



**LAZER ŞOK DÖVME İŞLEMİNİN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ
γ-TiAl VE IN939 PARÇALARDA YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Mahmut ÖZER

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mahmut ÖZER

05/07/2024

LAZER ŞOK DÖVME İŞLEMİNİN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ γ -TiAl ve IN939 PARÇALARDA YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Mahmut ÖZER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Eklemeli imalat (Eİ), havacılık, otomotiv ve biyomedikal gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, özellikle toz yataklı Eİ üretimlerinde yüzeydeki kalıntı gerilmeleri ve pürüzlülük sorunları, Eİ metal parçalarında istenilen performansları elde etmesini engellemektedir. Lazer şok dövme işlemi bu bağlamda metal malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirerek ederek yorulma davranışının en önemli aşaması olan çatlak başlangıcını geciktirebilen bir işlemdir. LŞD işlemi üretim sonrası yüzeyde bulunan çeki kalıntı gerilmelerini (ÇKG) bası kalıntı gerilmelerine (BKG) çevirerek mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Bu çalışmada, farklı Eİ yöntemleriyle üretilen γ -TiAl ve IN939 alaşımlarının LŞD işlemi sonrası yüzey özellikleri ve yorulma performansları incelenmiştir. Bu bağlamda yapılan kalıntı gerilme ölçümlerine göre üretimden sonrası EİE γ -TiAl numunesinde yüzeyde bulunan 0-75 MPa değerleri arası ÇKG'leri, -460 MPa değerinde BKG'sine dönüşmüştür. Öte yandan, SLE IN939 için yüzeyde 654 MPa değerlerine ulaşan ÇKG'leri LŞD sonrası -516 MPa değerine kadar BKG olarak değişmiştir. Benzer sonuçlar mikro sertlik değerlerinde de hem yüzey hem de derinlik yönünde elde edilmiştir. Yüzey mikro sertlik değerlerinde γ -TiAl için artış %44,4 ve IN939 için artış %18,2 olarak elde edilmiştir. LŞD işleminin yüksek pürüzlü yüzeylerde de olumlu etkileri S_a , S_z ve S_q değerlerine göre EİE γ -TiAl için sırasıyla %15,8; %12,23 ve %16,68 ve SLE IN939 için ise sırasıyla %8,41; %9,38 ve %8,42 azalmıştır. LŞD işleminin Eİ üretimi numunelerin yorulma performansı ve davranışına etkileri 4-nokta eğmeli yorulma ve hasarlı yüzeylerin SEM incelemesi üzerinden değerlendirilmiştir. EİE γ -TiAl alaşımında yorulma limitinde LŞD sonrası %50 artış gözlenmiştir. SLE IN939 numunelerinde ise aynı gerilme değerlerinde LŞD işlemi ile artışlar 438,3 MPa'da 4,53 kat, 512 MPa'da 4,76 kat ve 585,6 MPa'da 1,37 kat olarak elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, lazer yüzey darbeleme, yüzey bütünlüğü, kalıntı gerilme, mikro sertlik, yorulma ömrü

Sayfa Adedi : 89

Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF LASER SHOCK PROCESSING ON THE
FATIGUE LIFE OF ADDITIVELY MANUFACTURED γ -TiAl AND IN939 PARTS

(Ph. D. Thesis)

Mahmut Özer

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) is widely used in fields such as aerospace, automotive, and biomedical. However, residual stresses and surface roughness issues, especially in powder bed-based AM productions, can hinder the desired performance of AM metal parts. Laser Shock Peening (LSP) is a process that modifies the surface properties of metal materials, delaying the most critical stage of fatigue behavior, crack initiation. The LSP process improves mechanical properties by converting Tensile Residual Stresses (TRS) on the surface to Compressive Residual Stresses (CRS). In this study, the surface properties and fatigue performances of γ -TiAl and IN939 alloys produced by different AM methods were investigated after LSP treatment. According to residual stress measurements conducted after production, TRS values ranging from 0 to 75 MPa on the surface of the AM γ -TiAl specimen were converted to -460 MPa CRS after LSP treatment. Meanwhile, for IN939, TRS reaching 654 MPa on the surface was converted to -516 MPa CRS after LSP. Similar results were obtained in microhardness values in both surface and depth directions. An increase of 44,4% for γ -TiAl and 18,2% for IN939 was observed in surface microhardness values. The positive effects of LSP on highly rough surfaces were also observed, with reductions of 15.8%, 12.23%, and 16.68% in Sa, Sz, and Sq values for γ -TiAl, and 8,41%; 9,38%, and 8,42% for IN939, respectively. The effects of LSP on the fatigue performance and behavior of AM samples were evaluated through four-point bending fatigue and SEM examination of damaged surfaces. A 50% increase in fatigue limit was observed in γ -TiAl alloy after LSP. In IN939 specimens, increases with LSP at the same stress levels were obtained as 4,53 times at 438,3 MPa, 4,76 times at 512 MPa, and 1,37 times at 585,6 MPa.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, laser shock processing, surface integrity, residual stress, fatigue life

Page Number : 89

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu tez çalışması ve diğer akademik çalışmalarımnda benimle bilgi, beceri ve deneyimlerini paylaşan, bana bu hususa her türlü desteği sağlamış olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması süresince yapılan dönem sonu toplantılarında çalışmanın kalitesinin artırılmasına yönelik görüş ve önerilerini sunan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Ömer KELEŞ ve Sayın Doç. Dr. Yiğit KARPAT'a da ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte benden maddi manevi desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Fatma KOÇ ÖZER'e, annem Sevim MUTLU'ya, babam Mehmet ÖZER'e, abim Metin Kağan ÖZER'e ve kardeşim Alper ÖZER'e şükranlarımı sunarım. Yine bu süreçte katkıları olan Amasya Üniversitesindeki iş arkadaşlarım ile Gazi Üniversitesi AMTRG grubu üyelerine tek tek teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamın oluşturulmasında büyük yardımları olan 123M192 kodlu “Lazer ile Dövme İşleminin Eklemeli İmalat ile Üretilmiş Gama Ti-Al ve Inconel939 Alaşımlarının Yorulma Ömürlerine Etkilerinin Araştırılması” başlıklı 1002-A kapsamındaki projesi için TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Bu bağlamda, çalışmaya alt yapı sağlayan HiLASE ve TEI kurumlarına da ayrı ayrı şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. Eİ Metallerinde Yorulma	6
2.2. LŞD İşlemi Prensibi.....	7
2.2.1. LŞD şok basıncı.....	8
2.2.2. LŞD işleminde kalıntı gerilimi oluşumu.....	11
2.2.3. LŞD işleminin yüzey ve mekanik özelliklere etkileri.....	12
2.2.4. LŞD işleminin mikro yapıya etkileri	17
2.2.5. Literatür özeti ve literatür açığı	20
3. MATERYAL YÖNTEM	23
3.1. Numunelerin Üretimi.....	23
3.2. LŞD İşlemi Parametreleri	24
3.3. Yüzey Özelliklerinin Karakterizasyonu.....	27
3.3.1. Yüzeyin optik mikroskop ve sem-eds analizi.....	27
3.3.2. Kalıntı gerilme ölçümleri.....	27
3.3.3. Mikro sertlik ölçümleri	29

