

Inconel 718 Sac Malzemelerin Lazer İle Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin
Etkilerinin Araştırılması

Murat Uzungörür

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2015

Investigation of Effects of Laser Cutting Process Parameters on Inconel 718
Sheet Metal Materials

Murat Uzungörür

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

May 2015

Inconel 718 Sac Malzemelerin Lazer İle Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin
Etkilerinin Araştırılması

Murat Uzungörür

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon - İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa Ulutan

Mayıs 2015

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Murat Uzungörür 'ün YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Inconel 718 Sac Malzemelerin Lazer İle Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN

Üye : Doç. Dr. Mustafa Ertunç TAT

Üye : Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ümit ER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜLEŞEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Inconel 718 Sac Malzemelerin Lazer İle Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Araştırılması” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 28/05/2015

Murat UZUNGÖRÜR

İmza

ÖZET

Bu çalışmada, Inconel 718 havacılık malzemesinin farklı parametrelerde CO₂ lazer ile kesilmesi sonrasında ortaya çıkan kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve kesme bölgesinin mikroyapısı incelenmiştir. Kesme sırasında lazer gaz basıncının ve lazer kesme gücünün sabit olduğu, kesme gazı basıncının ve ilerleme hızının değiştiği parametreler kullanılmıştır. Kesme işlemi sonrasında numunelerin incelenmesinde kerf genişliği ölçüm projektörü, yüzey profilometre, SEM ve EDS analizleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, bu malzeme için en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. En düşük basınç değeri olan 0,8 bar kesme gazı basıncında yapılan kesme işleminde ortalama kerf genişliği değerlerinin 1,2 bar ve 1,6 bar kesme gazı basıncında yapılan kesme işlemlerine göre düşük olduğu belirlenmiştir. 1,6 bar kesme gazı basıncı ve 6 m/dak 'lık kesme hızında en düşük yüzey pürüzlülüğü (Ra=2,8 µm) değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Inconel 718, Sac metal, Lazer kesme, Kesme parametreleri

SUMMARY

In this study, variations of results of kerf width, surface roughness and microstructure analysis due to CO₂ laser cutting of Inconel 718 aerospace material with different cutting parameters have been evaluated. During the cutting process, parameters of laser gas pressure and laser cutting power are constant while cutting gas pressure and feed rate are variable have been used. After the cut process, samples have been evaluated with kerf width measurement projector, surface profilometer, SEM and EDS analysis. At the end of this study, determination of the best cutting parameters for this material are aimed. It is determined that average kerf width value of 0,8 bar cutting gas pressure is low compared to 1,2 bar and 1,6 bar cutting gas pressure. The lowest surface roughness value (Ra=2,8 μm) is obtained with the cutting process using 1,6 bar cutting gas pressure and 6 m/min feed rate.

Key words: Inconel 718, Sheet metal, Laser cutting, Cutting parameters

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince gerektiğinde tez çalışmam dahilinde ve gerektiğinde tez çalışmam haricinde yardımlarını ve değerli bilgilerini benden esirgemeyen, çalışma azmini ve hırsını örnek aldığım, değerli hocam, tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN 'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Deney numunelerinin hazırlanması ve lazerle kesme işlemleri sırasında yaptıkları yardımlardan dolayı Sayın Melih UÇMAZBAŞ 'a ve Sayın Onur ÇEVİK 'e teşekkür ederim.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin yapılmasında göstermiş olduğu yardım severlikten dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ 'a teşekkür ederim.

SEM ve EDS analizlerinin yapılması sırasında yaptığı yardımlardan dolayı Sayın Kürşad Osman AY 'a teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım süresince olduğu gibi lisansüstü öğrenimim süresince de maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Murat UZUNGÖRÜR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LAZER TEKNOLOJİSİ VE LAZER KESME YÖNTEMİ	3
2.1 Sac Kesme Yöntemleri ve Lazer Teknolojisi	3
2.2 Lazer Kesme	6
2.3 Lazer Kesme Parametreleri ve Özellikleri	8
2.3.1 Kerf Genişliği	9
2.3.2 Isı Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB)	10
2.3.3 Yüzey Pürüzlülüğü	11
2.4 Kesme Gazları	12
2.5. Nozul Tipleri	13
3. LAZER KESME İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	14

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	18
4.1 Çalışmanın Kapsamı	18
4.2 Çalışmada Kullanılan Malzeme Özellikleri	18
4.3 Lazer Kesme Cihazı	19
4.4 Deney Parametreleri	20
4.5 Kerf Genişliği Ölçümü	20
4.6 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	23
4.7 Mikroyapı İncelemesi ve EDS Analizi	25
5. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ	27
5.1 Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları	27
5.2 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları	31
5.3 Mikroyapı ve EDS Analizi İnceleme Sonuçları	46
6. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	61
KAYNAKLAR DİZİNİ	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 İlk oksijen destekli CO ₂ lazer kesme (Ion, 2005)	5
2.2 Lazer Kesmenin Şematik Diyagramı (Webb, 2004)	7
2.3 Lazer kesme yüzey karakteristikleri (Wandera, 2006)	9
2.4 Kerf genişliği (Stournaras, 2009)	10
2.5 Isı tesiri altında kalan bölge - ITAB (Stournaras, 2009)	11
2.6 Nozul tipleri (J. C. Ion, 2005)	13
4.1 Lazer kesme cihazı ve kontrol paneli (Bystronic Laser 3015)	19
4.2 Kerf genişlikleri ölçümünde kullanılan ölçüm projektörü	21
4.3 Numunelerin cihaza bağlanması	22
4.4 Kerf genişliği ölçüm noktaları	22
4.5 Nanovea ST400 yüzey profilometre cihazı ve veri işleme sistemi	23
4.6 Numunelerin mikroskop tablasına bağlanması	24
4.7 JEOL JSM-5600LV Taramalı Elektron Mikroskobu	26
5.1 Lazerle kesilmiş Inconel 718 'in üst yüzey görünüşü; a) 2 m/dak kesme hızı, b) 4 m/dak kesme hızı, c) 6 m/dak kesme hızı, d) 8 m/dak kesme hızı	28
5.2 Kerf genişliği ortalama ölçüm sonuçları	30
5.3 Lazerle kesilmiş A1 ve A2 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 0,8 bar, kesme hızı 2 m/dak.)	34
5.4 Lazerle kesilmiş A3 ve A4 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 0,8 bar, kesme hızı 4 m/dak.)	35
5.5 Lazerle kesilmiş A5 ve A6 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 0,8 bar, kesme hızı 6 m/dak.)	36
5.6 Lazerle kesilmiş A7 ve A8 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 0,8 bar, kesme hızı 8 m/dak.)	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.7 Lazerle kesilmiş B1 ve B2 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,2 bar, kesme hızı 2 m/dak.)	38
5.8 Lazerle kesilmiş B3 ve B4 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,2 bar, kesme hızı 4 m/dak.)	39
5.9 Lazerle kesilmiş B5 ve B6 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,2 bar, kesme hızı 6 m/dak.)	40
5.10 Lazerle kesilmiş B7 ve B8 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,2 bar, kesme hızı 8 m/dak.)	41
5.11 Lazerle kesilmiş C1 ve C2 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,6 bar, kesme hızı 2 m/dak.)	42
5.12 Lazerle kesilmiş C3 ve C4 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,6 bar, kesme hızı 4 m/dak.)	43
5.13 Lazerle kesilmiş C5 ve C6 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,6 bar, kesme hızı 6 m/dak.)	44
5.14 Lazerle kesilmiş C7 ve C8 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,6 bar, kesme hızı 8 m/dak.)	45
5.15 Lazerle kesilmiş A1 ve A2 numunelerinin 0,8 Bar kesme gazı basıncı ve 2 m/dak kesme hızında; a) A1 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) A1 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) A1 numunesinin EDS analizi, d) A2 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) A2 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) A2 numunesinin EDS analizi	47

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
5.16	Lazerle kesilmiş A3 ve A4 numunelerinin 0,8 Bar kesme gazı basıncı ve 4 m/dak kesme hızında; a) A3 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) A3 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) A3 numunesinin EDS analizi, d) A4 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) A4 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) A4 numunesinin EDS analizi	48
5.17	Lazerle kesilmiş A5 ve A6 numunelerinin 0,8 Bar kesme gazı basıncı ve 6 m/dak kesme hızında; a) A5 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) A5 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) A5 numunesinin EDS analizi, d) A6 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) A6 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) A6 numunesinin EDS analizi	49
5.18	Lazerle kesilmiş A7 ve A8 numunelerinin 0,8 Bar kesme gazı basıncı ve 8 m/dak kesme hızında; a) A7 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) A7 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) A7 numunesinin EDS analizi, d) A8 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) A8 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) A8 numunesinin EDS analizi	50
5.19	Lazerle kesilmiş B1 ve B2 numunelerinin 1,2 Bar kesme gazı basıncı ve 2 m/dak kesme hızında; a) B1 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) B1 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) B1 numunesinin EDS analizi, d) B2 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) B2 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) B2 numunesinin EDS analizi	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
5.20	Lazerle kesilmiş B3 ve B4 numunelerinin 1,2 Bar kesme gazı basıncı ve 4 m/dak kesme hızında; a) B3 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) B3 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) B3 numunesinin EDS analizi, d) B4 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) B4 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) B4 numunesinin EDS analizi	53
5.21	Lazerle kesilmiş B5 ve B6 numunelerinin 1,2 Bar kesme gazı basıncı ve 6 m/dak kesme hızında; a) B5 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) B5 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) B5 numunesinin EDS analizi, d) B6 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) B6 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) B6 numunesinin EDS analizi	54
5.22	Lazerle kesilmiş B7 ve B8 numunelerinin 1,2 Bar kesme gazı basıncı ve 8 m/dak kesme hızında; a) B7 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) B7 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) B7 numunesinin EDS analizi, d) B8 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) B8 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) B8 numunesinin EDS analizi	55
5.23	Lazerle kesilmiş C1 ve C2 numunelerinin 1,6 Bar kesme gazı basıncı ve 2 m/dak kesme hızında; a) C1 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) C1 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) C1 numunesinin EDS analizi, d) C2 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) C2 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) C2 numunesinin EDS analizi	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.24 Lazerle kesilmiş C3 ve C4 numunelerinin 1,6 Bar kesme gazı basıncı ve 4 m/dak kesme hızında; a) C3 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) C3 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) C3 numunesinin EDS analizi, d) C4 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) C4 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) C4 numunesinin EDS analizi	58
5.25 Lazerle kesilmiş C5 ve C6 numunelerinin 1,6 Bar kesme gazı basıncı ve 6 m/dak kesme hızında; a) C5 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) C5 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) C5 numunesinin EDS analizi, d) C6 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) C6 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) C6 numunesinin EDS analizi	59
5.26 Lazerle kesilmiş C7 ve C8 numunelerinin 1,6 Bar kesme gazı basıncı ve 8 m/dak kesme hızında; a) C7 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) C7 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) C7 numunesinin EDS analizi, d) C8 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) C8 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) C8 numunesinin EDS analizi	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Inconel 718 malzemenin kimyasal bileşimi	18
4.2 Deney parametreleri	20
4.3 Deney numunelerinin numaralandırılması	25
5.1 Kerf genişliği ölçüm sonuçları	29
5.2 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları	33

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Kısaltmalar****Açıklama**

ITAB	Isı Tesiri Altında Kalmış Bölge
CNC	Bilgisayar Sayımlı Kontrol
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Rz	Ortalama Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü
Rt	Maksimum Tepe Yüksekliği
Rmr	Yüzey Profili Malzeme Oranı
W	Watt
kW	Kilowatt
mW	Miliwatt

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve artan talepler nedeniyle imalat süreçlerinin kaliteden taviz verilmeksizin hızlanması bir gereklilik olmuştur. Sac metal endüstrisinde de son ürünlerin elde edilmesinde en önemli imalat süreçlerinden biri olan kesme işleminin hızlı ve kaliteli olması gerekmektedir. Sac metal kesme işlemi giyotin makas, plazma, su jeti ve lazer gibi çeşitli kesme yöntemleri ile yapılabilmektedir. Lazer ile kesme yöntemi, diğer kesme yöntemleri içinde daha düşük hurda vermesi ve kolay kullanım özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Lazer kesme yönteminde uygun kesme parametreleri seçildiğinde çok hızlı ve düzgün bir kesim yapılabilmektedir (Berkmanns ve Faerber, 2008).

Lazerle kesme yöntemi ile metal ve metal olmayan malzemeler yüksek kesme kalitesi ve kesme hızlarında kesilebilmektedir. Seramik, plastik, ahşap, kumaş ve cam gibi çok çeşitli malzemeler lazer ile kesilebilir. Lazer kesme yönteminin bir bilgisayar sistemi ile programlama yapılarak kullanılabilmesi sayesinde, birçok farklı şekildeki parçanın kesilmesi mümkün olmakta ve işlem süresi oldukça kısa sürmektedir. Lazer kesme işlemi için program yazmak oldukça hızlı ve kolaydır. Bu sayede kesme programı ile çok karmaşık şekilli parçaların kesilmesi mümkün olabilmektedir. Ayrıca farklı şekillere sahip parçalar arasında çok kolay ve hızlı bir şekilde geçiş yapmak mümkündür. Bu esneklik, stok sayısının az olmasını ve kesme sonucunda elde edilen ürünlerin çok çeşitli olmasını sağlamaktadır.

Ancak lazer kesme yöntemi ile kaliteli bir sonuç elde etmek için sadece kesilecek malzemeye uygun lazer kesme makinesinin seçilmesi yeterli değildir. Makine seçimine ek olarak kesme parametreleri olan; kesme hızı ve gaz basıncının da uygun şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Kesme parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi kesme işleminin en az termal hasar ile tamamlanması için önemlidir (Stournaras vd., 2009).

Lazer kesme yöntemi, diğer termal kesme yöntemlerinden farklı olarak daha yüksek kesme kalitesi, daha pürüzsüz kesme yüzeyi, daha dar kesme ağız ve daha dar ısı etkisi altında kalmış bölge oluşturmaktadır. Bu yönleriyle lazer kesme yöntemi diğer yöntemlerden daha üstündür (Patel vd., 2011).

Bu çalışmada havacılık sektöründe yaygın kullanımı olan Inconel 718 sac malzemenin CO₂ lazer yöntemi ile kesilmesine, farklı lazer kesme parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmanın giriş bölümünde, amaç ve yöntem bilgisi verilmektedir. İkinci bölümde lazer teknolojisi ve lazer kesme yöntemi tanıtılmış, üçüncü bölümde lazer kesme yöntemi ile ilgili literatür araştırması, dördüncü bölümde deneysel çalışmalar, beşinci bölümde deney sonuçları ve irdelenmesi, altıncı bölümde ise genel sonuçlar ve tartışma ele alınmıştır. Sonuç olarak; CO₂ lazer kesme yönteminin Inconel 718 sac malzemelerde, karmaşık geometrili parçaların kesilmesinde kullanımının mümkün olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.

2. LAZER TEKNOLOJİSİ VE LAZER KESME YÖNTEMİ

2.1. Sac Kesme Yöntemleri ve Lazer Teknolojisi

Sac metallerin kesilmesinde lazer kesme yönteminin yanında su jeti, plazma ve oksijen-yakıt ile kesme yöntemleri de bulunmaktadır.

Su jeti ile kesme işleminde, kesme olayını gerçekleştirmek için yüksek basınç ve yüksek hızda su akışı kullanılır. Yüksek basınç ve akış hızını elde etmek için 0,1-0,4 mm çap aralığında nozul kullanılır. Kesme işlemi için gerekli enerji, 400 MPa 'a kadar çıkabilen basınç ve 900 m/sn 'ye kadar çıkabilen akış hızı ile sağlanmaktadır. Cihazda kullanılan nozul; safir, yakut ya da elmasan yapılmaktadır. Elmas aşınmaya karşı yüksek dirençli olmasına rağmen maliyet olarak dezavantajlıdır. Kesme sırasında oluşan talaşların filtre kullanımı ile sistemden uzaklaştırılması önemlidir. Nozulun iş parçasına olan uzaklığı, nozul çapı, su basıncı ve ilerleme hızı parametreleri kesme işleminin önemli parametreleridir. İlerleme hızı, kesilen malzemeye ve malzeme kalınlığına göre 5 mm/sn ile 500 mm/sn arasında değişiklik göstermektedir. Kesme işleminde su akışına kesmeyi kolaylaştıran aşındırıcı parçacıklar katılmaktadır. Alüminyum oksit, silisyum dioksit ve silikat minerali kullanılan aşındırıcı parçacıklardır. Aşındırıcı parçacıklar yaklaşık 0,25 kg/dak miktarında su akışına katılmaktadır. Su jeti ile kesme işlemi, tekstil, kompozit, deri, halı, taş, cam gibi malzemeler ile sac metallerin kesilmesinde kullanılmaktadır (Groover, 2010). Su jeti modern sanayide otomotiv sektörü, havacılık sektörü, inşaat mühendisliği ve kimyasal prosesler gibi bir çok alanda kullanılmaktadır (Krajcarz, 2014).

Plazma ile kesme işleminde, plazma olarak tanımlanan aşırı ısıtılmış, elektriksel iyonize gaz kullanılır. Plazma akışının sıcaklığı 10000 °C ile 14000 °C arasında değişmektedir (Subbarao, 2013). Kesme işlemi, metalin plazma akışının yüksek sıcaklığı ile ergimesi ve ergimiş metalin ortamdaki uzaklaştırılması ile gerçekleşmektedir. Plazma arkı, torç içindeki elektrot ile anot görevi gören iş parçası arasında oluşmaktadır. Nitrojen, Argon, Hidrojen ya da bu gazların karışımı plazmayı oluşturmak için kullanılmaktadır. Plazma ile kesme, yalnız karbonlu çeliklerin, paslanmaz çeliklerin ve alüminyum malzemelerin kesilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Groover, 2010).

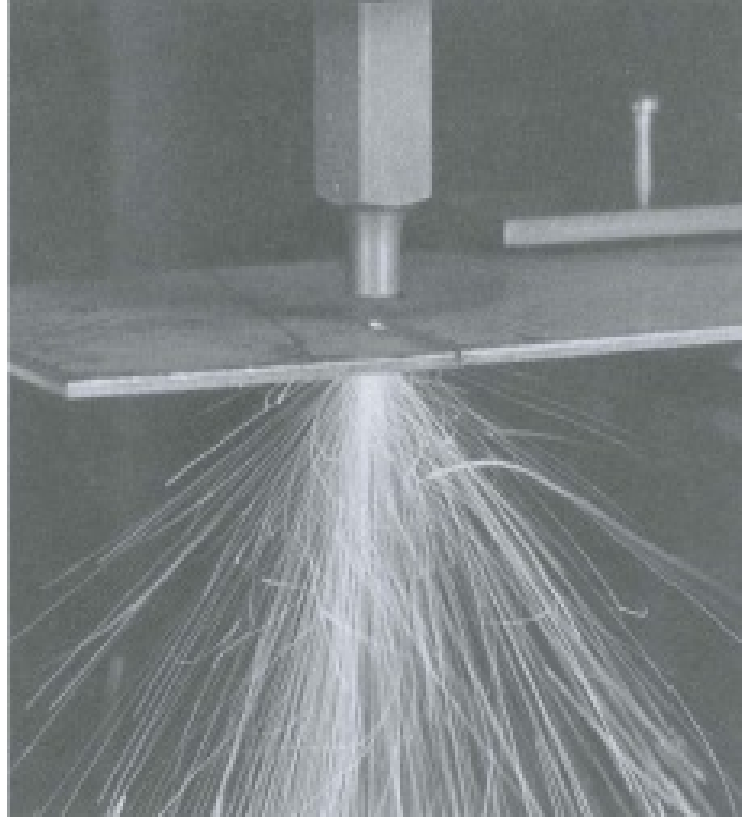
Oksi-yakıt ile kesme işleminde, kullanılan yakıtın yanmasından elde edilen ısı ve metalin Oksijen ile egzotermik reaksiyona girmesinden faydalanılmaktadır. Yakıt gazının ve Oksijen gazının uygun oranda karışımı kesme sisteminde bulunan torç yardımı ile gerçekleşir. Oksi-yakıt kesme yönteminde ergimiş malzeme uzaklaştırılmasının birincil mekanizması, Oksijen ile kesilen metal arasındaki kimyasal reaksiyondur. Kullanılan yakıt olarak, Asetilen, Propilen, Propan ve Metilasetilen-Propadien karışımlarından biri seçilebilir. Asetilen, en yüksek yanma sıcaklığına sahip olduğundan, kaynak ya da kesme işlemi için en çok tercih edilen yakıttır. Ancak Asetilen gazının depolanması ve kullanılması dikkat gerektirmektedir (Groover, 2010).

Lazer kelimesi, uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışık amplifikasyonu (laser - light amplification by stimulated emission of radiation) anlamına gelmektedir. Lazerler, iğne deliğinden geçebilecek kadar ince olan küçük diyot lazerlerden, üç katlı bina yüksekliğinde olabilen askeri ve araştırma lazerlerine kadar farklı boyutlarda olabilirler. Farklı lazerler, farklı renklerde ışın oluştururlar. Işının rengi lazerin dalga boyuna bağlıdır. CO₂ ve neodim lazerlerinin yaydığı ışınlar, ışık spektrumunun kızılötesi bölgesinde buldukları için insanlar tarafından görülemezler. Ruby ya da Helyum-Neon lazerlerinin kırmızı ışınları ve Argon lazerinin yeşil ve mavi ışınları insanlar tarafından görülebilirler (Hitz vd., 2001).

Metal işlemede lazer oldukça güçlü bir konuma sahiptir. CO₂, Nd:YAG ve fiber lazerler metal işlemede en çok kullanılan lazer tipleridir. CO₂ lazer, Bell Laboratuvarlarında Patel tarafından 1964 yılında bulunmuştur. İlk çalışmalarda 1 mW lazer gücü elde edilmişken, Azot gazının ilave edilmesi elde edilen gücün 200 mW olmasını sağlamıştır. Günümüzde tüm CO₂ lazerleri yaklaşık olarak 0,8:1:7 karışım oranlarında CO₂ / N₂ / He gaz karışımı içermektedir. 4,4 kW 'lık bir CO₂ lazer kesme tezgahı yaklaşık olarak 51 kW elektrik tüketim değerine sahiptir. 1976 yılında güçlü ve kararsız rezonatör kullanılan yüksek performanslı Nd:YAG lazer tanıtılmıştır. Sonrasında ticari amaçlı Nd:YAG lazerler kullanılmaya başlanmıştır (Steen ve Mazumder, 2010). Fiber lazer, 1963 yılında Elias Snitzer tarafından bulunmuştur. Fiber lazerlerin sanayide kullanımı 1980'li yılların sonunu bulmuştur (Gapontsev ve Krupke, 2002).

Koruyucu gaz destekli ilk CO₂ lazer kesme Mayıs 1967 tarihinde Arthur Sullivan ve arkadaşları tarafından SERL 'de (Baldock, UK) yapılmıştır. 1 mm kalınlığındaki çelik levha, potasyum klorür lens kullanılan 300 W gücündeki oksijen ile eşeksenli lazer kesme ile kesilmiştir. İşlem sırasında kullanılan kesme parametreleri günümüzde kullanılan

parametreler ile yüksek oranda benzerlik göstermektedir. İlk oksijen destekli lazer kesim işlemi Şekil 2.1. 'de verilmiştir (Ion vd., 2005).



Şekil 2.1. İlk oksijen destekli CO₂ lazer kesme (Ion, 2005).

Karbondioksit gaz lazerler ve katı hal lazerleri olmak üzere iki tip lazer bulunmaktadır. Sanayi alanında en çok kullanılan lazer, gaz lazeri olan CO₂ lazerdir. CO₂ lazerini oluşturan aktif ortamda %5 Karbondioksit, %10 Nitrojen ve geri kalan kısımda Helyum bulunmaktadır. Oluşan lazer ışını gözle görülmektedir ve kızıl ötesi dalga boyu arasında yer almaktadır. 10 W gücünden başlayarak 45 kW gücüne kadar istenilen güçlerde üretilebilmektedir. Elektrik verimliliği yaklaşık %10 'dur. Nd:YAG (Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet) lazerde ise lazer yayan eleman YAG kristal rodun içindeki Neodim 'dir. %3 ile %5 arasında verimliliği olmaktadır. Fiber lazerlerde katı hal

lazerleri grubuna girmektedir. Elektrik verimliliği %50 'ye varmaktadır. Fiber lazer, genellikle uzun süre bakım gerektirmeden kullanılabilir.

CO₂ lazer ve Nd:YAG lazer arasındaki farklar:

1. CO₂ lazer, gaz lazeri olup, Nd:YAG lazer katı hal lazeridir.
2. CO₂ lazer, 10,6 µm dalga boyuna sahiptir. Nd:YAG lazer, 1,06 µm dalga boyuna sahiptir.
3. CO₂ lazer, plastik, cam, kumaş ve akrilik gibi malzemeler tarafından absorbe edilirken, Nd:YAG lazer bu malzemeler tarafından absorbe edilemez.
4. CO₂ lazer, sanayi alanında en çok kullanılan lazerdir. Nd:YAG lazer, CO₂ lazerden sonra çok kullanılan ikinci lazerdir (Webb ve Jones, 2004).

