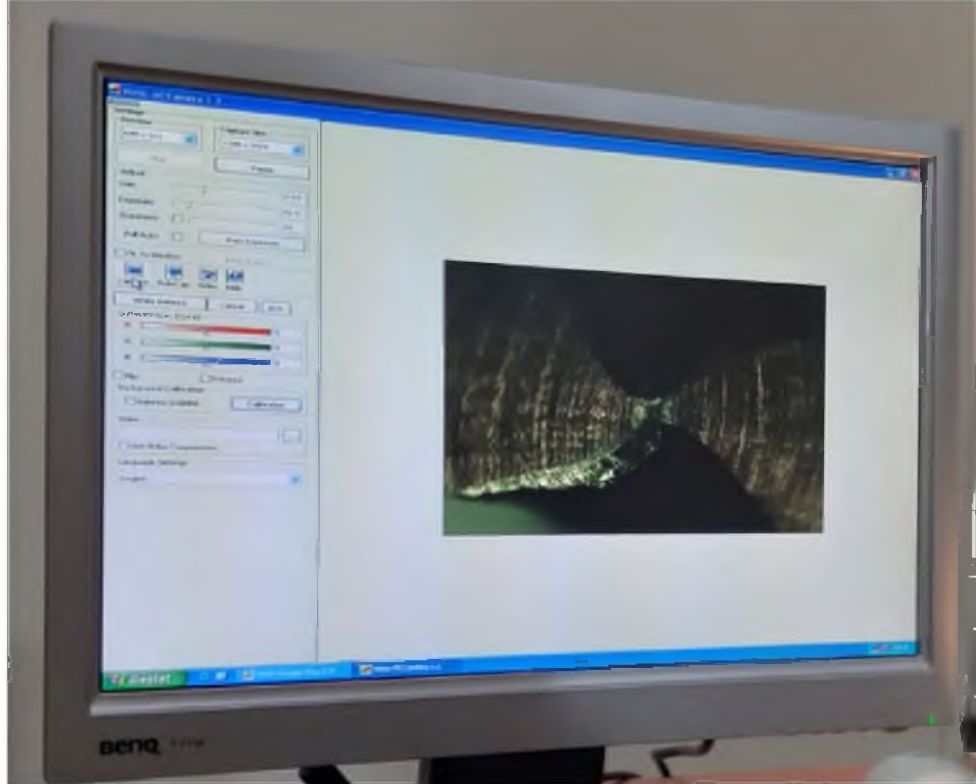
Şekil 4.7. CutPro MALDAQ Modülü

4.6. Takım Aşınması

Takım aşınması deneylerinde her bir delik delme işleminin ardından matkaplar sökülmüş ve OLYMPUS SZ61 mikroskobuna yerleştirilmiştir. Şekil 4.8’de kullanılan mikroskop görüntüsü verilmiştir. Mikroskoba yerleştirilen matkapların görüntüleri bilgisayarda bulunan Motic Images Plus 2.0 ML yazılımı ile kaydedilmiştir. Mikroskobun numune yerleştirme bölümü yeterli olmadığından dolayı her seferinde takımdan sol, sağ ve orta kısım olmak üzere 3 adet görüntü alınmıştır. Şekil 4.9’da bilgisayarda bulunan programının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.8. Olympus SZ61 mikroskobu



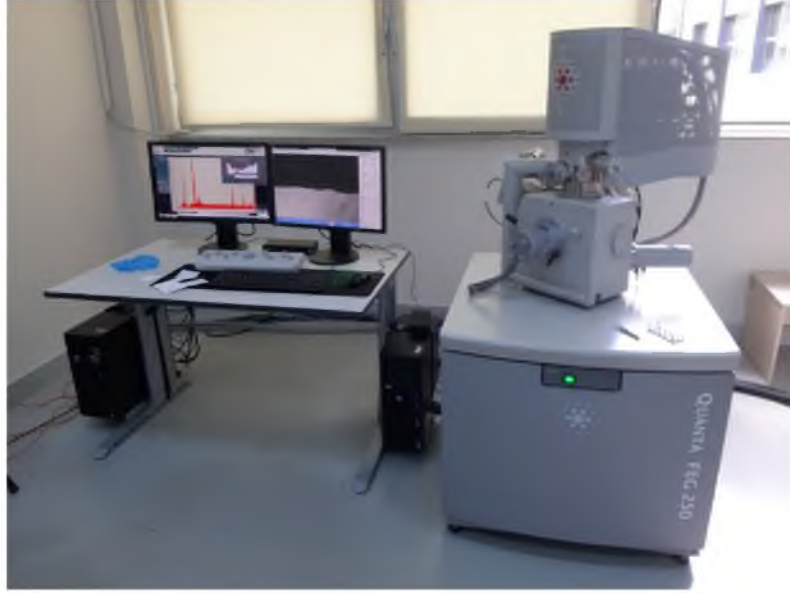
Şekil 4.9. Motic Images Plus 2.0 ML yazılımı

Takım aşınması deneyleri tamamlandıktan sonra SEM ve EDS görüntülerinin alınabilmesi için takımlar, Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM’de bulunan JSEDM Tel Erezyon tezgahına bağlanmış ve taramalı elektron mikroskobuna uygun boyutlarda kesilmiştir. Şekil 4.10’da tel erezyon tezgâhına bağlanan takımların görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.10. Tel erezyon tezgâhına kesilen takımlar

Takım aşınması deneylerinde kullanılan kesici takımların EDS analizi, Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM’de bulunan QUANTA FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11’de cihaza ait görüntü verilmiştir.



Şekil 4.11. QUANTA FEG 250 Taramalı elektron mikroskobu (YETEM)

Takım aşınması deneylerinde kullanılan 2 adet takımın SEM görüntüleri, Dicle Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBTAM) laboratuvarlarında bulunan QUANTA FEG 250 taramalı elektron mikroskobu ile alınmıştır. Şekil 4.12’de cihaz görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.12. QUANTA FEG 250 Taramalı elektron mikroskobu (DÜBTAM)

4.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Inconel 718 iş parçalarının delinen deliklerinde yüzey pürüzlülük ölçümleri, Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM’de Hommel Tester T500 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile alınmıştır. Şekil 4.13’de yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait görüntü

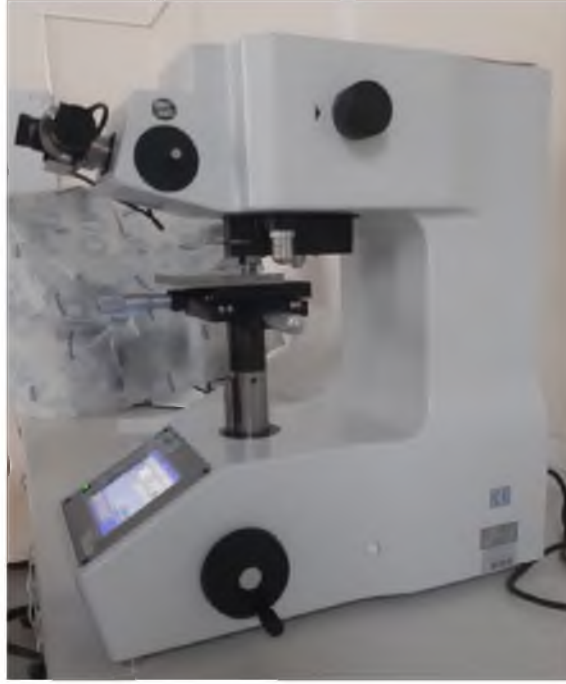
verilmiştir. Numuneler üzerinde bulunan her bir delikten 4 farklı yerden ölçüm alınmış ve ölçümlerin aritmetik ortalamaları alınarak ortalama Ra değeri hesaplanmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümleri 0,8 mm ölçme aralığında ve 4,8 mm ölçme boyunda alınmıştır.



Şekil 4.13. Hommel Tester T500 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

4.8. Mikrosertlik Ölçümü

İU ve KİT Inconel 718 iş parçalarının mikrosertlik ölçümleri Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM laboratuvarlarında bulunan TTS Matsuzawa HWMMT-X3 cihazında yapılmıştır. Şekil 4.14’de mikrosertlik ölçüm cihazına ait görüntü ve Şekil 4.15’de iş parçasında sertlik ölçümü yapılması anında çekilen görüntü verilmiştir.



Şekil 4.14. Sertlik Ölçüm Cihazı



Şekil 4.15. Sertlik Ölçümü

4.9. Mikroyapı

İU ve KİT Inconel 718 iş parçaları, elektron mikroskopunda görüntü alınabilmesi için Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM laboratuvarlarında JSEDM Tel Erezyon tezgâhında 8x8x10 mm olacak şekilde kesilmiştir. Şekil 4.16'da cihaz görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.16. İş parçalarının tel erezyon tezâhında kesilmesi

Metolografik çalışmalar için hazırlanmış olan Inconel 718 iş parçaları, Batman Üniversitesi laboratuvarlarında 200, 400, 800 ve 1200'lük zımparalar ile zımparalanmış ve her zımparalama işleminden sonra işlemin yeterliliği mikroskop altında kontrol edilmiştir. Zımparalama işleminin yeterli olduğu görüldükten sonra numuneler, 3µm'lik elmas pasta ile parlatılarak dağlama işlemine hazır hale getirilmiştir. Deney numuneleri, Kalling's No 2 ayıracı (100ml HCl + 100ml Etanol + 5 gr CuCl₂) ile yaklaşık 2-3 dakika boyunca dağlama işlemi yapılarak SEM analizi için uygun görüntü alınabilecek duruma getirilmiştir (Voort ve Manilova, 2004; Üzgür, 2013; Sohrabi ve ark, 2018; Gao ve ark., 2019). Analiz için hazır hale getirilen numunelerin görüntüsü Şekil 4.17'de verilmiştir. Numunelerin SEM görüntüleri, Dicle Üniversitesi DÜBTAM laboratuvarlarında bulunan QUANTA FEG 250 taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiştir.

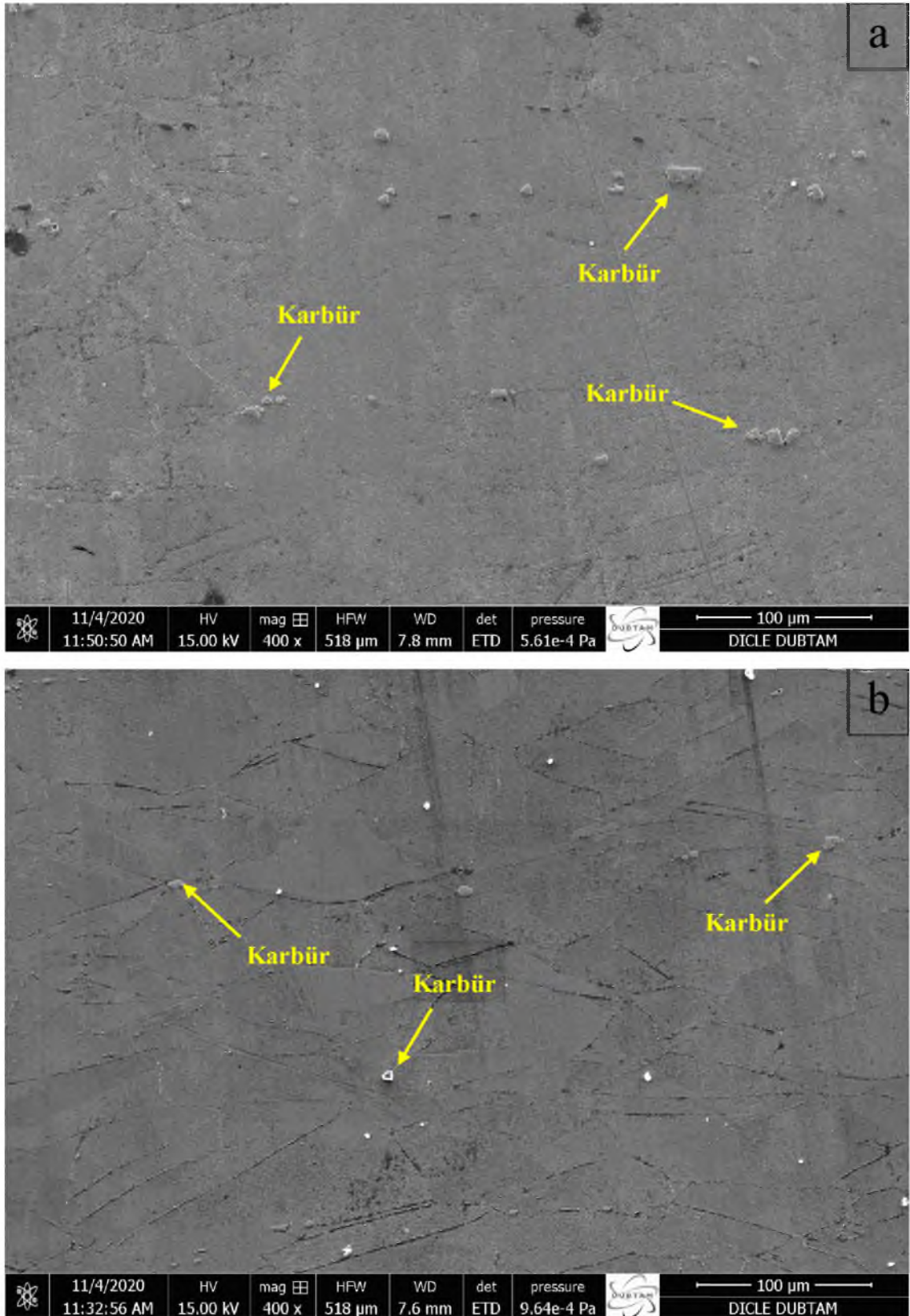


Şekil 4.17. Mikroyapı analizi için hazırlanan numuneler

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Mikroyapı Analizi

Kriyojenik işlem uygulanmamış (İU) Inconel 718 iş parçasının mikroyapı görüntüsü Şekil 5.1.a'da ve -146 °C'de 24 saat derin kriyojenik işlem ile 2 kez temperleme işlemi (200 °C'de 2 saat) uygulanmış (KİT) Inconel 718 süper alaşımının mikroyapı görüntüsü Şekil 5.1.b'de verilmiştir. Şekil 5.1.a'da İU Inconel 718 alaşımı üzerinden alınan SEM görüntüsü incelendiğinde, mikroyapıda heterojen dağılım gösteren iri karbür taneleri olduğu görülmektedir. Şekil 5.1.b'de gösterilen KİT Inconel 718 alaşımının mikroyapısında ise bu karbürlerin daha ince ve dağılımlarının daha homojen olduğu anlaşılmaktadır. Karbürlerin süper alaşımların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri kaçınılmazdır. Morfolojisi düzensiz, heterojen ve yüksek oranda bulunan karbürler, malzemenin mekanik özelliklerini düşürmektedir (Üzgür, 2013). Ayrıca nikel esaslı süper alaşımların mikroyapısında bulunan bu sert karbürler, kesici takımlarda aşınmalara neden olup malzemenin işlenebilirliğini zorlaştırmaktadır (Choudhury ve El-Baradie, 1998; Ezugwu ve ark. 1999). Literatüre bakıldığında, Şekil 5.1'deki SEM görüntülerinde gösterilen yapıların Inconel 718 alaşımında bulunan karbürler ile aynı morfolojik özelliklere sahip olduğu görülmekte ve bunların karbür olduğu anlaşılabilmektedir (Sims, 1984; Voort, 1992; Davis, 2000; Liu ve ark., 2005; Krook ve ark., 2005; Vishwakarma ve Chaturvedi, 2008; Kuo ve ark., 2009; Kitaguchi, 2012; Ay, 2013; Üzgür, 2013; Atmaca, 2015; Rezaei ve Moosavy, 2018). Literatürde bulunan benzer çalışmalarda da malzemelere uygulanan kriyojenik işlemin, malzemenin bütününe etki ederek karbür boyutlarını azalttığı ve homojen karbür dağılımı sağladığı görülmüştür (Çiçek ve ark., 2013; Palanisamy ve Senthil, 2018; Kara ve ark. 2019). Ayrıca kriyojenik işlem uygulanırken bekletme süresi ne kadar uzun olursa, malzeme yapısında karbür dağılımı o kadar ince olmaktadır (Yıldız ve ark., 2011).