	Sayfa
3.3.4. Yüzey pürüzlülük ölçümleri	30
3.4. LŞD İşlemini Sayısal Modelleme Çalışmaları.....	31
3.4.1. Basınç modeli.....	31
3.4.2. Malzeme modeli.....	32
3.4.3. Model kurgusu	33
3.5. Mikro Yapı Analizi	34
3.6. Dört-Nokta Eğmeli Yorulma Deneyleri	34
4. LŞD İŞLEMİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ	37
4.1. Optik Mikroskop İncelemesi ve SEM-EDS analizi	37
4.2. Kalıntı Gerilme Ölçümleri.....	39
4.3. Mikro Sertlik Ölçümleri.....	45
4.4. Yüzey Pürüzlülük	51
5. LŞD İŞLEMİNİN SAYISAL MODELLEMESİ	59
5.1. Malzeme Modeli Parametrelerinin Belirlenmesi	59
5.2. Simülasyon ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	60
6. LŞD İŞLEMİNİN YORULMA PERFORMANSINA ETKİLERİ	65
6.1. Mikro Yapı Analizi.....	65
6.2. 4-Nokta Eğmeli Yorulma Deneyleri.....	66
6.3. Kırılma Yüzeyleri	71
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Eİ sonucu oluşan hatalar	7
Çizelge 2.2. Literatürde LŞD uygulamalarında kullanılan işlem parametreleri	13
Çizelge 3.1. Numune üretim parametreleri.....	24
Çizelge 3.2. LŞD işleminde kullanılan parametreler	25
Çizelge 3.3. 2B analizlerde kullanılan malzemeler ve lazer parametreleri.....	31
Çizelge 3.4. Çeşitli metaller için elde edilen JC malzeme modeli parametreleri	32
Çizelge 3.5. Eİ üretimi γ -TiAl ve IN939 alaşımlarının mekanik özellikleri	36
Çizelge 4.1. XRD ölçümleri sonucunda elde edilen kalıntı gerilme değerleri	41
Çizelge 4.2. Numunelerin en yüksek kalıntı gerilme değerleri	44
Çizelge 4.3. Eİ ürünü numunelerin yüzey mikro sertlik değerleri.....	46
Çizelge 4.4. Yüzey darbeleme yöntemi uygulanmış ve uygulanmamış malzemelerin yüzey Vickers sertlikleri arası ilişki	50
Çizelge 4.5. Yüzey darbeleme yöntemi uygulanmamış malzemelerin yüzey Vickers sertlikleri ve uygulanmışların BKG değerleri arası ilişki	50
Çizelge 4.6. Yüzey darbeleme yöntemi uygulanmış malzemelerin yüzey Vickers sertlikleri ve BKG değerleri arası ilişki	50
Çizelge 4.7. Zımparalanmamış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrasında çizgisel pürüzlülük değerleri	53
Çizelge 4.8. Zımparalanmamış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrasında çizgisel pürüzlülük değerleri	54
Çizelge 4.9. Zımparalanmış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrasında çizgisel pürüzlülük değerleri	54
Çizelge 4.10. Zımparalanmış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrasında çizgisel pürüzlülük değerleri	54
Çizelge 4.11. Zımparalanmamış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrası alansal pürüzlülük değerleri	57
Çizelge 5.1. Basma deneyleri sonucunda elde edilen JC parametreleri	60

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.2. Deneysel ve simülasyondan KG profillerinin karşılaştırılması	61
Çizelge 6.1. SLE IN939 numunelerinin aynı gerilme seviyelerinde 4-nokta eğmeli yorulma yorulma deneyi sonuçları.....	69
Çizelge 6.2. El üretimi metallerde LŞD işleminin yorulma performansına etkilerinin araştırıldığı çalışmalar.....	70



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Toz beslemeli eklemeli imalatın şekilsel olarak gösterimi	5
Şekil 2.2. Sınırlandırılmış plazma modeli	8
Şekil 2.3. LŞD işleminin şematik olarak gösterimi (a) uygulanışı (b) kalıntı gerilme oluşumu	12
Şekil 2.4. LŞD işleminin mukavemetlendirme mekanizmasının şematik gösterimi ...	18
Şekil 2.5. LŞD işleminde tane incelmeye neden olan mekanizmalar	19
Şekil 2.6. LŞD işleminin mikro yapıya etkilerinin şematik gösterimi	21
Şekil 3.1. Eİ numunelerinin (a) boyutları, (b) SLE üretimi IN939 alaşımı, (c) EIE üretimi γ -TiAl alaşımı	23
Şekil 3.2. Dört-nokta eğmeli yorulma deneyi numuneleri (a) boyutları (b) γ -TiAl ve IN939 alaşımı numuneleri.....	24
Şekil 3.3. LŞD işleminde kullanılan parametrelere karşılık gelen lazer şok basıncının zamana karşı dağılımı	25
Şekil 3.4. LŞD işleminin uygulanışı, (a) yüzey karakterizasyonu numuneleri, (b) yorulma deneyi numuneleri.....	26
Şekil 3.5. Kalıntı gerilim ölçüm noktaları	28
Şekil 3.6. Yüzey ve derinlik yönünde mikro sertlik karakterizasyonu	30
Şekil 3.7. Sayısal modelleme için kullanılan üç boyutlu model	34
Şekil 3.8. Malzemelerin yüklenme yönlerine göre oluşan gerilme dağılımları (a) eğilme, (b) çekme, (c) dört-nokta eğilme (d) üç-nokta eğilme.....	35
Şekil 4.1. LŞD uygulanmış γ -TiAl numunesinin SEM-EDS sonucu	39
Şekil 4.2. LŞD uygulanmış IN939 numunesinin SEM-EDS sonucu.....	39
Şekil 4.3. LŞD işleminin öncesi ve sonrası oluşan XRD desenleri, (a) TiAl, (b) IN939 .	41
Şekil 4.4. EIE γ -TiAl numunelerinin derinlik yönünde kalıntı gerilme profilleri	42
Şekil 4.5. IN939 numunelerinin derinlik yönünde kalıntı gerilme profilleri.....	43
Şekil 4.6. EIE TiAl numuneleri için derinlik yönünde mikro sertlik değerleri	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. SLE IN939 numuneleri için derinlik yönünde mikro sertlik değerleri.....	47
Şekil 4.8. LŞD işleminin pekleştirme etkisi, (a) yüzeylerin sertlikleri arası korelasyon, (b) yüzeylerin BKG değerleri arası korelasyon, (c) LŞD yüzeylerin sertlik ve BKG değerler arası korelasyon	49
Şekil 4.9. LŞD sonrası oluşturulan BKG ve işlemsiz yüzeyin sertliği arası ilişki.....	51
Şekil 4.10. İki boyutlu yüzey pürüzlülük profilleri, (a-c) SLE IN939, (b-d) SLE+LŞD IN939, (e-g) EIE γ -TiAl, (f-h) EIE+LŞD γ -TiAl.....	53
Şekil 4.11. LŞD işleminin pürüzlülüğe etkisi, (a) yüksek pürüzlülüğe sahip Eİ yüzeyi, (b) plazma genleşmesi ile etrafa yayılan ergimiş metaller	55
Şekil 4.12. IN939 numunelerin optik profilometre görüntüleri, (a-b) SLE IN939, (c-d) SLE+LŞD IN939.....	57
Şekil 4.13. γ -TiAl numunelerin optik profilometre görüntüleri, (a-b) EIE γ -TiAl, (c-d) EIE+LŞD γ -TiAl	58
Şekil 5.1. Basma deneyi sonuçları: (a) EIE-TiAl, (b) SLE-IN939	59
Şekil 5.2. Plastik bölge için yapılan eğri uydurma işlemi: (a) γ -TiAl (b) IN939	60
Şekil 5.3. Sayısal modelleme sonucu elde edilen kalıntı gerilme sonuçları: (a-c) IN939 için S11 ve S22 yönlerinde KG değerleri, (b-d) TiAl için S11 ve S22 yönlerinde KG değerleri.....	61
Şekil 5.4. SLE IN939 alaşımı için derinlik yönünde deneysel ve sayısal KG sonuçlarının karşılaştırılması.....	62
Şekil 5.5. EIE γ -TiAl alaşımı için derinlik yönünde deneysel ve sayısal KG sonuçlarının karşılaştırılması.....	63
Şekil 5.6. Literatürde bulunan çalışmaların karşılaştırılması.....	64
Şekil 6.1. EIE γ -TiAl numunelerinin 4-nokta eğmeli yorulma deneyi sonuçları	67
Şekil 6.2. IN939 numunelerinin 4-nokta eğmeli yorulma deneyi sonuçları	68