CO₂ lazer ve fiber lazer arasındaki farklar:

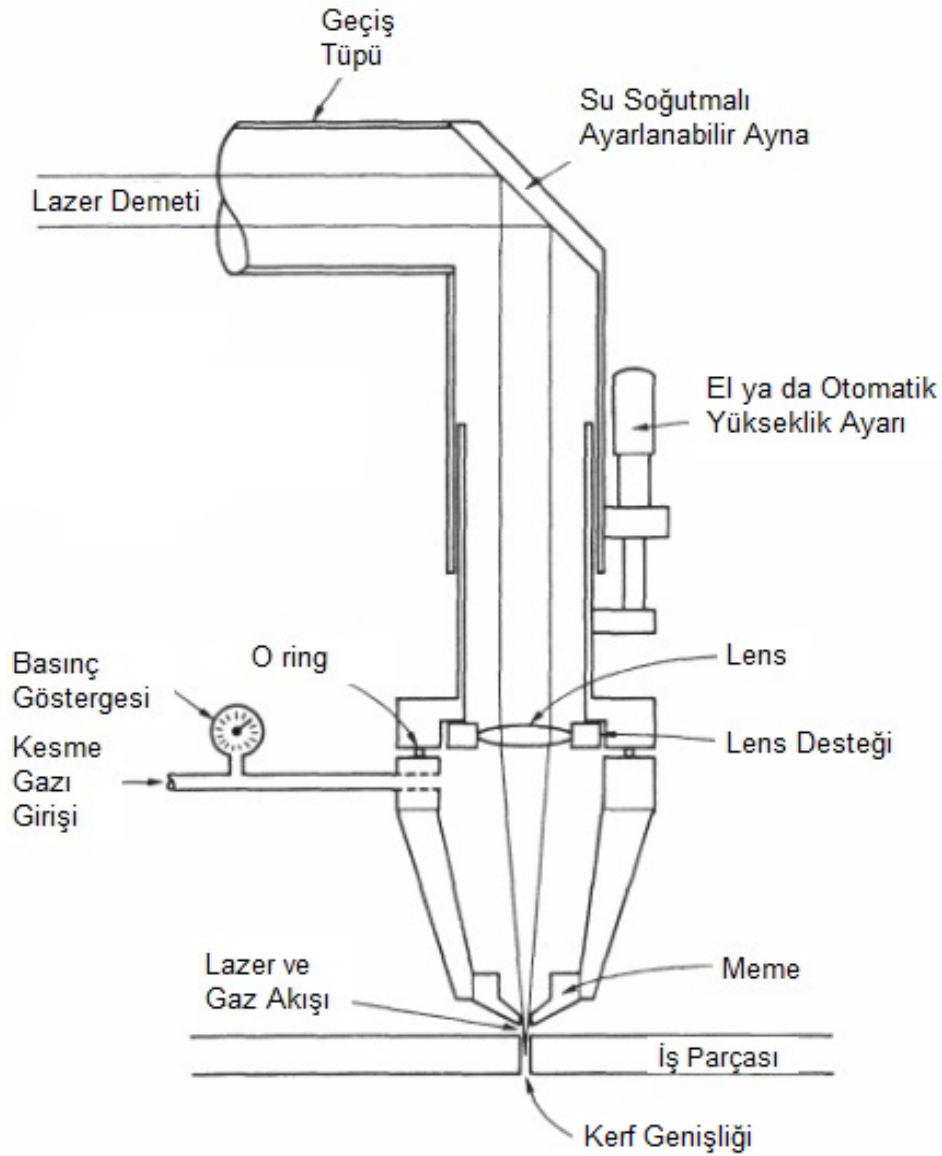
1. CO₂ lazer, gaz lazeri olup, fiber lazer katı hal lazeridir.
2. CO₂ lazer, 10,6 µm dalga boyuna sahiptir. Fiber lazer, 1,06 µm dalga boyuna sahiptir.
3. Fiber lazerler aynı koşullarda CO₂ lazere göre metal malzemeleri 3 kata kadar daha hızlı kesebilir.
4. CO₂ lazerlerin maliyeti fiber lazerlere göre daha düşüktür.
5. Fiber lazer ile bakır, pirinç ve alüminyum gibi malzemeleri kesebilirken, CO₂ lazer, yansıma tehlikesi nedeni ile kesemez (Kellens vd., 2014).

2.2. Lazer Kesme

Lazerle kesme günümüzde hızlı, düşük hasarlı ve sac üzerinden karmaşık şekilli parçaların kesilmesinde kullanılmaktadır.

Lazer kesim işleminin temel mekanizması aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Yüksek yoğunluktaki kızılötesi ışık ışını lazer tarafında oluşturulur.
2. Işın sistem parçalarından biri olan lens yardımı ile iş parçası üzerine odaklanır.
3. İş parçası üzerine gelen ışın malzemeyi ısıtır ve etki ettiği bölgeyi eritir (genellikle 0,5 mm 'den küçük çapta).
4. Ergimiş malzeme, lazer ışını ile birlikte iş parçasına etkiyen basınçlı gaz yardımı ile kesilen bölgeden uzaklaştırılır (Şekil 2.2) (Webb ve Jones, 2004).



Şekil 2.2. Lazer Kesmenin Şematik Diyagramı (Webb, 2004).

Lazer kesmenin avantajları, kesme kalitesi ve işlem özellikleri olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Kesme kalitesi özellikleri:

1. Kesme işlemi sonucunda oluşan kerf genişliği (kesim işlemi sonucunda malzemede oluşan kesme boşluğudur) diğer işlemlere göre oldukça dardır. Bu durum önemli ölçüde malzeme kaybını önlemektedir.

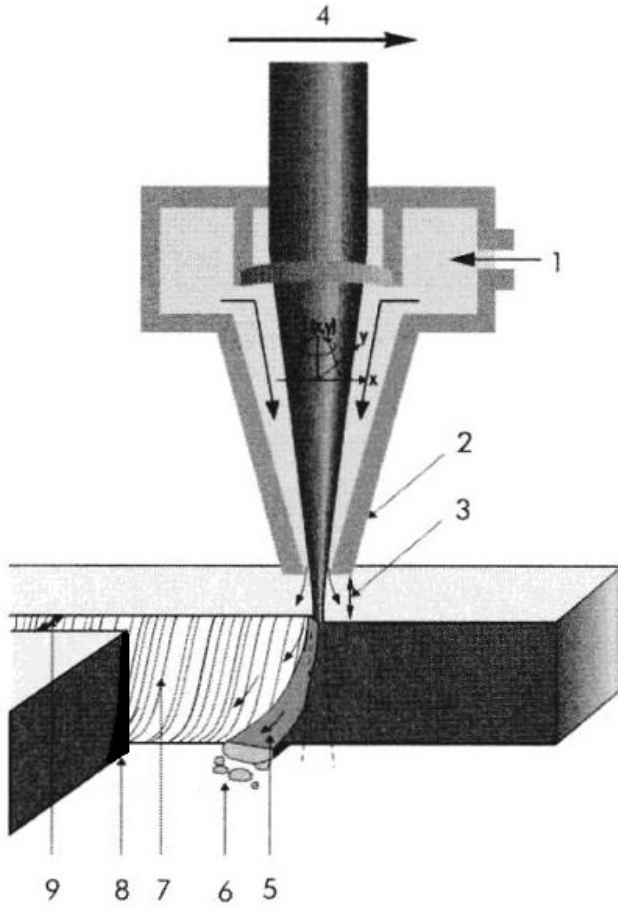
2. Kesilen kenarlar, diğer termal kesim tekniklerinde olduğu gibi yuvarlak kenarlı olmak yerine keskin kenarlı olurlar.
3. Kesilen kenar temiz ve pürüzsüz olur. Kesim, son kesim işlemi olarak kabul edilebilir, kesim ilave temizleme işlemi gerektirmez.
4. Mekanik kesim tekniklerinde olduğu gibi kesilen kenarlarda çapak oluşmaz.
5. Isı tesiri etkisi altında kalan bölge çok dardır. Genellikle yeniden katılaşılan bölgenin genişliği mikrometre mertebelerinde olduğundan kesilen bölgede oluşan bozulmalar önemsizdir (Steen ve Mazumder, 2010).

İşlem özellikleri:

1. Kesme işlemi temassız olduğu için lazer kesme cihazında aşınma olmaz ancak lenslerin temiz tutulması gerekmektedir.
2. Kesim işlemi herhangi bir yönde yapılabilir.
3. Sadece kesme programı değişiklikleri yapıldığı için proses oldukça esnektir (Steen ve Mazumder, 2010).

2.3. Lazer Kesme Parametreleri ve Özellikleri

Lazer kesmenin kalitesi, kesme sırasında iş parçasından çıkarılan malzemenin miktarına ve kesim işleminden etkilenen bölgeye bakılarak belirlenebilir. Kesme kalitesini belirlemek için incelenen karakteristik özellikler kerf genişliği, ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve yüzey pürüzlülüğü özellikleridir. Şekil 2.3. 'de lazer kesme yüzey karakteristikleri gösterilmektedir (Wandera vd., 2006).

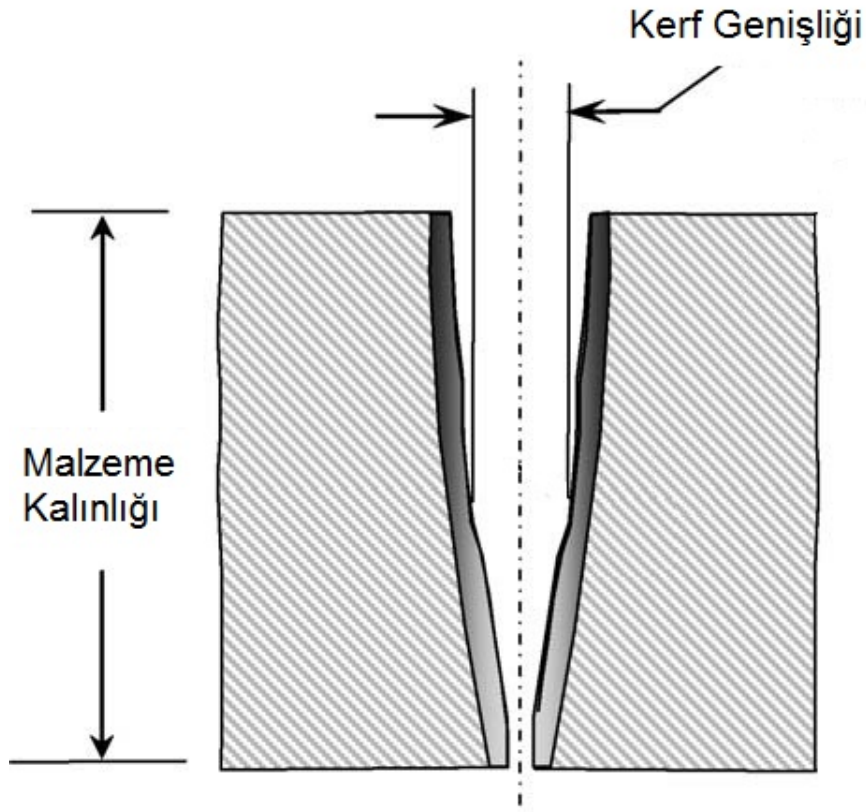


1. Koruyucu Gaz
2. Nozul
3. Nozul mesafesi
4. Kesme hızı
5. Erimiş malzeme
6. Cüruf
7. Kesme pürüzlülüğü
8. Isı tesiri altında kalan bölge
9. Kerf genişliği

Şekil 2.3. Lazer kesme yüzey karakteristikleri (Wandera, 2006).

2.3.1. Kerf genişliği

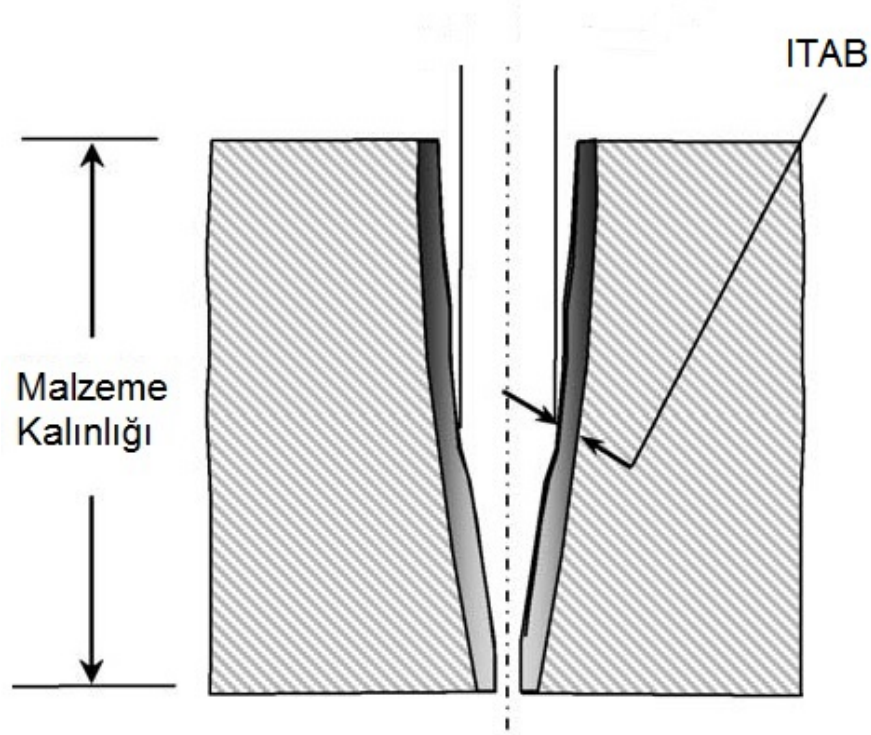
Kerf genişliği, lazer kesme işlemi sırasında oluşan yarığın genişliğidir ve genellikle iş parçasının alt yüzeyinde üst yüzeyinden daha dardır (Şekil 2.4.). Kerf genişliği, kesme işlemi sırasında iş parçasından çıkarılan malzemeyi temsil eder. İş parçasından çıkarılan malzeme aslında israf edilen malzemedir. Bu yüzden küçük kerf genişliği her zaman istenmektedir. Lazer gücü, kesme hızı ve koruyucu gaz basıncı parametrelerinin kerf genişliği üzerinde etkisi bulunmaktadır (Wandera vd., 2006).



Şekil 2.4. Kerf genişliği (Stournaras, 2009).

2.3.2. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB)

Isı tesiri altında kalan bölge lazer kesme işlemi sırasında kesilen kenarın hemen yanında oluŐur (Şekil 2.5.). Isı tesiri altında kalan bölge, metalurjik yapının ısı tarafından etkilendiği ancak ergimenin olmadığı metal bölgesidir. Isı tesiri altında kalan bölgedeki mikroyapı değişiklikleri, lazer kesme işleminde kesme kalitesinin belirlenmesinde göz önünde bulundurulması gereken karakteristik özelliklerden biridir. Isı tesiri altında kalan bölgenin genişliği, kesilen malzemede birim uzunluk başına gelen enerji ve kesilen malzemenin kalınlığına bağlı olarak deđiŐir. Isı tesiri altında kalan bölge genişliği lazer kesme işlemi ısıya duyarlı bölgelerin yakınlarında yapıldığı durumlarda önem taŐımaktadır (Wandera vd., 2006).



Şekil 2.5. Isı tesiri altında kalan bölge - ITAB (Stournaras, 2009).

2.3.3. Yüzey pürüzlülüğü

Lazer kesme ile yapılan kesme işlemleri sonucunda iş parçasında oluşan kesme yüzeyi, yüzey düzensizliğinin belirli bir form almış halidir. Lazer kesme sırasında oluşan dairesel ve yarı dairesel oluklar, lazer ışınının şekline, kesme hızına ve kesmenin oluşum sürecine bağlıdır. Lazer kesme kalitesi, kesme işlemi sonrasında kesitin yüzey kalitesine bakılarak değerlendirilebilir. Kesilen yüzey incelendiğinde iki farklı bölge görülür. Üst bölgede lazer ışınının parçaya giriş tarafı ve alt bölgede lazer ışınının parçadan çıkış tarafı gözlemlenir. Üst bölge, aralarındaki mesafe 0,1 - 0,2 mm arasında olan düzgün olukların bulunduğu bölge iken alt bölge, ergimiş metal artıkları ve daha kaba yüzey karakteristiklerinin bulunduğu bölgedir (Radovanovic ve Dasic, 2006).

Lazer kesmede, iş parçasının kenarları oluklu yapıya sahiptir. Düşük kesme hızlarında, oluklar hemen hemen lazer ışınına paralel olurlar. Kesme hızı arttıkça, oluklar kesme yönünden bükülerek uzaklaşır. Yüzey pürüzlülüğünü belirlemek için en çok

kullanılan parametreler, ortalama maksimum pürüzlülük (Rz) ve ortalama pürüzlülük (Ra) 'tür (Radovanovic ve Dasic, 2006).

2.4. Kesme Gazları

Lazer kesme gazlarının lazer kesme üzerinde 5 temel etkisi bulunmaktadır. Asal gazlar, Azot gibi, kesme sırasında oluşan ergimiş metalin katılaşmadan iş parçasının alt kısmından atılmasını sağlar. Aktif gazlar, Oksijen gibi, kesilen malzeme ile egzotermik reaksiyona girer. Ayrıca aktif gazlar, yüksek ışın yoğunluğu ile ince kesitlerin kesimi sırasında plazma oluşumunu engelleme işlemine de hizmet eder. Optik parçalar gaz akışı yardımı ile cüruf sıçramalarından korunurlar. Son olarak da kesilen kenarlar, ITAB bölgesini dar tutmak için gaz akışı ile soğutulurlar. Kesilen iş parçasının 10 mm üzerinde olması durumunda yardımcı gazlar olmadan, lazer kesme ile yüksek hızda kaliteli kesimler yapmak imkansızdır. Yardımcı gazların önemi kesilecek malzemenin kalınlığı arttıkça önem kazanmaktadır (Ion vd., 2005).

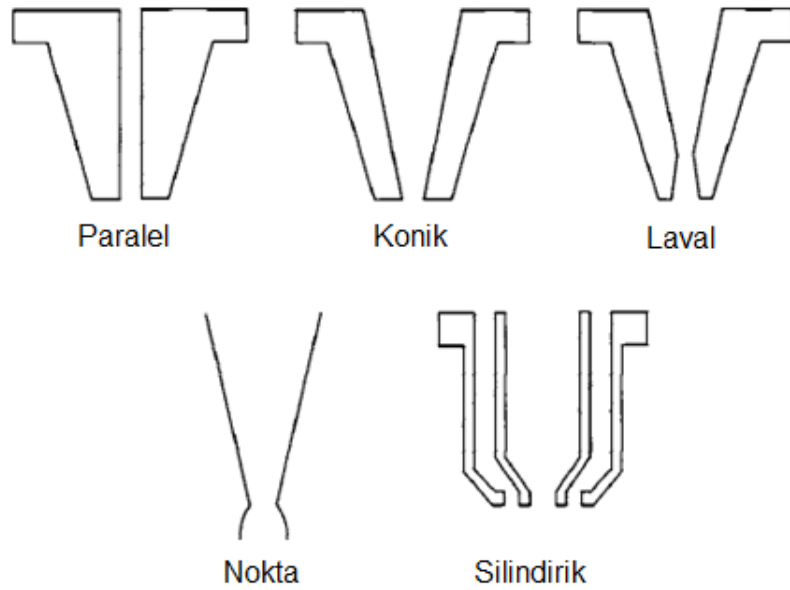
Azot gazı, ucuz olması nedeniyle en çok kullanılan asal gazdır. Saflık oranı nispeten önemsizdir, genellikle %99,8 üzerinde saflık ile temin edilebilir. Azot, genellikle demir bazlı paslanmaz çelik ve nikel alaşımlı malzemelerin yüksek kalite ile kesimlerinin yapılmasında kullanılır. Argon gazı, oksit ve kırılğan titanyum nitrür oluşumunu önlediği için, Titanyum malzemelerin kesiminde en çok kullanılan asal gazdır. Helyum gazı, çok yüksek kesme kalitesi gerektiren uygulamalarda ya da Oksijen gazının kesme işlemine kesinlikle dahil olmaması gereken uygulamalarda kullanılabilir. Hava genellikle Alüminyum, polimerler, ahşap, kompozit, alümina, cam ve kuvars gibi malzemelerin kesiminde kullanılır (Ion vd., 2005).

Oksijen gazı, düşük karbonlu çeliklerin ve paslanmaz çeliklerin lazer ile kesilmesinde kesme kalitesinin ve yüksek kesme hızının öncelikli olduğu, renk değişiminin ikinci planda olduğu durumlarda kullanılır. Kesme işleminin ilk adımlarında artan oksidasyonla birlikte, Oksijen gazının varlığı egzotermik reaksiyon meydana getirerek lazer gücünü artırır. Kesilen plakanın kalınlığı arttıkça kesme işleminin yanma etkisini azaltmak için Oksijen basıncı düşürülür, nozul çapı büyütülür. Kesme işlemi sırasında gaz basıncı çok düşük olursa, ergimiş metal düzgün bir şekilde kesilen bölgeden uzaklaştırılmaz ve çapak oluşmasına neden olur. Ayrıca %60 Helyum gazı, %40 Oksijen

gazı gibi gaz karışımları ile kesme hızı azaltılmadan iyi kalite ile kesim yapılması mümkündür (Ion vd., 2005).

2.5. Nozul Tipleri

Nozul tasarımı, kesme gazının şeklini ve dolayısıyla kesme kalitesini etkiler. Uygulamaya bağlı olarak bir kaç farklı geometride nozul kullanılabilir. En çok kullanılan bazı nozul tipleri Şekil 2.6. 'de gösterilmiştir (Ion vd., 2005).



Şekil 2.6. Nozul tipleri (Ion, 2005).

Lazer kesme işleminde nozulun üç temel görevi bulunmaktadır. Bunlar, gaz akışının lazer ışını ile aynı ekseninde olmasını sağlamak, optik lens hareketlerini en aza indirmek için basıncı azaltmak ve ergime noktasındaki türbülansı azaltmak için iş parçası üzerindeki gaz basıncını düzenlemektir. Nozul çapı 0,8 mm ile 3 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Malzemeye ve plaka kalınlığına göre uygun nozul seçilmektedir. Küçük olan nozullar pürüzlü kenarlara neden olurken, büyük nozullar uygun olmayan gaz akışına neden olarak gaz tüketimini artırmaktadır. Plaka halinde sac kesimi yapan bir çok sanayi kolunda konik ya da silindirik nozul kullanılmaktadır (Ion vd., 2005).

3. LAZER KESME İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Metal malzemelerin kesme uygulamalarında kesme işleminin daha hızlı olması, kesme işlem hassasiyetinin daha yüksek olması, kesme sonrası kenar düzgünlüğü ve ITAB 'ın dar olması gibi sebeplerle lazer kesme yöntemi tercih edilmektedir. Lazer kesme işlemi koruyucu gaz yardımı ile yapılmaktadır. Koruyucu gaz, kesme bölgesindeki egzotermik reaksiyonları arttırmak için ya da kesme bölgesini egzotermik reaksiyonlardan korumak için kullanılır. Böyle bir durumda, Oksijen metallerin kesilmesinde egzotermik reaksiyonları arttırmak için kullanılırken, asal gazlar plastik gibi metal olmayan malzemelerin kesiminde aşırı yanmayı önlemek için kullanılmaktadırlar. Lazer kesme işleminde, lazer çıkış gücü, frekans, kesme hızı, koruyucu gaz basıncı ve odak mesafesi kesim işleminin kalitesini belirleyen parametrelerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, lazer çıkış gücünün kesme kalitesini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Kesme kalitesi, kesilen bölgedeki cüruf yüksekliği ve eğrilik değerlerinin incelenmesiyle değerlendirilmiştir (Yilbas vd., 2008).

Süper alaşım Inconel 718, Nikel ve Nikel bazlı alaşımların arasındaki önemli alaşımlardan biridir ve özellikle havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Inconel 718 yüksek oksitlenme direnci, yüksek korozyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı nedeniyle tercih edilmektedir. Inconel 718, uçak motoru parçalarında, kimyasal proseslerde, basınçlı kaplarda ve tanklarda, buhar türbinlerinde, uzay araçlarında, tıbbi uygulamalarda, denizcilik uygulamalarında, kirlilik kontrol ekipmanlarında kullanılmaktadır. Ancak düşük ısı iletkenliği, sertliği ve kesme takımı malzemesi ile tepkimeye girme eğilimi gibi imalatı zorlaştıran özellikleri bulunmaktadır. Bu yüzden zor işlenebilen malzemeler arasında sınıflandırılmaktadır (Thakur vd., 2009).

Hong vd. (2008) çalışmalarında, CO₂ lazer ile Inconel 718 kaynağını incelemiştir. Inconel 718, kaynak sonrası ısı işlem sırasındaki gerinim yaşlanması çatlaklarına karşı direnç göstermesi nedeniyle iyi kaynaklanabilirlik özellikleri göstermektedir. Fakat, Bor / Niyobyum segregasyonu, laves fazları ve kılcal çatlaklar gibi bazı problemler, Inconel 718 'in kaynak işlemi sırasında ısı etkisi altında kalmış bölgelerinde oluşabilmektedirler. Bu yüzden CO₂ lazer kaynağı ile birleştirilen Inconel 718 'in mikroyapısı ve mekanik

özellikleri, kaynak parametreleri, kaynak öncesi koşulları ve kaynak öncesi ısıl işlem açısından incelenmiştir. Kaynak öncesi ısıl işlem koşullarının yorulma üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, 5 mm kalınlığındaki Inconel 718 için gözenekler gibi hatalar olmadan tam kaynak nüfuzu sağlayabilmek için minimum 6 kW lazer gücü gerektiği bulunmuştur. Maksimum nüfuziyet derinliği ve hatasız kaynak için kaynak işleminin yüzeyin hemen üzerinde (yüzey üzerinden 0 mm yükseklikte) yapılması gerektiği belirlenmiştir.