Şekil 5.1. Inconel 718 alaşımlarındaki karbürler, a) İÜ Inconel 718, b) KİT Inconel 718

Malzemenin çok düşük sıcaklıklara maruz kalmasıyla yapıda bulunan kristallerde hacim küçülmesi meydana gelebilmektedir. Bu durum, Eşitlik 5.1’de verilen

genel hacimce genleşme katsayısı formülünden yola çıkılarak ifade edilebilir (Li ve ark., 2017):

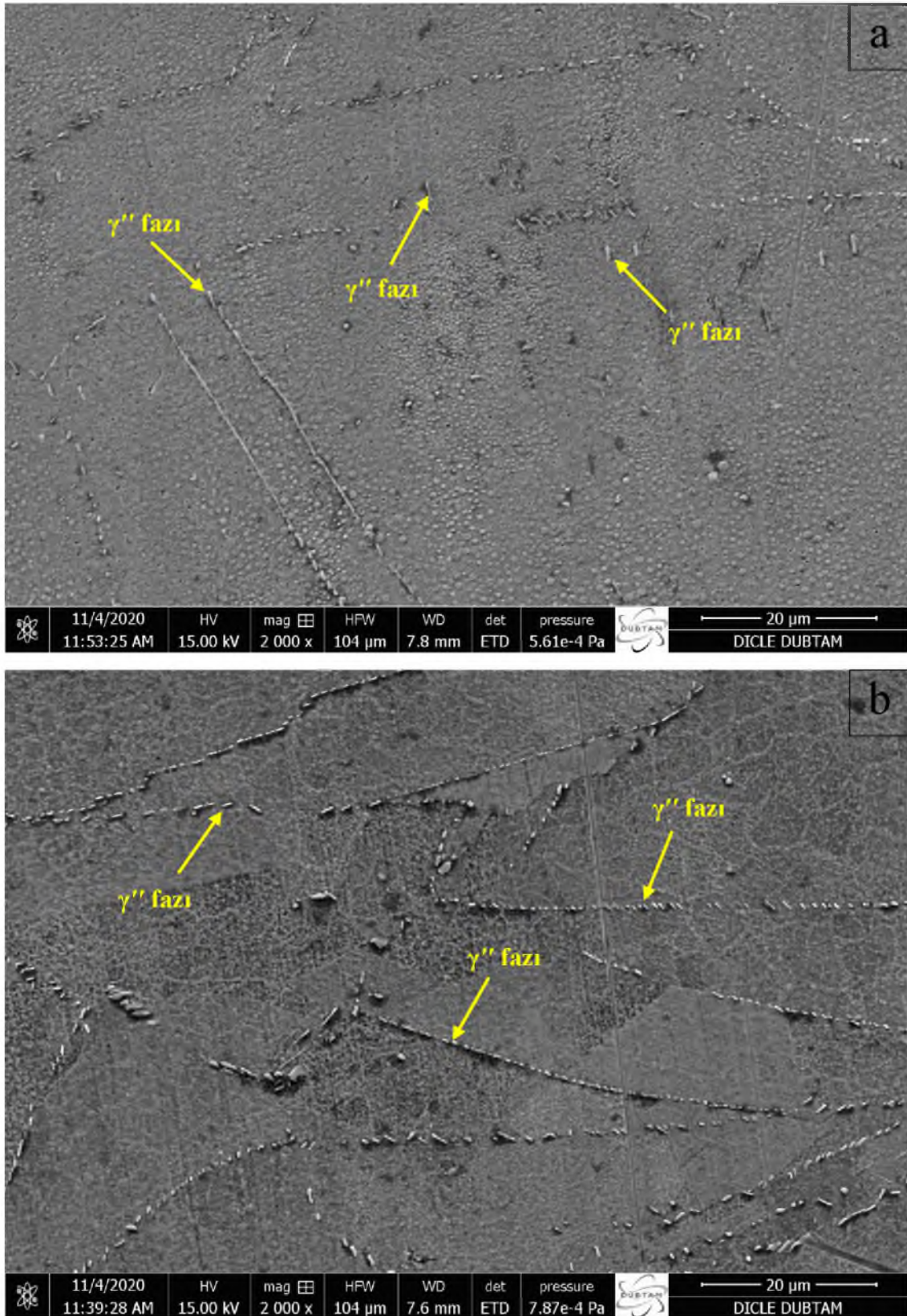
$$\alpha = V^{-1}(\partial V / \partial T)_P \quad (5.1)$$

Formülde α $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ de genleşme katsayısını, V mm^3 cinsinden hacmi ve P ise MPa cinsinden basıncı ifade etmektedir. Sıcaklık T_0 'dan T 'ye değiştiğinde, karşılık gelen hacmin V_0 'dan V_T 'ye değiştiğini varsayabiliriz. Bu nedenle denklem 5.1'den denklem 5.2 elde edilebilir (Li ve ark., 2017):

$$V_T = V_0 e^{\alpha(T-T_0)} \quad (5.2)$$

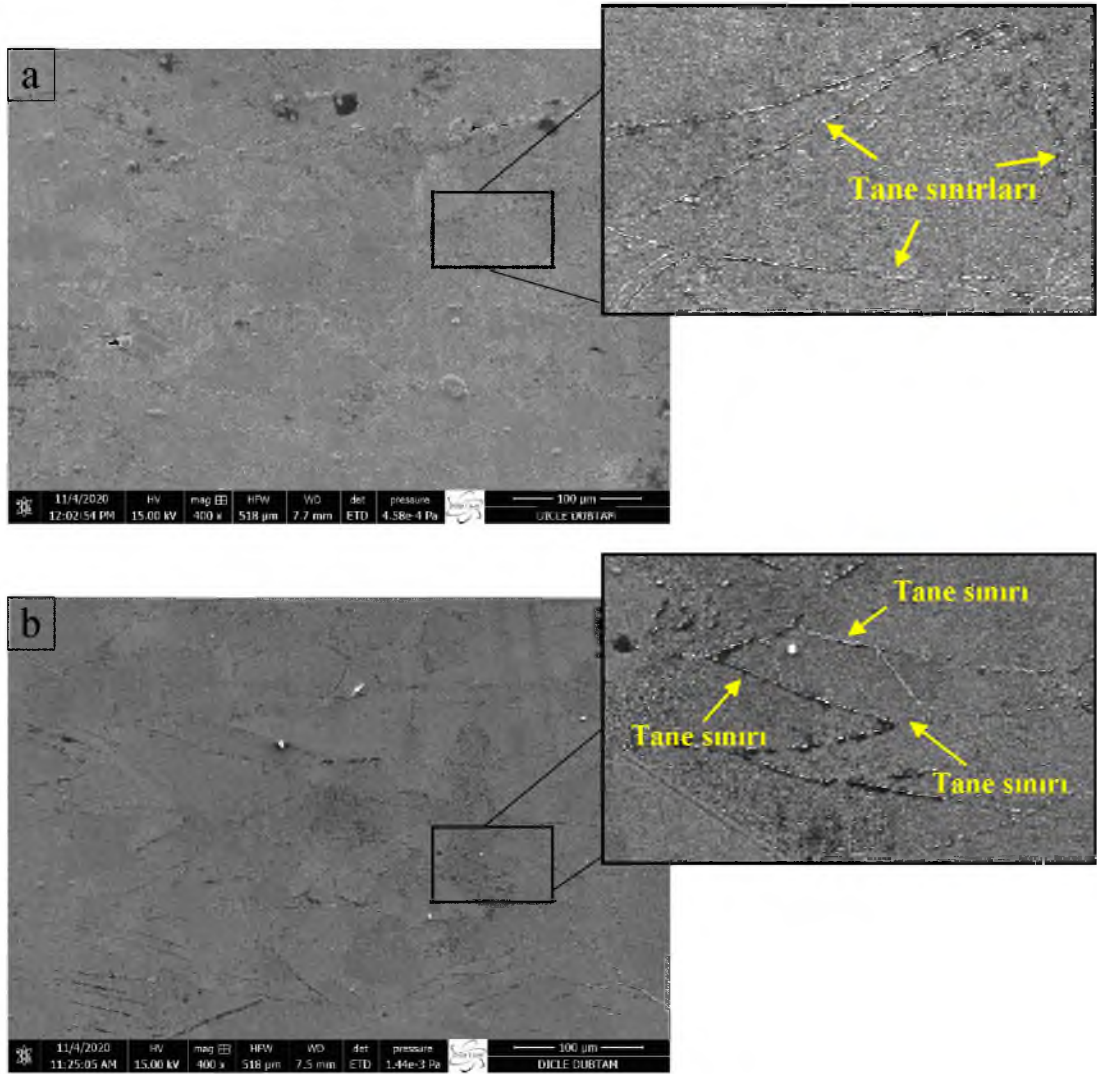
Denklem 5.2'de, sıcaklık değişiminin hacimde değişikliğe neden olacağı görülmektedir. Sıcaklık düşüşü kaçınılmaz olarak katı maddenin hacminin küçülmesine ve iç gerilmede artışa neden olmaktadır. Kristallerin hacim küçülmesi, farklı fazlar ve taneler arasındaki genleşme katsayılarındaki farklılık nedeniyle iç gerilmenin ve plastik deformasyon enerjisinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca hacim ve kafes büzülmesi, boşluklar ve mikro gözenekler gibi malzeme kusurlarının bazı yönlerinin düzeltilmesine yol açarak malzemenin yoğunluğunu artırabilmektedir (Li ve ark., 2017).

Şekil 5.2.b'de verilen KİT Inconel 718 alaşımının mikroyapı görüntüsüne bakıldığında, Şekil 5.2.a'da görülen İU Inconel 718 iş parçası mikroyapısına kıyasla daha fazla sayıda şerit biçiminde çökeltilerin olduğu görülmektedir. Literatür çalışmalarının incelenmesi sonucunda bu çökeltilerin, Inconel 718 süper alaşımında bulunan ana sertleştirici γ'' (Gama çift üssü, Ni_3Nb) fazı olduğu anlaşılmıştır (Niang ve ark., 2010; Fu ve ark., 2010; Ay, 2013; Li ve ark., 2017; Chen ve ark, 2019). Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımında birçoğu tane sınırları boyunca dağılan bu γ'' fazlarının daha fazla görülmesinin sebebi, kriyojenik işlemin neden olduğu hacim ve kafes daralmasının malzeme iç enerjisinde bir artışa neden olması ve bu durumun da γ'' fazının çökmesine destek olmasıdır. Literatürde de Inconel 718 alaşımına kriyojenik işlem uygulanması ile alaşımın mikroyapısında γ'' fazlarının özellikle tane sınırlarında çökeldiği görülmüştür (Li ve ark., 2017).



Şekil 5.2. Inconel 718 alaşımlarında γ'' fazları, a) İÜ Inconel 718, b) KİT Inconel 718

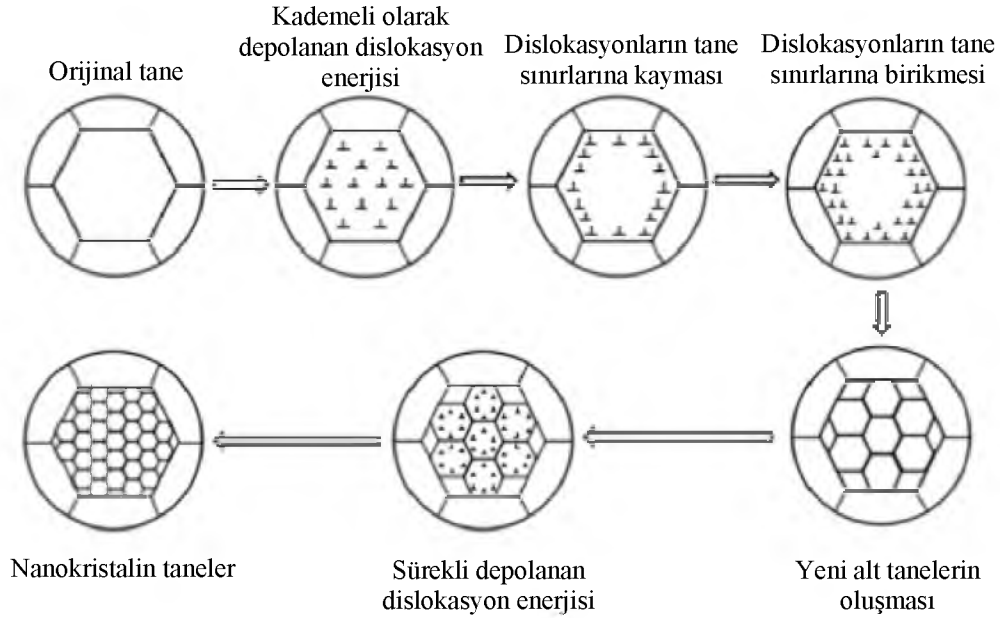
Şekil 5.3.a’da verilen İU Inconel 718 ve Şekil 5.3.b’de verilen KİT Inconel 718 iş parçalarının SEM görüntülerinde alaşımların tane boyutları incelenmiştir. Şekil 5.3.a’ya bakıldığında, İU Inconel 718 iş parçasının mikroyapısında bulunan tanelerin genel olarak iri bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bunun aksine KİT Inconel 718 alaşımında mevcut olan tanelerin genel olarak daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Inconel 718 alaşıma kriyojenik işlem uygulanması sonucunda mikroyapıdaki tanelerin incelendiği literatür çalışmaları ile de doğrulanmıştır (Li ve ark., 2017; Naiju ve ark., 2019).



Şekil 5.3. Inconel 718 alaşımlarında tane boyutları, a) İU Inconel 718, b) KİT Inconel 718

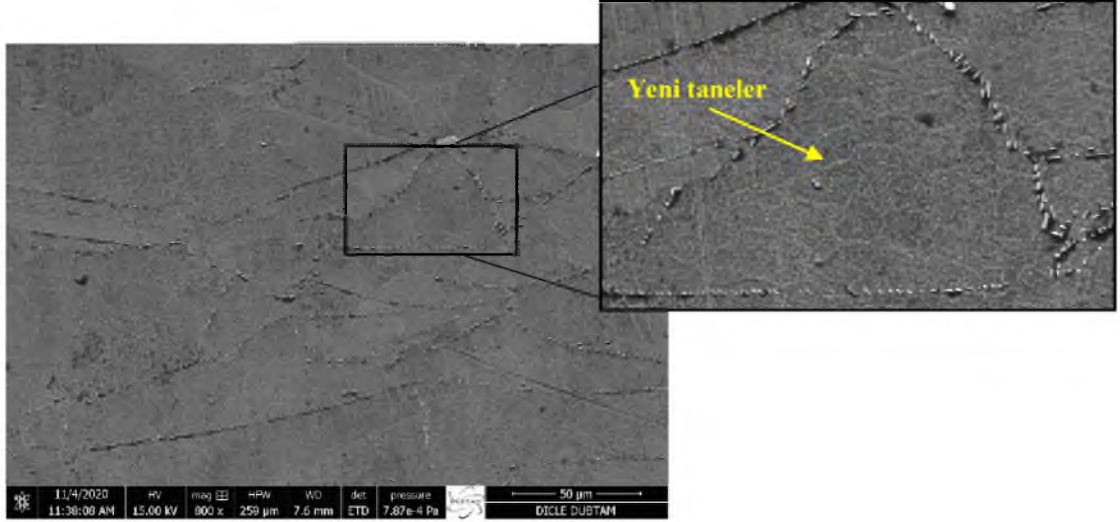
Inconel 718 süper alaşımına kriyojenik işlem uygulandığında, plastik deformasyonun ve iç gerilmenin sürekli artmasıyla orijinal tanelerin birçok kristal taneye veya ikizlenmeye bölündüğü, tanelerin daha ince hale geldiği ve tane

boyutlarının daha üniform olduğu bilinmektedir. Yeni kristallerin oluşumu dinamik yeniden kristalleşme teorisi ile açıklanabilir. Şekil 5.4'te alt kristallerin oluşumu şematik olarak gösterilmiştir. Matriste depolanan iç gerilme ve plastik deformasyon enerjisinin artması ile dislokasyon kayma sistemleri devreye girmektedir. Inconel 718'in mikroyapı özelliğinden dolayı bir dislokasyonun kontrolsüz bir şekilde kayması zordur ve bu da tane sınırlarında dislokasyonların birikmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak çok sayıda kümelenmiş dislokasyon, tane sınırları tarafından kolayca emilir. Difüzyon süreci sırasında dislokasyonlar yeniden düzenlenir ve geniş açılı oryantasyon oluşturur. Bu nedenle yüksek yoğunluklu dislokasyonlar, doğrudan alt taneciklerin ve hatta nano ölçekli tanelerin oluşumuna yol açan yeniden kristalleşmeyi uyarır ve bu da tane incelmeye neden olur (Li ve ark., 2017).



Şekil 5.4. Kriyojenik ortamda plastik deformasyona maruz kalan Inconel 718 süper alaşımında nanokristalin oluşumunun şematik diyagramı (Li ve ark., 2017).

Şekil 5.4'te dinamik yeniden kristalleşme teorisi ile açıklanan yeni tanelerin oluşması durumunun görsel olarak daha iyi anlaşılması için, Şekil 5.5'te KİT Inconel 718'e ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.5 incelendiğinde, kriyojenik işlemde önce tek parça olan tanenin, kriyojenik işlemde plastik deformasyonun ve iç gerilmelerin sürekli artması ile yeni tanelere ayrılmış olduğu görülebilmektedir.



Şekil 5.5. Inconel 718 alaşımına kriyojenik işlem uygulanması ile yeni tanelerin oluşması

5.2. Mikrosertlik Analizi

Kriyojenik işlem ve iki kez temperleme işlemi uygulanmış (KİT) Inconel 718 alaşımı ile herhangi bir ısıtım işlemi uygulanmamış (İU) Inconel 718 alaşımına ait mikrosertlik testleri sonuçları Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablo 5.1’de verilen bu değerler, her iki iş parçasının 6 ayrı noktasından alınan mikrosertlik değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak oluşturulmuştur. Inconel 718’e uygulanan ısıtım işlemler sonucunda, malzemenin mikrosertlik değerinde %7,5 oranında bir artış meydana gelmiştir. Literatürde bulunan benzer çalışmalarda da Inconel 718 iş parçasına kriyojenik işlem uygulanması ile mikrosertliğin yükseldiği görülmüştür (Li ve ark., 2017; Naiju ve ark., 2019). Uygulanan kriyojenik işlem süresinin uzatılması ile Inconel 718’in sertlik değeri daha fazla artırılabilir (Naiju ve ark., 2019).

Tablo 5.1. Mikrosertlik ölçümü sonuçları

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
İU Inconel 718	465
KİT Inconel 718	500

Inconel 718 malzemesine kriyojenik işlem uygulanması sonucunda, ana sertleştirici faz olan γ'' fazı kriyojenik işlemin etkisiyle daha fazla çökelerek tane sınırları boyunca dağılmış ve dislokasyon hareketlerini engelleme etkisi ile beraber malzeme sertliğinde bir artış meydana getirmiştir (Li ve ark., 2017). Ayrıca iş parçasına

kriyojenik işlem uygulanması ile orijinal taneler, sürekli artan plastik deformasyon ve iç gerilim nedeniyle birçok taneye ayrılmış ve bu da tane sınırlarının genişlemesine yol açmıştır. Tane incelmesinden kaynaklanan tane sınırlarındaki artış, dislokasyon hareketi direncinin yükselmesine ve dolayısıyla malzeme sertliğinin artmasına neden olmuştur (Naiju ve ark., 2019).