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. LŞD işleminin uygulanması (a) robot kol üzerine bağlanmış numuneler, (b) LŞD işlemi öncesi ve sonrası yüzey, (d) dört-nokta eğmeli yorulma numuneleri	27
Resim 4.1. Lazer darbelerinin yüzeydeki etkisi, (a) optik mikroskop ile incelenen bölgeler, (b) işlemsiz bölge, (c) işlemsiz ve LŞD uygulanan alanlar arası geçiş bölgesi, (d) LŞD bölgesi	38
Resim 6.1. EİE γ -TiAl numunelerinin mikroyapısı, (a) X-Y düzleminde, (b) Z-yığıma yönünde.	65
Resim 6.2. SLE IN939 numunelerinin mikroyapısı, (a) X-Y düzleminde, (b) Z-yığıma yönünde.....	66
Resim 6.3. Dört-nokta eğme testlerinden sonra kırılma yüzeyleri, (a) EİE γ -TiAl numunesi (b) EİE γ -TiAl numunesi.....	71
Resim 6.4. Kırılmış yüzeylerin SEM fotoğrafları, (a) EİE için çatlak başlangıç yerleri, (b) EİE-LŞD için çatlak başlangıç yerleri, (c) EİE için kırılma mekanizmaları, (d) EİE-LŞD için kırılma mekanizmaları.....	72
Resim 6.5. Dört-nokta eğme testlerinden sonra kırılma yüzeyleri, (a) SLE IN939 numunesi (b) SLE-LŞD IN939 numunesi.....	73
Resim 6.6. Kırılma yüzeylerinin SEM gözlemleri, (a) SLE IN939 numunesi için çatlak başlangıcı, (b) çatlak başlangıç noktasındaki erimemiş parçacıklar, (c) SLE-LŞD IN939 numunesi için çatlak başlangıç noktası.	74
Resim 6.7. IN939 numunelerinde gözlemlenen yorulma kırılması mekanizmaları, (a)-(b)-(e) SLE IN939 numunesi, (c)-(d)-(f) SLE-LŞD IN939 numunesi.	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Cm²

Santi metrekare

GW

Giga watt

hz

Hertz

MPa

Mega paskal

ns

Nano saniye

µm

Mikro metre

Kısaltmalar

Açıklamalar

BKG

Bası kalıntı gerilmesi

ÇKG

Çeki kalıntı gerilmesi

BD

Bilyalı dövme

Eİ

Eklemeli İmalat

LŞD

Lazer şok dövme

LP

Lazer parlatma

SİP

Sıcak izostatik presleme

TAEİİ

Tel ark ergitmeli eklemeli imalat

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ), bir yapısal parçanın üç boyutlu verisinden doğrudan faydalanarak, katmanlar halinde parçanın oluşturulmasını içeren bir üretim yöntemidir. Eİ, her ne kadar ilk yıllarında hızlı prototipleme adı altında anılsa da gün geçtikçe gelişen lazer ve robotik teknolojileri sayesinde gerçek uygulamalarda da kullanılmak amacıyla endüstride de yaygınlaşmaya başlamıştır. Geleneksel yöntemlerin aksine, bütün bir kütleden malzeme eksilterek değil, yapısal parçanın üç boyutlu modelini katmanlar halinde oluşturmasından dolayı karmaşık geometrileri daha rahat üretebilmektedir. Bu avantajlarına ek olarak, geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan nikel süper alaşımı gibi metallerin üretiminin önünü Eİ yöntemleri açmıştır [1]. Eİ ile metal, polimer ve seramik malzemeler üretilebilmektedir. Metal parçaların üretimi açısından bakıldığında, toz veya tel şeklindeki hammaddeler kullanılarak son ürün imal edilmektedir. Eİ ile geometrik açıdan zorlu ve daha az hammadde kullanılarak parça üretilebilmesi potansiyeli özellikle havacılık ve uzay endüstrisinin ilgisini çekmiştir. Buna ek olarak ise biyomedikal alanında da Eİ'nin kullanımı bulunmaktadır [2]. Eklemeli imalatın gelişimine bağlı olarak ise otomotiv, mimari ve elektronik gibi farklı sektörlerde de yayılım göstermesi beklenmektedir [3]

Metal üretiminde birçok farklı Eİ yönteminden faydalanılmaktadır. Hammadde olarak kullanılan toz veya tel malzemeler kaynaştırılarak, ergitilerek veya bir yapıştırıcı yardımıyla bağlanarak, insan müdahalesi en aza indirilerek doğrudan bilgisayar destekli tasarım ile üretilen üç boyutlu modelden faydalanarak katman katman parçanın üretimi sağlanmaktadır. Günümüzde alüminyum alaşımlar, paslanmaz çelikler, titanyum alaşımlar, nikel tabanlı süper alaşımlar ve kobalt alaşımlar gibi birçok farklı metal, Eİ yöntemleri ile üretilebilmektedir. Metallerin Eİ ile yöntemlerinde ise toz yataklı füzyon, doğrudan enerji yığma ve tel beslemeli Eİ yöntemleri ön plana çıkmakla birlikte bağlayıcı püskürtme ve levha laminasyonu gibi tekniklerde bulunmaktadır. Toz yataklı füzyon yöntemleri ise kullanılan ısı kaynağına göre lazer veya elektron ışınli sistemler olarak ayrılmaktadır. Doğrudan enerji yığma yönteminde ise hem toz metal hem de ergitme ışınlı tek nozülde bir metal levha üzerinde parça üretimi veya bir hasarlı parçanın üzerinde doğrudan yığma yaparak tamir için kullanılabilir. Tel beslemeli sistemde ise ark kaynağından faydalanılarak parça ortaya çıkarılmaktadır [1].

Yüksek ısıl girdinin olduğu Eİ ile metal parçalarının üretimi her ne kadar karmaşık geometrilerin üretimi, daha az hammadde kullanımı vb. avantajlar sağlasa da üretilen parçaların kalitesi hala tartışma konusudur. Eİ ile üretilen parçalarda ortaya çıkan bazı sorunlar aşağıdaki gibidir;

- Yetersiz enerji girdisi nedeniyle ergitilemeyen metal tozlar,
- Yüksek hızda kontrolsüz olarak parçanın soğumasından kaynaklı meydana gelen çarpılmalar sonucu oluşan kalıntı gerilmeler,
- Hammadde kaynaklı parça içinde kalabilen hava boşlukları ve gözenekleri,
- Yüksek yüzey pürüzlülüğü,

Eİ ile üretim esnasında oluşabilen bu sorunların bir kısmı üretim parametrelerinin kontrolü ile azaltılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır [4–6]. Bu bağlamda kontrol edilen parametreler ise ısı enerjisi kaynağının tarama (lazer ve elektron ışını) hızı, tarama stratejisi, üretim atmosferinin kontrolü (vakum ortamı veya argon gazı altında üretim gibi) ve üretilen geometrinin oryantasyonu şeklinde olup güncel olarak araştırmalar devam etmektedir.

Eİ ile üretilmiş metal parçalarda oluşan bu hatalar sebebiyle özellikle yorulma dayanımında istenilenin çok altında performans elde edilmektedir. Metal malzemelerde yorulma malzemenin zamana bağlı değişen yükler altındaki davranış biçimi olarak ifade edilmektedir. Öte yandan yorulma davranışı, malzemenin akma sınırının altındaki yüklerde 0.25 – 5 Hz frekans aralığında çevrim sayısının 10^5 'ten az olduğu düşük çevrimli yorulma ve malzemenin akma sınırının üstündeki yüklerde 20 – 100 Hz frekans aralığında çevrim sayısının 10^5 'ten az olduğu yüksek çevrimli yorulma olmak üzere iki bölgede incelenmektedir.

Yorulma hasarının oluşmasını ise üç aşama ile adlandırabiliriz. Bunlar sırasıyla çatlağın başlangıcı, çatlağın dengeli ilerlemesi ve çatlağın dengesiz ilerlemesi ile kopma şeklinde verilebilir. Bu aşamalardan çatlak başlangıcı ise yorulma ömrünün %40 – 90'ını oluşturmaktadır [7, 8]. Çatlak başlangıcını etkileyen en önemli malzeme özellikleri ise yüzey ile ilişkili olan yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve yüzey kalıntı gerilmesidir.