Lazerle kesmede düşük güç ayarları ile kesme işlemi yapıldığında, ergimiş metalin iş parçası üzerinde aktığı gözlenmiştir. Bu durum kesme kalitesini düşürmektedir. Yapılan çalışmaların sonucunda lazer çıkış gücünün kesim işlemine uygun olarak seçilmesinin kesme kalitesini artırdığı belirlenmiştir (Yilbas vd., 2008).

Lazer kesme işleminin sonucunun düzgün olabilmesi için lazer kesme kaynağının uygun olarak belirlenmesi önemlidir. Ancak, lazer kesiminin kalitesi sadece lazer kesme kaynağının uygun olarak belirlenmesinin yanında, kesme işlemi ile ilgili diğer parametrelerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

- Kesme hızı.
- Kesme gazı basıncı.

İşlem parametrelerinin doğru seçilmesi kesme işleminin minimum ısıl deformasyon ile yapılmasını sağlamaktadır. Kullanımı yaygın olan CO₂ lazer kesme işlemi ile Alüminyum 5083 alaşımı üzerinde kesme kalitesi ile ilgili çalışmalar yapılmış ve kesme kalitesinde etkili en önemli kesme parametreleri olan kerf genişliği, ısı etkisi altında kalmış bölge genişliği ve kesilen kenardaki yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda 1,8 kW gücünde CO₂ lazer kesme sistemi ve 2 mm kalınlığında AA5083 plaka kullanılmıştır. N₂ gazı ise koruyucu gaz olarak kullanılmıştır. Lazer gücünün ve kesme hızının, kesme kalitesinde büyük ölçüde etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, lazer frekansının ve koruyucu gaz basıncının da yüzey pürüzlülüğünde ve kesilen yüzeyin şeklinde etkili olduğu bulunmuştur (Stournaras vd., 2009).

CO₂ lazer kesimin yanında Nd:YAG lazer de oldukça yaygın kullanılmaktadır. Inconel 718 'in Nd:YAG lazer kullanılarak kesilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda kesme parametrelerinden lazer gücü, kesme hızı ve iş parçasının kalınlığının kesme kalitesine

etkileri incelenmiştir. Kesilen bölgenin yüzey pürüzlülüğünün özellikle kesme hızından etkilendiği görülmüştür (Ahn ve Byun, 2009).

Lazer kesme, malzemenin ergime, buharlaşma ve kimyasal bozulma ile atıldığı termal enerji tabanlı gelişmiş bir işleme sürecidir. Lazer kesmenin üretim endüstrisinde tercih edilmesinin nedenleri arasında çalışma kolaylığı, dar ısı tesiri altında kalmış bölge, minimum deformasyon, yüksek kesme hızı, yüksek kesme kenar hassasiyeti, otomasyon kolaylığı, yüksek üretim kalitesi gibi özellikleri bulunmaktadır. Kesme kalitesini göz önüne alan önde gelen araştırmalarda kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve ısı tesiri altında kalmış bölge özellikleri incelenmiştir (Madic ve Radovanovic, 2012).

Lazer kesme yöntemi son dönemlerde, çeşitli metal malzemelere kolayca uygulanabilmekte ve minimum hurda çıkarmasından dolayı mekanik kesme işlemine göre daha çok tercih edilmektedir. Lazer kesme temassız bir işlem olduğu için özel bağlayıcı ve aparatlara ihtiyaç duymamaktadır. Bu özelliklerine ek olarak ince ve hassas iş parçalarına zarar verecek mekanik kuvvet yaratmamaktadır. Lazer kesme, diğer termal kesme yöntemlerine de yüksek kesme kalitesi, pürüzsüz kesme yüzeyi, dar kerf genişliği ve dar ısı etkisi altında kalmış bölge özelliklerine sahip olması yönüyle üstünlük sağlamaktadır (Patel vd., 2011).

Haşçalık ve Ay (2012) çalışmalarında, yaşlandırılmış Inconel 718 'in CO₂ lazer ile kesilmesi sonucunda elde edilen kesme kalitesini incelemiştirler. Kesme kalitesini, kerf koniklik oranı, kesme sonrasında yeniden katılaşmış bölge kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine bakarak belirlemeyi amaçlamışlardır. Lazer gücü, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. X-ray ve EDS analizleri sonuçlarına göre, kesme sonrasında yeniden katılaşan bölgenin sertliğinin ana malzemenin sertliğinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En önemli kesme parametresinin lazer gücü olduğunun belirlenmesiyle beraber, kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve kerf koniklik oranı sonuçları üzerindeki etkisinin lazer gücünden daha yüksek olduğunu belirlemiştirler.

Yüksek mukavemetli çeliklerin CO₂ lazer ile kesilmesinde optimum çalışma alanı ve kesme koşulları ile ilgili çalışma yapılmıştır. Malzemenin ve malzeme üzerindeki kaplamanın etkisi incelenmiştir. Kerf genişliği, ısı etkisi altında kalmış bölge ve kerf koniklik açısı sonuçları değerlendirilmiştir. Malzemelerin farklı kimyasal yapıları ve farklı kaplamaların, kesme sırasında malzemenin termal davranışına etki ettiği belirlenmiştir.

Çalışmanın sonucuna göre yüksek mukavemetli çeliklere CO₂ lazer kesme yönteminin uygulanabileceği belirlenmiştir (Lamikiz vd., 2005).

Rajaram vd. (2003) çalışmalarında, 4130 çelik numunelerinin CO₂ lazer ile kesilmesinde güç ve ilerleme hızı parametrelerinin kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü, kesme çizgileri ve ısı tesiri altında kalmış bölge sonuçlarının üzerindeki etkilerini incelemiştir. Lazer gücünün kerf genişliği ve ısı tesiri altında kalmış bölge üzerinde en fazla etki gösteren parametre olduğunu, ilerleme hızının ikinci derecede etki gösterdiğini belirlemiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme çizgilerinin de en çok ilerleme hızından etkilendiği sonucuna ulaşmışlardır.

Lertora vd. (2014) çalışmalarında, Inconel 718 'in birleştirilmesinde en çok tercih edilen yöntem olan CO₂ lazer kaynağını incelemiştir. Yüksek enerji yoğunluğu malzemenin hızlı bir şekilde ergimesine neden olmaktadır. Bu durum, yüksek ergime oranı ve düşük ısı tesiri altında kalmış bölge oluşmasını sağlamaktadır. Deneysel olarak 0,4 mm ve 1,6 mm kalınlığında olan 300x210 mm² boyutlarında Inconel 718 sac malzemeler kullanılmıştır. Kaynak işleminde, lazer gücü ve kaynak hızı parametreleri ile kaynak nüfuziyeti ve kaynak genişliği özellikleri arasında ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Sabit kaynak hızı parametresi ile yapılan kaynak işleminde, kaynak nüfuziyeti ve genişliği özelliklerinin lazer gücü ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda Inconel 718 'in bindirmeli kaynak işlemi ile birleştirilmesi sonrasında göstermiş olduğu yorulma dayanımı da değerlendirilmiştir.

Riveiro vd. (2010) çalışmalarında, 2024-T3 alüminyum-bakır alaşımının CO₂ lazer ile kesilmesinde proses parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Kullanılan alüminyum-bakır alaşımının kalınlığı 3 mm olarak seçilmiştir. 3,5 kW gücünde CO₂ lazer cihazı kullanılmıştır. Maksimum ilerleme hızı olarak, sürekli dalga lazer ayarında 4-4,5 m/dak ve darbeli lazer ayarında 2-3 m/dak değerleri elde edilmiştir. Sürekli dalga lazer ayarında, yüzey pürüzlülüğü ve cüruf miktarı darbeli lazer ayarına göre düşük olmuştur. Darbeli lazer ayarında en iyi kesme sonuçları, yüksek güç ve yüksek frekans değerlerinde elde edilmiştir. Sürekli dalga lazer ayarında ise darbeli lazer ayarına göre daha iyi kesme sonuçları elde edilmiştir. Yüksek kesme hızı ve kaliteli kesme sonuçlarına, yüksek güç ve lazer ışınının tam iş parçası yüzeyine ya da iş parçası yüzeyinin çok az altına odaklanması ile ulaşılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada, yüksek sıcaklıktaki çalışma koşullarına dayanıklı ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan Inconel 718 malzemesinin farklı parametrelerde CO₂ lazer kullanılarak kesilmesi ile elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Çalışmanın öncelikli amacı Inconel 718 'in lazerle kesilmesinde uygun parametrelerin belirlenmesidir.

4.2. Çalışmada Kullanılan Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada 100x100x1 mm³ boyutlarında Inconel 718 sac malzeme deney numunesi olarak kullanılmıştır. Numunelerin yüzeyinin yağsız ve kuru olmasına dikkat edilmiştir. Deneylerde kullanılan Inconel 718 malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Inconel 718 malzemenin kimyasal bileşimi.

Alaşım Elementi	Ağırlıkça (%)
Nikel (+Kobalt)	50.00 - 55.00
Krom	17.00 - 21.00
Demir	Kalanı
Nobiyum (+Tantalum)	4.75 - 5.50
Molibden	2.80 - 3.30
Titanyum	0.65 - 1.15
Aluminyum	0.20 - 0.80
Kobalt	1.00 maks.
Karbon	0.08 maks.
Mangan	0.35 maks.
Silikon	0.35 maks.
Fosfor	0.015 maks.
Sülfür	0.015 maks.
Bor	0.006 maks.
Bakır	0.30 maks.

4.3. Lazer Kesme Cihazı

Bu çalışmada numuneleri hazırlamak için 4 kW güç üretebilen Bystronic Laser BTL 4000 Turbo rezonatör kullanan Bystronic Laser 3015 lazer kesme cihazı kullanılmıştır. Sistemde CO₂, O₂ ve He gazları lazeri oluşturan gazlar olarak, O₂ ve N₂ gazları ise kesme gazları olarak kullanılmaktadırlar. CO₂ lazer kesme cihazı ve bileşenleri Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Lazer kesme cihazı ve kontrol paneli (Bystronic Laser 3015).

4.4. Deney Parametreleri

Lazer gaz basıncının ve lazer kesme gücünün sabit olduğu, kesme gazı basıncının üç farklı değeri için deneyler yapılmıştır. Lazer gücü 800 W olarak belirlenmiştir. Kesme işlemlerinin hepsi aynı gün yapılmıştır. Her bir deneyde ise 2, 4, 6 ve 8 m/dak olmak üzere dört farklı ilerleme hızında kesme işlemi yapılmıştır. Sonuç olarak toplam on iki farklı kesme işlemi yapılmıştır. Deney parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney parametreleri (Tüm deneylerde lazer gaz basıncı ve lazer kesme gücü sabittir).

Deney Numarası	İlerleme (m/dak)
1. Deney Kesme Gazı Basıncı = 0,8 Bar	2
	4
	6
	8
2. Deney Kesme Gazı Basıncı = 1,2 Bar	2
	4
	6
	8
3. Deney Kesme Gazı Basıncı = 1,6 Bar	2
	4
	6
	8

4.5. Kerf Genişliği Ölçümü

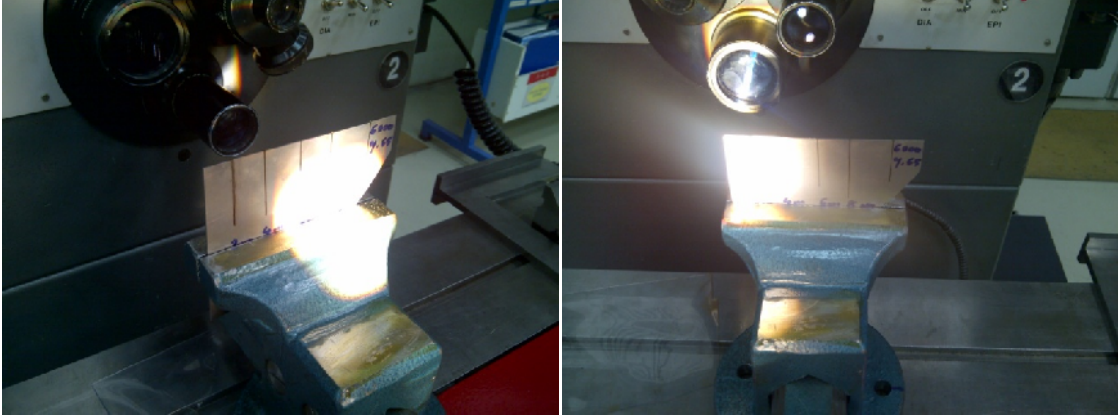
CO₂ lazer kesme cihazı ile kesilmiş numunelerin kesme kalitelerinin belirlenmesi için ilk olarak kerf genişlikleri ölçülmüştür. Numunelerin kerf genişlikleri Şekil 4.2. 'de görülen bir ölçüm projektörü kullanılarak (Microtecnica Anteus Proiettore Di Profili Anteus B marka) yapılmıştır.



Şekil 4.2. Kerf genişlikleri ölçümünde kullanılan ölçüm projektörü.

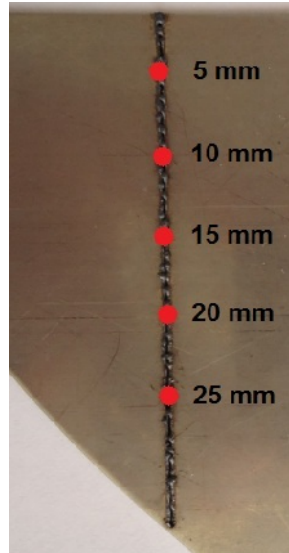
Anteus B ölçüm cihazı, 450 mm çapında yansıtma ekranına sahiptir. Cihaz yatay olarak konumlandırılmış aydınlatma sistemine ve yere dik olarak konumlandırılmış yansıtma ekranına sahiptir. Cihazda 3 farklı lens tutucu bulunmaktadır. Numunelerin kerf genişliği ölçümleri sırasında 10 kat (x10) büyütme özelliği olan lens kullanılmıştır.

Numuneler mengene yardımı ile cihaza bağlanarak sabitlenmiş ve ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3. 'te numunelerin cihaza bağlanma şekli görülmektedir.



Şekil 4.3. Numunelerin cihaza bağlanması.

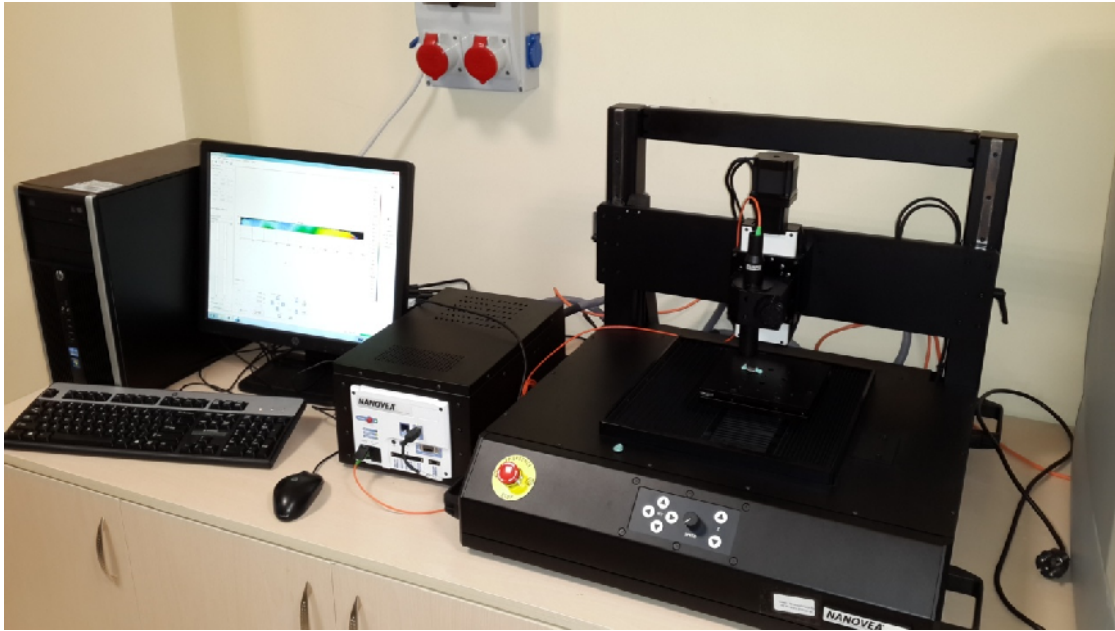
Cihaza bağlanan her bir numunede 5 farklı noktadan ölçüm yapılmıştır. Mengeneye tutturulan numunelerin üst kenarlarını referans almak suretiyle Şekil 4.4. 'te görüldüğü gibi 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm ölçülerinden kerf genişliği ölçümü yapılmıştır.



Şekil 4.4. Kerf genişliği ölçüm noktaları.

4.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

CO₂ lazer kesme cihazı ile kesilmiş numunelerin kesme kalitelerinin belirlenmesi için kesim işlemi sonrasında elde edilmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Ölçüm işlemi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Nanovea ST400 yüzey profilometre cihazı ile yapılmıştır. Nanovea ST400 yüzey profilometre cihazı ve veri işleme sistemi Şekil 4.5.'de görülmektedir.

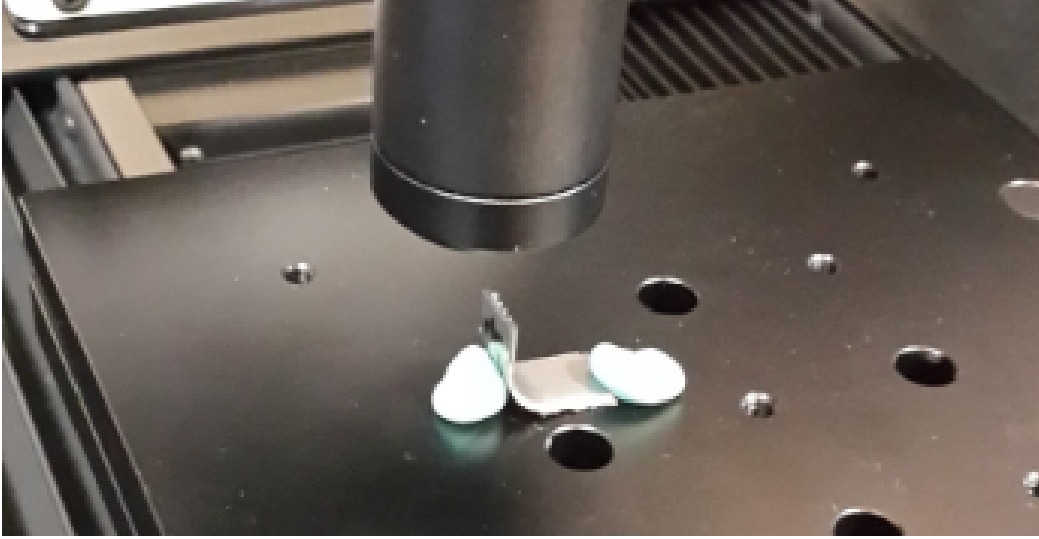


Şekil 4.5. Nanovea ST400 yüzey profilometre cihazı ve veri işleme sistemi.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü sırasında kullanılan Nanovea ST400 yüzey profilometre cihazı, maksimum 3 mm derinliğe sahip olan yüzeylerin ölçümünü yapma yeteneğine sahip optik mercek ile donatılmıştır. Ölçüm işlemi sonrasında elde edilen veriler, verileri işleyen cihaz aracılığı ile bilgisayara aktarılmıştır.

Ölçüm işleminde ilk olarak numuneler profilometre cihazının tablasına bağlanır. Numunelerin bağlanmasında yüzey profili çıkarılacak yüzeyin ölçüm işlemini yapacak

olan merceğe dik olarak konumlandırılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunun için numunelerin bağlanmasında hamur yapıştırıcı kullanılmıştır ve numuneler gerektiği gibi merceğe dik olarak profilometre tablasına bağlanmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Numunelerin mikroskop tablasına bağlanması.

Yüzey tarama işlemi yapıldıktan ve veriler bilgisayara aktarıldıktan sonra Professional 3D programı kullanılarak analiz sonuçları elde edilmiştir. Analiz sonuçları olarak her bir numunenin 3D yüzey profili görüntüsü, Ra, Rz, Rt ve Rmr değerleri incelenmiştir. Her bir kesme yüzeyinden iki adet ölçüm alınmıştır. Örneğin 0,8 Bar sabit basınçta yapılan kesme işleminde oluşan iki kesme yüzeyi A1 ve A2 olarak isimlendirilmiştir. Numuneler, kesme gazı basıncı ve ilerleme hızına göre Çizelge 4.3. 'te görüldüğü gibi numaralandırılmıştır.

Çizelge 4.3. Deney numunelerinin numaralandırılması.

Numune 1		Kesme Gazı Basıncı				0,8 bar	
2 m/dak		4 m/dak		6 m/dak		8 m/dak	
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8

Numune 2		Kesme Gazı Basıncı				1,2 bar	
2 m/dak		4 m/dak		6 m/dak		8 m/dak	
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8

Numune 3		Kesme Gazı Basıncı				1,6 bar	
2 m/dak		4 m/dak		6 m/dak		8 m/dak	
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8

4.7. Mikroyapı İncelemesi ve EDS Analizi

CO₂ lazer kesme cihazı ile kesilmiş numunelerin kesme işlemi sonrasında oluşmuş yüzeylerinin EDS analizleri yapılarak mikroyapıları incelenmiştir. EDS analizi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (MERLAB) 'nde JEOL JSM-5600LV Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7).

Elektron mikroskobu analizlerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları ve mikroyapıların belirlenmesinde enerji dağılımlı x-ray analizi (EDS) kullanılmıştır. SEM fotoğrafları 100X, EDS analizi fotoğrafları 500X büyütme ile alınmıştır.



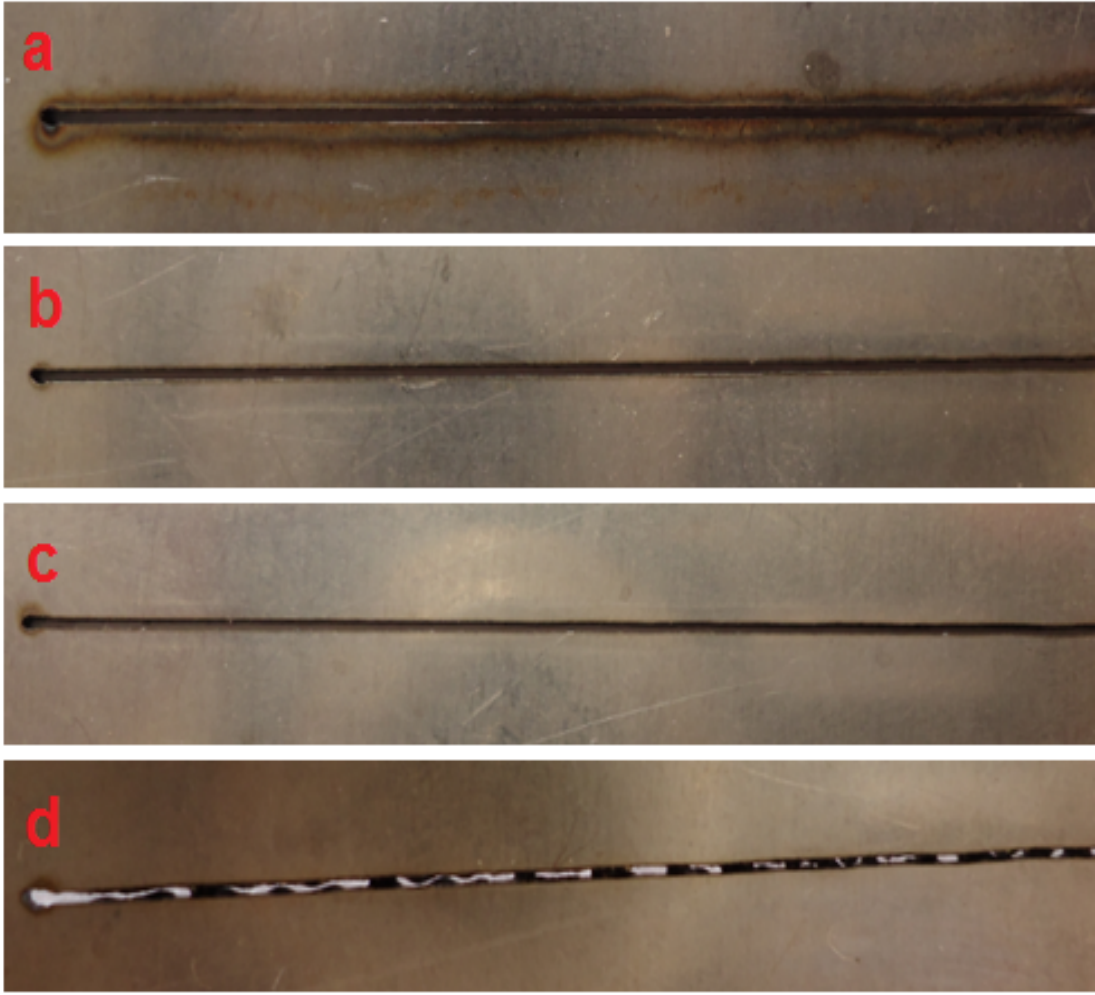
Şekil 4.7. JEOL JSM-5600LV Taramalı Elektron Mikroskobu.

5. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

5.1. Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları

Kesme işlemleri sonrasında numunelerde öncelikle kerf genişliği ve ısı girdisi için görsel makro inceleme yapılmıştır. Kesme hızında ilerleme artışı iş parçasına gelen ısıl girdiyi azaltmaktadır. Makro incelemelerde bu durum açık olarak görülmektedir.

2 m/dak ilerleme hızında deneyi yapılan numunelerin makro incelemelerinde ısıdan etkilenen bölge, renk değişimi ile kolaylıkla görülmektedir. Diğer numuneler ile karşılaştırıldığında, yavaş ilerlemeden dolayı beklenildiği gibi bu numunelerde daha fazla enerji girdisi olduğu açıktır. En yüksek ilerleme hızı olan 8 m/dak ile kesilen numunelerde kesme aralığı düzensizliklerinin arttığı açıkça görülmektedir. 0,8 bar kesme gazı basıncında 2 m/dak, 4 m/dak, 6 m/dak ve 8 m/dak ilerleme hızlarında kesilen numunelerin makro inceleme fotoğrafları Şekil 5.1.'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Lazerle kesilmiş (0,8 bar kesme gazı basıncı) Inconel 718 'in üst yüzey görünüşü; a) 2 m/dak kesme hızı, b) 4 m/dak kesme hızı, c) 6 m/dak kesme hızı ve d) 8 m/dak kesme hızı.

Kesme işlemi sonrasında on iki farklı numune için beş farklı ölçüm ortalaması alınmıştır. Yapılan kerf genişliği ölçüm sonuçları Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kerf genişliği ölçüm sonuçları.

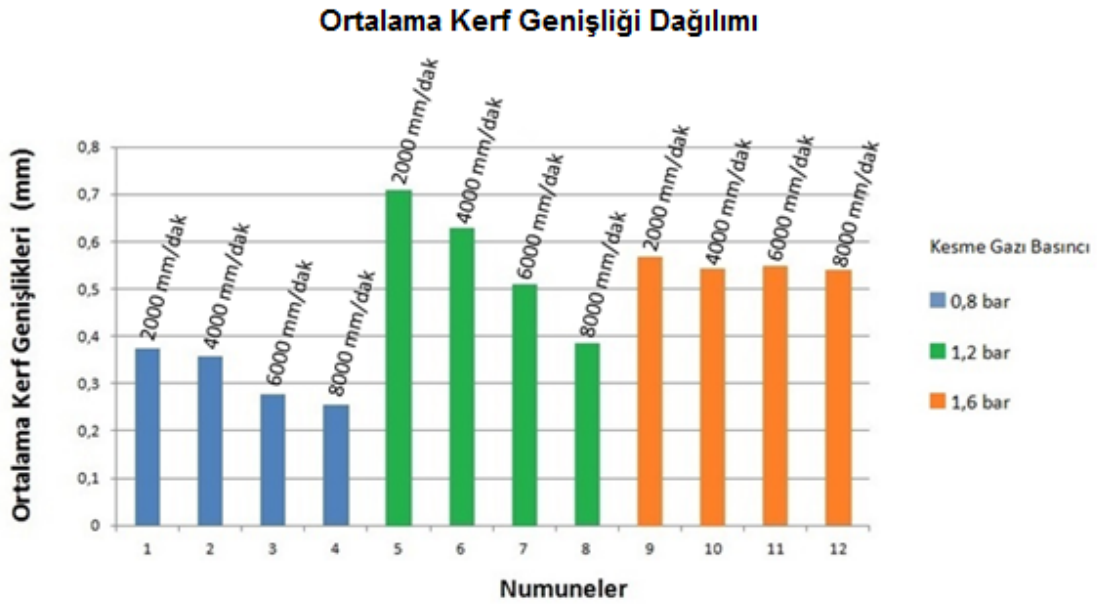
Deney 1	Kesme Gazı Basıncı	0,8 bar	Kerf Genişlikleri					
	Lazer Gaz Basıncı	0,8 bar	5 mm	10mm	15 mm	20 mm	25 mm	Ortalama
Ölçüm Noktaları			5 mm	10mm	15 mm	20 mm	25 mm	Ortalama
Kesme Hızı	İlerleme (m/dak)	Kerf Genişliği (mm)						
	2 - Num. 1	0,313	0,368	0,363	0,431	0,402	0,375	
	4 - Num. 2	0,341	0,332	0,336	0,352	0,426	0,357	
	6 - Num. 3	0,326	0,255	0,259	0,294	0,252	0,277	
	8 - Num. 4	0,255	0,232	0,260	0,283	0,253	0,257	

Deney 2	Kesme Gazı Basıncı	1,2 bar	Kerf Genişlikleri					
	Lazer Gaz Basıncı	0,8 bar	5 mm	10mm	15 mm	20 mm	25 mm	Ortalama
Ölçüm Noktaları			5 mm	10mm	15 mm	20 mm	25 mm	Ortalama
Kesme Hızı	İlerleme (m/dak)	Kerf Genişliği (mm)						
	2 - Num. 5	0,639	0,745	0,658	0,740	0,763	0,709	
	4 - Num. 6	0,627	0,635	0,610	0,617	0,653	0,628	
	6 - Num. 7	0,549	0,462	0,530	0,468	0,538	0,509	
	8 - Num. 8	0,423	0,341	0,375	0,438	0,346	0,385	

Deney 3	Kesme Gazı Basıncı	1,6 bar	Kerf Genişlikleri					
	Lazer Gaz Basıncı	0,8 bar	5 mm	10mm	15 mm	20 mm	25 mm	Ortalama
Ölçüm Noktaları			5 mm	10mm	15 mm	20 mm	25 mm	Ortalama
Kesme Hızı	İlerleme (m/dak)	Kerf Genişliği (mm)						
	2 - Num. 9	0,562	0,563	0,569	0,577	0,569	0,568	
	4 - Num. 10	0,539	0,485	0,567	0,575	0,545	0,542	
	6 - Num. 11	0,533	0,571	0,558	0,498	0,579	0,548	
	8 - Num. 12	0,535	0,533	0,512	0,571	0,552	0,541	

Kerf genişliği ölçümleri sonrasında hesaplanan ortalama değerlerin grafik dağılımı Şekil 5.2. 'te görülmektedir. Bu grafik incelendiğinde en düşük kesme gazı basıncında (0,8 bar) yapılan kesme işleminde ortalama kerf değerlerinin diğer numunelere göre düşük değerlerde olduğu görülmektedir. 1,2 bar basınç değerinde ise kerf aralıkları en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Kesme gazı basıncının maksimum değeri olan 1,6 bar 'da ise kısmen azalmalar görülmesine rağmen değerler yüksektir.

Aynı grafikten düşük ilerleme değerlerinde örneğin, 2 m/dak değerlerine bakıldığında tüm numuneler arasında bunların değerlerinin yüksek olduğu söylenebilir. Bu numuneler grafikte numune 1, numune 5 ve numune 9 olarak görülmektedir. Bu durum yavaş kesme hızında malzemenin daha uzun süreli gaz basıncına maruz kalması ile açıklanmaktadır. Bu uzun temas süresi daha fazla partikülün aralıktan uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu durum numunelerin EDS analizlerine (Şekil 5.15., Şekil 5.19., Şekil 5.23.) bakıldığında oluşan oksit partiküllerinin artışı ile desteklenmektedir.



Şekil 5.2. Kerf genişliği ortalama ölçüm sonuçları.

Benzer şekilde farklı basınç değerlerinde kesme işlemi yapılmasına rağmen en düşük kerf genişlikleri 8 m/dak maksimum kesme hızı değerlerinde (numuneler 4, 8 ve 12)

elde edilmiştir. Basınç değeri artışına bağlı olarak kerf değerlerinde artışlar olmasına rağmen en düşük kerf aralığı 0,8 bar ve 8 m/dak değerinde elde edilmiştir. Basınç değeri 1,6 bar olduğunda ise kesme hızının etkisi yüksek kesme gazı basıncı nedeniyle neredeyse kaybolmaktadır.

Şekil 5.2.'ye göre 0,8 bar basınç değerinde yapılan EDS incelemelerinde (Şekil 5.15., Şekil 5.16., Şekil 5.17., Şekil 5.18.) oksit partiküllerinin oranının az olduğu görülmektedir. Düşük basınçta sonuçta daha kısa süreli gaz teması sonucunda bu durumun oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca düşük gaz temas süresi farklı alaşım elementlerinden oluşan Inconel 718 'de farklı boyut ve bileşimlerde oksitler oluşmasına neden olmuştur. Bu yapıların oluşma eğilimi yüzey özelliklerine etki etmiştir. Sonuçta daha düşük süreli gaz teması ile daha düşük boyutlarda oksitlerin oluştuğu belirlenmiştir.

5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada Inconel 718 malzemedен üç farklı kesme basıncı ve dört farklı kesme hızında CO₂ lazer kesme yöntemi ile kesilmiş yirmi dört adet numune incelenmiştir. Kesme işlemi sonrasında doğal olarak her numune için iki farklı kesme yüzeyi oluşmuştur. Yüzey pürüzlülükleri, 3D profilometre cihazı ile ölçülmüştür.

Şekil 5.3.-5.14. arasında kesme yüzeylerinin yüzey profil fotoğrafları verilmiştir. Çizelge 5.2.'de farklı kesme basınçlarında ve farklı kesme hızlarında lazer ile kesilen numunelerin her iki yüzeylerinden alınan değerler aritmetik ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir. Çizelgeye bakıldığında yüzey profilometresi ile alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), ortalama maksimum yüzey pürüzlülüğü (Rz) ve maksimum tepe yüksekliği (Rt) değerleri görülmektedir. Burada 0,8 Bar kesme basıncında Ra (4-4,2 µm) ve Rz (16,1-18,9 µm) değerlerinin düşük kesme hızlarında birbirine yakın ve düşük değerlerde çıktığı görülmektedir. Bu basınçta sadece en yüksek kesme hızı değeri olan 8 m/dak pürüzlülük değerlerinde yaklaşık 3 kat artış görülmektedir. Bu durum, bu ilerleme hızında metal ergimesinin diğerlerine göre kısmen yetersiz kalması ve kesme izleri arası boşlukların artması ile açıklanmıştır. Bu durum 8 m/dak kesme hızındaki yüzeyin profilometre fotoğrafında görülmektedir. Şekil 5.6. 'da yetersiz ergime, oluşan yüksek tepelerle açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.1 'deki makro inceleme de bu durumu desteklemektedir.

Çizelge 5.2.'de 1,2 Bar gaz basıncında farklı kesme hızı değerlerinde yapılan lazerle kesme sonrasında Ra değerleri 4,3-6,2 μm arasında ve Rz değerleri 18,4-27,5 μm arasında ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçları birbirlerine oldukça yakındır. Burada en düşük hız değeri olan 2 m/dak'da yüzey pürüzlülük değerleri en yüksektir. En düşük ilerleme hızı sonuçta malzemeye daha fazla enerji girdisi gerçekleştirmektedir. Bu nedenle malzemede daha geniş bir ergime bölgesi oluşmaktadır. Daha geniş ergime bölgesi yüzey pürüzlülüğünü kısmen arttırmaktadır. Bu basınç değerinde özellikle 4 m/dak ve 6 m/dak hızlarında yüzey pürüzlülüklerinde azalma görülmektedir. Kesme gazı basıncının 0,8 Bar'dan 1,2 Bar'a arttığı bu numunelerde yine 8 m/dak kesme hızı değerinde yüksek pürüzlülük değerleri görülmektedir.

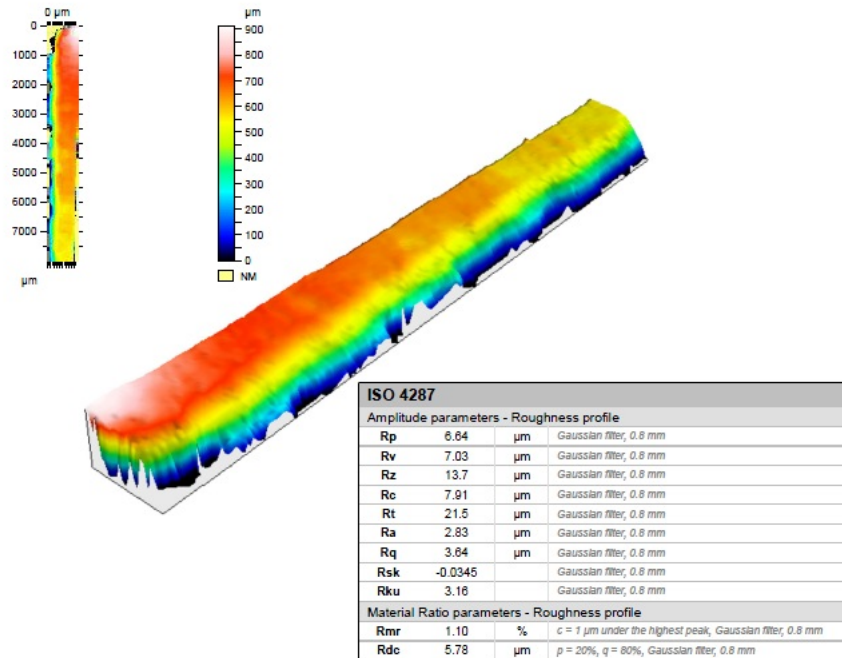
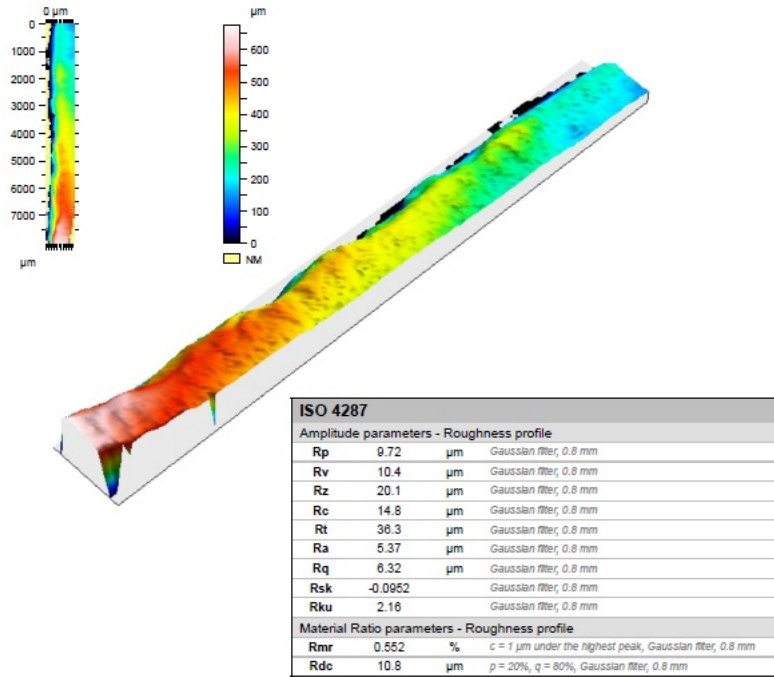
Çizelge 5.2.'de 1,6 Bar basınçta farklı kesme hızı değerlerinde elde edilen numunelerin Ra değerleri 2,8-6,5 μm , Rz değerleri 12,7-28,9 μm olarak ölçülmüştür. Burada beklenildiği üzere kesme gazı basıncı artışı sonrasında yüzey pürüzlülük değerlerinde belirgin azalmalar elde edilmiştir. Özellikle 6 m/dak kesme hızında Ra 2,8 μm ve Rz 12,7 μm değerleri tüm kesme işlemleri için en iyi sonuçları vermiştir. Benzer şekilde bu basınç değerinde de 8 m/dak kesme hızında diğer numunelerden yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 5.2. genel olarak incelenirse 0,8 Bar kesme gazı basıncı ile 1,2 Bar ve 1,6 Bar kesme basınçları karşılaştırılırsa; yüzey pürüzlülük sonuçları daha dengeli görülmesine rağmen en yüksek pürüzlülük değeri 0,8 Bar gaz basıncında (Ra 14,3 μm , Rz 57,7 μm) elde edilmiştir. Basınç değeri 0,8 Bar'dan 1,2 Bar'a arttırıldığında pürüzlülük değerlerinde genel olarak az miktarda bir artış görülmektedir. Bu durumun artan oksijen miktarı ile oluşan oksitlerin etkisi ile olduğu düşünülmektedir. Basınç değeri 1,6 Bar olduğunda diğer basınç değerlerine göre en düşük hız değeri olan 2 m/dak ve en yüksek hız değeri olan 8 m/dak'da benzer şekilde yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. En iyi pürüzlülük değerinin elde edildiği bu basınçta metal ergimesi ve kesme gazı basıncı arasında daha iyi bir denge kurulduğu düşünülmektedir. Tüm sonuçlar içerisinde 6 m/dak kesme hızı metal ergimesi, oksijen reaksiyonu ve yüzey pürüzlülüğü değerleri açısından optimum şartları sağlamaktadır.

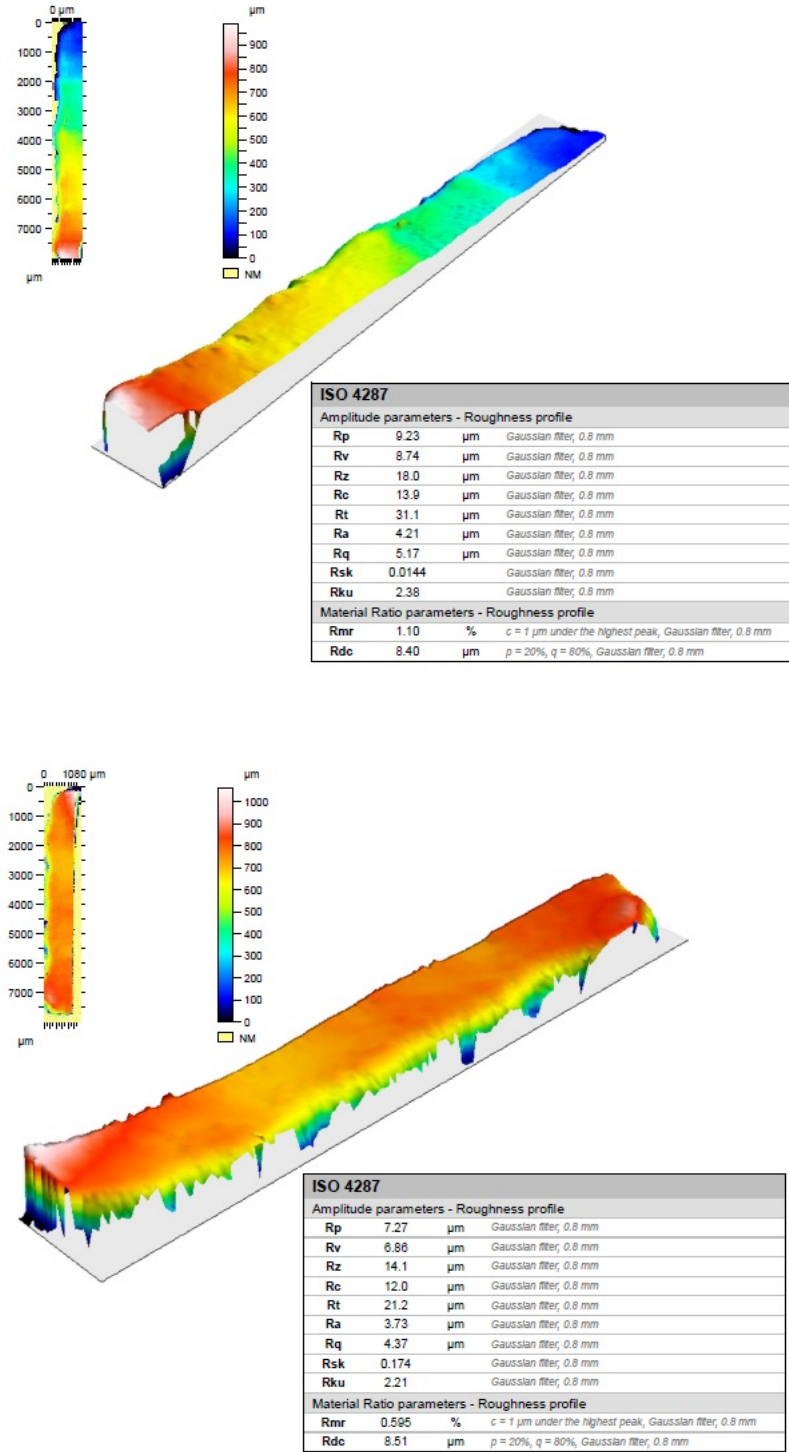
Çizelge 5.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.

Numuneler	Kesme Basıncı (Bar)	Kesme Hızı (m/dak)	Ortalama Ra (μm)	Ortalama Rz (μm)	Ortalama Rt (μm)
A1 - A2	0,8	2	4,1	16,9	28,9
A3 - A4		4	4,0	16,1	26,2
A5 - A6		6	4,2	18,9	47,2
A7 - A8		8*	14,3	57,7	144,8
B1 - B2	1,2	2	6,2	27,5	45,6
B3 - B4		4	5,0	24,3	200,5
B5 - B6		6	4,3	18,4	62,4
B7 - B8		8*	5,9	25,0	85,0
C1 - C2	1,6	2	4,6	19,5	31,0
C3 - C4		4	3,6	15,2	32,8
C5 - C6		6	2,8	12,7	42,4
C7 - C8		8*	6,5	28,9	77,9

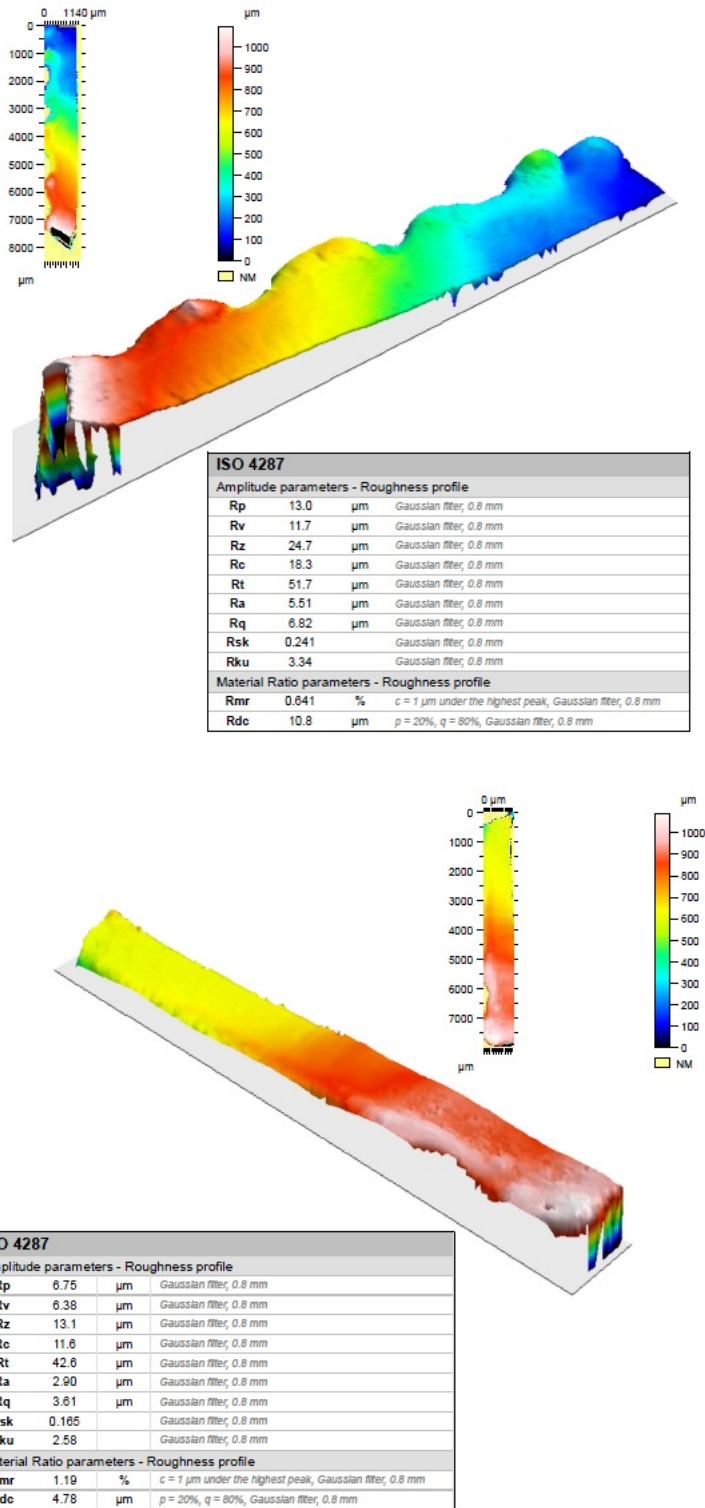
* Tüm basınç değerlerinde 8 m/dak ilerleme hızında yapılan kesme işlemlerinde yetersiz ergime görülmüştür. Tam kesme işlemi gerçekleşmediği için pürüzlülük değerlerinin üzerleri çizilmiştir.