Tane boyutunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi, çekme mukavemeti veya nano sertlik için Hall-Petch ilişkisi ile ifade edilebilir. Çekme mukavemeti için Hall-Petch ilişkisini ifade eden Eşitlik 5.3'te verilmiştir (Li ve ark., 2017):

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-1/2} \quad (5.3)$$

Denklemden σ MPa cinsinden akma dayanımını, σ_0 ile k malzemeye özgü sabitleri ve d μm cinsinden ortalama tanecik boyutunu ifade etmektedir. Eşitlik 5.4'te ortalama tane boyutu ile sertlik arasındaki Hall-Petch ilişkisi verilmiştir (Li ve ark., 2017):

$$H_V = H_{V0} + K_{HV} d^{-1/2} \quad (5.4)$$

H_V MPa cinsinden ölçülen yüzey sertliğini, H_{V0} ile K_{HV} malzeme sabitlerini ve d μm cinsinden ortalama tanecik boyutunu ifade etmektedir. Denklem 5.3 ve 5.4'te, tane boyutunun küçülmesiyle malzemenin mukavemetinin ve nano sertliğinin giderek arttığı görülmektedir (Li ve ark., 2017).

5.3. Kesme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, kriyojenik işlem ile temperleme işlemi uygulanmış (KİT) ve ısıtılmış işlem uygulanmamış (İU) Inconel 718 süper alaşımların delik delme ve takım ömrü deneylerinden elde edilen ilerleme kuvvetleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

5.3.1. Delik delme deneylerinde kesme kuvvetleri

Inconel 718 iş parçalarının delinmesinde kriyojenik işlemin ve kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini görmek için işleme deneyleri yapılmıştır. Delme işleminde üç kuvvet bileşeninden kesme kuvveti ve radyal kuvvet

nispeten küçük değerlerde olduğundan dolayı işlenebilirlik testlerinde üçüncü kuvvet bileşeni olan ilerleme kuvveti dikkate alınmaktadır (Gökçe ve ark., 2017). Bu nedenle bu çalışmada delik delme işlemleri sırasında 3 kuvvet bileşeni de ölçülmüş ve sadece eksenel kuvvet bileşeni üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. İU Inconel 718 ve KİT Inconel 718 alaşımlarına, 4 farklı kesme hızı ve 3 farklı ilerleme ile yapılan delik delme deneylerine ait ilerleme kuvveti değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

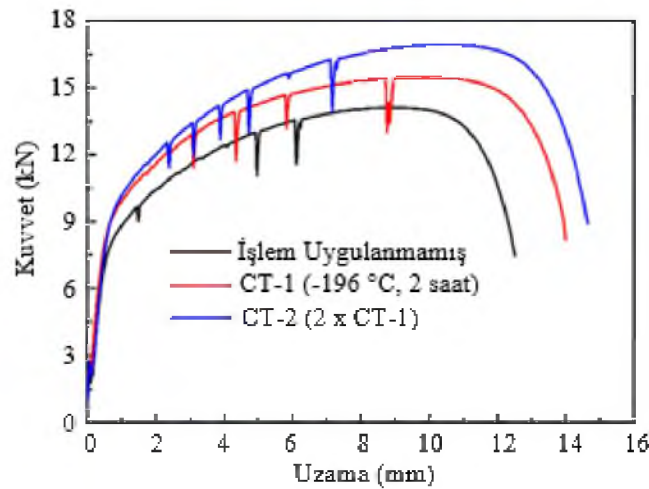
İU Inconel 718 iş parçasının delinmesi sırasında elde edilen en yüksek ilerleme kuvveti 2119 N’dur ve bu değer, 16 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir. KİT Inconel 718’de ise ölçülen en yüksek ilerleme kuvveti 2154 N’dur ve bu değer de 16 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme ile tespit edilmiştir. İU Inconel 718 malzemesinin delinmesinde meydana gelen en düşük ilerleme kuvveti 1223 N’dur ve bu değer, malzemenin 19 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme ile delinmesinde ortaya çıkmıştır. KİT Inconel 718 alaşımında ise en düşük ilerleme kuvveti 1301 N’dur ve bu değer, İU Inconel 718 iş parçasında olduğu gibi 19 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir.

Tablo 5.2. Delik delme deneylerinde ilerleme kuvvetleri (N)

Deney No	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	İlerleme Kuvveti (N)	
			İU Inconel 718	KİT Inconel 718
1	10	0,06	1254	1322
2	10	0,09	1512	1650
3	10	0,12	1797	2008
4	13	0,06	1267	1363
5	13	0,09	1546	1723
6	13	0,12	1904	2042
7	16	0,06	1294	1403
8	16	0,09	1630	1805
9	16	0,12	2119	2154
10	19	0,06	1223	1301
11	19	0,09	1450	1634
12	19	0,12	1892	1950

Tablo 5.2’deki ilerleme kuvvetlerine bakıldığında, KİT Inconel 718 alaşımının delinmesi sırasında elde edilen kuvvetlerin, İU Inconel 718 alaşımında elde edilen kuvvetlere kıyasla bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. İlerleme kuvvetlerinde meydana gelen bu artışın, Inconel 718’e kriyojenik işlem uygulanması sonucunda alaşımın mikrosertliğinde meydana gelen %7,5 oranındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. İş parçasına kriyojenik işlem uygulanması sonucunda geliştirilen

mekanik özellikler ve mikroyapıdaki farklılıklar nedeniyle ilerleme kuvvetleri daha yüksek çıkabilmektedir (Palanisamy ve Senthil, 2018). Bu durum, Li ve arkadaşlarının (2017) kriyojenik işlem uygulanması sonucunda sertliği artan Inconel 718 alaşımlarına yaptıkları çekme deneyi testleri sonuçları ile daha iyi açıklanabilmektedir. Şekil 5.6’da bu çekme testlerine ait kuvvet-uzama eğrisi grafiği ve Tablo 5.3’te çekme testi sonuçları verilmiştir. Çekme testinde elde edilen bu sonuçlara bakıldığında, kriyojenik işleme tabi tutulan Inconel 718 iş parçalarının, ortalama akma dayanımı ve çekme dayanımı değerlerinin süneklik kaybı olmadan arttığı görülmektedir (Li ve ark., 2017). Sonuç olarak kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasının yüksek sertlik değeri, artan akma dayanımı nedeniyle ortalama ilerleme kuvvetlerinin yükselmesine neden olmuştur (Çiçek ve ark., 2013). Malzemelere kriyojenik işlem uygulanması ile sertlikte artış görülen literatür çalışmalarında da iş parçasının işlenmesi sırasında ilerleme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür (Çiçek ve ark., 2013; Palanisamy ve Senthil, 2018).



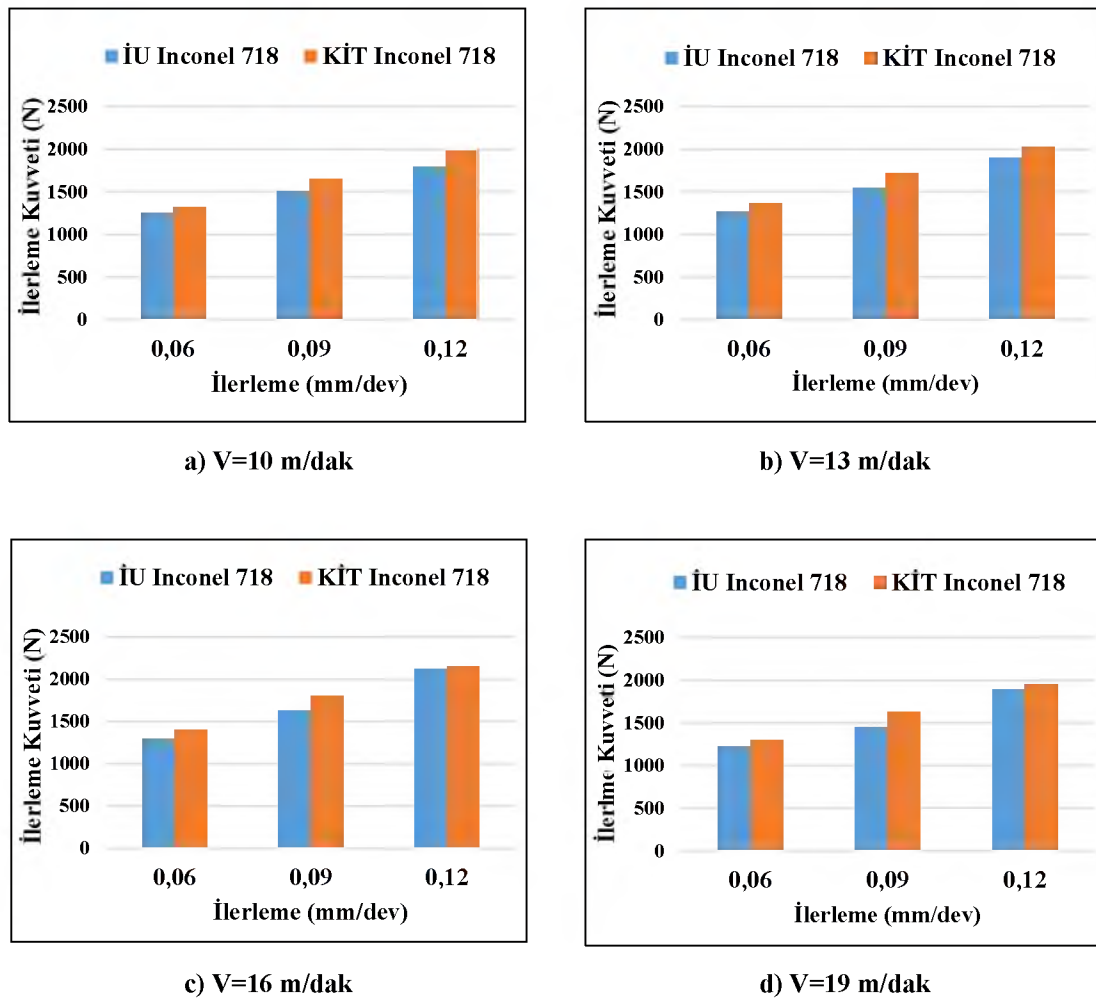
Şekil 5.6. İşlem uygulanmamış ve 2 farklı kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımlarının kuvvet-uzama eğrisi grafiği (Li ve ark., 2017)

Tablo 5.3. İşlem uygulanmamış ve 2 farklı kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımlarının çekme testi sonuçları (Li ve ark., 2017)

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%)
İşlem Uygulanmamış	1258	1026	11.5
CT-1 (-196 °C, 2 saat)	1377	1131	15.4
CT-2 (2 x CT-1)	1461	1202	16.9

İlerlemedeki artışın ilerleme kuvvetleri üzerindeki etkisini gösteren grafikler Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekil 4.7’deki grafikler incelendiğinde, her iki iş parçası için de kesme hızı sabit kalıp ilerleme artığında ilerleme kuvvetlerinde bir artış olduğu

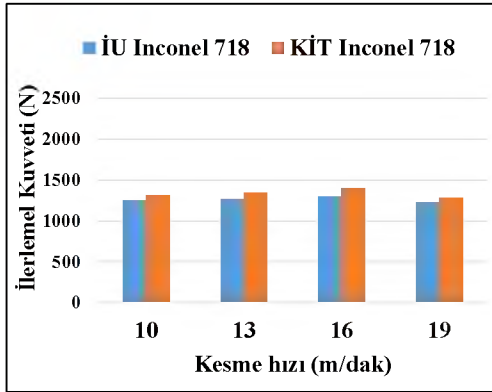
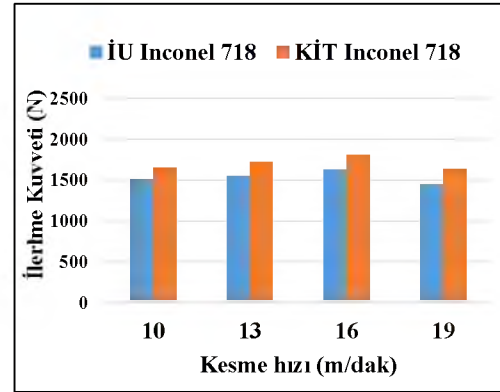
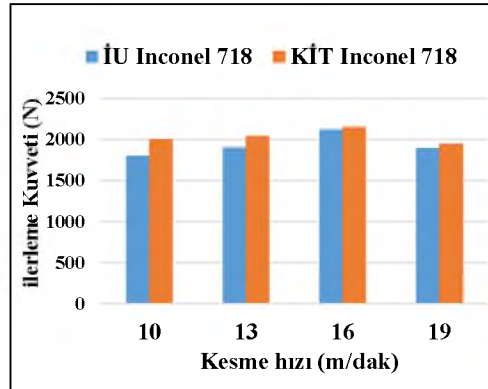
anlaşılmaktadır. Inconel 718'in delinmesinde ilerlemedeki artış, kesici takımında tüm kesme kenarı boyunca kesme kuvvetinin artmasına neden olmaktadır (Oezkaya ve ark., 2019). Delik delme sırasında artan ilerleme ile birlikte talaş kaldırma oranı artmaktadır (Karabulut ve Kaynak, 2020). İlerlemenin artması ile ilerleme kuvvetlerinde meydana gelen artış, birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasıyla açıklanabilir (Çiçek ve ark., 2011; Kara ve ark. 2019). Literatürde de Inconel 718'in delinmesi sırasında ilerleme arttıkça kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür (Oezkaya ve ark., 2019; Pang ve Wang, 2020).



Şekil 5.7. İlerlemeye bağlı olarak ilerleme kuvvetlerindeki değişim a) V=10 m/dak b) V=13 m/dak c) V=16 m/dak d) V=19 m/dak

Kesme hızına bağlı olarak ilerleme kuvvetlerindeki değişim grafiği Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.8'deki grafiklere bakıldığında, 16 m/dak kesme hızına kadar ilerleme kuvvetinin arttığı görülmektedir. Nikel esaslı alaşımlarda yüksek iş sertleşme etkisinin, yüksek kesme kuvvetlerine neden olduğu bilinmektedir (Ezugwu ve ark., 2003). Inconel

718 alaşımında kesici takım malzemeyi işledikçe işlenen yüzeyin altındaki bölge sertleşmektedir ve takımın her bir ardışık kesimi, bir önceki kesme işlemi sırasında sertleşmiş malzemeyi işlemektedir (Schirra ve Viens,1994). Kesme hızının artmasıyla birlikte ilerleme kuvvetinde meydana gelen bu artış, Inconel 718'in yüksek iş sertleşmesi etkisine ve yüksek derecede sertleştirilmiş bir yüzey tabakası oluşturan, düşük kesme sıcaklıklarında süneklikten gevrekliğe geçiş yapma eğilimine bağlanabilir (Vimalesh ve ark., 2015). 16 m/dak kesme hızından sonra kesme kuvvetlerinde meydana gelen düşüş ise, daha yüksek kesme hızlarında kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelen malzeme yumuşamasının, gevrekliğin üstesinden gelmesi ve plastisiteye izin vermesi sonucunda oluşmaktadır (Vimalesh ve ark., 2015). Kesme parametrelerinin ilerleme kuvvetleri üzerindeki etkileri dikkate alınırsa, Inconel 718 alaşımının delinmesinde ilerleme hızının kesme hızından daha etkili olduğu söylenebilir. Şekil 5.7- Şekil 5.8'deki kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasının kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasına göre ilerleme kuvvetleri yaklaşık olarak %7,5 oranında daha yüksek çıkmıştır.

a) $f=0,06$ mm/devb) $f=0,09$ mm/devc) $f=0,12$ mm/dev

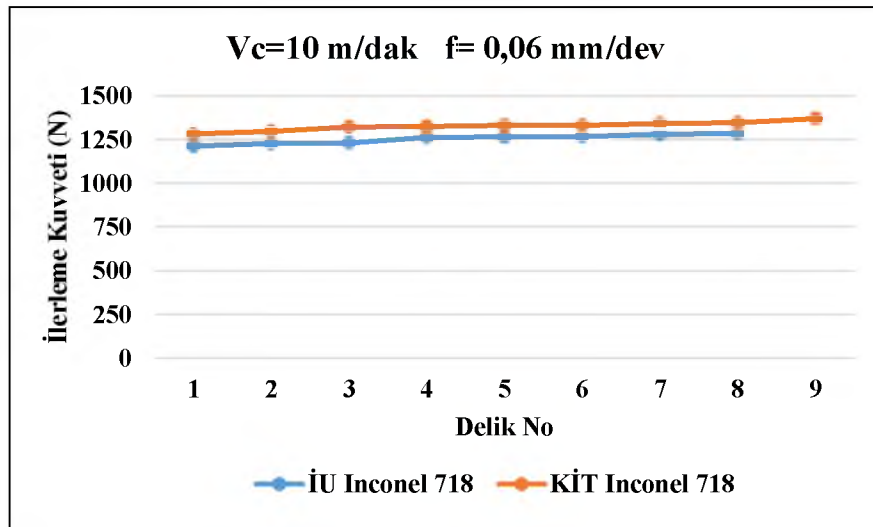
Şekil 5.8. Kesme hızına bağlı olarak ilerleme kuvvetlerindeki değişim a) $f=0,06$ mm/dev b) $f=0,09$ mm/dev c) $f=0,12$ mm/dev

5.3.2. Takım ömrü deneylerinde kesme kuvvetleri

Çalışmanın bu kısmında, İÜ ve KİT Inconel 718 alaşımlarına sabit kesme hızı (10 m/dak) ve ilerleme (0,06 mm/dev) değerleri ile her bir iş parçasında 1 adet kesici takım kullanılarak delik delme işlemleri yapılmıştır. Yapılan deneylere ait sonuçlar Tablo 5.4'te ve bu sonuçlardan elde edilen grafik Şekil 5.9'da verilmiştir. Tablo 5.4'te ve Şekil 5.9'a bakıldığında, KİT Inconel 718'e ait ilerleme kuvvetlerinin İÜ Inconel 718'e ait ilerleme kuvvetlerine kıyasla bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. İlerleme kuvvetlerindeki bu artışın, önceden de (Bkz. Bölüm 5.3.1) belirtildiği gibi KİT Inconel 718 alaşımının sertliğinde meydana gelen %7,5 oranındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 5.4. Takım ömrü deneylerinde ilerleme kuvvetleri (N)

Delik No	İlerleme Kuvveti (N)	
	İÜ Inconel 718	KİT Inconel 718
1	1213,8	1282,2
2	1228,3	1298,3
3	1232,1	1322,5
4	1263,7	1326,3
5	1265,5	1331,6
6	1268,6	1332,1
7	1280,5	1343,1
8	1285,3	1347,1
9		1370,9



Şekil 5.9. Takım ömrü deneylerinde ilerleme kuvvetlerinin grafiği

5.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

Bu bölümde, kriyojenik işlem uygulanmamış (İU) Inconel 718 ve kriyojenik işlem ile temperleme işlemi uygulanmış (KİT) Inconel 718 alaşımlarına yapılan delik delme ve takım ömrü deneylerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

5.4.1. Delik delme deneylerinde yüzey pürüzlülük değerleri

Dört farklı kesme hızı (10, 13, 16 ve 19 m/dak) ve 3 farklı ilerleme (0,06, 0,09 ve 0,12 mm/dev) değerleri ile her deneyde yeni bir takım kullanılarak İU ve KİT Inconel 718 iş parçalarına delik delme işlemleri yapılmıştır. Delinen deliklerin 4 farklı noktasından yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmış ve değerlendirmeler bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları alınarak yapılmıştır.