Eİ ile üretilen malzemelerin yüzeyinde üretim esnasında oluşan yüksek yüzey pürüzlülüğü, ergimeyen metal toz parçacıkları ve çarpılmalardan kaynaklanan kalıntı gerilmeler doğrudan yorulma performansını düşürmektedir [9]. Her ne kadar üretim parametrelerinin kontrolü malzeme kalitesini iyileştirse de parçanın gerçek bir uygulamada kullanılabilmesi için yukarıda bahsedilen sorunlar tam anlamıyla giderilememektedir. Bu nedenle, üretim sonrası çeşitli son işlemler uygulanmaktadır. Yüzeyden talaş kaldırma, zımparalama, sıcak izostatik presleme (SİP), bilye ile dövme (BD), lazer parlatma (LP) ve lazer şok dövme (LŞD) gibi işlemler Eİ ile üretilen parçalara özgü sorunların giderilmesinde ön plana çıkmaktadır [10–12]. SİP bu uygulamalardan öne çıkanlardan biridir. SİP işlemi esnasında malzemeye yüksek sıcaklık ve basınç uygulanarak parçada bulunan gözenekler kapanabilmekte, kalıntı gerilmeler giderilmekte ve mikro yapı homojen hale getirilebilmektedir. Ancak bu işlem parçanın daha çok iç bölgelerinde olan sorunları çözebilmektedir. Yüzey kaynaklı hataları tam anlamıyla giderilememektedir [13]. Öte yandan yüzeyden talaş kaldırma ve zımparalama gibi işlemler uygulama açısından kolay olsa da sadece pürüzlülük sorununu ortadan kaldıracıdır. Lazer parlatma işlemi ise pürüzlü yüzeyin tekrar ergitilerek pürüzlülüğün giderilmesini içermektedir. Ancak, lazer parlatma işlemi pürüzlülüğü giderse bile yüzeyde çatlaklar bırakabilmektedir [14]. Fakat, bu işlemlerden hiçbiri BD ve LŞD gibi malzeme yüzeyinde bası kalıntı gerilmeler (BKG) oluşturamamaktadır. BD ve LŞD işlemleri bu farklılık sayesinde Eİ’den kaynaklanan çekme kalıntı gerilmelerin (ÇKG) etkisini azaltmakta veya tamamen yok edebilmektedir.

LŞD işlemi yüzey bölgesinde bası kalıntı gerilmesi oluşturarak yüzey ile bağlantılı olan malzeme özelliklerini iyileştirebilen yüzey işlemlerinden biridir. LŞD işlemi BD’den daha derin bir bası kalıntı gerilme profili, daha kontrollü bir işlem olması ve Eİ ile üretilen karmaşık geometrilerde uygulanmasının daha uygun olması açılarından ayrılmaktadır. LŞD işlemi yüksek enerjili lazer darbelerinin metal parça hasar görme açısından kritik olan yüzeylerine nano saniye mertebelerinde uygulanmaktadır. Yüksek enerjili lazer darbelerin metal yüzeyinde oluşturduğu basınç ile bası kalıntı gerilmeleri oluşturulmaktadır [15].

Bu tez çalışmasında iki farklı Eİ üretim yöntemi olan EIE ve SLE ile uzay ve havacılık sektöründe önemli yeri olan iki farklı alaşım olan γ -TiAl ve IN939’un üretilmesi ve üretilen numunelere LŞD işleminin yüzey bütünlüğü özelliklerinden pürüzlülük, sertlik ve kalıntı gerilme ile mekanik özelliklerinden yorulma davranışına etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

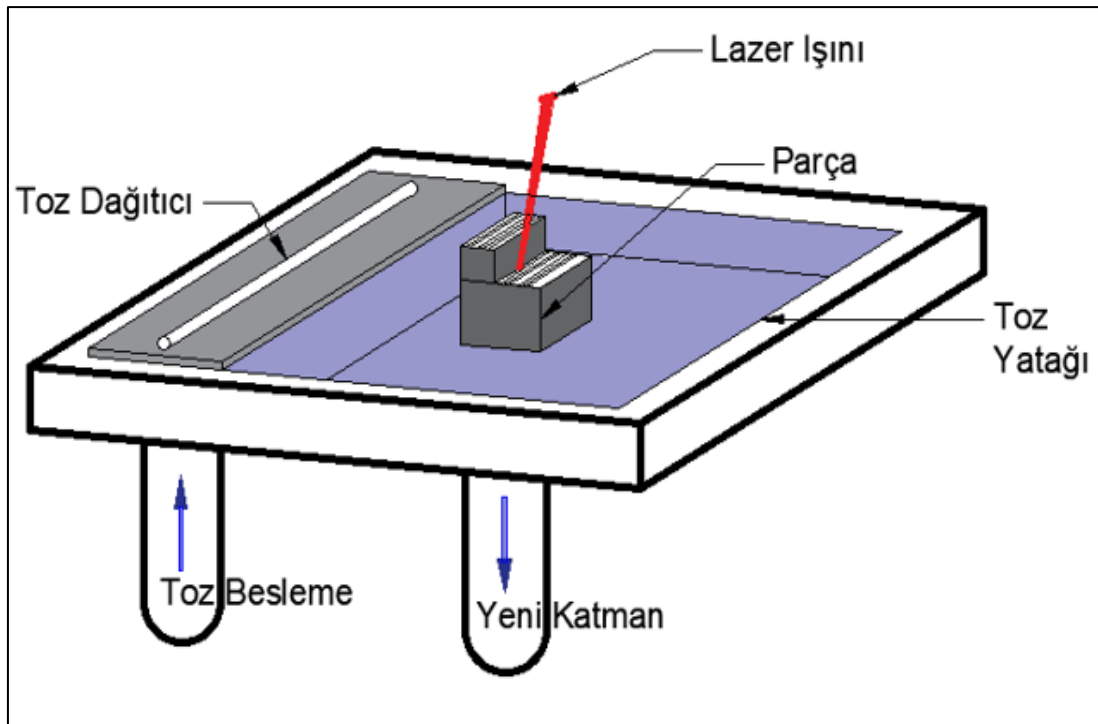
Bu amaç doğrultusunda tez çalışmasının hedefleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Eİ üretimi sonrası LŞD işlemi ile sertlik değerinin artırılması,
- LŞD işlemi ile Eİ ile üretilen metal alaşımlarında bulunabilen çeki kalıntı gerilmelerinin belirli bir derinliğe kadar bası yönünde üretilmesi,
- Eİ üretimi sonrası yüzeyin pürüzlülüğünün LŞD işlemi ile azaltılması,
- LŞD işleminin sayısal modellemesinin yapılarak LŞD sonucunda oluşan kalıntı gerilme profilinin tahmin edilmesi,
- Eİ üretimi parçaların yorulma ömürlerinin LŞD işlemi ile artırılması.