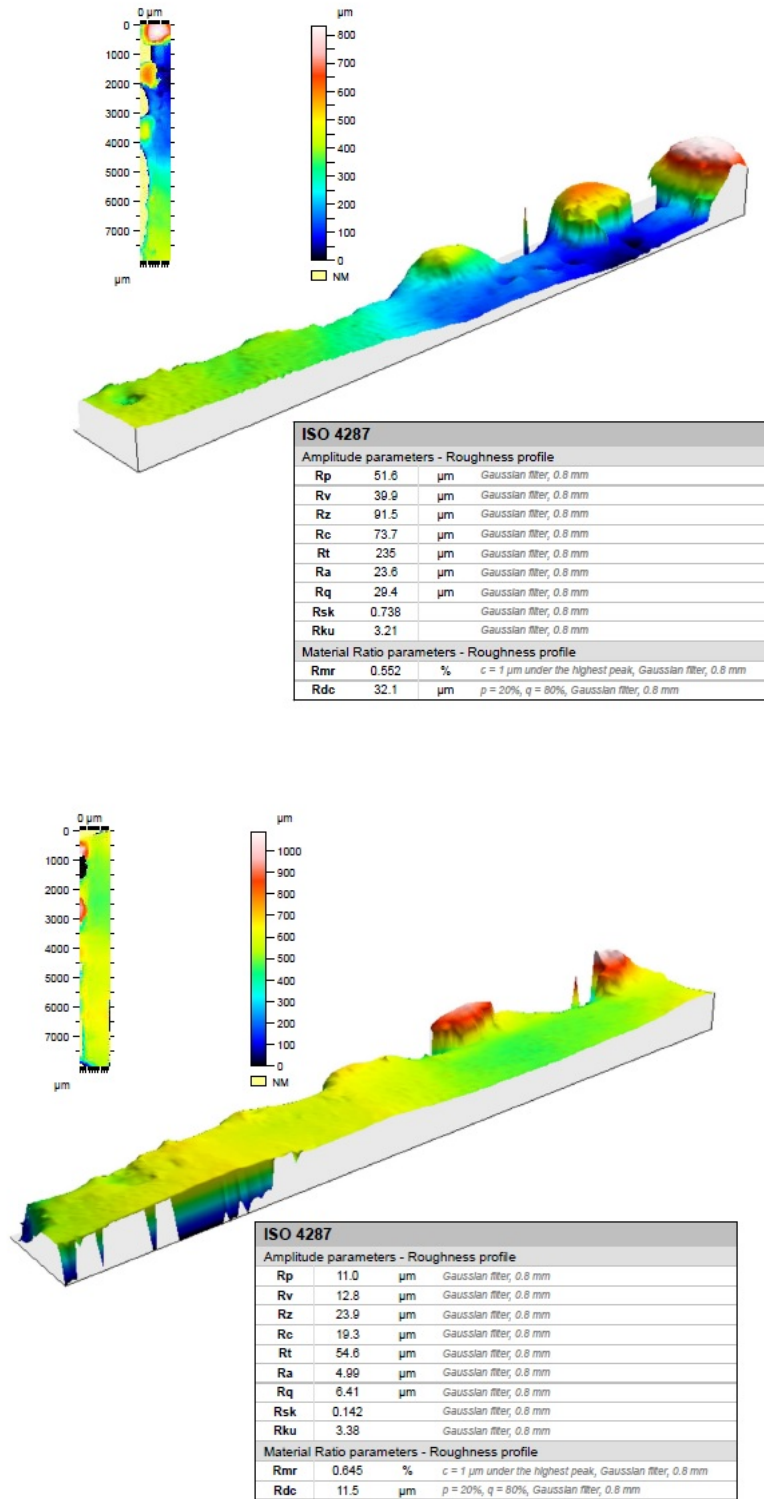
Şekil 5.3. Lazerle kesilmiş A1 ve A2 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 0,8 bar, kesme hızı 2 m/dak.).



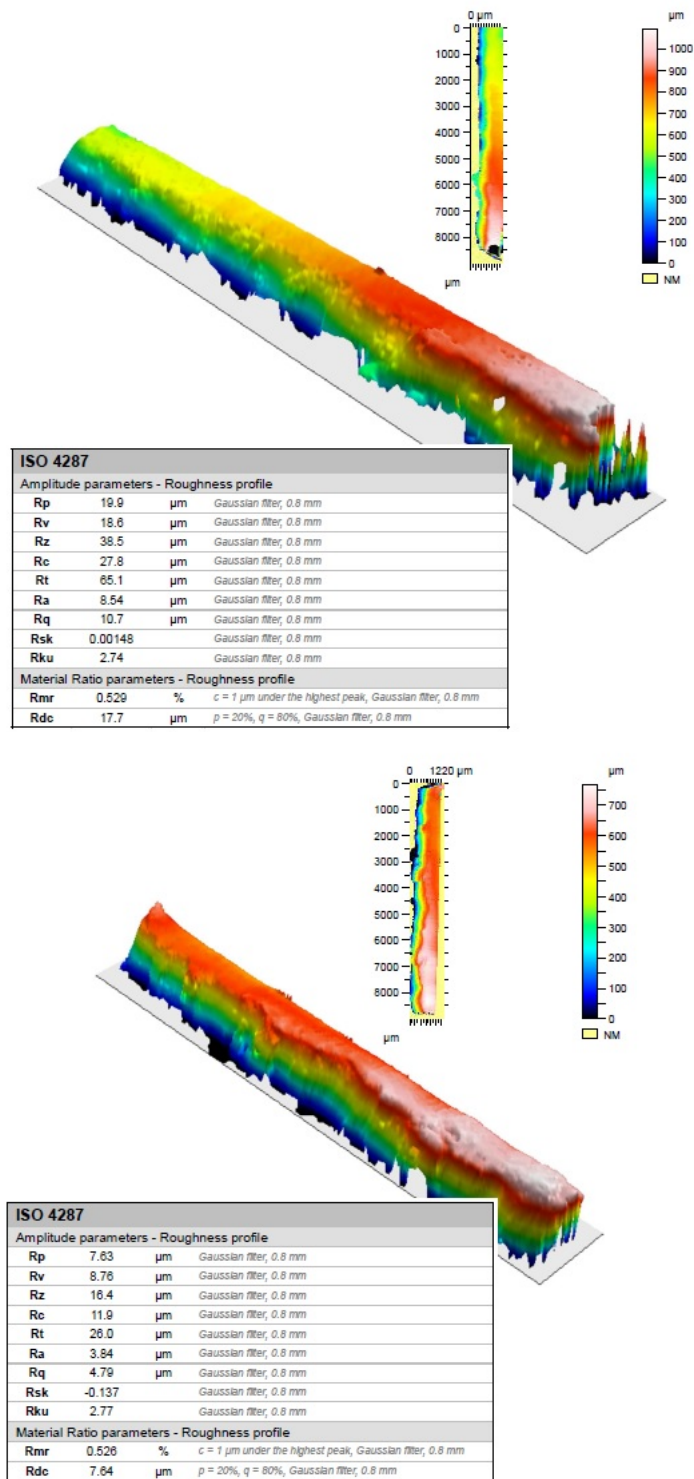
Şekil 5.4. Lazerle kesilmiş A3 ve A4 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 0,8 bar, kesme hızı 4 m/dak.).



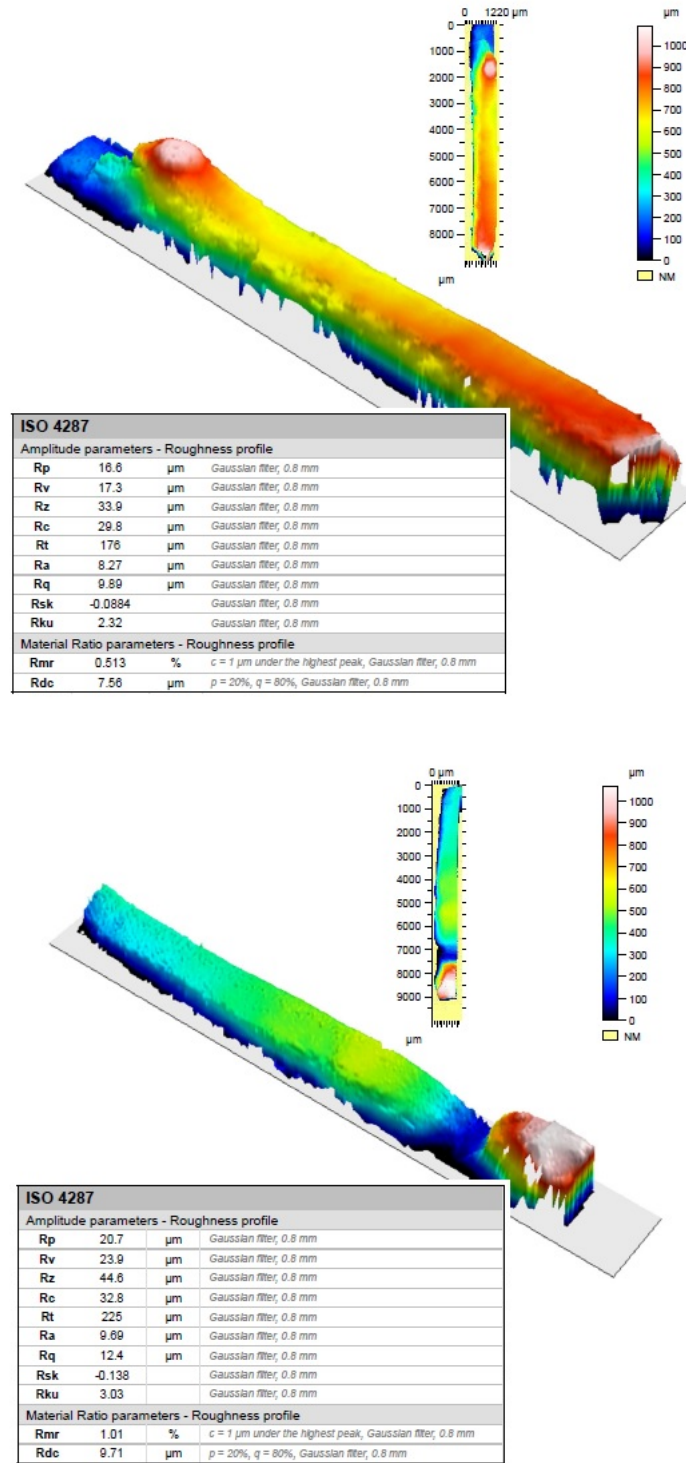
Şekil 5.5. Lazerle kesilmiş A5 ve A6 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 0,8 bar, kesme hızı 6 m/dak.).



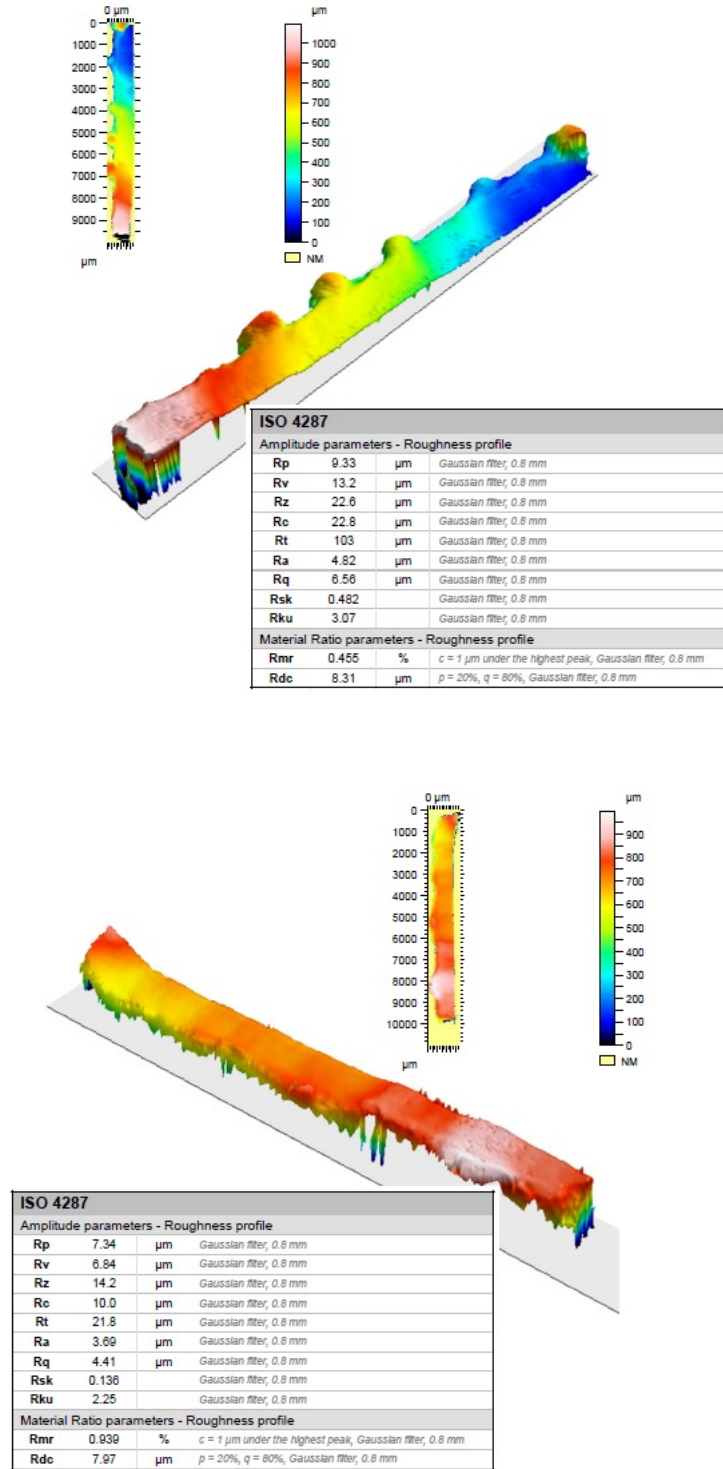
Şekil 5.6. Lazerle kesilmiş A7 ve A8 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 0,8 bar, kesme hızı 8 m/dak.).



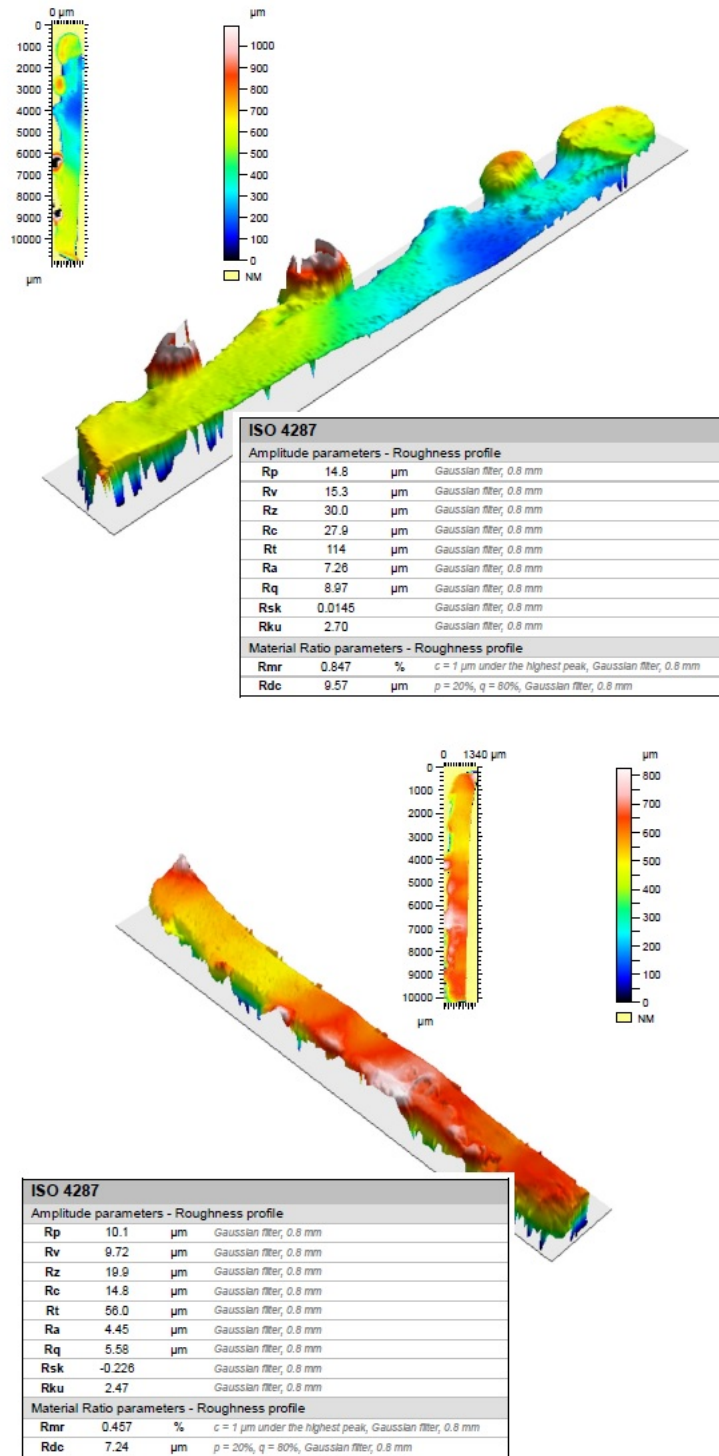
Şekil 5.7. Lazerle kesilmiş B1 ve B2 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,2 bar, kesme hızı 2 m/dak.).



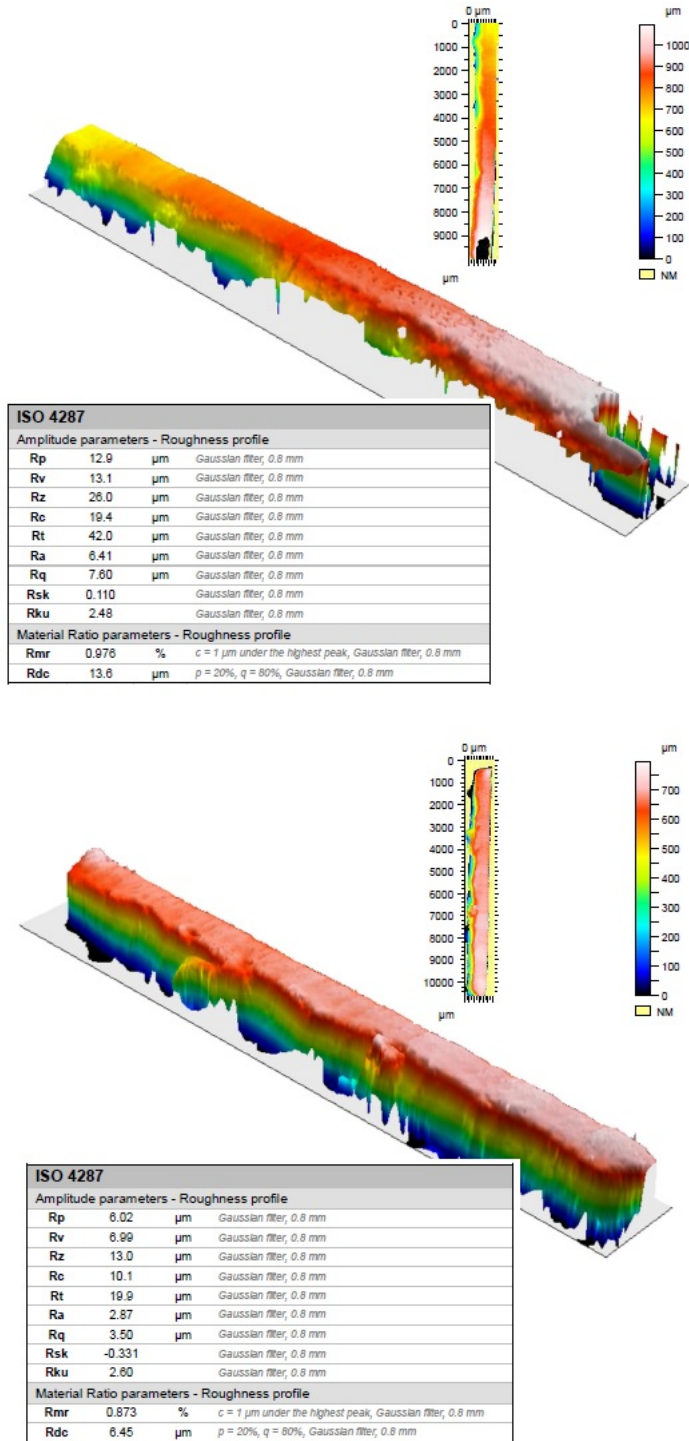
Şekil 5.8. Lazerle kesilmiş B3 ve B4 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,2 bar, kesme hızı 4 m/dak.).



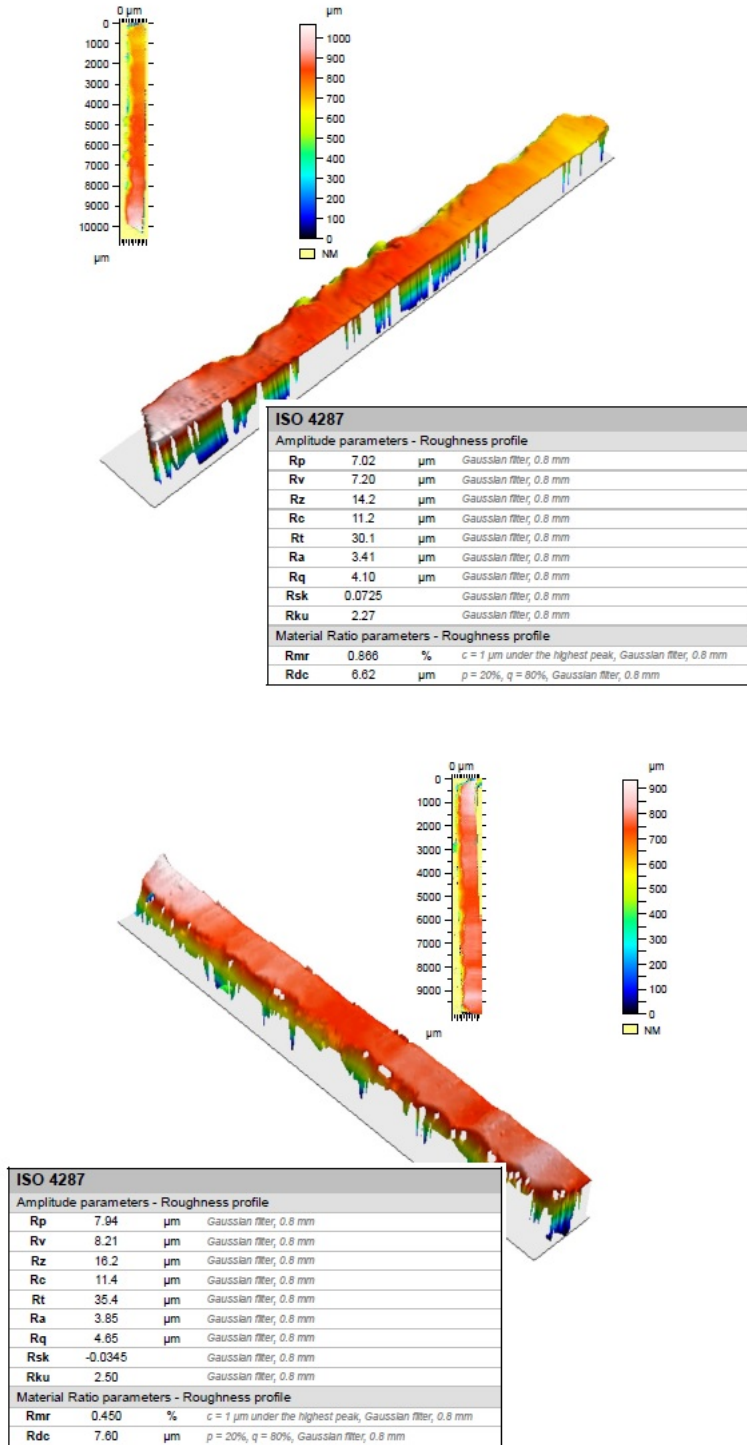
Şekil 5.9. Lazerle kesilmiş B5 ve B6 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,2 bar, kesme hızı 6 m/dak.).



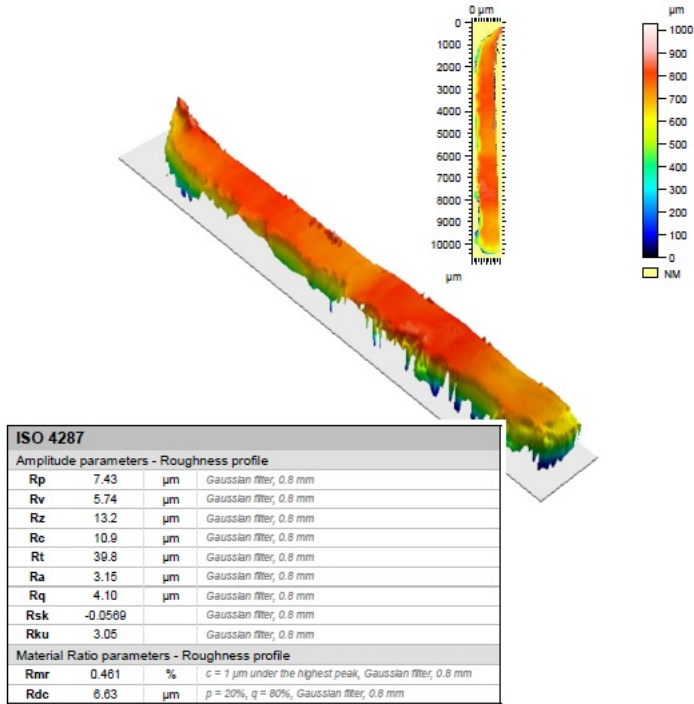
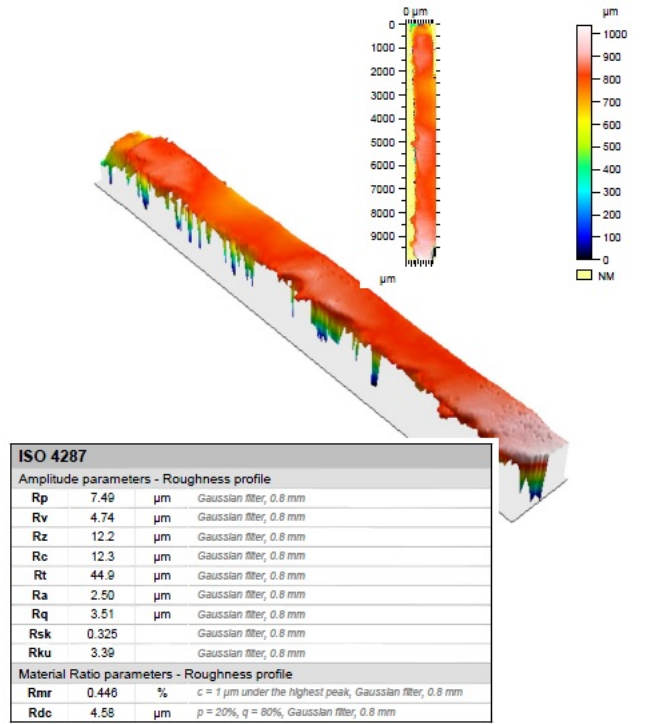
Şekil 5.10. Lazerle kesilmiş B7 ve B8 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,2 bar, kesme hızı 8 m/dak.).