İU Inconel 718 iş parçasında en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değeri 1,465 μm olup, bu değer 19 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir. KİT Inconel 718 alaşımında ise en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değeri 1,43 μm 'dir ve bu değer de 19 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme ile ortaya çıkmıştır. İU Inconel 718 malzemesinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0,92 μm olup, bu değer 16 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerlemede tespit edilmiştir. KİT Inconel 718'de ise en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0,8725 μm olup, bu değer de 16 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir.

Delik delme deneylerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 5.5'te verilmiştir. Tablo 5.5'e bakıldığında, KİT Inconel 718 alaşımının delinmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, İU Inconel 718 alaşımının delinmesinde elde edilen değerlerden genel olarak daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, Inconel 718 alaşımına kriyojenik işlem uygulanması ile mikroyapıda meydana gelen değişikliklerin, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerine atfedilmiştir. Bu tez çalışmasının mikroyapı analizi bölümünde (Bkz. Bölüm 5.1), Inconel 718 iş parçasına kriyojenik işlem uygulanması sonucunda mikroyapıda bulunan karbürlerin incelendiği ve homojen dağıldığı, tane yapılarının küçüldüğü ve daha fazla sayıda γ'' fazlarının çökeldiği görülebilir. Ayrıca mikrosertlik analizi bölümünde (Bkz. Bölüm 5.2), kriyojenik işleminden sonra Inconel 718 iş parçasının mikrosertliğinde %7,5 oranında bir artış meydana geldiği görülebilir. Literatürde Inconel 718'in işlenebilirliğini etkileyen

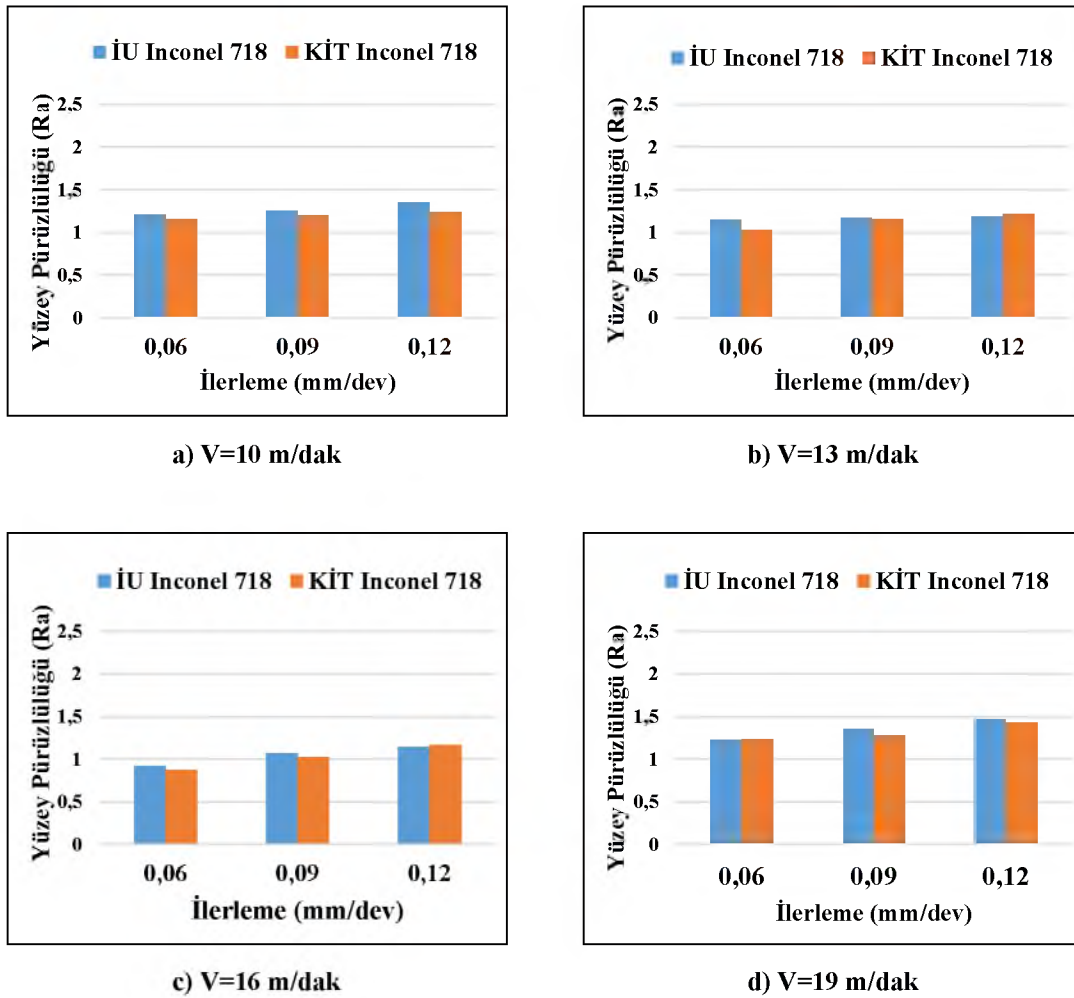
malzeme özelliklerinin incelendiği çalışmalarda, büyük tane boyutunun küçük tane boyutuna kıyasla daha fazla takım aşınmasına yol açtığı görülmüştür (Schirra ve Viens 1994; Krook ve ark., 2005). Ayrıca bu çalışmaların birinde, yerel karbür içeriğinin fazla olmasının daha fazla takım aşınmasına neden olduğu ve karbürlerin takım aşınmasını olumsuz yönde etkilemede γ'' fazlarından daha etkili olduğu bulunmuştur (Krook ve ark., 2005). Literatürde Inconel 718’de sertliğin takım aşınması üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalarda, malzeme sertliğindeki artışın daha fazla takım aşınmasına neden olduğu anlaşılmıştır (Schirra ve Viens 1994; Olovssjö ve ark. 2010). Takım aşınması ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğrudan bir ilişki olduğu bilinmektedir (Kara ve ark. 2019). Dolayısıyla KİT Inconel 718 iş parçasında karbürlerin incelip homojen dağılmasının ve tanelerin incelmesinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu etki sağladığı, alaşım sertliğinin artmasının ve γ'' fazlarının çökmesinin ise olumsuz etki sağladığı söylenebilir. Sonuç olarak Inconel 718 alaşımına kriyojenik işlem uygulanması ile meydana gelen bu olumlu ve olumsuz durumların sonucunda, iş parçasının delinmesi ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinde genel olarak bir iyileşme sağlanmıştır.

Tablo 5.5. Delik delme deneylerinde delik yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra)

Deney No	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri (μm)	
			İU Inconel 718	KİT Inconel 718
1	10	0,06	1,2075	1,155
2	10	0,09	1,2525	1,1975
3	10	0,12	1,3515	1,2375
4	13	0,06	1,1475	1,025
5	13	0,09	1,1725	1,1525
6	13	0,12	1,19	1,2155
7	16	0,06	0,92	0,8725
8	16	0,09	1,0725	1,025
9	16	0,12	1,1425	1,1625
10	19	0,06	1,225	1,2325
11	19	0,09	1,35	1,28
12	19	0,12	1,465	1,43

İlerlemedeki artışa bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişimi gösteren grafikler Şekil 5.10’da verilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde, delik delme işlemlerinden sonra elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, ilerlemedeki artışa bağlı olarak yükseldiği görülmektedir. İlerlemenin artması, birim zamanda çıkarılan talaş hacmini artırarak ilerleme kuvvetlerinin ve titreşimin artmasına ve dolayısıyla

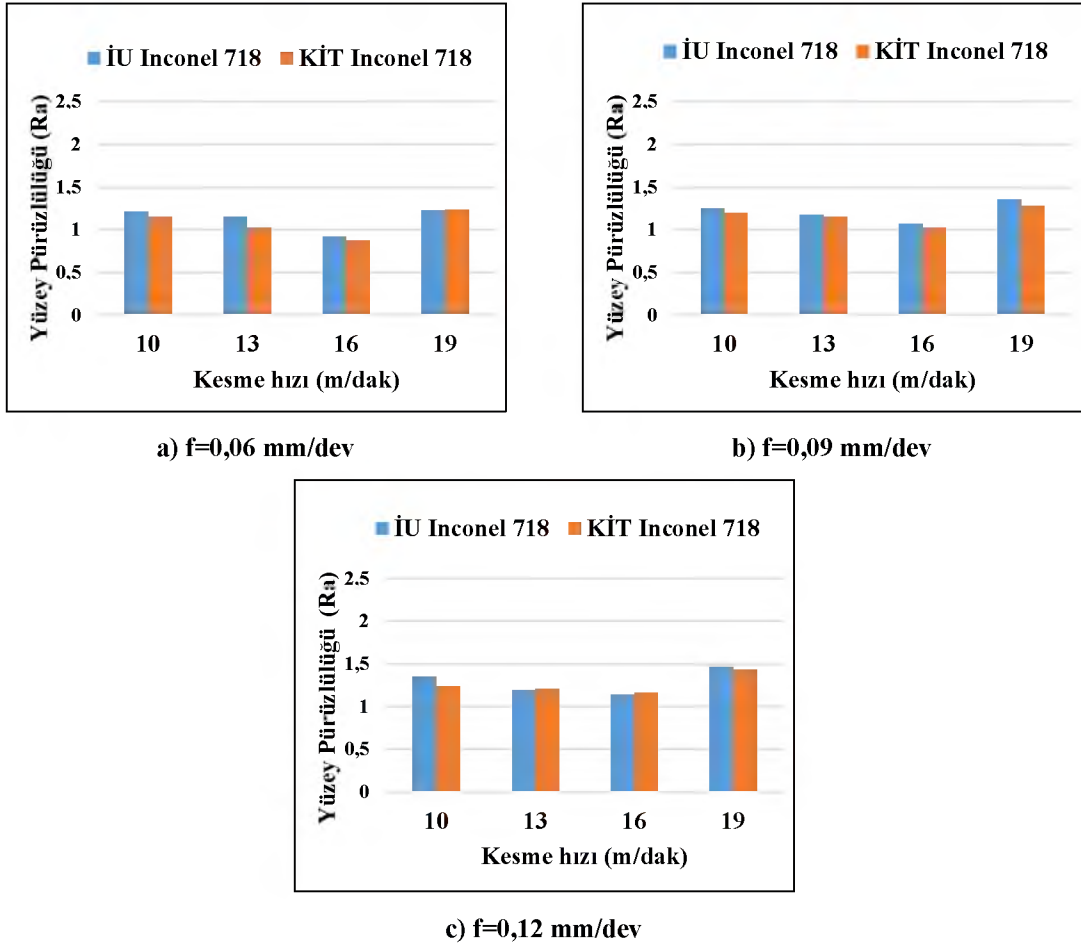
yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır. Ayrıca ilerlemedeki artış, kesici takım-iş parçası arayüzündeki sıcaklığın artmasına neden olur. Arayüzdeki sıcaklık artışı daha sonra takım aşınmasına ve sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünün bozulmasına neden olmaktadır (Kara ve ark. 2019). Literatürde de Inconel 718 alaşımının delinmesinde ilerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı görülmüştür (Kıvak ve ark., 2010; Rahim ve Sasahara, 2011; Kumar ve ark., 2017; Karabulut ve Kaynak, 2020)



Şekil 5.10. İlerlemeye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğündeki değişim a) V=10 m/dak b) V=13 m/dak c) V=16 m/dak d) V=19 m/dak

Şekil 5.11’de kesme hızına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişim grafikleri verilmiştir. Şekil 5.11’de verilen grafikler incelendiğinde, 16 m/dak kesme hızına kadar kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düştüğü görülmektedir. Inconel 718 alaşımının delinmesinde artan kesme hızı BUE oluşumunda bir azalmaya neden olmakta, takım ile fener milinin titreşimini azaltmakta ve sonuç

olarak yüzey pürüzlülüğü değeri düşmektedir (Karabulut ve Kaynak, 2020). 16 m/dak kesme hızından sonra yüzey pürüzlülüğü değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Inconel 718 alaşımının delinmesinde kesme hızının artmasıyla takım aşınmasında ciddi artışlar görülmektedir (Kıvak ve ark., 2012). Yüksek kesme hızlarında kesici takımın hızla aşınması sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yükseldiği düşünülmektedir (Altın ve ark., 2006; Kıvak ve ark., 2010). Şekil 5.10- Şekil 5.11'deki kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasının kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasına göre yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık olarak %4,5 oranında daha düşük çıkmıştır.



Şekil 5.11. Kesme hızına bağlı olarak ilerleme kuvvetlerindeki değişim a) f=0,06 mm/dev b) f=0,09 mm/dev c) f=0,12 mm/dev

5.4.2. Takım ömrü deneylerinde yüzey pürüzlülük değerleri

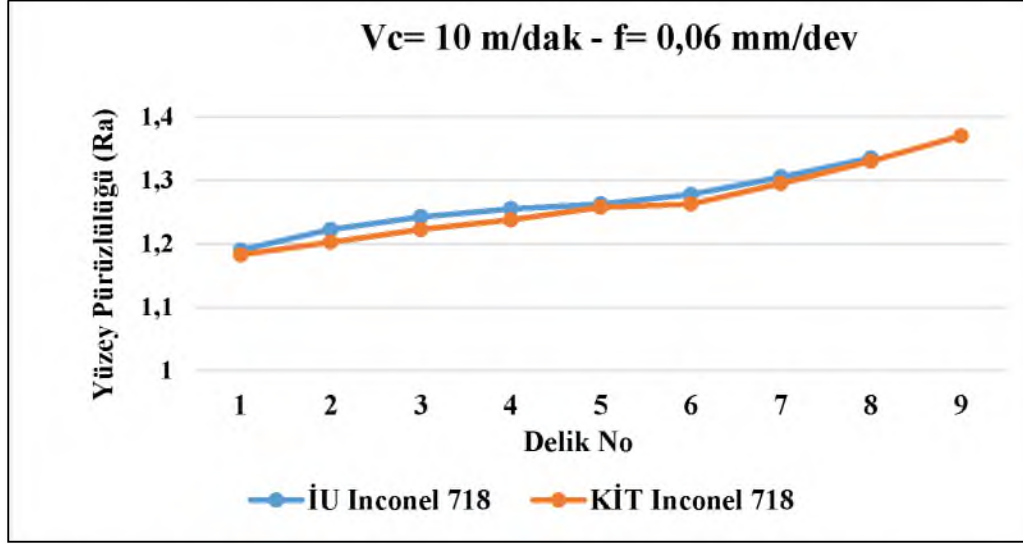
Takım ömrü deneyleri, İU ve KİT Inconel 718 iş parçalarında birer takım kullanılarak 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme değerleri ile yapılmıştır.

Değerlendirmeler işlenen her deliğin 4 farklı noktasından ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak yapılmıştır.

Takım ömrü deneylerinde kullanılan kesici takımlarda delinen delik sayısı arttıkça aşınma meydana gelmiştir. Kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar, bu tez çalışmasının takım aşınması bölümünde (Bkz. Bölüm 5.5) her bir delik delme işleminden sonra takımdan alınan mikroskop görüntülerine bakılarak anlaşılabilir. Kesici takım aşındıkça elde edilen yüzey kalitesi bozulmaktadır (Roy ve ark., 2018). Bu nedenle delinen her delikten sonra ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri genel olarak bir önceki delik delme işlemine göre artma eğilimi göstermiştir. İU ve KİT Inconel 718 alaşımları üzerinde birer adet takım ile yapılan takım ömrü deneylerine ait yüzey pürüzlülüğü ölçümü değerleri Tablo 5.6’da ve bu değerlerden elde edilen grafik Şekil 5.12’de verilmiştir. Şekil 5.12’ye bakıldığında, KİT Inconel 718 alaşımının delinmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, İU Inconel 718 alaşımının delinmesinde elde edilen değerlerden genel olarak daha düşük olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasının mikroyapı analizi bölümünde (Bkz. Bölüm 5.1), Inconel 718 iş parçasına kriyojenik işlem uygulanması sonucunda mikroyapıda bulunan karbürlerin incelendiği, homojen dağıldığı ve tane yapılarının küçüldüğü görülmüştür. Söz konusu bu durum yüzey pürüzlülüğü değerlerinde genel olarak bir iyileşme sağlamıştır.