Bu tez çalışması giriş, literatür taraması, materyal ve yöntem, yüzey bütünlüğü (pürüzlülük, mikro-sertlik, kalıntı gerilme), LŞD işlemini sayısal olarak modellenmesi, yorulma özellikleri (yorulma testleri ve kırılma yüzeylerinin analizi), sonuç ve öneriler olmak üzere yedi ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, Eİ ve LŞD işlemi hakkında ön bilgi verilmiş, çalışmanın motivasyonu ve amacı kısaca tartışılarak, tezin kapsamı anlatılmıştır. İkinci bölümde toz yataklı Eİ yöntemleri ile üretilen metallerin yorulma özellikleri ve LŞD işlemi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca bu bölümde, toz yataklı Eİ yöntemleri ile üretilen numune yüzeylerine uygulanmış LŞD işlemlerinin yüzey özelliklerinden pürüzlülük, sertlik, mikro yapı ve kalıntı gerilme profili ile ilgili geçmiş akademik çalışmalar incelenmiş ve literatüre katkı ihtiyacı belirlenmiştir. Üçüncü bölümde numunelerin geometrilerinin belirlenmesi, üretimi ve LŞD işleminin uygulanması, yüzey pürüzlülük, mikro sertlik, mikro yapı, kalıntı gerilme ölçümlerinin ve yorulma testlerinin yapılması. Buna ek olarak ise sayısal modelleme için gerekli malzeme modelinin ve parametrelerinin belirlenmesi hakkında bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise LŞD işleminin yüzey bütünlüğüne olan etkileri yüzey pürüzlülük, yüzey mikro sertlik ve kalıntı gerilme ölçümleri üzerinden elde edilen sonuçlar LŞD uygulanmış ve uygulanmamış numuneler arasında karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve tartışılmıştır. Beşinci bölümde, LŞD işleminin sayısal olarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellemeden elde edilen kalıntı gerilme profili ile deneysel olarak elde edilen kalıntı gerilme profilleri karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde ise LŞD işleminin Eİ üretimi numunelerin yorulma performansına etkileri ve bu numunelerin yorulma davranışları incelenmiştir. Bu bağlamda yapılan dört-nokta eğmeli yorulma testleri ve SEM fotoğrafları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde ise tez çalışmasında yapılan ölçüm ve deneylerden elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilerek ileride yapılacak çalışmalara ışık tutması amacıyla öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Metallerde eklemeli imalat genelde metal toz veya tellerinin bir ısı kaynağı ile ergitilerek katmanlar halinde parçanın modelini oluşturacak şekilde üst üste yığılmasını içeren bir işlemdir (bkz. Şekil 2.1.). Eklemeli imalatın, üretim süresinin kısaltılması ve buna bağlı maliyetlerin düşürülmesi, geleneksel yöntemlere göre daha az ham madde ile üretimin sağlanabilmesi, karmaşık geometri üretimine olanak sağlaması ve bu sayede daha hafif, birkaç elemandan oluşan parçaların yekpare üretiminin sağlanması gibi imkân sunduğu birçok avantaj bulunmaktadır. Sağladığı bu avantajlar sayesinde özellikle havacılıkta olmak üzere ayrıca otomotiv ve tıp alanında implantlarda eklemeli imalattan yararlanılmaktadır [16]. Bu bağlamda, metaller için birçok eklemeli imalat yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanları Seçici Lazer Ergitme (SLE), Elektron Işını ile Ergitme (EIE), Yönlendirilmiş Enerji Yığma (YEY) ve Tel Beslemeli Eklemeli İmalattır (TBEİ). En yaygın olarak kullanılan metaller ise titanyum alaşımları (Ti64, Ti64-ELI ve γ -TiAl), alüminyum alaşımları (Al-Si-Mg), süper alaşımlar (IN718, IN625) ve paslanmaz çelikler (316, 316L, PH 17-4) şeklindedir [17].

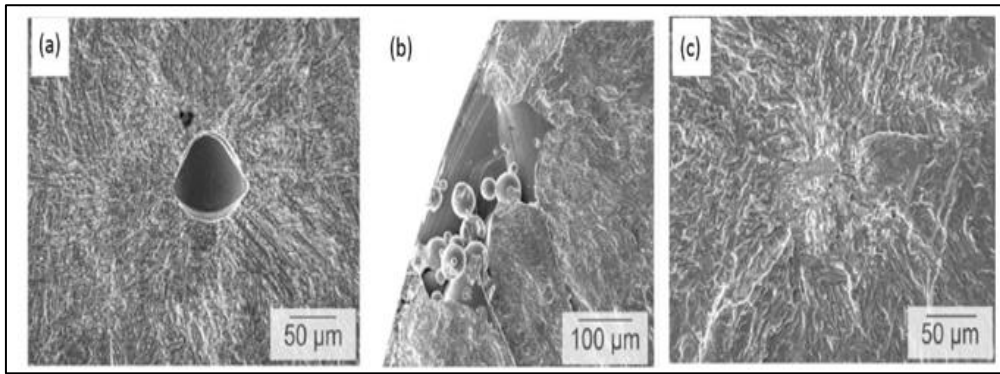


Şekil 2.1. Toz beslemeli eklemeli imalatın şekilsel olarak gösterimi [17]

2.1. Eİ Metallerinde Yorulma

Yorulma hasarı metallerde genellikle yüksek yüzey pürüzlülüğü, yüzeyde bulunan çeki yönündeki kalıntı gerilmeler gibi zayıf yüzey özelliklerinin nedenleri sonucunda daha hızlı ve beklenmedik şekillerde gerçekleşebilmektedir. Yorulma hasarının oluşmasında ise yaygın olarak üç aşamadan bahsedilmektedir. Bu aşamalar sırasıyla, çatlağın başlaması, çatlağın stabil ilerlemesi ve çatlağın kararsız ilerlemesi olarak sıralanmaktadır [8]. Metal malzemelerin yorulma davranışını etkileyen en önemli unsurlardan birisi malzemenin yüzey özellikleridir. Çünkü, dinamik yüklere maruz kalan parçalarda yorulma ömrünün %40 – 90'ını yüzey özelliklerinin etkin olduğu çatlak başlangıcı oluşturmaktadır [7, 8].

Eklemeli imalat malzemelerinde ise üretim kaynaklı hatalar statik yüklemeler altında çalışan parçalarda sorun yaratmasa da yüklemeler dinamik olduğu zaman istenilen performanslar alınamamaktadır. Metal eklemeli imalat parçalarında üretim kaynaklı hatalar Çizelge 2.1'de verilmiştir. Eİ metallerinde çoğunlukla ergime eksikliği bölgeleri, gaz poroziteleri ve ergimemiş parçacıkların yorulma hasarına neden olmaktadır. Eİ işlem parametrelerine göre anlık olarak yetersiz enerji verilmesi ya da fazla enerji verilmesi genelde bu hatalara neden olmaktadır. İşlem parametreleri hataların şeklini, lokasyonlarını, boyutlarını, oryantasyonlarını ve yoğunluklarını da etkilemektedir. Bu bağlamda, Eİ parçalarının yorulma performanslarını iyileştirilebilmesi için kalıntı gerilme, yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapı gibi ana özelliklere odaklanılması gerekmektedir.



Resim 2.1. Eİ ürünü malzemelerde oluşan hata türlerinin SEM görüntüleri: (a) gaz sıkışması, (b) erimemiş toz nedeniyle oluşan boşluk, (c) faz kaynaklı hata [18]

Çizelge 2.1. El sonucu oluşan hatalar [2]

Hata Türü	Özellikleri	Nedeni
Ergime eksikliği (LoF)	Sinterlenememiş alan veya delaminasyon, katmanlar veya rota üzerinde yetersiz füzyon	Yetersiz enerji
Erimemiş toz	Bitmemiş toz ergimesi	Yetersiz enerji
Gaz porozitesi	Sıkışmış gaz	Fazla Enerji
Anahtar deliği (Keyholing)	Anahtar deliği yapsının yetersiz kapanması	Fazla Enerji
Ufak çatlaklar		Kalıntı gerilme
Yumaklanma/topaklanma (balling)	Malzemedeki düzensizlik	Yetersiz ısılanma
Oksit parçacıkları		Oksijen içeriği
Alfa fazı yüzeyleri (facet)		Tekrarlı olan ısıtma-soğutma ve karmaşık eşsiz faz transformasyonları
Bead-up (boncuklanma)		Sürekli bir katman yerine damlacık şeklinde katılma
Yüzey pürüzlülüğü	Kısmen erimiş toz parçacıkları	Katman katman yığılma ve toz besleme deposu

2.2. LŞD İşlemi Prensibi

LŞD işleminin uygulanmasında farklılıklar bulunabilmektedir. Örneğin, metal yüzeyinin lazerin termal etkilerinden korunmak istenmesi durumunda koruyucu bir kaplama siyah bir bant veya alüminyum folyo ile sağlanabilmektedir. Öte yandan, bu kaplamalar kullanmadan doğrudan malzeme yüzeyine de uygulanabilmektedir ve bu işlem kaplamasız LŞD olarak adlandırılmaktadır.