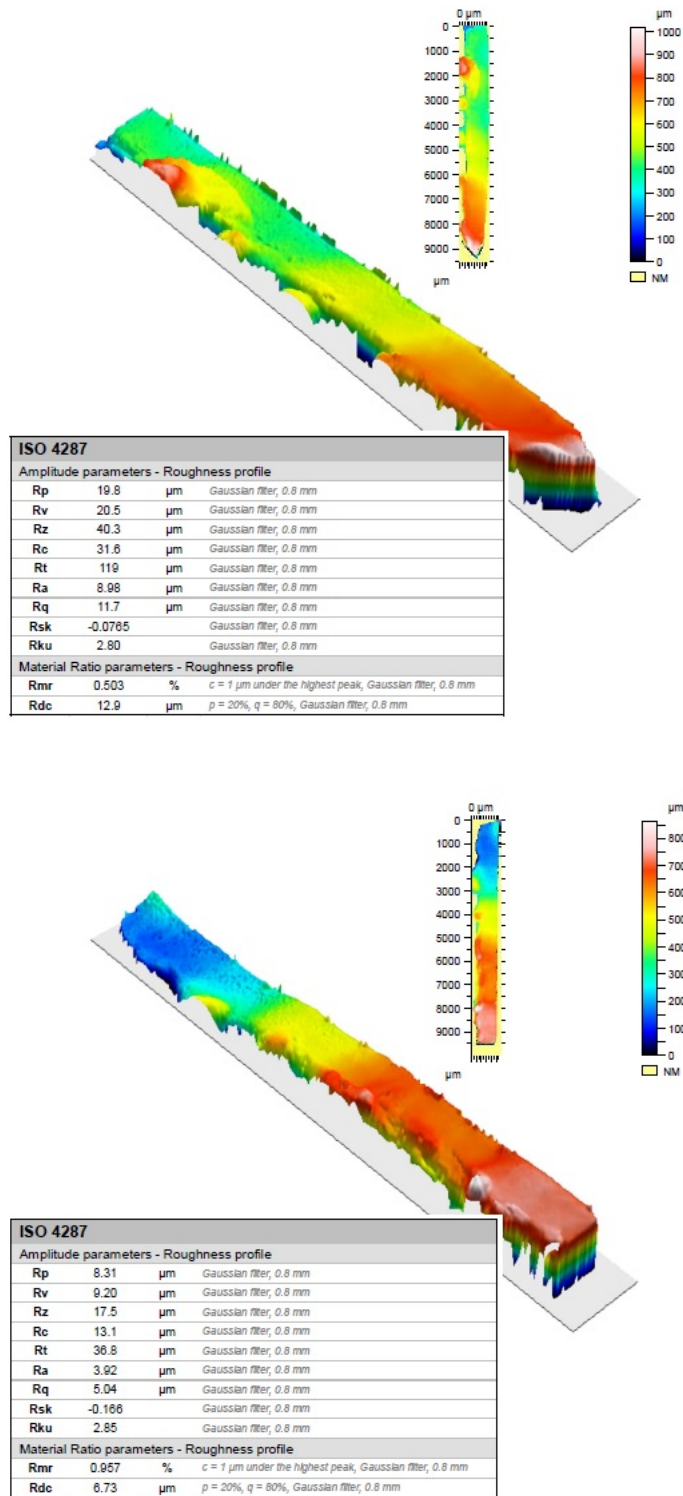
Şekil 5.11. Lazerle kesilmiş C1 ve C2 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,6 bar, kesme hızı 2 m/dak.).



Şekil 5.12. Lazerle kesilmiş C3 ve C4 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,6 bar, kesme hızı 4 m/dak.).



Şekil 5.13. Lazerle kesilmiş C5 ve C6 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,6 bar, kesme hızı 6 m/dak.).

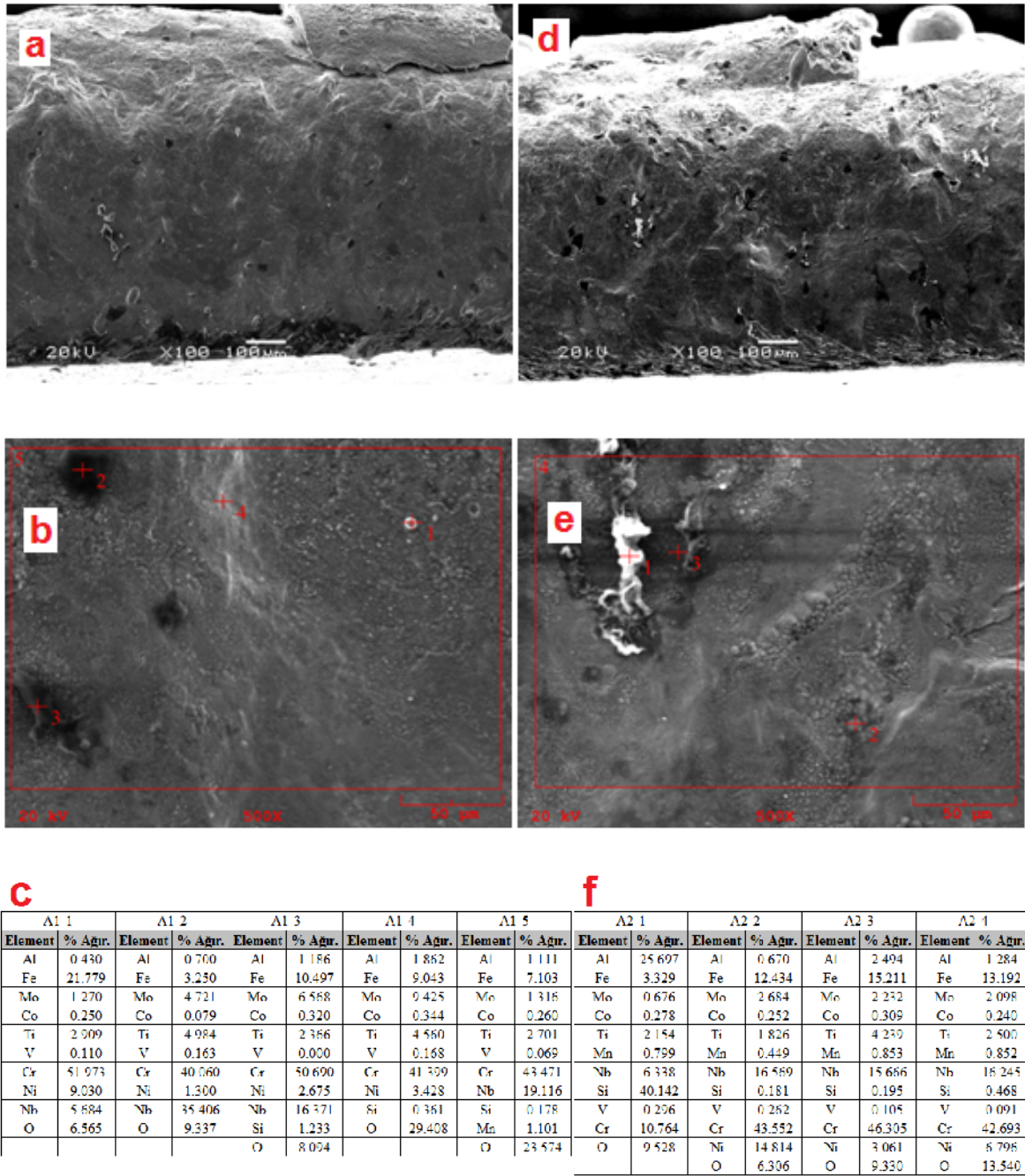


Şekil 5.14. Lazerle kesilmiş C7 ve C8 numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları (Kesme gazı basıncı 1,6 bar, kesme hızı 8 m/dak.).

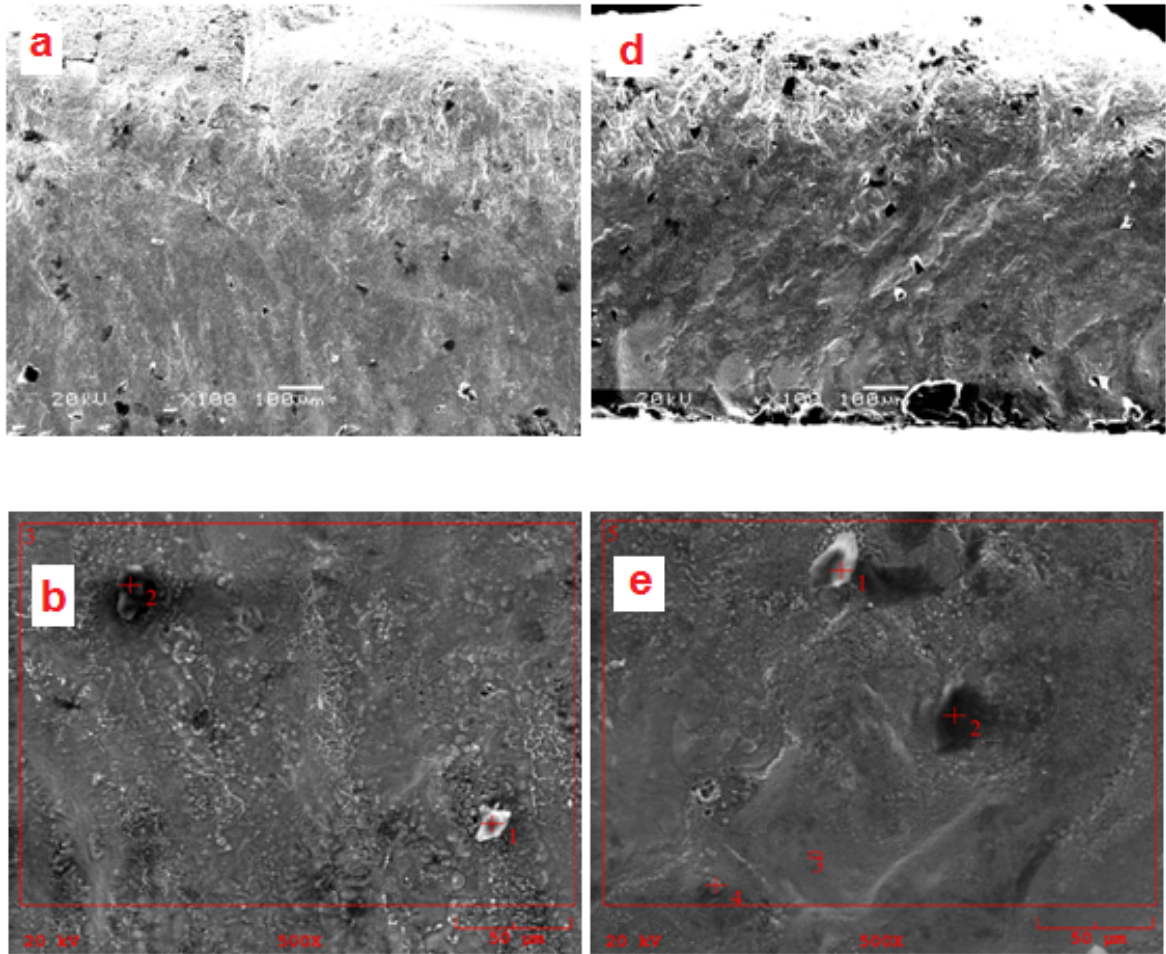
5.3. Mikroyapı ve EDS Analizi İnceleme Sonuçları

Bu bölümde kesme işlemi sonrasında oluşan kesme yüzeylerinin mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Kesme işlemleri sonrasında oluşan her iki yüzey incelenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde numunelerin kesme yüzeylerinden elektron mikroskobunda 100X büyütme ile genel görüntüleri elde edilmiştir. Aynı numunelerden 500X büyütme ile EDS analizleri yapılmıştır. Şekil 5.15.-5.26. arasında bu incelemelerin sonuçları verilmiştir.

Şekil 5.15.-5.18. arasında 0,8 Bar basınçta ve farklı kesme hızlarında lazerle kesilen Inconel 718 'in yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları ve EDS analizleri görülmektedir. SEM fotoğrafları ve EDS analizleri genel olarak incelendiğinde kesme yüzeylerinin yapısının ana malzemeye oranla büyük oranda değiştiği görülmektedir. Bu gaz basıncında 2, 4 ve 6 m/dak 'lık kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğü ile uyumlu olarak SEM fotoğraflarında düzgün yüzeyler elde edilmiştir. Numunelerin belirli yüzeylerinde kısmen kesme izleri görülmektedir. Ayrıca SEM fotoğraflarında yüzeyde oksit partikülleri görülmektedir. Bu fotoğrafların sonucunda kesme yüzeylerinde mikro çatlak görülmemiştir. 8 m/dak 'lık kesme hızında ise (Şekil 5.18) derin çukurlar ve kesme sırasında oluştuğu belli olan farklı bileşimdeki oksitler görülmektedir. Bu oksitler hızlı kesme neticesinde ortamdaki uzaklaşarak numunenin pürüzlülüğünün artmasına sebep olmuştur. Bu durum Şekil 5.18. 'da SEM fotoğraflarında ve EDS analizlerinde görülmektedir.

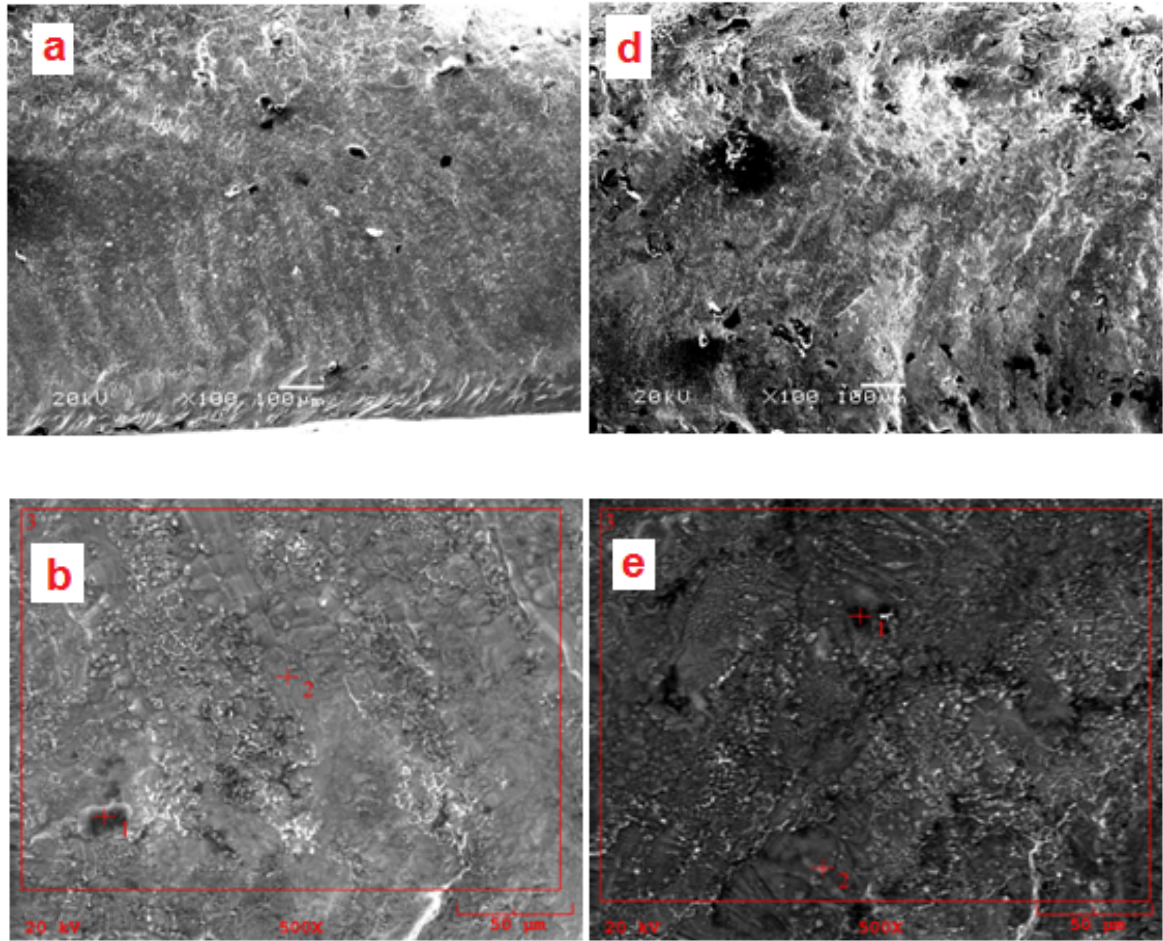


Şekil 5.15. Lazerle kesilmiş A1 ve A2 numunelerinin 0,8 Bar kesme gazı basıncı ve 2 m/dak kesme hızında; a) A1 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) A1 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) A1 numunesinin EDS analizi, d) A2 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) A2 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) A2 numunesinin EDS analizi.



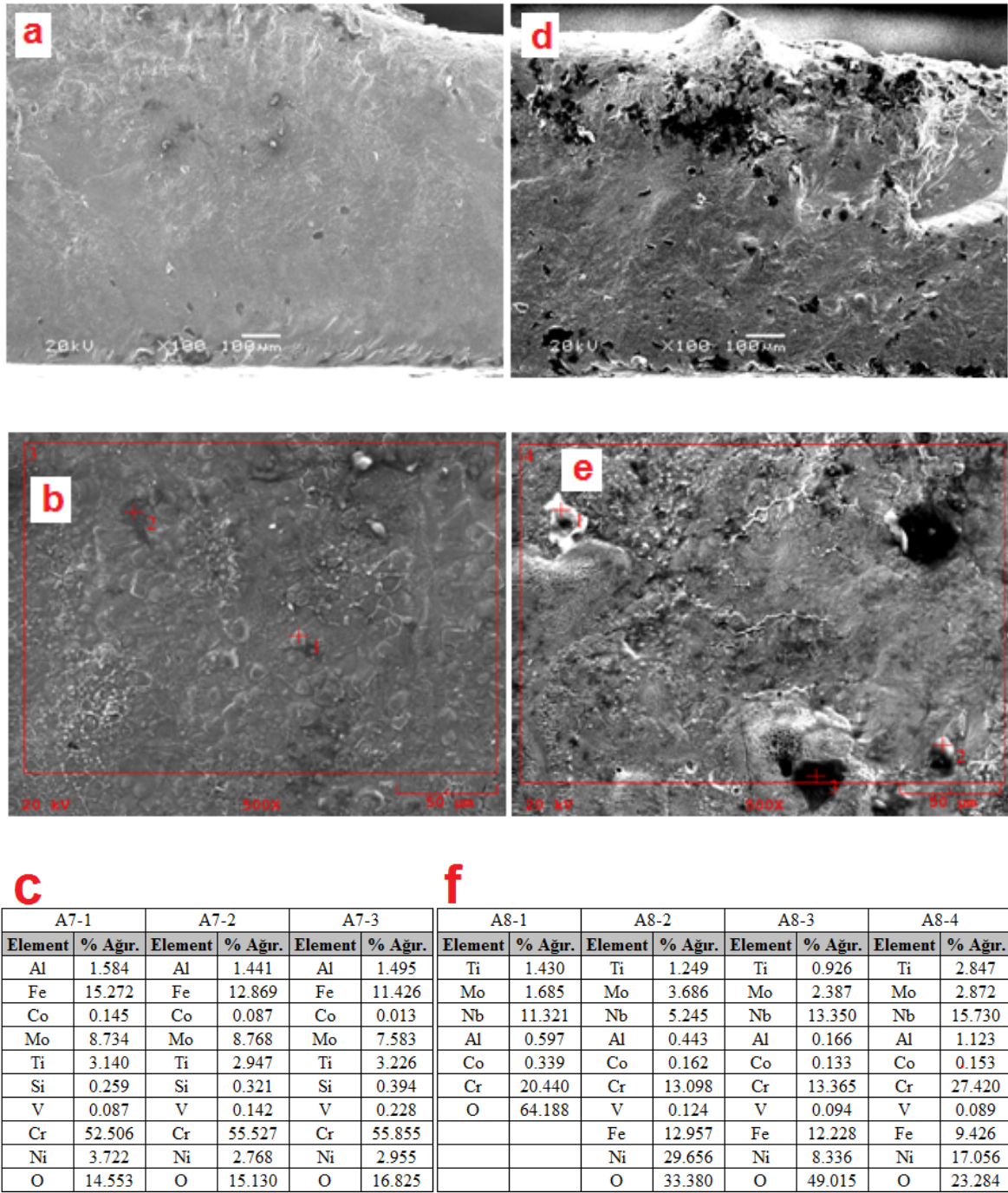
A3-1		A3-2		A3-3		A4-1		A4-2		A4-3		A4-4		A4-5	
Element	% Ağr.	Element	% Ağr.	Element	% Ağr.	Element	% Ağr.	Element	% Ağr.	Element	% Ağr.	Element	% Ağr.	Element	% Ağr.
Fe	9.679	Fe	12.121	Fe	10.699	Fe	2.201	Fe	3.467	Fe	12.367	Fe	11.285	Fe	8.563
Al	0.528	Al	0.566	Al	1.017	V	0.114	V	0.055	V	0.083	V	0.013	V	0.088
V	0.130	V	0.087	V	0.161	Cr	25.161	Cr	26.273	Cr	36.084	Cr	31.822	Cr	36.508
Cr	57.742	Cr	22.843	Cr	40.592	Mo	8.393	Mo	2.769	Mo	3.390	Mo	1.723	Mo	2.093
Mo	1.772	Mo	4.238	Mo	2.157	Co	0.131	Co	0.147	Co	0.427	Co	0.073	Co	0.169
Co	0.179	Co	0.050	Co	0.195	Ti	3.102	Ti	0.798	Ti	1.006	Ti	4.163	Ti	2.634
Ti	2.257	Ti	1.400	Ti	2.591	Mn	1.429	Mn	0.412	Mn	0.475	Mn	0.694	Mn	0.602
Mn	0.419	Mn	0.428	Mn	0.539	Nb	24.886	Nb	14.938	Nb	13.053	Nb	17.581	Nb	17.586
Nb	12.464	Nb	11.333	Nb	17.817	Ni	1.697	Ni	1.579	Ni	15.126	Ni	1.987	Ni	7.188
Ni	3.929	Ni	2.307	Ni	8.632	Si	1.091	Si	0.323	Si	0.213	Si	0.111	Al	1.053
O	10.901	O	44.626	O	15.597	Al	1.294	O	49.239	O	17.776	O	30.547	O	23.715
						O	30.201								

Şekil 5.16. Lazerle kesilmiş A3 ve A4 numunelerinin 0,8 Bar kesme gazı basıncı ve 4 m/dak kesme hızında; a) A3 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) A3 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) A3 numunesinin EDS analizi, d) A4 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) A4 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) A4 numunesinin EDS analizi.