Tablo 5.6. Takım ömrü deneylerinde delik yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra)

Delik No	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri, Ra (µm)	
	İU Inconel 718	KİT Inconel 718
1	1,19	1,1825
2	1,2225	1,2025
3	1,2425	1,2225
4	1,25	1,2375
5	1,2625	1,2575
6	1,2775	1,2625
7	1,305	1,295
8	1,335	1,33
9		1,37



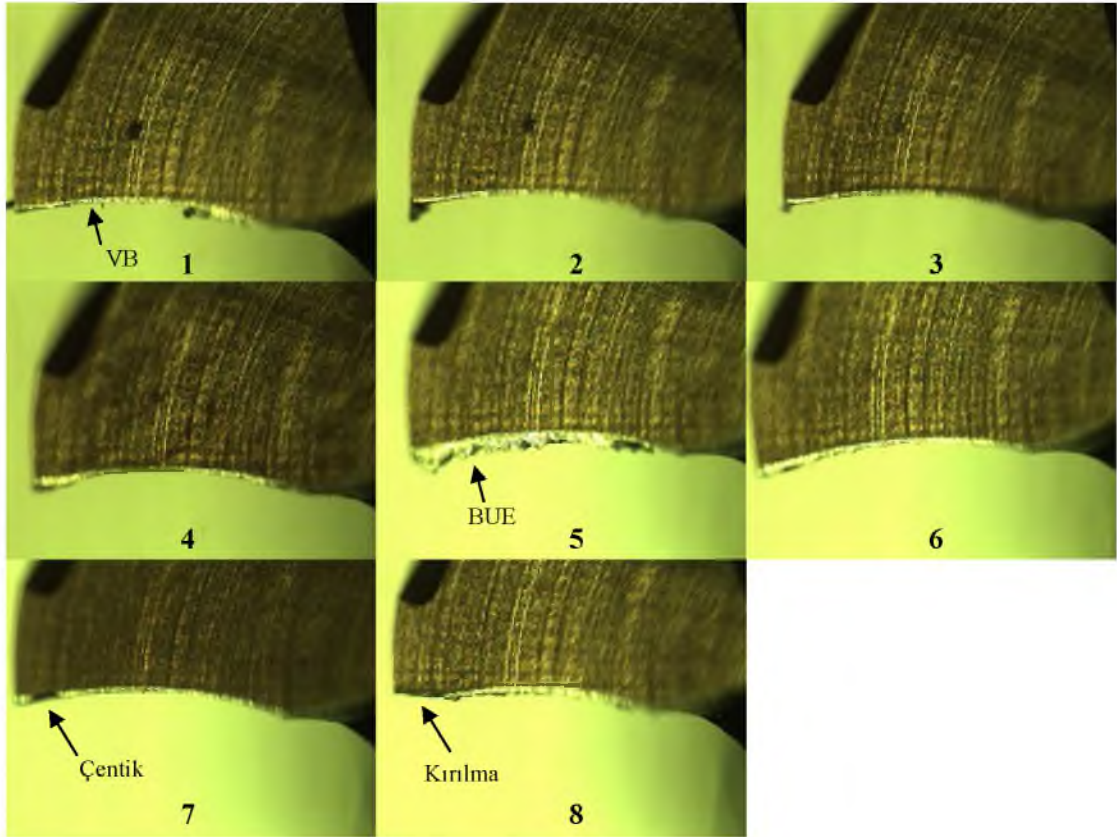
Şekil 5.12. Takım ömrü deneylerinde delik yüzeylerinden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği

5.5. Takım Ömrü

Takım ömrü deneyleri, kriyojenik işlem ile temperleme işlemi uygulanmış (KİT) Inconel 718 ve ısıtıl işlem uygulanmamış (İU) Inconel 718 alaşımlarında birer adet takım kullanılarak, 10 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme değerleri ile yapılmıştır. Her bir delik delme işleminden sonra takımların sol, sağ ve orta kısımları mikroskop altında incelenmiştir. Elde edilen görüntüler sayesinde takımda meydana gelen aşınmalar adım adım görülebilmektedir.

Her iki iş parçasında da kullanılan kesici takımlarda $V_B=0,25$ mm veya $V_{Bmax}=0,5$ mm değerlerine ulaşmadan kırılma meydana gelmiştir. İU Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takımın sol kenarına ait mikroskop görüntüleri Şekil 5.13'te verilmiştir. Şekil 5.13'te 1 numaralı görselden itibaren yan yüzey aşınmasının (V_B) etkin olduğu görülmektedir. 5. delik delme işleminden sonra kesici takımın kesme kenarında yüksek oranda yığıntı talaş (BUE) biriktiği görülmektedir (Şekil 5.13). BUE oluşumu, Inconel 718'in yüksek mukavemeti nedeniyle yüksek sıcaklıkta ve yüksek gerilmelerde yüksek kimyasal reaksiyona girme eğilimi (afinitesi) ve iş/çalışma sertleşmesi eğiliminden kaynaklanmaktadır (Khanna ve ark., 2020). 6 numaralı görselde görüldüğü üzere devam eden kesme işlemi nedeniyle BUE üzerine gelen gerilmelere dayanamayarak büyük oranda kopmuştur. 7 numaralı görsele bakıldığında kesici takımda çentik aşınması meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.13). Inconel 718 alaşımının işlenmesinde BUE'nin kesici takım üzerinden tekrar tekrar kaldırılması

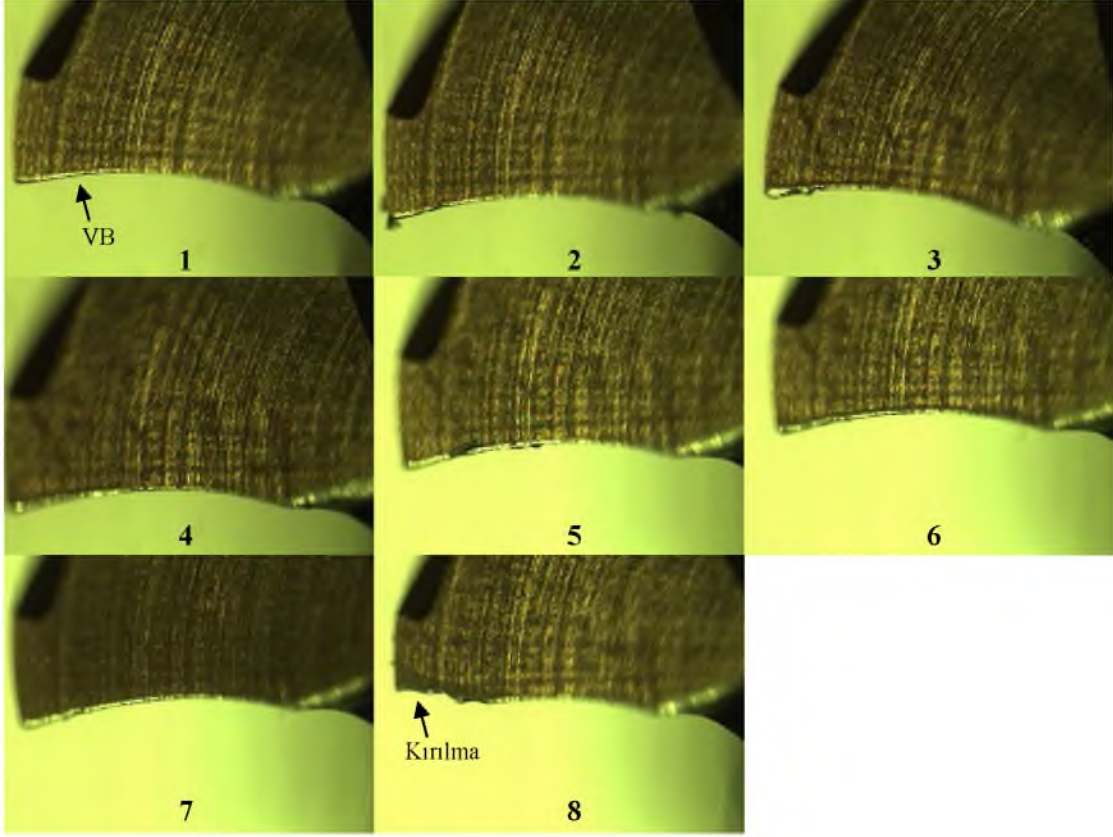
kesici takımında çentik aşınmasına neden olabilmektedir (Dudzinski ve ark., 2004). İU ve KİT Inconel 718 alaşımlarına yapılan mikroyapı analizleri sonucunda, İU Inconel 718 iş parçasındaki tane boyutlarının KİT Inconel 718 iş parçasındaki tane boyutlarından daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Inconel 718 alaşımlarında tane boyutu ile çentik aşınması arasında pozitif bir korelasyon bulunmaktadır (Krook ve ark., 2005; Olovşjö ve ark., 2010). Ayrıca nikel esaslı alaşımlarda bulunan sert karbür fazlarının aşındırıcı etkisi ve alaşımın yüksek iş sertleşmesi etkisi, kesici takımında çentik aşınmasına neden olabilmektedir (Ezugwu ve ark., 2003). 8 nolu görsele bakıldığında kesici takımında kırılma meydana geldiği görülmektedir. Bu kırılmanın ardından delme deneyleri durdurulmuştur.



Şekil 5.13. Takım ömrü deneylerinde İU Inconel 718’de kullanılan takımın sol kenarına ait mikroskop görüntüleri

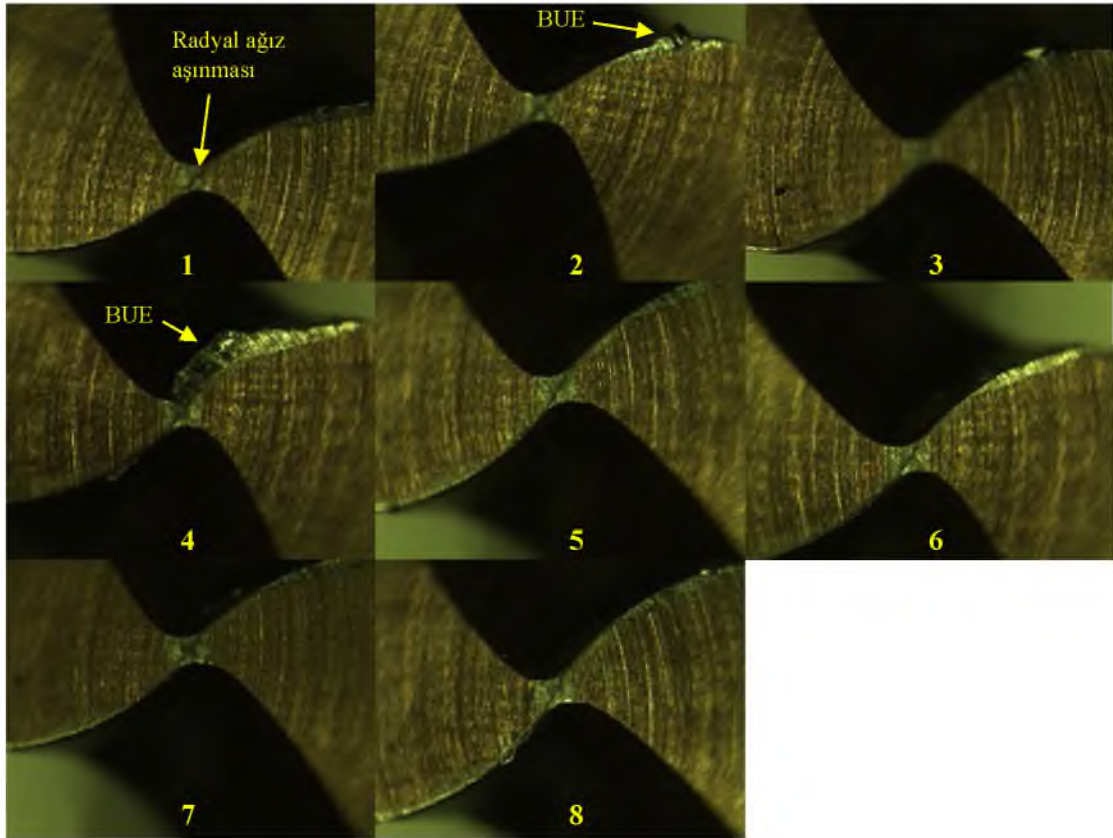
Şekil 5.14’te İU Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takımın sağ kenarına ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. İlk delik delme işleminden itibaren yan yüzey aşınması etkin olmuştur. Inconel 718 alaşımının iş sertleşmesi etkisi sonucunda kesici takımında yan yüzey aşınması görülmektedir (Li ve ark., 2006; Deshpande ve ark., 2018).

Delme işlemi devam ettikçe takım aşınmaya devam etmiş ve son delik delme işleminde kesici takımın sol kısmında olduğu gibi bu kısmında da kırılma meydana gelmiştir.



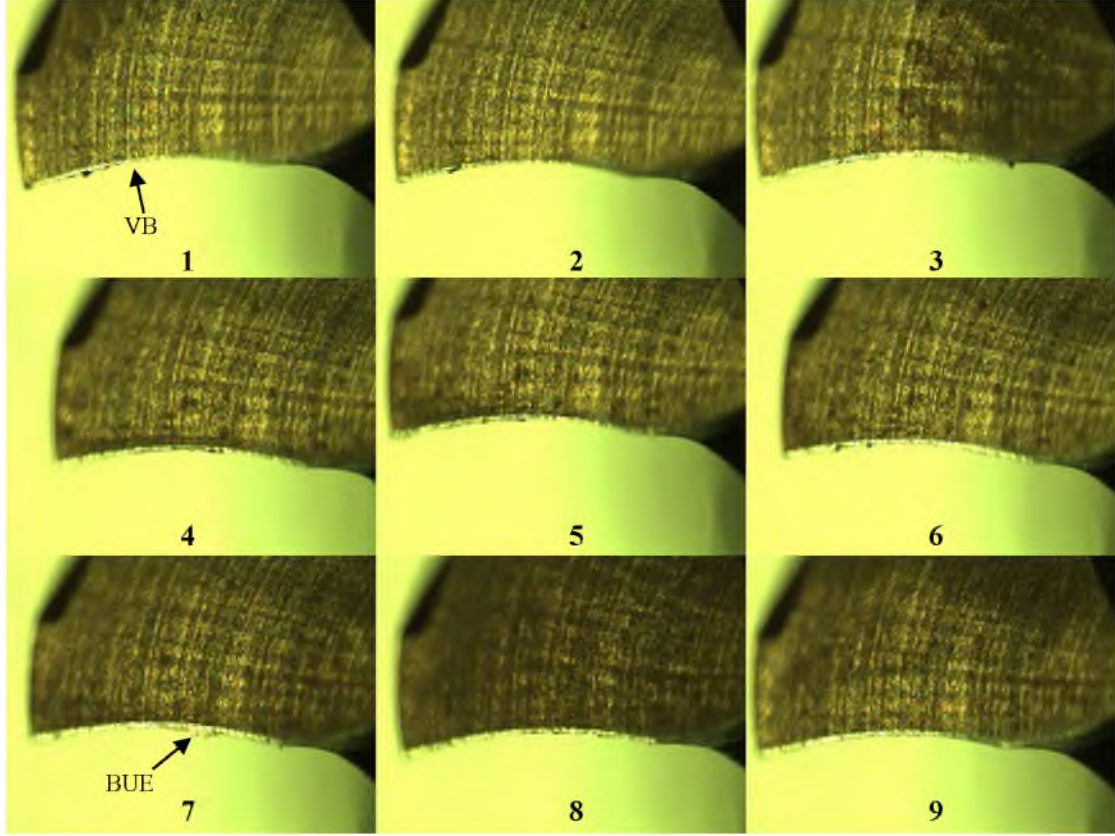
Şekil 5.14. Takım ömrü deneylerinde İU Inconel 718’de kullanılan takımın sağ kenarına ait mikroskop görüntüleri

İU Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takımın orta kısmından çekilen mikroskop görüntüleri Şekil 5.15’te verilmiştir. Şekil 5.15’te 1 nolu görselden 8 nolu görsele doğru radyal ağız incelendiğinde meydana gelen aşınma görülebilmektedir. Kesici takım üzerinde 2. delik delme işleminden sonra radyal ağza yakın kesme kenarında bir miktar BUE oluştuğu ve 4. delikten sonra fazlasıyla biriktiği net bir şekilde görülebilmektedir. 5. delik delme işleminde BUE gerilmelere dayanamayarak kopmuştur.