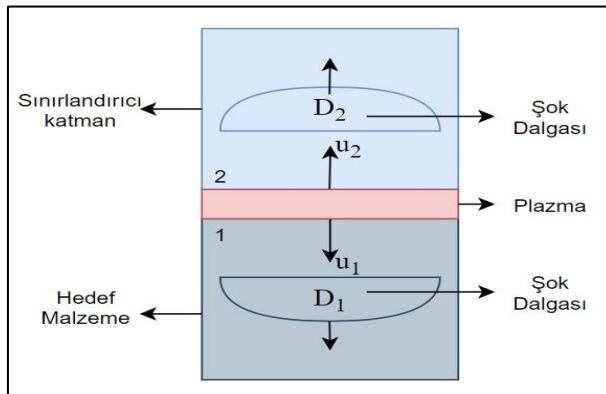
2.2.1. LŞD şok basıncı

Lazer şoklama işlemi esnasında meydana birçok karmaşık ve incelemesi güç lazer-malzeme etkileşimini içeren fiziksel olay gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, literatürde yapılan çalışmalar analitik olarak bir modelin üretilmesi için lazer şoklama işlemi basite indirgenerek şok basınç profilinin oluşturulmasına yönelmiştir.

Lazer şoklama işlemi için önemli diğer bir husus, işlemin ilk uygulamaları sınırlandırıcı katman adı verilen ve genelde su, cam gibi ışığı geçirgen malzemelerin kullanılmadığı durumlardır. Ancak, sınırlandırıcı katman olmadan yapılan uygulamalarda görülmüştür ki oluşan basınç malzemede istenen miktarlarda deformasyon sağlamamaktadır. Sınırlandırıcı katmanın işlem içindeki görevi her yönde genişleyen plazmanın oluşturduğu basıncı malzemeye geri iletmektir. Bu sayede oluşturulan basınç GPa mertebelerine çıkmakta ve istenen deformasyon yüzeyde oluşturulmaktadır [19]

Lazer şoklama işleminde basınç oluşumu iki aşamada meydana gelmekte olup lazer darbesi süresi sonucunda basınç en yüksek değerine (pik basınç) ulaşırken, devamında olan plazmanın adyabatik soğuması ile basıncın etkisi bir süre daha devam etmektedir.

Lazer şok basıncının modellenmesine yönelik çalışmalar ilk olarak Fabbro vd'nin (1990) yaptıkları çalışmada lazer darbesi ile çok hızlı oluşan plazmanın genişlemesini incelemiş ve bu genişleme ile oluşan basıncın bir boyutlu analitik modellemesini ortaya koymuşlardır [19]. Yapılan bu çalışmada öncelikle lazerin oluşturduğu plazmanın hem malzemeye hem de sınırlandırıcı katmana doğru şok dalgası şeklinde genişlediğini belirtmiş ve plazma kalınlığı (L) değişimini şu formül ile ifade etmişlerdir (Bkz. Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Sınırlandırılmış plazma modeli [19]

$$\frac{dL(t)}{dt} = u_1 + u_2 \quad (2.1)$$

Burada u_i plazma yüzeylerinin malzeme ve sınırlandırıcı katmana doğru olan hızlarını temsil etmektedir. Burada ikinci olarak Rankine-Hugoniot şok-dalga ilişkisinden ($P = \rho_i D_i u_i = Z_i u_i$) faydalanan basınç ile plazma kalınlığı arası bir ilişkiyi şu şekilde ifade etmişlerdir;

$$\frac{dL(t)}{dt} = \frac{2}{Z} P(t) \quad (2.2)$$

Burada P plazma basıncı, Z ise malzeme şok empedans değerlerinin ortak etkisidir. Lazerden gelen enerjinin basınca katkısı ise enerji korunum kanunu ile açıklanmış olup şöyledir;

$$I(t)dt = P(t)dL(t) + d[E_i(t)L(t)] \quad (2.3)$$

Bu denklemin sağ tarafının ilk kısmı basıncın yaptığı iş ve ikinci kısmı ise iç enerjinin plazma basıncına olan katkısını temsil etmektedir. İç enerji ise termal ve gaz iyonizasyon enerjilerinden oluşmaktadır. Plazma basıncının oluşmasında ise iç enerjinin termal kısmı etkili olup iç enerjinin α kadarı termal enerjiye ($E_{termal} = \alpha E_i$) ve geri kalan kısmı olan $(1-\alpha)$ kadarı ise iyonizasyon kısmına aktarılmaktadır. Bunun sonucunda enerji korunum denklemi şu hale gelmektedir;

$$I(t) = \frac{P(t)dL(t)}{dt} + \frac{d[E_i(t)L(t)]}{dt} \quad (2.4)$$

Buna ek olarak ise hazırlanan modelde plazma ideal gaz yasalarına uyduğu kabul edilerek basınç ve iç enerji arasında olan $P(t) = (2/3)\alpha E_i$ ilişkiden faydalanılarak enerji korunum denklemi son halini almıştır.

$$I(t) = \frac{P(t)dL(t)}{dt} + \frac{3}{2\alpha} \frac{d[P(t)L(t)]}{dt} \quad (2.5)$$

Elde edilen diferansiyel denklemin çözülebilmesi için $I(t) = At^a$ ve $L(t) = Bt^b$ varsayımları uygulanır ve lazer yoğunluğu sabit kabul edilirse (yani $a=0$ için) denkleminde bulunan katsayılar rahatlıkla elde edilir ve son durumda plazma basıncı için şu ilişkiler elde edilir.

$$P_0 = 0.1 \left(\frac{\alpha}{2\alpha+3} \right)^{1/2} Z^{1/2} I_0^{1/2} \quad (2.6)$$

$$L(\tau) = 2 \times 10^4 P_0 Z^{-1} \quad (2.7)$$

P_0 lazer palsı süresinde oluşan pik basınç iken τ pals süresini temsil etmektedir. Lazer yüzey işleminin ikinci kısmı ise lazerin kapanmasından sonrasında meydana gelen plazmanın adyabatik soğumasıdır. Bu kısımda basıncın etkisi devam ederken şu ilişkileri takip etmektedir;

$$p(t) = p(\tau) \left(\frac{L(\tau)}{L(t)} \right)^\gamma \quad (2.8)$$

$$L(t) = L(\tau) \left(1 + \frac{\gamma+1}{2\tau} (t-\tau) \right)^{1/(\gamma+1)} \quad (2.9)$$