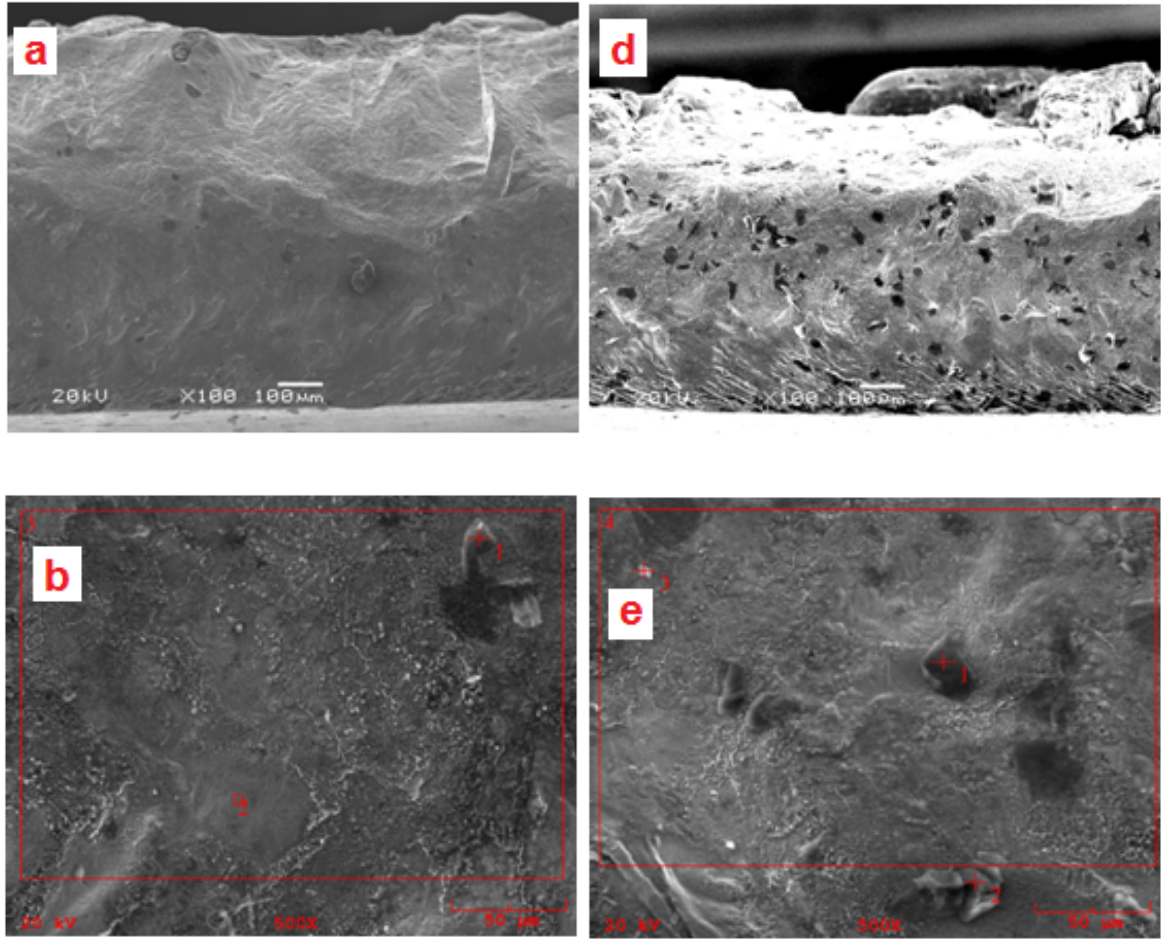
A5-1		A5-2		A5-3		A6-1		A6-2		A6-3	
Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.
Al	1.584	Al	3.396	Al	2.104	Fe	14.070	Fe	23.276	Fe	9.361
Fe	10.988	Fe	5.307	Fe	10.630	Mo	1.624	Mo	2.661	Mo	1.972
V	0.100	V	0.277	V	0.108	Co	0.227	Co	0.158	Co	0.010
Cr	23.779	Cr	48.590	Cr	42.079	Ti	2.642	Ti	2.450	Ti	3.133
Co	0.414	Co	0.249	Co	0.337	Mn	0.432	Mn	0.753	Mn	0.642
Mo	5.945	Mo	8.726	Mo	7.372	Nb	15.993	Nb	27.151	Nb	16.643
Ti	2.489	Ti	3.740	Ti	3.491	Al	0.953	Al	0.319	Al	1.019
Si	0.244	Si	0.443	Si	0.256	V	0.074	V	0.250	V	0.219
Ni	29.211	Ni	8.365	Ni	19.586	Ni	5.362	Ni	6.009	Ni	9.673
O	25.246	O	20.906	O	14.038	Si	0.305	Si	0.312	Si	0.220
						Cr	49.255	Cr	33.616	Cr	45.970
						O	9.063	O	3.045	O	11.136

Şekil 5.17. Lazerle kesilmiş A5 ve A6 numunelerinin 0,8 Bar kesme gazı basıncı ve 6 m/dak kesme hızında; a) A5 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) A5 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) A5 numunesinin EDS analizi, d) A6 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) A6 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) A6 numunesinin EDS analizi.



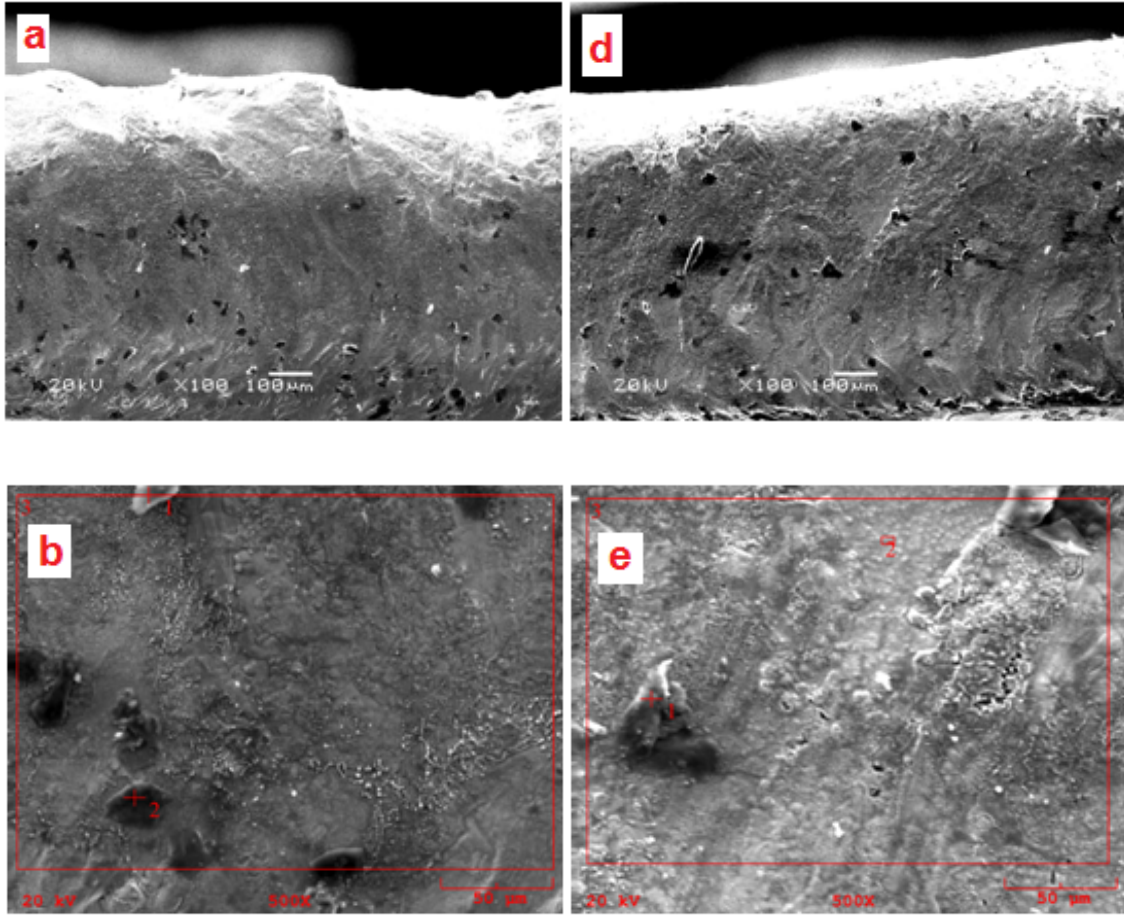
Şekil 5.18. Lazerle kesilmiş A7 ve A8 numunelerinin 0,8 Bar kesme gazı basıncı ve 8 m/dak kesme hızında; a) A7 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) A7 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) A7 numunesinin EDS analizi, d) A8 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) A8 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) A8 numunesinin EDS analizi.

Şekil 5.19.-5.22. arasında 1,2 Bar basınçta ve farklı kesme hızlarında kesilen Inconel 718 'in yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları ve EDS analizleri verilmiştir. Şekil 5.19a. ve 5.19d. incelendiğinde kesme yüzeyinde kesme çiziklerinin kısmen oluştuğu, oksitlerle beraber kısmen ergimiş metal kalıntılarının yüzeyde kaldığı görülmektedir. Kesme hızı arttıkça 4 ve 6 m/dak kesme hızlarında kesme sonrasında oluşan partiküllerde azalma görülmektedir. Hız 8 m/dak olduğunda kesme bölgesinde yer yer boşluklar görülmektedir (Şekil 5.22.). Bu durum kesme hızı artışı ile kesmenin ergiyen metalin düzgün şekilde ortamdan uzaklaştırılmadığını göstermektedir. Aynı şeklin EDS analizinde kaba demir ve krom içeren oksitler görülmektedir. Bu gruptaki numunelerde basınç artışı ile kesme izlerinde belirginlik artmıştır.



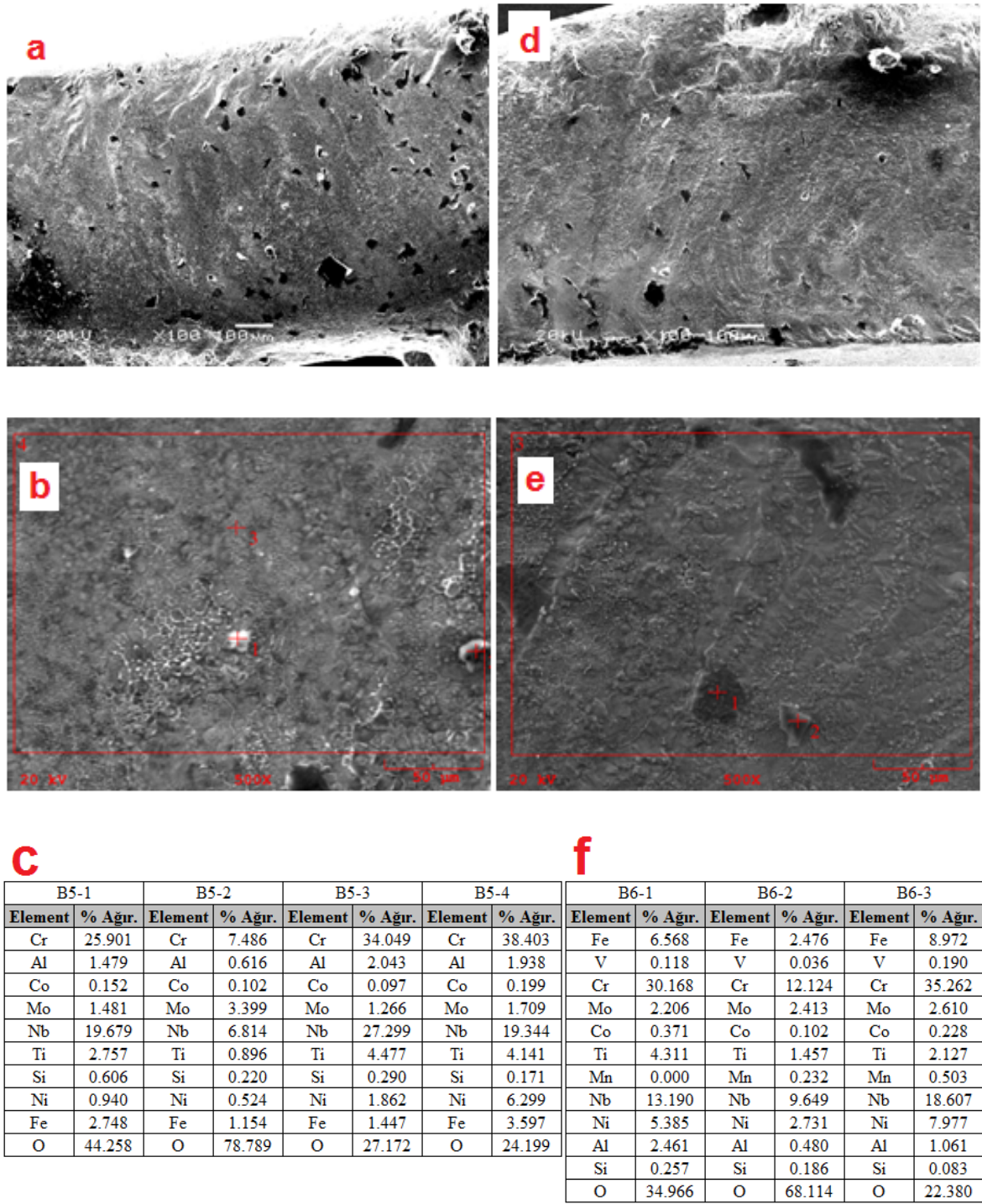
B1-1		B1-2		B1-3		B2-1		B2-2		B2-3		B2-4	
Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.
Al	2.057	Al	3.215	Al	1.924	Fe	2.691	Fe	3.150	Fe	4.818	Fe	7.122
Fe	3.082	Fe	15.078	Fe	7.375	V	0.000	V	0.183	V	0.031	V	0.050
V	0.061	V	0.046	V	0.118	Cr	12.440	Cr	26.627	Cr	25.810	Cr	33.085
Cr	54.570	Cr	18.509	Cr	39.199	Mo	5.585	Mo	2.903	Mo	4.477	Mo	3.047
Mo	3.002	Mo	4.788	Mo	2.067	Co	0.182	Co	0.226	Co	0.411	Co	0.236
Co	0.231	Co	0.395	Co	0.196	Ti	1.797	Ti	4.526	Ti	1.724	Ti	3.245
Si	0.570	Si	0.275	Si	0.227	Mn	0.089	Mn	0.426	Mn	0.311	Mn	0.496
Ti	4.076	Ti	1.876	Ti	4.224	Nb	8.702	Nb	17.562	Nb	20.304	Nb	17.538
Mn	0.837	Mn	0.095	Mn	0.813	Ni	2.600	Ni	7.015	Ni	4.375	Ni	8.627
Nb	22.885	Nb	9.094	Nb	19.534	Al	0.491	Al	2.790	Al	0.383	Al	2.059
Ni	1.024	Ni	41.837	Ni	10.499	Si	0.163	Si	0.490	Si	0.947	Si	0.224
O	7.606	O	4.792	O	13.824	O	65.261	O	34.101	O	36.409	O	24.273

Şekil 5.19. Lazerle kesilmiş B1 ve B2 numunelerinin 1,2 Bar kesme gazı basıncı ve 2 m/dak kesme hızında; a) B1 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) B1 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) B1 numunesinin EDS analizi, d) B2 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) B2 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) B2 numunesinin EDS analizi.

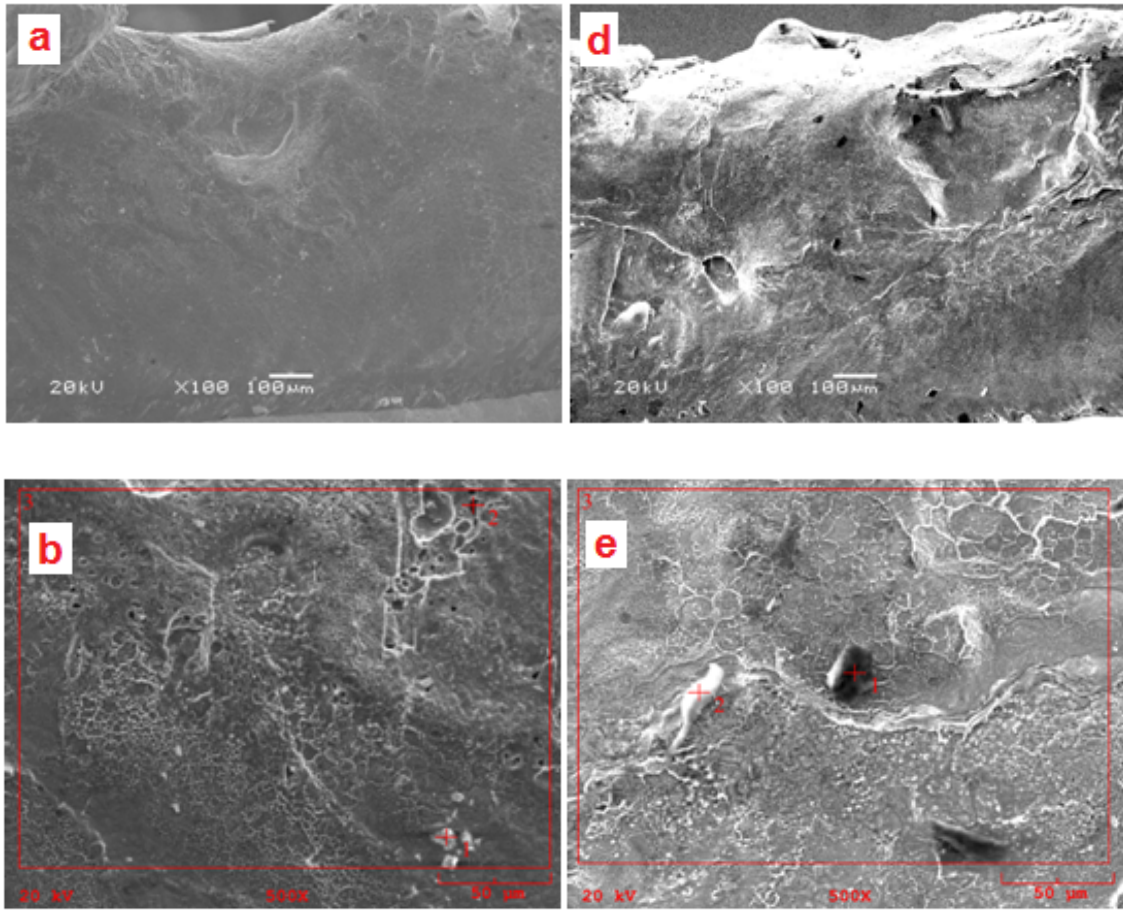


B3-1		B3-2		B3-3		B4-1		B4-2		B4-3	
Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.
Al	2.543	Al	1.862	Al	1.961	Cr	81.555	Cr	18.540	Cr	31.657
Fe	10.333	Fe	6.521	Fe	9.219	Al	5.206	Al	0.838	Al	1.795
Co	0.365	Co	0.289	Co	0.386	O	13.239	Mo	4.800	Mo	2.258
Mo	3.944	Mo	2.523	Mo	2.384			Nb	8.243	Nb	17.362
Ti	3.141	Ti	4.826	Ti	3.090			Co	0.465	Co	0.233
Ni	22.784	Ni	16.192	Ni	19.175			V	0.084	V	0.075
V	0.336	V	0.228	V	0.158			Fe	15.329	Fe	6.124
Cr	32.089	Cr	30.177	Cr	31.282			Ni	41.205	Ti	3.077
Nb	14.133	Nb	10.972	Nb	15.770			Ti	2.117	Ni	8.691
O	10.332	Si	0.221	Si	0.187			O	8.378	O	28.729
		O	26.190	O	16.387						

Şekil 5.20. Lazerle kesilmiş B3 ve B4 numunelerinin 1,2 Bar kesme gazı basıncı ve 4 m/dak kesme hızında; a) B3 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) B3 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) B3 numunesinin EDS analizi, d) B4 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) B4 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) B4 numunesinin EDS analizi.



Şekil 5.21. Lazerle kesilmiş B5 ve B6 numunelerinin 1,2 Bar kesme gazı basıncı ve 6 m/dak kesme hızında; a) B5 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) B5 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) B5 numunesinin EDS analizi, d) B6 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) B6 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) B6 numunesinin EDS analizi.

**c**

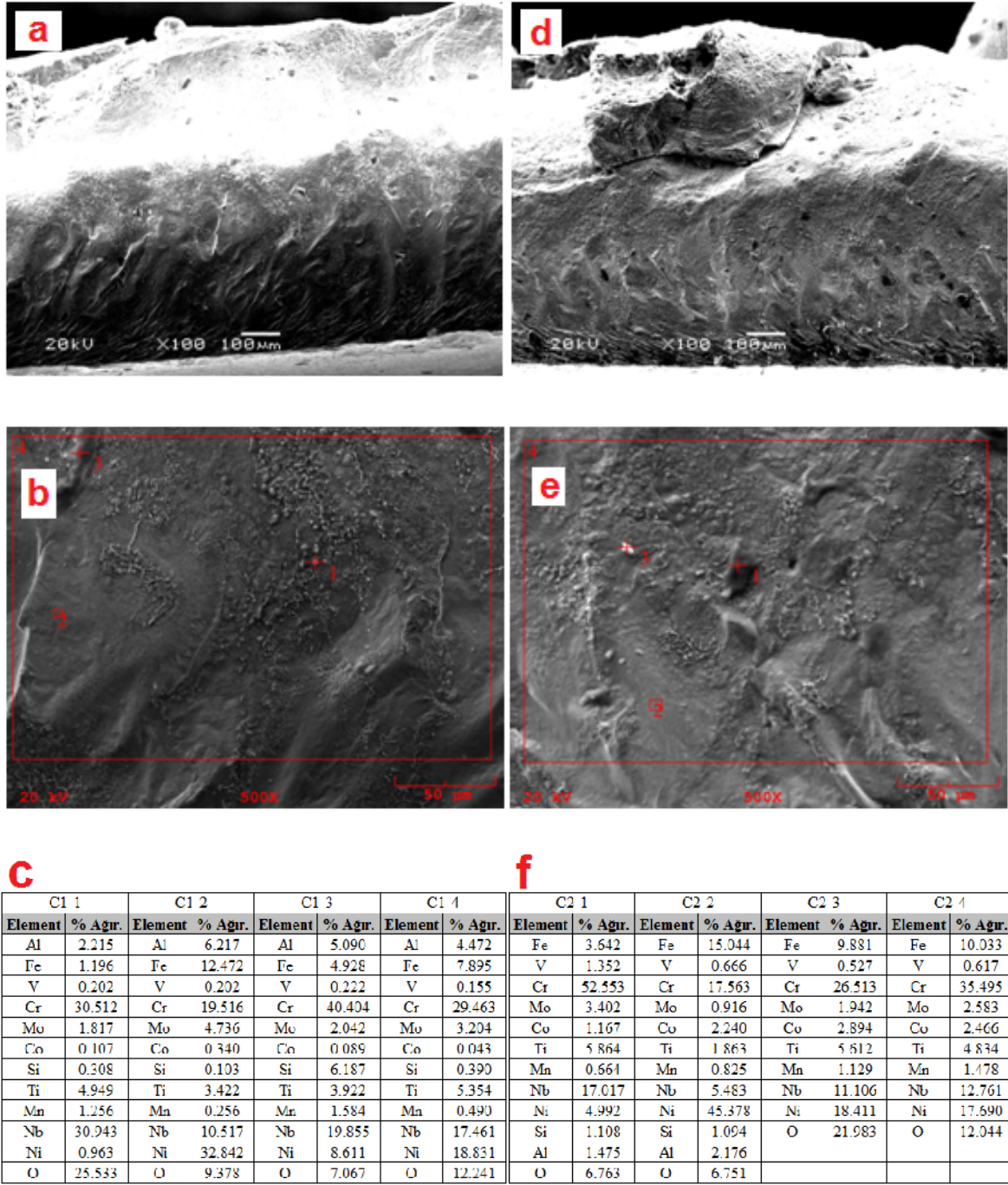
B7-1		B7-2		B7-3	
Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.
Al	1.974	Al	0.571	Al	2.960
Fe	27.691	Fe	13.762	Fe	7.018
Co	0.078	Co	0.974	Co	0.241
Mo	2.055	Mo	0.852	Mo	8.466
Ti	3.398	Ti	1.848	Ti	4.750
V	0.143	V	0.442	V	0.228
Cr	26.171	Cr	21.108	Cr	50.687
Ni	13.940	Ni	48.914	Ni	8.351
Si	1.748	Si	0.112	O	17.299
Nb	8.644	Nb	8.148		
O	14.160	O	3.270		

f

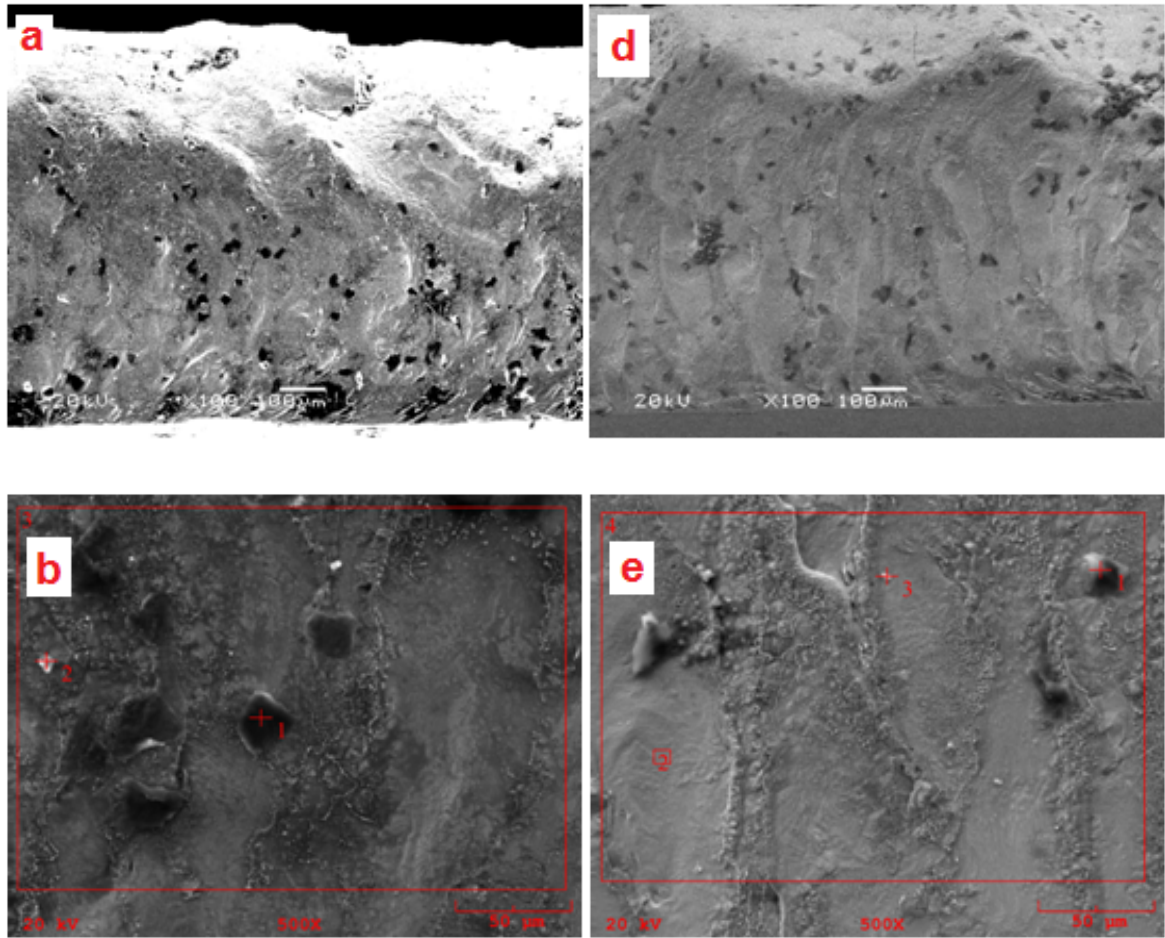
B8-1		B8-2		B8-3	
Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.
Cr	30.879	Cr	21.303	Cr	36.547
Al	0.813	Al	1.588	Al	2.085
Co	0.318	Co	0.181	Co	0.038
Mo	2.213	Mo	2.704	Mo	1.824
Nb	11.976	Nb	15.348	Nb	17.412
Ti	2.873	Ti	3.142	Ti	4.597
Si	0.356	Si	0.146	Si	0.075
V	0.232	V	0.045	V	0.186
O	50.340	O	55.544	Ni	8.545
				Fe	5.439
				O	23.251

Şekil 5.22. Lazerle kesilmiş B7 ve B8 numunelerinin 1,2 Bar kesme gazı basıncı ve 8 m/dak kesme hızında; a) B7 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) B7 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) B7 numunesinin EDS analizi, d) B8 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) B8 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) B8 numunesinin EDS analizi.