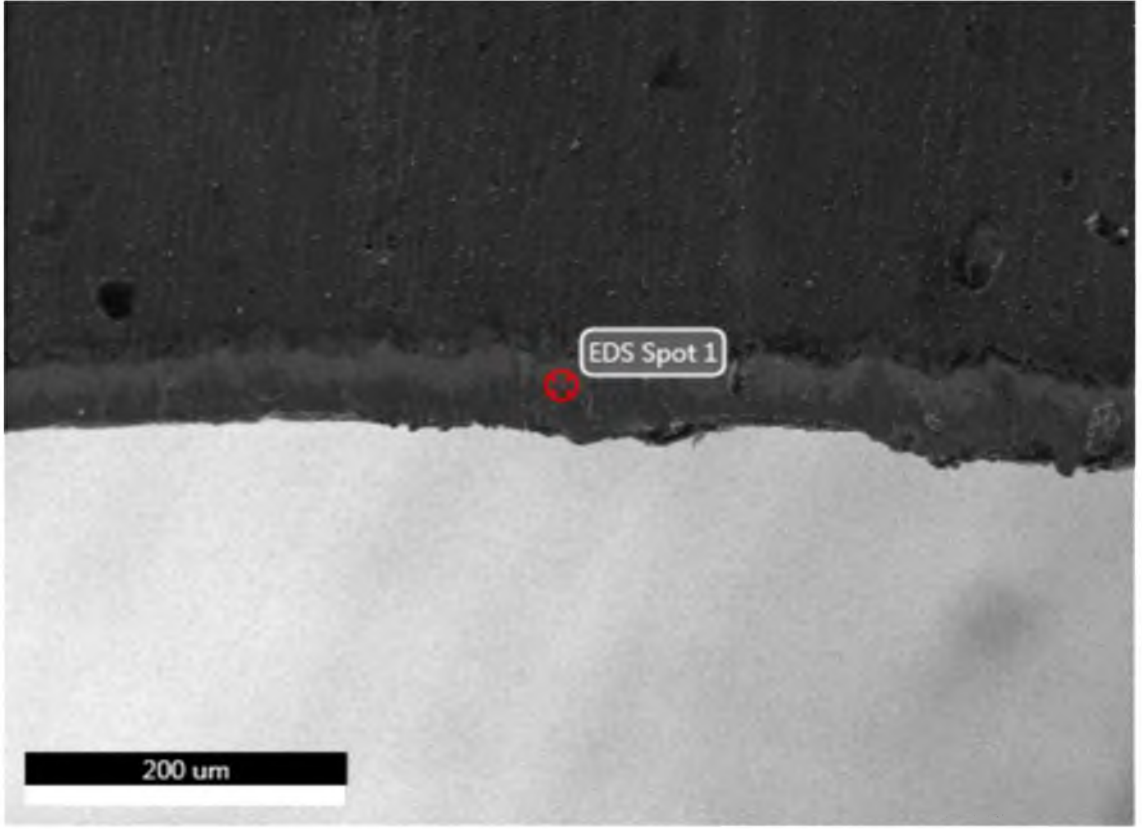
Şekil 5.15. Takım ömrü deneylerinde İU Inconel 718’de kullanılan takımın uç kısmına ait mikroskop görüntüleri

KİT Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takımın sol kenarına ait mikroskop görüntüleri Şekil 5.16’da verilmiştir. Şekil 5.16’daki görüntülere bakıldığında, kesici takımda ilk delik delme işleminden itibaren meydana gelen yan yüzey aşınması görülebilmektedir. 7 nolu delme işleminden sonra BUE’nin ana kesici kenarda biriktiği ve devam eden kesme işleminde BUE miktarının azaldığı görülmektedir.



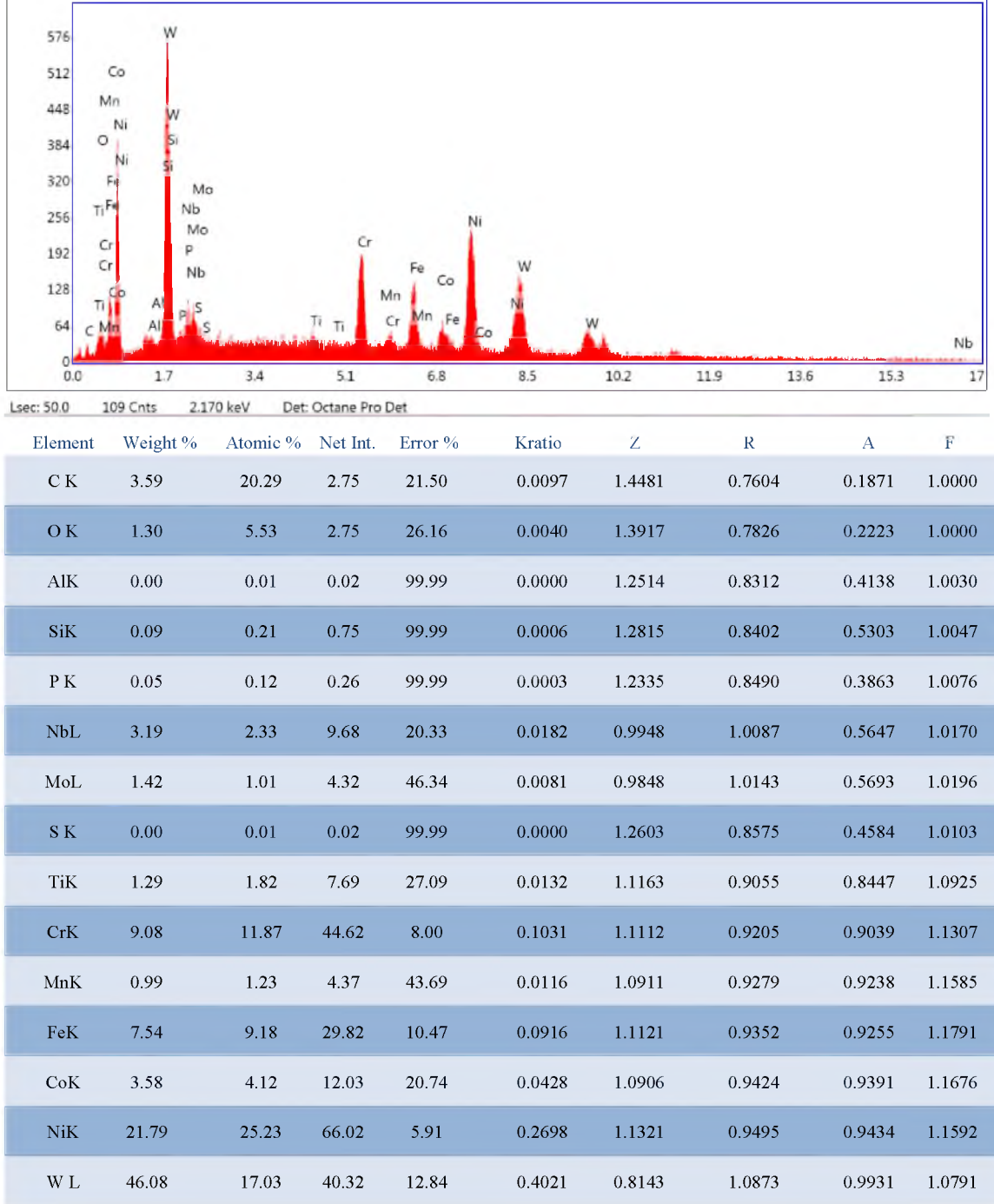
Şekil 5.16. Takım ömrü deneylerinde KİT Inconel 718’de kullanılan takımın sol kenarına ait mikroskop görüntüleri

9 nolu delme işleminden sonra KİT Inconel 718’de kullanılan kesici takımın sol kenarında yapılan EDS analizinde, iş parçasına ait talaşın matkabın kesici kenarında biriktiği gözlemlenmiştir. EDS analizinin yapıldığı yerin görüntüsü Şekil 5.17’de ve EDS analizi sonuçları Tablo 5.7’de verilmiştir. Tablo 5.7’de verilen EDS analizi sonucu ile Tablo 4.1’de verilen Inconel 718 alaşımının kimyasal bileşimine bakıldığında, EDS sonucu tablosunda Inconel 718 alaşımı elementlerinin olduğu görülmektedir. Bu durum kesici takıma yapışan talaşın Inconel 718 iş parçasına ait olduğunu göstermektedir. Inconel 718 alaşımı kuru şartlar altında delindiğinde hızlı bir difüzyon oranı göstermektedir. Yüksek difüzyon hızı, Inconel 718’in yüksek sıcaklıklarda birçok takım malzemesi ile kimyasal reaksiyona girme eğiliminin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Khanna ve ark., 2020).



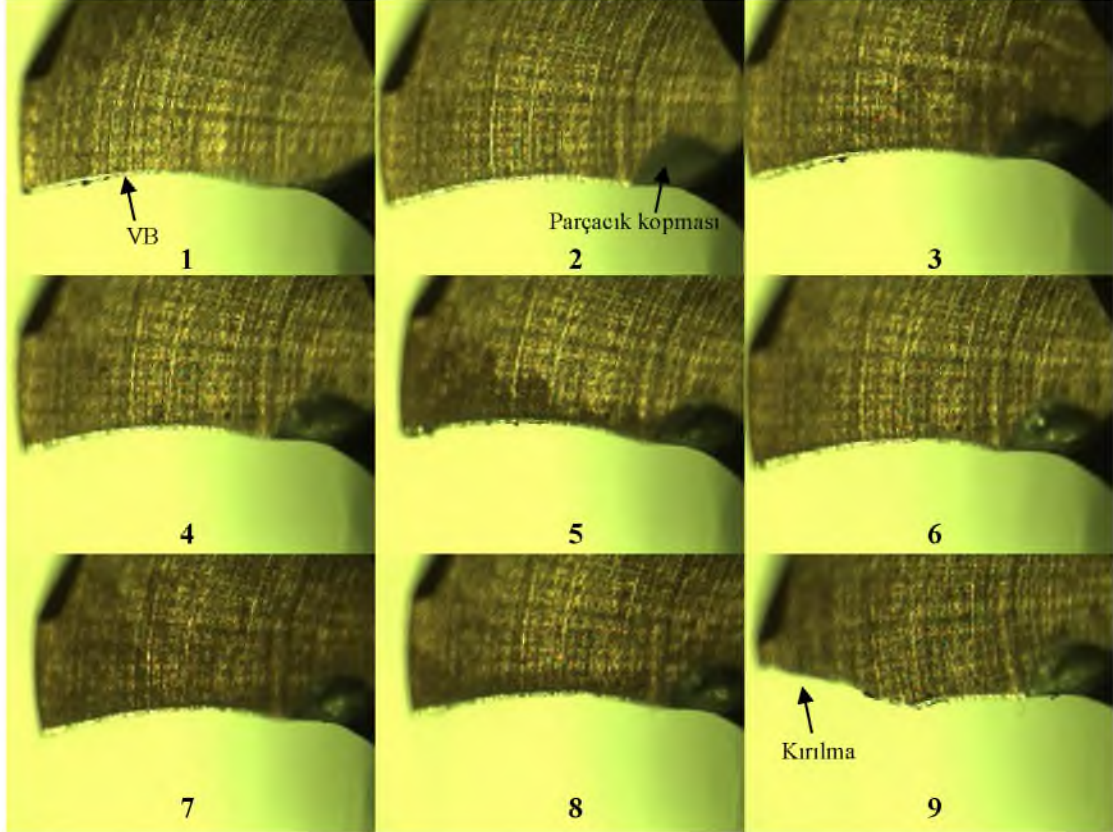
Şekil 5.17. Takım ömrü deneylerinde K&T Inconel 718’de kullanılan takımından alınan EDS analizi yeri

Tablo 5.7. Takım ömrü deneylerinde KİT Inconel 718’de kullanılan takımından alınan EDS analizi sonucu



Şekil 5.18’de KİT Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takımın sağ kenarına ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Kesici takımın yan yüzeyinde ilk delik delme işleminden itibaren yan yüzey aşınması etkin olmuştur. 2 nolu delme işleminden sonra radyal ağza yakın kesici kenarda parçaçık kopması (chipping) meydana gelmiştir. Inconel 718 alaşımının kuru şartlarda delinmesi, matkabın kesici kenarının erken bozulmasına ve delme sırasında ciddi deformasyon oluşmasına neden olmaktadır.

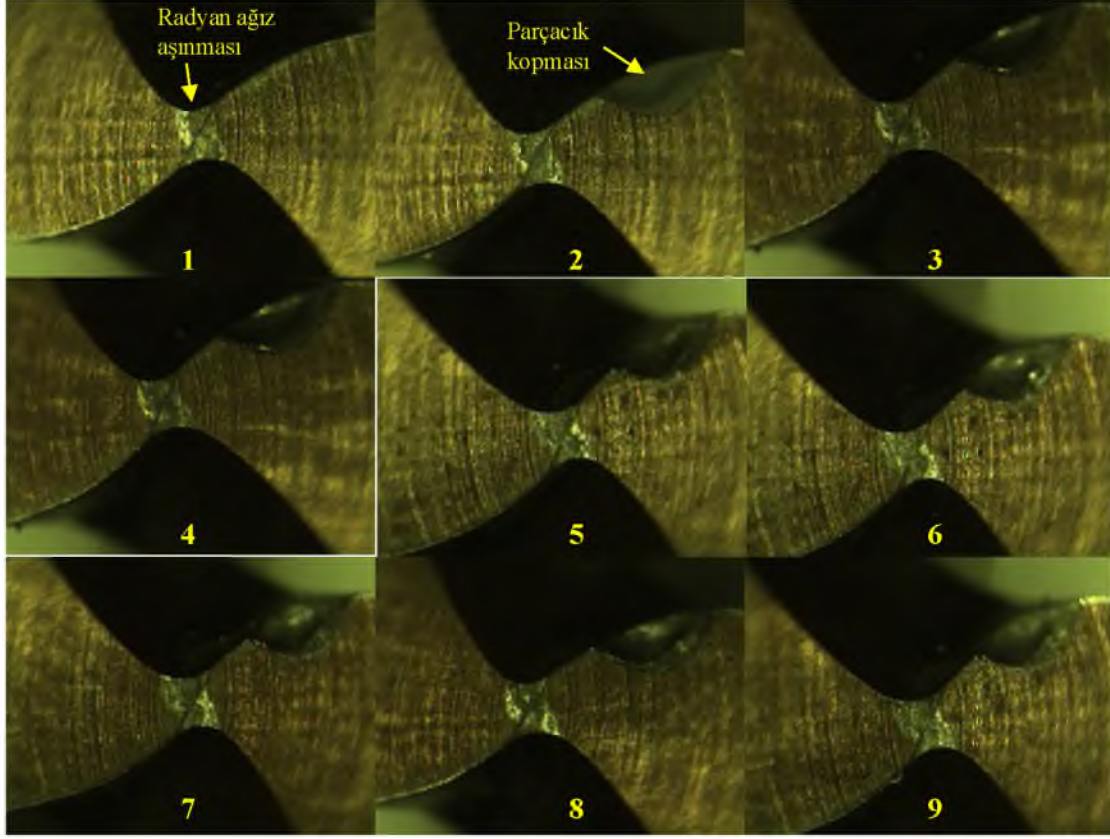
Inconel 718 alaşımının kuru kesme şartlarında delinmesinde, şekil 5.18’de 2 nolu görselde de görülen parçaçık kopması gibi nedenlerle kesici kenarın hızlı aşınması gözlemlenebilir. Parçaçık kopması, delme işleminde yüksek gerilim ve düşük takım-talaş temas alanı sonucunda küçük bir alanda ısının yoğunlaşması nedeniyle meydana gelebilmektedir (Khanna ve ark., 2020). 9 nolu görselde takımın kırıldığı görülmektedir. Bu kırılma meydana geldikten sonra delik delme işlemleri durdurulmuştur.



şekil 5.18. Takım mr deneylerinde KİT Inconel 718’de kullanılan takımın sağ kenarına ait mikroskop görüntüleri

KİT Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takımın orta kısmına ait mikroskop görüntüleri şekil 5.19’da verilmiştir. şekil 5.19’daki görüntüler incelendiğinde, ilk delik delme işleminde belirgin bir şekilde radyal ağızda aşınma meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca 2 numaralı görselde 2. delik delme işleminde sonra meydana gelen parçaçık kopması görülebilmektedir. İU Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takım ile toplam 8 adet delik delinebilmiştir. Bu kesici takımda 7. delik delme işleminde sonra çentik aşınması meydana gelmiş ve 8. delik delme işleminde sonra takımın her iki kenarı da kırılmıştır. KİT Inconel 718 iş parçasında kullanılan kesici takım ise toplam 9 adet delik delebilmēir. 2. delik delme işleminde sonra kesici

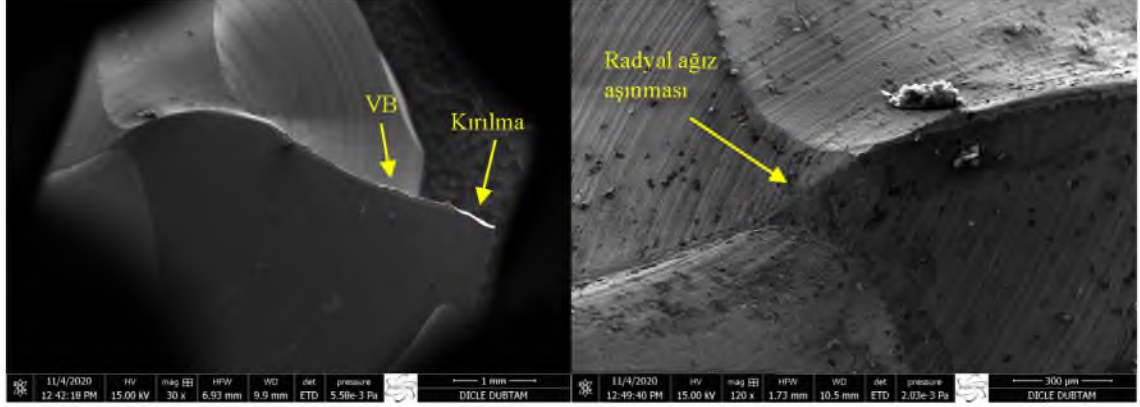
takımda parçacık kopması meydana gelmiş ve 9 nolu delme işleminden sonra takımın sol kenarı kırılmıştır. Her iki kesici takım da V_B ve radyal ağız aşınmasının ilk delik delme işleminden itibaren etkin olduğu görülmüştür.