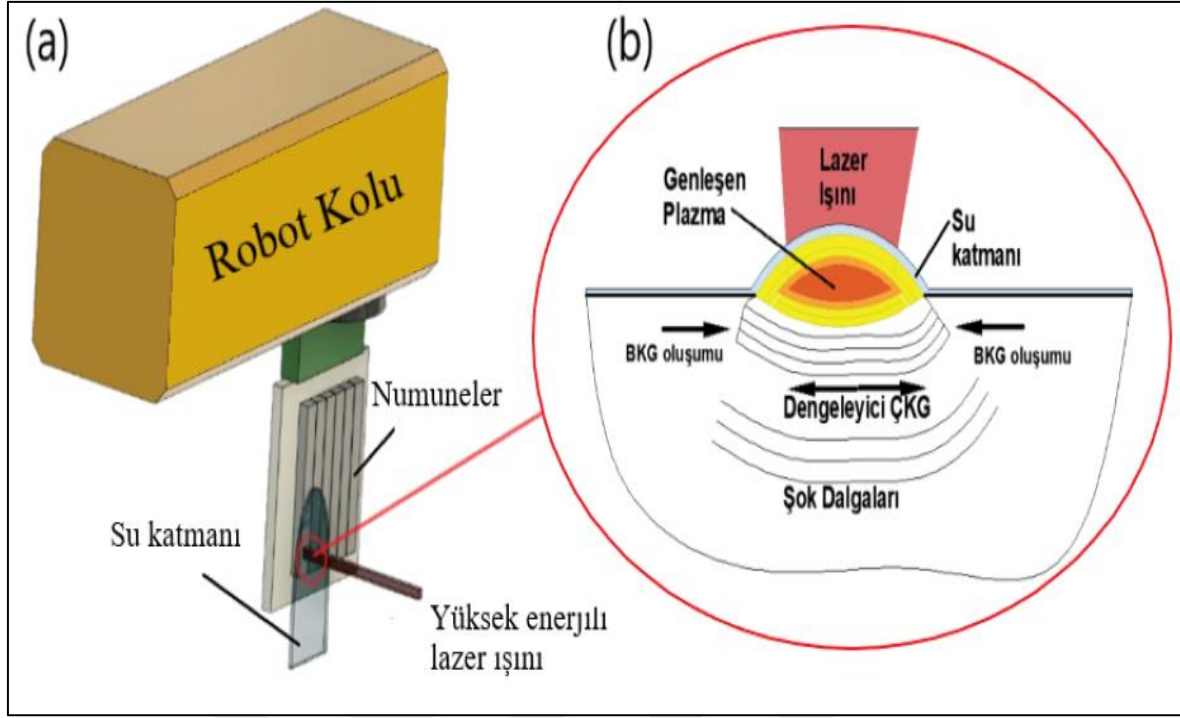
γ ifadesi özgül ısı oranıdır. Bu çalışmada elde edilen basınç formülünde iki adet ölçülmesi gereken serbest değişken bulunmaktadır. Literatürde serbest değişken olmadan basıncın hesaplanması için birçok çalışma mevcuttur [20, 21]. Ancak bu çalışmaların çoğu sayısal modellerdir. Bunların dışında ise Fabbro'nun modelini temel alarak yapılan çalışmalardan, Zhang ve ark. (2004) yaptıkları çalışma α serbest değişkenini ortadan kaldırmak için kütle korunumunu da matematiksel modele dahil etmişlerdir [22]. Yapılan bir diğer çalışmada ise malzeme özelliklerinin plazma basıncının durumuna göre değiştiği belirtilmiş olup Fabbro'nun modelinde kullanılan katı malzeme modeli yerine yoğunlaşmış malzeme modelini kullanılmıştır [23]. Ancak, bu iki çalışma sonucu oluşan diferansiyel denklemler analitik olarak çözülememektedir ve ayrıca elde edilen sonuçlar Fabbro'nun modeline yakındır. Bir boyutlu olarak plazma basıncı oluşumunun matematiksel modeli ve de analitik çözümünün varlığından dolayı kullanılacak lazer parametreleri doğrultusunda malzeme yüzeyinde oluşacak basınç rahatlıkla hesaplanabilmektedir.

Plazma basıncı ile alakalı diğer önemli bir nokta ise basıncın hem zamana bağlı hem de lazer ışın çapı r içindeki dağılımıdır. Plazma basıncının lazer çapı sınırları içinde Gauss dağılımı göstermektedir [22]. Buna göre oluşturulan pik basıncı denklem 10'a uygun olarak alan üzerinde dağılım göstermektedir. Burada P_0 tepe basıncını ve r ifadesi alanın merkezinden olan uzaklığı ifade ederken R yarı çapı belirtmektedir.

$$P(r, t) = P_0 \exp \left(-\frac{r^2}{2R^2} \right) \quad (2.10)$$

2.2.2. LŞD işleminde kalıntı gerilimi oluşumu

Bir malzeme yüzeyine lazerle çekişleme uygulamanın amaçlarından biri, plastik deformasyon yoluyla yüzey boyunca basma artık gerilimleri oluşturmaktır. Lazer ile yüzey dövme ile BKG oluşturma süreci, lazer ışını ile malzeme arasındaki karmaşık fiziksel etkileşimleri içerir. İşlem, parçanın yüzeyine yüksek yoğunluklu bir lazer ışınının gönderilmesiyle başlar. Lazer darbesi metal ile etkileşime girdiğinde ışının enerjisi metal yüzey tarafından emilir ve emilen enerji yeterliyse buharlaşma ve iyonizasyon mekanizmalarıyla anında plazma oluşur. Ortaya çıkan plazma enerjiyi emmeye devam edecek ve her yöne hızla genişleyecektir. Plazmanın hızla genişlemesi, malzemeye nüfuz eden yüksek basınçlı bir şok dalgası yaratır. Yüksek enerjili lazer darbesi sonucu oluşan plazmanın basınç etkisinin artırılabilmesi için lazer ışınlarına karşı geçirgen olan su veya cam gibi bir katman malzemenin üstüne yerleştirilebilir. Böylece güçlendirilen şok basıncı malzemeye nüfuz eder ve malzemenin Hugoniot elastik sınırı (HES) aşıldığında plastik deformasyon oluşturur. Plastik deformasyon, kafes distorsiyonu, dislokasyon oluşumu ve yüzey tabakasının taneciklerinin incilmesi gibi mekanizmalar yoluyla mikro yapıda değişikliklere yol açacaktır [24]. LŞD sırasında termal etkiler de meydana gelmektedir. Bu nedenle bazı uygulamalarda koruyucu katman olarak özel siyah bir bant veya alüminyum folyolar kullanılmaktadır. Öte yandan LŞD işlemi koruyucu bir katman olmadan yapıldığında, malzemenin üst yüzeyinde sıcaklık 10^3 K mertebelerine çıkabilmekte ve yüzeyde kısmen ergimeler gerçekleşmektedir. Lazer darbesinin bitiminden sonra soğutma aşamasına geçilir. Metal katılaştıkça lazer noktası alanının iç bölgesinde çekme gerilmeleri oluşur ve ayrıca oluşturulan basınç gerilmeleri çevrede kalır [25]. Bu nedenle, tek bir lazer darbesi atımıyla çekme ve basma gerilimlerinin bir karışımı oluşturulacağından, lazer darbeleri bir örtüşme oranıyla (ing. overlap) uygulanmalıdır.



Şekil 2.3. LŞD işleminin şematik olarak gösterimi (a) uygulandığı (b) kalıntı gerilme oluşumu [26].

2.2.3. LŞD işleminin yüzey ve mekanik özelliklere etkileri

Literatürde eklemeli imalat ürünü metal alaşımlarında lazer yüzey dövme işleminin kalıntı gerilme üzerine etkileri çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan lazer parametreleri ve sonucunda elde edilen kalıntı gerilme profilleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Kalentics ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada, LŞD işleminin toz yataklı imalat yöntemlerinden SLE ile üretilmiş olan PH1 ve 316L çeliklerinin işlemsiz hallerine göre yüzey kalıntı gerilme özelliklerine etkileri farklı LŞD işlem parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. Yüzeyde oluşturulan bası kalıntı gerilme profilinin en yüksek değeri ve BKG’nin en derindeki pozisyonu üzerinden işlem parametrelerinin etkileri üzerine yorumlamalar yapılmıştır. Sonuç olarak her iki alaşımın yüzeyinde Eİ üretimi sonucu oluşan ÇKG’leri BKG’ne evrilmiş olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, lazer spot çapının büyümesi ile BKG derinliğinde artış sağlarken, küçülmesi ile daha yüksek BKG elde edildiği ifade edilmiştir. Koruyucu katmanın ise daha yüksek ve daha derin BKG ürettiğini gözlemlemişlerdir. Son olarak ise overlap (girinti miktarı) artması ile de daha yüksek ve daha derin BKG profili elde edildiğini belirtmişlerdir [27] .