Şekil 5.23.-5.26. arasında 1,6 Bar basınçta ve farklı kesme hızlarında kesilen Inconel 718 'in yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları ve EDS analizleri verilmiştir. Bu basınçta, basınç artışı sonucunda tüm numunelerin yüzeylerinde kesme izleri keskin ve açık şekilde oluşmuştur. Bu durum bu basınçtaki kerf genişliklerinin birbirlerine oldukça yakın olması ile uyumludur. Benzer şekilde bu numunelerde de kesme sonrası yüzeyde farklı partikül ve oksit bileşikleri oluştuğu görülmektedir. Ancak en yüksek basınç değerinde olan bu numunelerde kesme bölgesinde daha az kesme kalıntıları kaldığı görülmektedir. Bu numunelerin en düşük pürüzlülüğe sahip olan Şekil 5.25a. ve 5.25d. incelendiğinde oluşan kesme çizgilerinin oldukça düzgün olduğu ve şiddetli basınç nedeni ile oluşan partiküllerin bu numunelerde ortamdan uzaklaşarak ya da ara bölgelere toplanarak pürüzlülüğü azalttığı düşünülmektedir. 8 m/dak kesme hızında ise oluşan kaba oksitler yüzeyden tamamen uzaklaşmamıştır. EDS analizlerinde (Şekil 5.26b-5.26e) kaba Cr_2O_3 , CrO_3 ve Cr-Nb oksit içeren bileşiklerinin kesme bölgesinin alt taraflarında yoğunlaştığı görülmektedir (Ahn ve Byun, 2009). Bu durum kesme hızının artışı ile kesme sırasında oluşmuş olan oksitlerin tamamen ortamdan uzaklaşmadığını göstermektedir.

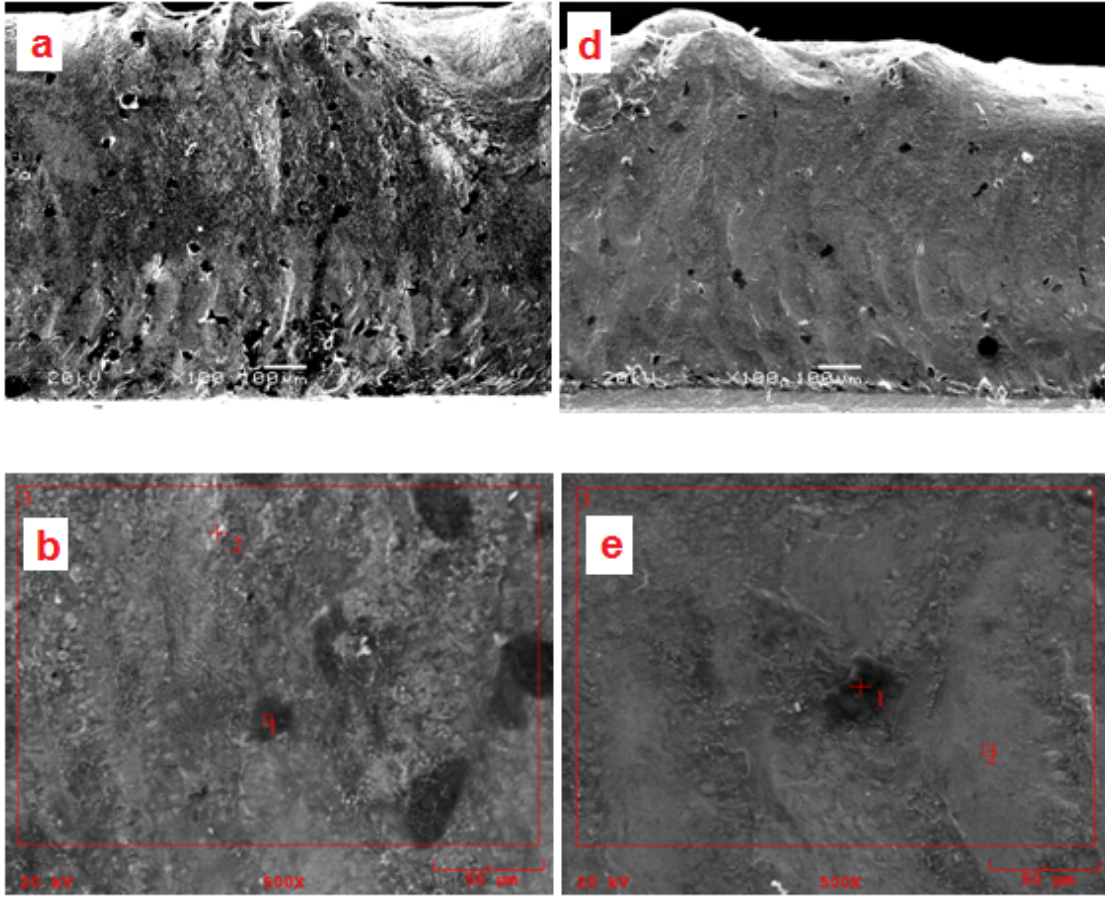


Şekil 5.23. Lazerle kesilmiş C1 ve C2 numunelerinin 1,6 Bar kesme gazı basıncı ve 2 m/dak kesme hızında; a) C1 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) C1 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) C1 numunesinin EDS analizi, d) C2 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) C2 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) C2 numunesinin EDS analizi.



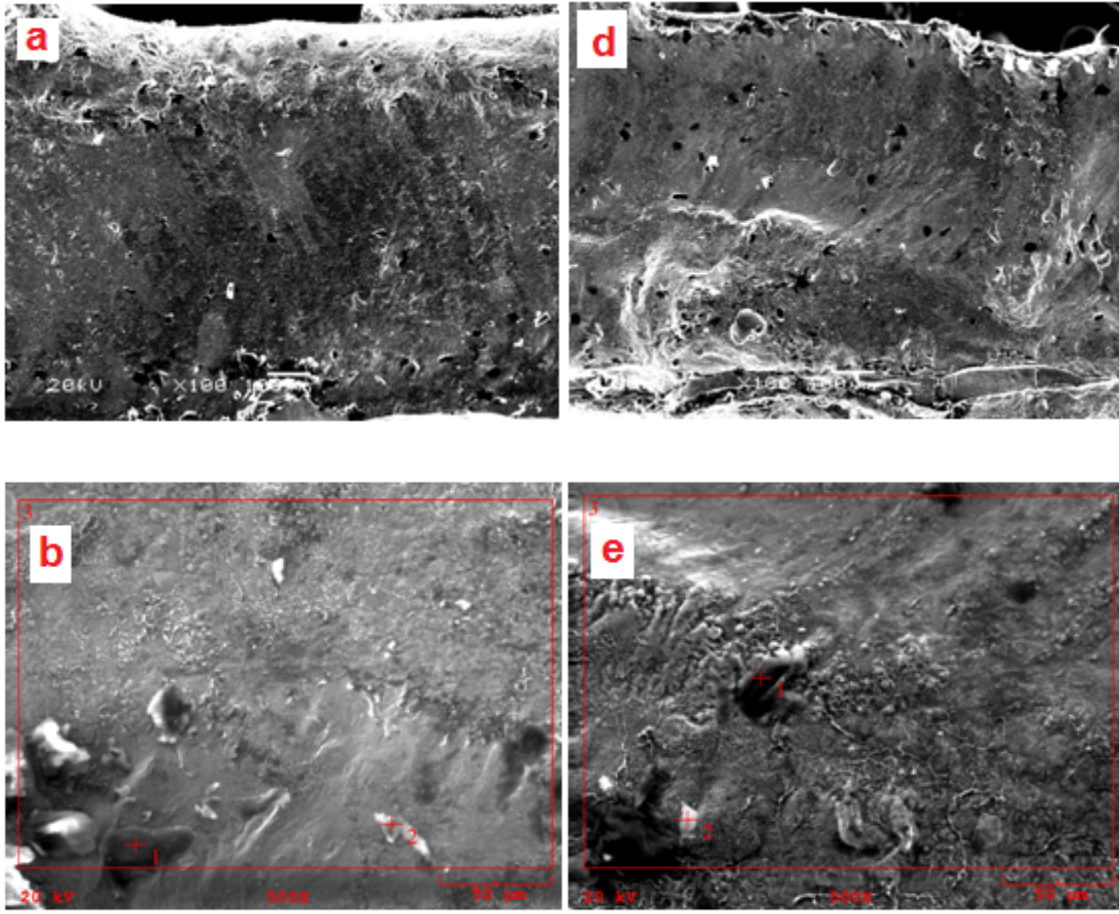
C3-1		C3-2		C3-3		C4-1		C4-2		C4-3		C4-4	
Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.
Fe	5.232	Fe	6.589	Fe	9.790	Al	2.586	Al	2.110	Al	3.439	Al	2.310
Al	1.549	Al	1.803	Al	3.408	Fe	16.903	Fe	16.102	Fe	2.186	Fe	10.000
Cr	25.938	Cr	21.373	Cr	28.480	V	0.096	V	0.140	V	0.104	V	0.253
Mo	4.736	Mo	1.821	Mo	3.506	Cr	16.499	Cr	18.253	Cr	43.766	Cr	32.895
Co	0.113	Co	0.186	Co	0.337	Mo	5.111	Mo	4.642	Mo	2.066	Mo	2.464
Ti	2.570	Ti	2.587	Ti	3.362	Co	0.253	Co	0.400	Co	0.120	Co	0.299
Mn	0.178	Mn	0.208	Mn	0.016	Si	0.208	Si	0.181	Si	0.127	Si	0.237
Nb	12.665	Nb	17.376	Nb	17.019	Ti	1.742	Ti	1.455	Ti	4.910	Ti	3.295
Ni	9.508	Ni	8.985	Ni	23.160	Mn	0.220	Mn	0.154	Mn	0.000	Mn	0.281
V	0.000	V	0.250	V	0.000	Nb	6.486	Nb	9.365	Nb	25.032	Nb	15.676
Si	0.684	Si	0.387	Si	0.214	Ni	44.723	Ni	43.396	Ni	2.203	Ni	21.603
O	36.826	O	38.435	O	10.709	O	5.173	O	3.801	O	16.047	O	10.690

Şekil 5.24. Lazerle kesilmiş C3 ve C4 numunelerinin 1,6 Bar kesme gazı basıncı ve 4 m/dak kesme hızında; a) C3 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) C3 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) C3 numunesinin EDS analizi, d) C4 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) C4 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) C4 numunesinin EDS analizi.



c						f					
C5-1		C5-2		C5-3		C6-1		C6-2		C6-3	
Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.
Fe	7.649	Fe	8.693	Fe	4.436	Fe	3.036	Fe	16.225	Fe	10.968
V	0.090	V	0.187	V	0.047	V	0.057	V	0.188	V	0.137
Cr	24.278	Cr	39.771	Cr	36.862	Cr	29.378	Cr	17.992	Cr	22.377
Mo	2.575	Mo	2.573	Mo	1.797	Mo	2.528	Mo	5.920	Mo	4.174
Co	0.259	Co	0.145	Co	0.084	Co	0.084	Co	0.226	Co	0.376
Ti	3.271	Ti	3.831	Ti	3.892	Ti	2.101	Ti	1.301	Ti	2.725
Mn	0.161	Mn	1.010	Mn	0.291	Mn	0.000	Mn	0.171	Mn	0.176
Nb	8.453	Nb	21.065	Nb	18.920	Nb	11.004	Nb	9.194	Nb	12.755
Ni	17.250	Ni	12.429	Ni	6.444	Ni	3.241	Ni	43.106	Ni	27.890
Al	2.160	Al	0.968	Al	2.210	Al	1.330	Al	2.155	Al	2.885
O	33.854	O	9.329	O	25.016	Si	0.348	Si	0.196	Si	0.231
						O	46.892	O	3.326	O	15.306

Şekil 5.25. Lazerle kesilmiş C5 ve C6 numunelerinin 1,6 Bar kesme gazı basıncı ve 6 m/dak kesme hızında; a) C5 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) C5 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) C5 numunesinin EDS analizi, d) C6 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) C6 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) C6 numunesinin EDS analizi.



C7-1		C7-2		C7-3		C8-1		C8-2		C8-3	
Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.	Element	% Ağır.
Al	1.618	Al	4.449	Al	2.734	O	25.347	O	41.359	O	24.526
Fe	11.990	Fe	15.061	Fe	9.909	Cr	74.653	Cr	45.615	Cr	23.551
V	0.001	V	0.129	V	0.134			Al	5.265	Al	3.309
Cr	12.286	Cr	21.614	Cr	34.415			Ti	7.447	Ti	4.780
Co	0.176	Co	0.350	Co	0.119			V	0.313	V	0.266
Mo	2.985	Mo	9.476	Mo	7.059					Fe	7.096
Ti	1.611	Ti	2.567	Ti	3.341					Ni	16.220
Ni	30.100	Ni	37.334	Ni	21.646					Co	0.192
Si	0.151	Si	2.529	Si	0.173					Mo	2.871
Nb	4.162	O	6.490	O	20.474					Nb	17.189
O	34.920										

Şekil 5.26. Lazerle kesilmiş C7 ve C8 numunelerinin 1,6 Bar kesme gazı basıncı ve 8 m/dak kesme hızında; a) C7 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), b) C7 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), c) C7 numunesinin EDS analizi, d) C8 numunesinin enine kesitinin SEM fotoğrafı (100x), e) C8 numunesinin SEM fotoğrafı (500x), f) C8 numunesinin EDS analizi.

6. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ağırlıklı olarak havacılık sektöründe kullanılan Inconel 718 sac malzemelerin, farklı kesme gazı basıncı ve ilerleme hızlarında CO₂ lazer kesme ile kesilmesi sonucunda oluşan kesme yüzeylerinin özellikleri incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Kesme basıncının, lazer giriş gücünün ve lazer kesme gücünün sabit olduğu, gaz basıncının ve ilerleme hızının değiştiği parametrelerde on iki farklı kesme deneyi yapılmıştır. Böylece Inconel 718 'in CO₂ lazer ile kesilmesi sonucunda elde edilen kesme kalitesine, kesme gazı basıncı ve ilerleme hızı parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Kesme işlemi sonrasında, işlem parametrelerinin numunelerin kerf genişliklerine, yüzey pürüzlülüklerine, mikroyapı, SEM ve EDS analizi sonuçlarına etkileri incelenmiştir. Bu incelemeler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde yazılmıştır.

- Bu çalışmada, Inconel 718 'in lazerle kesilmesinde 0,8 bar, 1,2 bar ve 1,6 bar kesme gazı basınçlarında ve 2, 4, 6 ve 8 m/dak kesme hızlarında kesme işlemleri yapılmıştır. Makro incelemeler ve yüzey ölçümleri sonrasında 2, 4 ve 6 m/dak 'da kesme işleminin oldukça düzgün olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Kesme hızı en yüksek değer olan 8 m/dak 'da kesme bölgesinde yer yer boşluk ve kesilmemiş alanlar görülmüştür. Bu durum yetersiz ergime ile açıklanmıştır. Lamikiz vd. (2005), çelik bir malzemenin kesilmesinde benzer şekilde yüksek hızlı kesimde aynı sonuçlara ulaşmıştır. Kesme hızı arttırıldığında kesilmemiş alanların oluşma riskinin arttığı belirlenmiştir.
- Genel olarak incelendiğinde Inconel 718 'de farklı alaşım elementleri olması sonucunda kesme gazı basıncı artışı daha fazla miktarda gaz ile farklı partikülün temasına ve sonuçta farklı boyutlardaki oksitlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu oksitlerin kesme bölgesinden uzaklaşması kerf genişliğine etki etmektedir. Kesme sırasında oluşan oksitlerin kerf bölgesinde etkili olduğu benzer çalışmalarda belirlenmiştir (Ahn ve Byun, 2009).
- En düşük kesme gazı basıncında (0,8 bar) yapılan kesme işleminde ortalama kerf değerlerinin diğer numunelere göre düşük değerlerde olduğu görülmektedir. 1,2

bar basınç değerinde ise kerf aralıkları en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Kesme gazı basıncının maksimum değeri olan 1,6 bar'da ise kısmen azalmalar görülmesine rağmen değerler yüksektir. Bu durum kesme gazı basıncı artışının kerf genişliğini arttırdığını ve basınç değeri kısmen yüksek bir değere ulaştığında (1,6 bar) kerf genişliği üzerindeki etkisini kaybettiğini göstermektedir. Benzer şekilde Ghany ve Newishy (2005), ND:Yag lazer ile paslanmaz çelik kesme işlemi sonrasında gaz basıncı artışının kerf genişliğini ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını belirtmişlerdir. Gaz basıncı artışı kesme bölgesinde oluşan ergimiş metali daha yüksek miktarda ortamdan uzaklaştırmaktadır.

- Kesme işleminde düşük kesme hızlarında uzun süreli temas sonucunda birim alana gelen enerji değeri artmaktadır. Düşük kesme hızlarında kesme için gerekli olan enerjinin geriye kalan miktarı ITAB genişliğinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle düşük kesme hızlarında büyük ITAB, benzer şekilde yüksek kesme hızlarında da kesme bölgesinde enerjinin yetersiz kalması nedeniyle kesilmemiş alanlar oluşmaktadır. Bu çalışma sonucu Stournaras vd. (2009) ve Rajaram vd. (2003) 'nin yaptığı çalışmalar ile uyum içerisindedir.
- Lazerle kesme sırasında işlemin maksimum hızda ve uygun pürüzlülükte yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada sadece yüzey pürüzlülüğü dikkate alınır, 1,6 bar basınçta 6 m/dak 'lık kesme hızında en düşük pürüzlülük değerleri 2,8 μm Ra elde edilmiştir. Bu sonuca göre yüksek gaz basıncı ve 4 - 6 m/dak 'lık kesme hızlarında en uygun kesme işlemleri yapılabilmektedir. Ahn ve Byun (2009) çalışmalarında Inconel 718 'in lazerle kesilmesinde aynı kalınlıkta malzeme için ~2 kat güçte kesme işlemi yapmışlardır. Bu durumda 8 m/dak kesme hızında 1,8 μm Ra değeri elde etmişlerdir. Bu çalışma ile karşılaştırıldığında deneylerimizde kesme gazı basıncının %50 arttırılması ve lazer gücünün yaklaşık %50 azaltılması ile benzer pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Bu durum, kesme hızı artışında kesme gücünün arttırılması gerektiği sonucunu desteklemektedir. Çalışmamızın sonuçlarına göre kesme basıncının arttırılması güç ve hız kadar etkili olmamaktadır.
- En düşük ilerleme hızı sonuçta malzemeye daha fazla enerji girdisi gerçekleştirmektedir. Bu nedenle malzemedeki daha geniş bir ergime bölgesi oluşmaktadır. Daha geniş ergime bölgesi yüzey pürüzlülüğünü kısmen arttırmaktadır. Tüm sonuçlar içerisinde 6 m/dak kesme hızı metal ergimesi, oksijen

reaksiyonu ve yüzey pürüzlülüğü değerleri açısından optimum şartları sağlamaktadır.

- Inconel 718 'in CO₂ lazer ile kesilmesinde sabit güçte 0,8 bar, 1,2 bar ve 1,6 bar farklı basınç değerlerinde 2, 4 ve 6 m/dak farklı kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir (Çizelge 5.2). Ancak aynı şartlarda 8 m/dak kesme hızı ile yeterli bir kesme yapılamamıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahn, D. G. and Byun, K. W., 2009, Influence of cutting parameters on surface characteristics of cut section in cutting of Inconel 718 sheet using CW Nd:YAG laser, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 19, 32-39.
- Berkmanns, J. and Faerber. M., 2008, Laser cutting, Laserline technical, Linde Gas, Germany, 20 p.
- Gapontsev, V., and Krupke, W., 2002, Fiber Lasers Grow in Power, <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-38/issue-8/features/fiber-lasers/fiber-lasers-grow-in-power.html>, erişim tarihi: 07.03.2015.
- Ghany, K. A., Newishy, M., 2005, Cutting of 1,2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser, *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 438-447.
- Groover, M. P., 2010, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., 628-655.
- Hasçalık, A. and Ay, M., 2012, CO₂ laser cut quality of Inconel 718 nickel - based superalloy, *Optics And Laser Technology*, 48, 554-564.
- Hitz, B., Ewing, J. J. and Hecht, J., 2001, *Introduction to laser technology*, The Institute Of Electrical And Electronics Engineers, Inc., New York, 302 p.
- Hong, J.K., Park, J.H., Park, N.K., Eom, I.S., Kim, M.B. and Kang, C.Y., 2008, Microstructures and mechanical properties of Inconel 718 welds by CO₂ laser welding, *Journal Of Materials Processing Technology*, 201, 515-520.
- Ion, J. C., 2005, *Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application*, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), Australia, 576 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Kellens, K., Rodrigues, G.C., Dewulf, W., Duflou, J.R., 2014, Energy and resource efficiency of laser cutting processes, *Physics Procedia*, 56, 854-864.
- Krajcarz, D., 2014, Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting, *Procedia Engineering*, 69, 838-843.
- Lamikiz, A., Lopez de Lacalle, L.N., Sanchez, J.A., Del Pozo, D., Etayo, J.M., Lopez, J.M., 2005, CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS), *Applied Surface Science*, 242, 362-368.
- Lertora, E., Mandolino, C. and Gambaro, C., 2014, Mechanical behaviour of Inconel 718 thin-walled laser welded components for aircraft engines, *International Journal of Aerospace Engineering*, Article ID 721680, 9 p.
- Madic, M. and Radovanovic, M., 2012, Comparative modeling of CO₂ laser cutting using multiple regression analysis and artificial neural network, Department of Production Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Nis, Nis, Serbia, *International Journal of Physical Sciences Vol. 7(16)*, 2422-2430.
- Patel, J. M., Parametric investigation in CO₂ laser cutting, Quality of hardox-400 materials, *International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 3 No. 7*, 5979-5984.
- Radovanovic, M. and Dasic, P., 2006, Research on surface roughness by laser cut, *The Annals of University "Dunarea Dej" of Galati Fascicle VIII*, ISSN 1241-4590 Tribology, 84-88.
- Rajaram, N., Sheikh-Ahmad J., and Cheraghi, S.H., 2003, CO₂ laser cut quality of 4130 steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , 43, 351-358.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Riveiro, A., Quintero, F., Lusquinos, F., Comesana, R., Pou, J., 2010, Parametric investigation of CO₂ laser cutting of 2024-T3 alloy, Journal of Materials Processing Technology, 210, 1138-1152.

Special Metals Corporation, 2007, Publication number SMC-045.

Steen, W. M. and Mazumder, J., 2010, Laser material processing, Fourth Edition, Springer-Verlag London Limited, New York, 577 p.

Stournaras, A., Stavropoulos, P., Salonitis, K. and Chryssolouris, G., 2009, An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum, CIRP Journal Of Manufacturing Science And Rechnology, 2, 61-69.

Subbarao, C., N.Sinivasa, R., Major K.E. and D.V.Ramana, R., 2013, Investigation analysis of plasma arc cutting parameters on the unevenness surface of Hardox-400 material, Procedia Engineering, 64, 854-861.

Thakur, D.G., Ramamoorthy, B. and Vijayaraghavan, L., 2009, Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning, Materials And Design, 30, 1718-1725.

The Center For Metals Fabrication, 1986, Vol. 3, No. 9, 6 p.

Wandera, C., 2006, Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam, M.S. thesis, Lappeenranta University of Technology, 128 p. (unpublished).

Webb, C. E. and Jones, J. D. C., 2004, Handbook of laser technology and applications, Volume III: Applications, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1179 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

Yilbas, B.S., Karatas, C., Uslan, I., Keles, O., Usta, Y., Yilbas, Z., and Ahsan, M., 2008, Wedge cutting of mild steel by CO2 laser and cut-quality assessment in relation to normal cutting, Optics And Laser In Engineering, 46, 777-784.