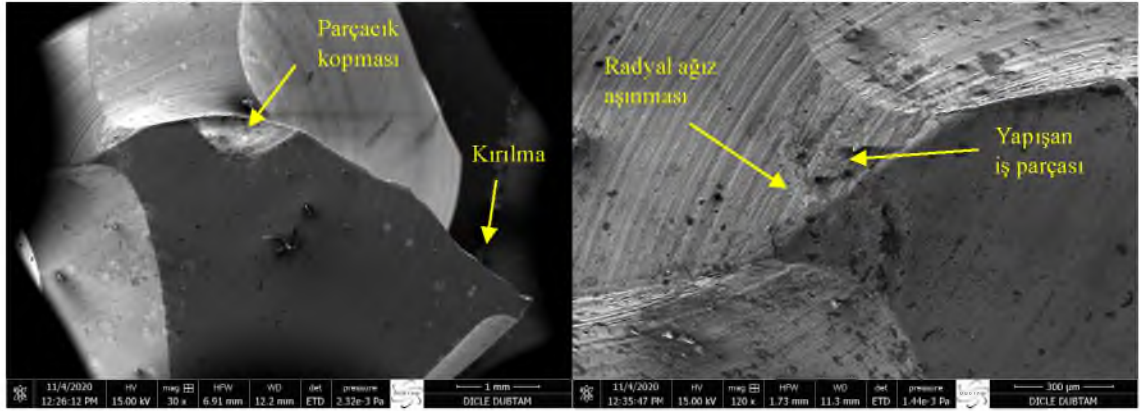
Şekil 5.19. Takım ömrü deneylerinde KİT Inconel 718’de kullanılan takımın uç kısmına ait mikroskop görüntüleri

İU Inconel 718’de kullanılan takıma ait SEM görüntüleri Şekil 5.20’de ve KİT Inconel 718 alaşımında kullanılan takıma ait SEM görüntüleri Şekil 5.21’de verilmiştir. KİT Inconel 718 iş parçasında kullanılan kesici takım, İU Inconel 718’de kullanılan kesici takıma kıyasla fazladan 1 adet delik delmiştir. Bu durumun sebebi, literatürde bulunan birkaç çalışmadan yararlanılarak daha iyi bir şekilde açıklanabilir. Schirra ve Viens (1994), Inconel 718 alaşımının delinmesinde tane boyutunun sabit kalıp sertliğinin artması durumunda, artan bir takım aşınması oranı nedeniyle işlenebilirliğin azaldığını görmüştür. Alaşım sertliğinin sabit kalıp tane boyutunun küçülmesi durumda ise işlenebilirlik oranının arttığını görmüşlerdir. Tablo 5.8’de, yazarların yapmış oldukları bu deneylere ait delik delmede tane boyutu ve sertliğin Inconel 718’in işlenebilirliğine etkisi sonuçları verilmiştir. Tablo 5.8’de ASTM numarası yükseldikçe tane boyutu küçülmektedir. Bu tez çalışmasında ise Inconel 718 alaşımına kriyojenik

işlem uygulanması ile hem sertliğin arttığı hem de tane boyutlarının küçüldüğü görülmüştür. Bu durum, iş parçasında takım aşınması üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkiye sahip değişimler meydana getirmiştir. Olovşjö ve ark. (2010), yaptıkları çalışmaların bir kısmında Inconel 718'in işlenmesi sırasında tane büyüklüğünün takım aşınması üzerinde sertlikten daha etkili olduğunu görmüştür. Fakat yazarlar veri setinin bu durumu desteklemeye yetmediğini belirtmişlerdir.



Şekil 5.20. İÜ Inconel 718’de kullanılan takıma ait SEM görüntüleri



Şekil 5.21. KİT Inconel 718’de kullanılan takıma ait SEM görüntüleri

Tablo 5.8. Delik delmede tane boyutu ve sertliğin Inconel 718'in işlenebilirliğine etkisi (Schirra ve Viens, 1994)

Tane Boyutu	Sertlik	İşlenebilirlik Oranı
ASTM 1-2	44 Rc	%15
ASTM 2-4	32 Rc	%18
ASTM 2-4	38 Rc	%17
ASTM 2-4	42 Rc	%16
ASTM 4-6	45 Rc	%19
ASTM 8-10	45 Rc	%20
ASTM 2-4	42 Rc	%14 (Tornalama)

Krook ve arkadaşları (2005) Inconel 718 alaşımı ile yaptıkları çalışmada büyük tane boyutunun, küçük tane boyutuna kıyasla daha büyük takım aşınmasına yol açtığını görmüşlerdir. Yazarlar Inconel 718 alaşımında karbürlerin, takım aşınmasını olumsuz yönde etkilemede γ'' ve γ' fazlarından daha önemli bir role sahip olduğunu anlamışlardır. Bu durumda, KİT Inconel 718 alaşımında kriyojenik işlemde sonra incelen ve homojen dağılan karbürlerin takım aşınması üzerindeki olumlu etkisinin, mikroyapıda çökelen γ'' fazlarının olumsuz etkisinden daha baskın olabileceği düşünülebilir. Ayrıca araştırmacılar, Inconel 718 alaşımında yerel karbür içeriğinin yüksek olabildiğini ve kesici takımın bir grup karbüre maruz kalması sonucunda ise anlık takım aşınması meydana gelebileceğini belirtmişlerdir. Bu tez çalışmasının mikroyapı analizi bölümünde (Bkz. Bölüm 5.1), KİT Inconel 718 alaşımında karbür dağılımının İU Inconel 718 alaşımına göre daha homojen olduğu olduğu görülebilir. Sonuç olarak, KİT Inconel 718'de karbürlerin inceli homojen dağılmasının ve tane küçülmesinin takım aşınması üzerindeki olumlu etkilerinin, iş parçası sertliğinin artmasının ve ikincil fazların çökmesinin olumsuz etkilerinden daha baskın geldiği ve bu nedenle kullanılan kesici takımın fazlardan 1 adet delik delebildiği söylenebilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kriyojenik işlem uygulanmış ve uygulanmamış Inconel 718 iş parçalarının delinmesinde elde edilen kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve ömrü ile mikroyapı ve mikrosertlik analizi sonuçları incelenip değerlendirilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- ✓ Kriyojenik işlem, Inconel 718 alaşımında mevcut olan karbürlerin incelmesine ve mikroyapı içerisinde homojen dağılmasına sebep olmuştur.
- ✓ Kriyojenik işlemden sonra Inconel 718 alaşımında özellikle tane sınırlarında daha fazla sayıda γ'' fazının olduğu görülmüştür.
- ✓ Kriyojenik işlem Inconel 718 alaşımında bulunan tanelerin küçülmesine ve yeni tanelerin oluşmasına sebep olmuştur.
- ✓ Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718'in mikrosertliği 465 HV ve kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718'in sertliği 500 HV çıkmıştır. Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718'in mikrosertliğinde %7,5 oranında bir artış meydana gelmiştir.
- ✓ En yüksek ilerleme kuvveti değeri kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 alaşımında 2119 N ve kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımında 2154 N'dur. Her iki iş parçasının delinmesinde de elde edilen en yüksek ilerleme kuvveti değerleri 16 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir.
- ✓ En düşük ilerleme kuvveti değeri kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçasında 1223 N ve kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 iş parçasında 1301 N'dur. Bu değerler, her iki iş parçasında da 19 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir.
- ✓ Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımının sertliğinin artması, artan akma dayanımı nedeniyle ilerleme kuvvetlerinin yükselmesine neden olmuştur.
- ✓ İş parçalarının delinmesinde birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasıyla nedeniyle ilerlemenin artması ile ilerleme kuvvetlerinde bir artış meydana gelmiştir.
- ✓ İş parçalarının delinmesinde elde edilen ilerleme kuvvetleri, 16 m/dak kesme hızına kadar iş sertleşmesi etkisi nedeniyle yükselmiştir. 16 m/dak kesme

hızından sonra kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle ilerleme kuvvetlerinde düşüş meydana gelmiştir.

- ✓ Kriyojenik işlem uygulanmış ve kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçasında sırasıyla en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değeri 1,43 μm ve 1,465 μm 'dir. Bu sonuçlar her iki iş parçasında da 19 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir.
- ✓ Kriyojenik işlem uygulanmamış ve kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 malzemelerinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri sırasıyla 0,92 μm ve 0,8725 μm ölçülmüştür. Bu değerler 16 m/dak kesme hızı ve 0,06 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir.
- ✓ Inconel 718 iş parçasına kriyojenik işlem uygulanması sonucunda karbürlerin inceli homojen dağılması ve tanelerin inceli yüzey pürüzlülüğünü olumlu yönde etkilemiş, malzeme sertliğinin artması ve γ'' fazlarının çökmesi ise olumsuz yönde etkilemiştir. Bu etkiler sonucunda kriyojenik işlem uygulanan Inconel 718 iş parçasının yüzey pürüzlülüğü değerlerinde bir iyileşme meydana gelmiştir.
- ✓ Her iki iş parçasında da ilerlemenin artması, birim zamanda çıkarılan talaş hacmini artırarak kesme kuvvetlerinin ve titreşimin artmasına dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Ayrıca ilerlemenin artması sonucunda artan sıcaklık, kesici takımın daha fazla aşınmasına ve sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünün bozulmasına neden olmuştur.
- ✓ 16 m/dak kesme hızına kadar kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerleri düşmüştür. Bu durum, Inconel 718 alaşımının delinmesinde artan kesme hızının BUE oluşumunu ve takım ile fener milinin titreşimini azaltması sonucunda olmuştur. 16 m/dak kesme hızından sonra yüzey pürüzlülüğü değerlerinde meydana gelen artış yüksek kesme hızlarında kesici takımın hızla aşınmasından dolayı olmuştur.
- ✓ İşleme deneylerinde, kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasının kriyojenik işlem uygulanmamış iş parçasına göre ilerleme kuvvetleri yaklaşık olarak %7,5 oranında daha yüksek çıkarken, yüzey pürüzlülük değerleri ise yaklaşık olarak %4,5 oranında daha düşük çıkmıştır.

- ✓ Inconel 718 iş parçasına uygulanan kriyojenik işlem ile artan sertlik değeri, artan akma dayanımı nedeniyle takım ömrü deneylerindeki kesme kuvvetlerinin yükselmesine neden olmuştur.
- ✓ Inconel 718 iş parçasına kriyojenik işlem uygulanması sonucunda mikroyapıda bulunan karbürlerin incelendiği, homojen dağıldığı ve tane yapılarının küçüldüğü görülmüştür. Söz konusu bu durum takım ömrü deneylerinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinde genel olarak bir iyileşme sağlamıştır.
- ✓ Takım ömrü deneylerinde kesici takımın aşınması nedeniyle delinen her bir delikten sonra ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri bir önceki delik delme işlemine göre artış göstermiştir.
- ✓ Takım ömrü deneylerinde kullanılan takımlar incelendiğinde, her iki iş parçasında da kullanılan kesici takımlarda yan yüzey aşınmasının, BUE'nin ve radyal ağız aşınmasının etkin olduğu görülmüştür. Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takımında çentik aşınması ve kriyojenik işlem uygulanmış iş parçasında kullanılan kesici takımda ise parçaçık kopması meydana gelmiştir.
- ✓ Kriyojenik işlem uygulanmamış Inconel 718 iş parçasında kullanılan kesici takım 8 delik, kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 iş parçasında kullanılan kesici takım 9 delik delmiştir. Inconel 718 iş parçasına kriyojenik işlem uygulanması ile karbürlerin inceliyor homojen dağılması ve tanelerin küçülmesi takım aşınması üzerindeki olumlu etkiler sağlamış, iş parçası sertliğinin artması ve γ'' fazların çökmesi ise takım aşınması üzerindeki olumsuz etkiler sağlamıştır. Bu olumlu etkilerin olumsuz etkilerden daha baskın gelmesi sonucunda kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımında kullanılan kesici takım fazladan 1 adet delik delmesine yardımcı olmuştur.

Kriyojenik işlemin, Inconel 718 iş parçasının delik delme işlemlerinde, deneysel sonuçlara etkisini görmek için gerçekleştirilen bu deneysel çalışmanın sonuçlarının bundan sonraki yapılacak çalışmalara kaynak olması için aşağıdaki öneriler getirilebilir.

- ✓ Yapılan literatür araştırmaları sonucunda, malzemelere kriyojenik işlem uygulanmasının ardından yapılan talaş kaldırma işlemlerine yönelik karşılaştırmalı çalışmaların oldukça yetersiz olduğu görülmüştür.

- ✓ Farklı sürelerde uygulanan kriyojenik işlemlerin Inconel 718 iş parçasının işlenebilirliği üzerinde etkisi araştırılabilir.
- ✓ Özellikle işlenebilirliği düşük malzemelere uygulanan kriyojenik işlemin talaş kaldırma işlemleri üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- ✓ Inconel 718 alaşımına uygulanan kriyojenik işlemin, talaş kaldırma işlemleri sırasında meydana gelen talaşların, titreşimin ve sıcaklığın üzerindeki etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abu-Mahfouz, I., 2003, Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 707–720
- Akıncıoğlu, S., Gökkaya, H., Uygur, İ., 2015, A review of cryogenic treatment on cutting tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78, 1609–1627
- Akkurt, M., 1998, *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları*”, Birsen Yayınevi, Ankara
- Akkurt, A., 2009, Delik yüzeylerine uygulanan yüzey iyileştirme işlemlerinin alüminyum alaşımı malzemeler üzerinde araştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), Karabük
- Alava, L. A., 2008, Multistage Cryogenic Treatment Of Materials: Process Fundamentals And Examples Of Application, *Proceedings of the 10th IIR International Conference*, Çek Cumhuriyeti
- Altın, A., Gökkaya, H., Nalbant, M., 2006, İşleme parametrelerinden kesme hızının Inconel 718 süper alaşımın işlenebilirliğine etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3), 581-586
- Arunachalam, R. and Mannan, M. A., 2000, Machinability of nickel-based high temperature alloys, *Machining Science and Technology* , 4(1), 127-168
- Askeland, D. R., 1998, *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt-1*, Nobel Akademik Yayıncılık
- Atmaca, E. S., 2015, Inconel 718 süperalaşımının PVD yöntemi ile AlTiN ve CrN kaplanması ve karakterize edilmesi, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1 135
- Ay, M., 2013, Inconel 718 nikel alaşımının elektro-termal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 1-244
- Azadian, S., Wei, L. Y., Warren, R., 2004, Delta phase precipitation in Inconel 718, *Materials Characterization*, 53(1), 7-16
- Baldissera, P. ve Delprete, C., 2008, Deep cryogenic treatment: a bibliographic review, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2, 1-11
- Baldissera, P. and Delprete, C., 2009, Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel, *Materials and Design*, 30, 1435–1440

- Bargel H. J. ve Schulze G., 1980, Malzeme Bilgisi Cilt-2, MBEAE Matbaası, Gebze
- Barron, R. F., 1974, Do treatment at temperature below -120°F help increase the wear resistance of tool steels? Here are some research findings that indicate they do, Heat Treat, 14–17
- Barron, R. F., 1982, Cryogenic Treatment of Metals to Improve Wear Resistance, Cryogenics, 22(8), 409–13
- Bartle, E.W., 1953, Carbon Dioxide Permits Improved Machined Time, Machine, 59(8), 157-158
- Basile, A. O. ve Radavich, J. F., 1991, A Current T-T-T Diagram for Wrought Alloy 718, The Minerals, Metals & Materials Society, 325-335
- Başaran, A., 1998, Elektron ışıını ve tig kaynağı yöntemleriyle birleştirilmiş Inconel 718 malzemenin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1-93
- Bayraktar, Ş. ve Demir, O., 2017, Nikel esaslı Inconel alaşımlarının işlenebilirliği, 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ
- Bayraktar, Ş., Sıyambaş, Y., Turgut, Y., 2017, Delik delme prosesi: bir araştırma, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2), 120-130
- Beer, N, Özkaya, E., Biermann, D., 2014, Drilling of Inconel 718 with Geometry-modified Twist Drills, Procedia CIRP, 24 , 49-55
- Belan, J., Kuchariková, L., Tillová, E., Vaško, A., 2017, The influence of applied heat-treatment on IN 718 fatigue life at three point flexural bending, Analı Zavoda za Povijesne Znanosti Hrvatske Akademije Znanosti i Umjetnosti u Dubrovniku, 56, 167-170
- Beno, T. and Hullıng, T. U., 2012, Measurement of Cutting Edge Temperature in Drilling, 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Athens, 531-536
- Carlson, E. A., 1991, Cold treating, cryogenic treatment of steel, ASM Handbook, 4, ASM International, Pennsylvania, U.S.A. 203–206
- Chen, K., Dong, J., Yao, Z., 2019, Creep Failure and Damage Mechanism of Inconel 718 Alloy at 800–900 °C. Metals and Materials International
- Chen, Y.C and Liao, Y. S., 2003, Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy, Journal of Materials Processing Technology, 140, 269-273
- Choudhury, I. A. ve El-Baradie, M. A., 1998, Machinability of nickel-base super alloys: a general review, Journal of Materials Processing Technology, 77, 278–284
- Collins, D. N., 1998, Cryogenic treatment of tool steels, Adv. Mater. Process., 154 (6), 23–29

- Collins, D. N. , Dormer, J., 1997, Deep cryogenic treatment of a D2 cold-work tool steel, *Heat Treat. Metals*, 71–74
- Cuesta, M., Aristimuño, P., Garay, A., Arrazola, P. J., 2016, Heat transferred to the workpiece based on temperature measurements by IR technique in dry and lubricated drilling of Inconel 718, *Applied Thermal Engineering*, 104, 309-318
- Çakır, A., Kavak, N., Duran, A., 2014, Kesici takım geometrisinin delik delme performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi, 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2014), Bursa
- Çakır, F. H. ve Çelik, O. N., 2017, The Effects of Cryogenic Treatment on The Toughness and Tribological Behaviors of Eutectoid Steel, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31, 3233-3239
- Çakır, M.C., 1999, Modern talaşlı imalatın esasları, *VİPAŞ*, 239-250
- Çakır, M. C., 2000, Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri, *Vipaş A.Ş*, Bursa, 350-390
- Çay, V. A. ve Ozan, S. 2005, Süperalaşımlar ve uygulama alanları, *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 178 - 188
- Çoğun, C. ve Özses, B., 2002, Bilgisayar sayısal denetimli takım tezgahlarında değişik işleme koşullarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(1), 59-75
- Çiçek, A., Kara, F., Kıvak, T., Ekici, E., 2013, Evaluation of machinability of hardened and cryo treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41, 461-469
- Çiçek, A., Kıvak, T., Turgut, Y., Uygur, İ., Ekici, E., 2011, Derin kriyojenik işlemin kesme kuvvetleri, delik çapları ve takım ömrü üzerine etkileri, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 33-36
- Darwin, J. D., Mohan, L. D., Nagarajan, G., 2007, Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of Chrome Silicon spring steel by Taguchi method, *Int J Mat Sci*, 2(1), 17–28
- Darwin, J. D., Mohan, L. D., Nagarajan, G., 2008, Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18% Cr martensitic stainless steel by Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1–3), 241–247
- Das, D., 2011, Structure-Property Correlation of Cryotreated AISI D2 Steel, *Doctoral Dissertation, Department of Metallurgy and Materials Engineering Bengal Engineering and Science University, Howrah*
- Davis, J.R., 1997, Heat Resistant Materials, *ASM Specialty Handbook*, ASM International, 221-254.

- Davis, J. R., 2000, Nickel, Cobalt, and Their Alloys, ASM Specialty Handbook, 1, 1-421
- Davis, J. R., 2000, ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys, ASM International, 310-312
- Demir, E., ve Toktaş, İ., 2014, AISI D2 çeliğine uygulanan farklı bekletme sürelerindeki derin kriyojenik işlemin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi, ISITES 2014 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science , Karabük, 1-12
- Demir, İ. D. K. ve Uygur, İ., 2017, Kriyojenik işlem uygulanmış dökme demir malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5, 210-219
- Deshpande, Y. V., Andhare, A. B., Padole, P. M., 2018, How cryogenic techniques help in machining of nickel alloys? A review, Machining Science and Technology, 22(4), 543-584
- Dobbins, D. B., 1995, Cryogenic treatment can boost life, Metalforming, 29
- Donachie, M. J., and Donachie, S. J., 2000, Superalloys: A Technical Guide, ASM International
- Dudzinski, D., Devillez, A., Moufki, A., Larrouquère, D., Zerrouki, V., Vigneau, J., 2004, A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(4), 439-456
- Dumasia, C. A., Kulkarni, V., A., Sonar, K., 2017, A review on the effect of cryogenic treatment on metals, International Research Journal of Engineering and Technology, 4(7), 2402-2406
- Dursun, M., 2007, Titanyum ve Inconel 718 malzemelerinin frezelenmesinde takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün araştırılması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 1-180
- El-Khabeery, M. M., Saleh, S. M., Ramadan, M. R., 1991, Some observations of surface integrity of deep drilling holes, Wear, 142(2), 331-349
- Ersöz E. ve Ovalı I., 2018, AISI D2 soğuk iş takım çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin aşınma davranışları üzerindeki etkisi, Politeknik Dergisi, 21(2), 411-417
- Ertunç, H. M. ve Sevim, İ., 2001, Kesici takımların aşınmasını gözlemleme üzerine yapılan çalışmalar, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 55 - 62

- Ezugwu, E. O., Wang, Z. M., Machado, A. R., 1999, The machinability of nickel-based alloys: a review, *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 1-16
- Ezugwu, E. O., Bonney, J., Yamane, Y., 2003, An overview of the machinability of aeroengine alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 134(2), 233-253
- Ezugwu, E. O., 2005, Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12-13), 1353-1367
- Farid, A., Sharif, S., Namazi, H., 2009, Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity when drilling and hole making in Inconel 718. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2(1), 564-569
- Fu, S., Dong, J., Zhang, M., Wang, N., Xie, X., 2010, Research on Inconel 718 type alloys with improvement of temperature capability, 7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives, Pittsburgh, 281-296.
- Gao, Y., Zhang, D., Cao, M., Chen, R., Feng, Z., Poprawe, R., Schleifenbaum, J. H., Ziegler, S., 2019, Effect of δ phase on high temperature mechanical performances of Inconel 718 fabricated with SLM process, *Materials Science and Engineering: A*, 767
- Gill, S.S., Singh, H., Singh, R., Singh, J., 2010, Cryoprocessing of Cutting Tool Materials - A review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48, 175-192
- Girion, M., Dumont, F., Valiorgue, F., Rech, J., Feulvarch, E., Lefebvre, F., Karaouni, H., Jourden, E., 2018, Influence of lubrication modes on residual stresses generation in drilling of 316L, 15-5PH and Inconel 718 alloys, 4th CIRP Conference on Surface Integrity, Jaipur, 41-46
- Gosh, R., 2006, Technology Assessment on Current Advanced Research Projects in Cryogenic Machining, *The Association for Manufacturing Technology*, 1-82
- Gökçe, H., Yavuz, M., Gökçe, H., Şeker, U., 2017, Orjinal matkap geometrisinde delme performansının sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanması, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(1), 27-34
- Höke, G., 2014, Sıvı azotta bekletme ve geleneksel kriyojenik işlemlerin SAE 4140 çeliğin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-69
- Huang, J. Y., Zhu, Y. T., X. Z. Liao, I. J. Beyerlein, M. A. Bourke, T. E. Mitchell, 2003, Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel, *Materials Science and Engineering: A*, 339(1-2), 241-244
- İnanır, Z., 2012, Yüksek çalışma sıcaklıklarının Inconel 718 alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012

- Kalia, S., 2010, Cryogenic Processing: A Study of Materials at Low Temperatures, *Journal of Low Temperature Physics*, 158, 934–945
- Kalidas, S., DeVor R. E., Kapoor S.G., 2001, Experimental investigation of the effect of drill coatings on hole quality under dry and wet drilling, *Surface and Coatings Technology*, 148(2–3), 117-128
- Kalluri, S., Rao, K. B. S., Halford, G. R., McGaw, M. A., 1994, Deformation and Damage Mechanisms in Inconel 718 Superalloy.
- Kaplan, Y., 2010, Delik delmede farklı parametrelerin kesme kuvveti, moment, titreşim, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve çapak oluşumuna etkileri, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-108
- Kara, F., 2014, AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1-179
- Kara, F., Karabatak, M., Ayyıldız, M., Nas, E., 2019, Effect of machinability, microstructure and hardness of deep cryogenic treatment in hard turning of AISI D2 steel with ceramic cutting, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 969-983
- Karabulut, Ş., 2006, Inconel 718 süper alaşımların işlenmesinde talaş kırılma problemleri ve talaş kırıcı tasarımı, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-104
- Karabulut, Y., ve Kaynak, Y., 2020, Drilling process and resulting surface properties of Inconel 718 alloy fabricated by Selective Laser Melting Additive Manufacturing, *Procedia CIRP*, 87, 355-359,
- Khanna, N., Agrawal, C., Gupta, M. K., Song, Q., 2020, Tool wear and hole quality evaluation in cryogenic Drilling of Inconel 718 superalloy, *Tribology International*, 143
- Kıvak, T., 2007, Inconel 718'in delinebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-113
- Kıvak, T., Habalı, K., Şeker U., 2010, Inconel 718'in delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerindeki etkisinin araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(2), 293-298
- Kıvak, T., Habalı, K., Şeker U., 2012, The effect of cutting paramaters on the hole quality and tool wear during the drilling of Inconel 718, *Gazi University Journal of Science*, 25(2), 533-540
- Kishawy, H. A., Hosseini A., 2019, *Machining Difficult-to-Cut Materials*, 1, Springer, 96-137

- Kitaguchi, H., 2012, Microstructure-property relationship in advanced Ni-based superalloys, *Metallurgy – Advances In Materials and Processes*, 19-42
- Kitaguchi H., 2012, *Metallurgy – advances in materials and processes*, Pardhi, P., IntechOpen, USA, 18-42
- Klocke, F., Gerschwiler, K., Fritsch, R., Lung, D., 2006, PVD-coated tools and native ester – an advanced system for environmentally friendly machining, *Surface and Coatings Technology*, 201(7), 4389-4394
- Klopp, W. D., 1995, *Nickel Base Alloys:IN-718*, Aerospace Structural Metals Handbook, USA
- Krook, M., Recina, V., Karlsson, B., 2005, Material properties affecting the machinability of Inconel 718, *Proceedings of the International Symposium on Superalloys and Various Derivatives*, 613-627
- Kumar, S., Singh, D., Kalsi, N. S., 2017, Experimental investigations of surface roughness of Inconel 718 under different machining conditions, *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1179 1185
- Kuo, C. M., Yanga, Y. T., Borb, H. Y., Wei C. N., Tai C. C., 2009, Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy, *Materials Science and Engineering A*, 510-511, 289-294
- Li, H. Z., Zeng, H., Chen, X. Q., 2006, An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts, *Journal of Materials Processing Technology*, 180, 296-304
- Li, J., Zhou, J., Xu, S., Sheng, J., Huang, S., Sun, Y., Sun, Q., Boateng E. A., 2017, Effects of cryogenic treatment on mechanical properties and microstructures of IN718 super-alloy, *Materials Science & Engineering A*, 707, 612-619
- Linde Gas, 2010, *Sub-zero Treatment of Steels*, Special Edition
- Liu, L., Zhai, C., Lu, C., Ding, W., Hirose, A., Kobayashi, K. F., 2005, Study of the effect of δ phase on hydrogen embrittlement of Inconel 718 by notch tensile tests, *Corrosion Science*, 47(2), 355-367
- Meral, G., Sarıkaya, M., Dilipak, H., 2011, Delik delme yönteminde delik kalitesinin taguchi yöntemiyle optimizasyonu, *Mühendis ve Makine*, 52, 42-49
- Meister Katalog, 2020, *Solid carbide cutting tools catalogue*, Germany, 1-52.
- Muralidharan, B. G., Shankar, V., Gill, T. P. S., 1996, Weldability of Inconel 718 - a review, *Indira Gandhi Centre for Atomic Research IGC--175*, Kalppakam, 1-39

- Naiju, C.D., Raja, K., Navin Kumar, N. N., Aditya, C. Y., Kumar, M. S., 2019, Effect of Cryogenic Treatment on Inconel 718 Produced by DMLS Technique, SAE Technical Paper
- Nalbant, H., 2018, Derin Kriyojenik İşlemin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1-74
- Niang, A., Viguier, B., Lacaze, J., 2010, Some features of anisothermal solid-state transformations in alloy 718. *Materials Characterization*, 61(5), 525-534
- Oezkaya, E., Beer, N., Biermann, D., 2016, Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 108, 52-65
- Oezkaya, E., Bücker, M., Strodtick, S., Biermann, D., 2019, A thermomechanical analysis leading to a novel flank face design providing longer tool lives for tools used in the drilling of Inconel 718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 2977–2992
- Olovsjöa, S., Wretlandb, A., Sjöbergb G., 2010, The effect of grain size and hardness of wrought Alloy 718 on the wear of cemented carbide tools, *Wear*, 268(9-10), 1045-1052
- Onnes, H. K., 1894, On the Cryogenic Laboratory at Leiden and on the Production of Very Low Temperature, *Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden*, 14
- Outeiro, J. C., Lenoir, P., Bosselut, A., 2015, Thermo-mechanical effects in drilling using metal working fluids and cryogenic cooling and their impact in tool performance, *Production Engineering - Research and Development*, 9, 551–562
- Palanisamy, D. and Senthil, P., 2018, A comparative study on machinability of cryo-treated and peak aged 15Cr-5Ni precipitation hardened stainless steel, *Measurement*, 116, 162-169
- Pang, K. and Wang, D., 2020, Study on the performances of the drilling process of nickel-based superalloy Inconel 718 with differently micro-textured drilling tools, *International Journal of Mechanical Sciences*, 180
- Patil, P.I. and Tated, R. G., 2012, Comparison of Effects of Cryogenic Treatment on Different Types of Steels: A Review, *International Conference in Computational Intelligence, Nashik-India* ,10-29
- Paulin, P., 1993, Frozen gears, *Gear Technology*, 10(2), 26-29
- Pineau, A. ve Antolovich, S. D., 2009, High temperature fatigue of nickel-base superalloys – A review with special emphasis on deformation modes and oxidation, *Engineering Failure Analysis*, 16(8), 2668-2697

- Radebaugh, R.. 2007, Historical Summary of Cryogenic Activity Prior to 1950, Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress, 3-27
- Radhakrishna C. H. and Rao, K. P., 1994, Studies on creep/stress rupture behaviour of superalloy 718 weldments used in gas turbine applications, Materials at High Temperatures, 12(4), 323-327
- Rahim, E., and Sasahara, H., 2011, An analysis of surface integrity when drilling Inconel 718 using palm oil and synthetic ester under MQL condition, Machining Science and Technology, 15, 76-90
- Reed, R.C., 2006, The Superalloys: Fundamentals and Applications, Cambridge University Press, Cambridge, 1-372
- Reitz, W. and Pendray, J., 2001, Cryoprocessing of materials: a review of current status, Materials and Manufacturing Processes, 16(6), 829-840
- Rezaei, M. A. ve Moosavy, H. N., 2018, The effect of pre-cold treatment on microstructure, weldability and mechanical properties in laser welding of superalloys, Journal of Manufacturing Processes, 34, 339-348
- Roy, S., Kumar, R., Anurag, Panda, A., Das, R. K., 2018, A Brief Review on Machining of Inconel 718, Materials Today: Proceedings, 5(9), 18664-18673
- Sandvik Coramat, 2020, Delik delme formülleri ve tanımları, Web adresi: <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/machining-formulas/definitions/pages/drilling.aspx> [11.07.2020]
- Schafrik, R. E., Ward, D. D., Groh, J. R., 2001, Application of Alloy 718 in GE Aircraft Engines: Past, Present and Next Five Years, Proceedings of the International Symposium on Superalloys and Various Derivatives, 1
- Schirra, J. J. and Viens, D., 1994, Metallurgical factors influencing the machinability of Inconel 718, Superalloys, 827-838.
- Sharman, A. R. C., Amarasinghe, A., Ridgway, K., 2008, Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718, Journal of Materials Processing Technology, 200(1-3), 424-432
- Sims, C. T., 1984, A history of superalloy metallurgy for superalloy metallurgists, Superalloys, 399-419
- Sohrabi, M. J., Mirzadeh, H., Rafiei, M., 2019 Revealing the as-cast and homogenized microstructures of niobium-bearing nickel-based superalloy. Inter Metalcast, 13, 320-330
- Special Metals Corporation, 2007, INCONEL® Alloy 718, Special Metals, Web adresi: <https://www.specialmetals.com/tech-center/alloys.html> [03.07.2020]

- Stoloff, N. S., 1990, Wrought and P/M Superalloys, ASM Handbook- Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys, 1
- Swindeman, R.W. ve Swindeman, M. J., 2008, A comparison of creep models for nickel base alloys for advanced energy systems, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 85 (1-2), 72-79
- Şahin, H. M. ve Acır, A., 2003, Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım ve talaş arasında oluşan sıcaklık dağılımının sonlu farklar metodu ile analizi, Politeknik Dergisi, 6(3), 541-549
- Tekin, E., 1982, Takım çeliklerinin ısı işlemleri, Ankara: Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Yayınları, 226-228
- Thomas, A., El-Wahabi, M., Cabrera, J. M., Prado, J. M., 2006, High temperature deformation of Inconel 718, Journal of Materials Processing Technology, 177 (1-3), 469-472
- Thornton, R., Slatter, T., Jones, A. H., Lewis R., 2011, The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs, Wear, 271, 2386-2395
- Tönshoff, H. K., Spintig, W., König, W., Neises, A., 1994, Machining of holes developments in drilling technology, CIRP Annals, 43(2), 551-561
- Uçak, N., ve Çiçek, A., 2018, Inconel 718 süperalaşımının delinmesinde kriyojenik soğutmanın delme performansı üzerine etkilerinin araştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(3), 1241-1252,
- Uçak, N. ve Çiçek, A., 2018, The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills, Journal of Manufacturing Processes, 31, 662-673,
- Ulutan, D. ve Özel, T., 2011, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51(3), 250-280
- Üzgür, S., 2013, Lazer kaynaklı Inconel 718 süperalaşımının kaynak hassasiyeti için varestreint test düzeneğinin geliştirilmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1-137
- Vimalesh M., Prabhu, S., Sekar, K. S, 2015, Machinability studies in drilling of Inconel 718 super alloy, Applied Mechanics and Materials, 787, 480-484
- Vishwakarma, K. and Chaturvedi, M., 2008, A study of HAZ microfissuring in a newly developed Allvac 718 Plus superalloy, Proceedings of the International Symposium on Superalloys, Pennsylvania, 241-250
- Voort, G. F. V., 1992, Optical Microscopy, Metallography and Microstructures, ASM International, 9, 102-126

- Voort, G. F. V., Gabriel, M. L., Manilova, E. P., 2004, Metallography and microstructures of heat resistant alloys, ASM Handbook, 9, 820-859
- Voort, G. F. V. and Manilova, E. P., 2004, Metallographic techniques for superalloys, Microscopy and Microanalysis, 10(2), 690 - 691
- Yap, T. C., Sivaraos, A., Lim, C. S., Leau, J. W., 2015, Surface Roughness and Cutting Forces in Cryogenic Turning of Carbon Steel, Journal of Engineering Science and Technology, 10(7), 911 - 920
- Yıldız, M., 2019, Özel grafitlerin delik delme işleminin incelenmesi, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-89
- Yıldız, Y., Sundaram, M. M., Rajurkar, K. P., Nalbant, M., 2011, The effects of cold and cryogenic treatments on the machinability of beryllium-copper alloy in electro discharge machining, Industrial and Management Systems Engineering Faculty Publications, 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Madison
- Zhisheng, W., Ping, S., Jinrui, L., Shengsun, H., 2003, Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel, Materials and Design, 24, 687–692
- Zwilsky, K. M. And Langer, E. L., 1992, ASM Handbook - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 2, 1-3407