Çizelge 2.2. Literatürde LŞD uygulamalarında kullanılan işlem parametreleri

Çalışma	Kullanılan Alaşımlar	Üretim Yöntemi	Kullanılan LŞD Parametreleri	En Yüksek BKG	En Yüksek BKG'nin Derinliği	BKG' Derinliği
[27]	PH1 ve 316L	SLE	• 0,4 – 1,6 ve 10 J lazer darbe enerjisi • 1 – 2 ve 5 mm lazer spot çapı • 1 Hz frekans • %40 - %80 overlap	• -798 MPa (PH1) • -730 MPa (316L)	• 0,247 mm (PH1) • 0,96 mm (316L)	• 1 mm (PH1) • 0,804 mm (316L)
[28]	Ti-6Al-4V	SLE	• 15 J enerji (veya 5,6 GW/cm² yoğunluğu) • 4 mm lazer spot çapı • 1 Hz frekans • %50 overlap	• -200 MPa	• 0,1 mm	• 0,7 mm
[29]	316L	SLE	• 4 GW/cm² güç yoğunluğu • 18 ns lazer darbe süresi • 4,7 mm spot kenar uzunluğu	-	-	-
[30]	Ti-6Al-4V	SLE	• 11 J enerji • 4 mm lazer spot çapı • 15 ns lazer darbe süresi • Tek kat, üç kat ve 5 kat lazer darbesi • 5 Hz lazer frekansı	• -690 MPa	• 0,15 mm	• 0,9 mm
[31]	Ti-6Al-4V	SLE	• 7,6 J enerji • 3 mm lazer spot çapı • 10 ns lazer darbe süresi • 5 Hz lazer frekansı	• -396 MPa	• 0,30 mm	• 0,9 mm
[32]	Ti-6Al-4V	EIE	• 11,89 GW/cm² güç yoğunluğu • 2,5 mm lazer spot çapı • 12 ns lazer darbe süresi • 1 Hz lazer frekansı • %25 overlap	-	-	-
[33]	316L	SLE	• 0,4 J lazer darbe enerjisi • 1 mm lazer spot çapı • 6,3 ns lazer darbe süresi • 5 Hz lazer frekansı • %80 overlap	-756 MPa	1 mm	
[34]	Ti-6Al-4V	SLE ve EIE	• 5,3 GW/cm² güç yoğunluğu • 2 mm lazer spot çapı • 12 ns lazer darbe süresi • 10 Hz lazer frekansı • %45 overlap	-100 MPa	-	-
[35]	Ti-6Al-4V	SLE	• 1,4 J lazer enerjisi • 1,34 mm lazer spot çapı • 8 ns lazer darbe süresi • 10 Hz lazer frekansı • 50% overlap	-505 MPa	-	-
[36]	TC17	DEY	• 20 J lazer enerjisi • 4 mm lazer spot çapı	-596 MPa	0,2 mm	1 mm
[37]	Ti-6Al-4V	SLE	• 9,9 GW/cm² güç yoğunluğu • 2,6 mm lazer spot çapı • 10 ns lazer darbe süresi • 10 Hz lazer frekansı • 62% overlap • 6 tekrar ile lazer darbesi	-706 MPa	0,2 mm	2,4 mm

SLE üretimi Ti-6Al-4V alaşımının kullanıldığı çalışmada LŞD işleminin mikro yapı, kalıntı gerilme, sertlik ve çekme özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan TEM analizleri sonucunda LŞD işleminin dislokasyon yoğunluğunu artırdığını ve Ti-6Al-4V malzemesinde görülen mekanik ikizlenmelerin tespit edildiği belirtilmiştir. LŞD işleminin mikro yapıda oluşturduğu bu değişimler sayesinde yüzey sertliğinin 361,0 HV değerinden 419,6 HV değerine yükseldiğini ve yüzeye yakın olan bölgede tane boyutlarının azaldığını göstermişlerdir. LŞD işleminin ayrıca malzemenin çekme özelliklerinden en yüksek çekme gerilmesi ve tokluk değerlerini de artırdığını çekme testi sonuçlarında elde etmişlerdir [28].

Eİ üretimi 316L alaşımının kullanıldığı bir başka çalışmada ise hem bilyeli dövme (BD) hem de LŞD işlemlerinin yorulma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Diğer LŞD uygulamalarından farklı olarak kare lazer spotu kullanılan bu çalışmada LŞD işlemi ile daha uniform ve daha derine ulaşabilen bir kalıntı gerilme profili oluşturulması hedeflenmiştir. Çünkü, BKG derinliğinin yorulma dayanımı üzerinde etkisinin önemli olduğu ifade edilmiştir. Yapılan yorulma testleri sonucunda 400 MPa gerilme değerinde işlemsiz Eİ 316L numunesine göre BD uygulanmış olanlarda 2,7 kat ve LŞD uygulanmış olanlarda 20 kat daha yüksek yorulma ömrü elde edilmiştir. Öte yandan 501 MPa gerilme seviyesinde yapılan testlerde ise işlemsiz numunelere göre BD işlemlilerde 1.9 kat ve LŞD işlemlilerde 6,8 kat daha yüksek yorulma ömrü elde etmişlerdir [29].

Hu, Lai, Hu ve Yao (2019) yaptıkları çalışmada LŞD işlemini SLE ile ürettikleri Ti64 numunelere uygulamış ve işlemsiz numuneler ile yüzey pürüzlülük, porozite, kalıntı gerilme ve mikro yapı özellikleri üzerinden karşılaştırmışlardır. LŞD işlemi lazer darbe tekrarının beşe çıkarılması ile pürüzlülükte çok az değişikliğe neden olmuştur. Tek kat yapılan işlemde Ra ve Rz değerleri sırasıyla 0,176 mikron ve 0,207 mikron artmıştır. Öte yandan LŞD işlemi yüzey bölgesinde bulunan poroziteleri de azaltmıştır. Tek kat, üç kat ve beş kat lazer darbesi sonrası incelenen bölgede porozitede ortalama %1 azalma elde edildiğini ifade etmişlerdir. Beş kat LŞD işlemi SLE üretimi işlemsiz Ti64 numunelerinde kalıntı gerilmeyi bası yönüne çevirerek -690 MPa ulaşabilen BKG oluşturmuştur. Ayrıca kalıntı gerilme profili 0,9 mm derinliğe kadar ilerlemiştir. Benzer şekilde malzemenin sertlik değerlerinde de ortalama %8'lik bir artış ortaya çıkmıştır. Mikro yapı analizi sonucunda ise LŞD işleminin yüzey bölgesinde dislokasyon yoğunluğunu artırarak düşük açılı tane sınırı miktarını artırdığı ifade edilmiştir [30].

Farklı bir çalışmada ise LŞD işlemi eklemeli imalata entegre edilerek her beş katman üretiminin ardından ve son olarak yüzeye LŞD işlemi uygulanmıştır. Böylece yüzeyde oluşturulan BKG'lerinin malzemenin iç bölgelerinde de oluşturulması hedeflenmiştir. Ek olarak ise numuneler dikey ve yatay olarak iki farklı oryantasyonda üretilmiştir. Sonuç olarak ise yüzeyde SLE üretimi ile meydana gelen 100 MPa ile 200 MPa arası değişen ÇKG değerleri LŞD uygulaması sonucunda -300 MPa ve -400 MPa arası değişen BKG değerlerine evrilmiştir. Ek olarak mikro sertlik değerleri de ortalama 320 HV değerinden 410 HV değerlerine yükselmiştir. Ayrıca, çekme özelliklerinden en yüksek çekme gerilmesi değerinde ise %20 kadar bir artış elde edilmiştir. LŞD işlemi esnasında uygulanan yüksek şok basıncı sonucunda yüksek yoğunluklu dislokasyonlar ve mekanik ikizlenmeler sonucunda mikro yapıda bulunan kaba taneli martenzitler ince taneli hale dönüştürülmüştür ve bunun sonucunda LŞD işlemlili SLE Ti64 numunelerin özelliklerinde iyileşmeler gözlemlendiği ifade edilmiştir [31].

Jin, Lan, Gao, He ve Rong (2020) elektron ışını ile ergitme yöntemiyle üretilmiş Ti64 numunelerin LŞD işlemi sonrası mikro sertlik, mikro yapı ve yorulma özelliklerinin nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Önceki çalışmalara benzer şekilde Ti64 alaşımında bulunan alfa fazında LŞD işleminde meydana gelen dislokasyon yoğunluğu artışı ve deformasyon ikizlenmesi ile tane incelmesinin meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bunun sonucunda ise mikro sertlikte %11 ve yorulma dayanımında %16 artış elde etmişlerdir. Yorulma dayanımını artıran LŞD'nin neden olduğu baskın mekanizmalar incelenmiştir. Adyabatik sıcaklık artışı ile bası kalıntı gerilmesi etkisi ve alfa fazının tane incelmeye öncül çatlak boyunu azaltmış, çatlak başlangıcını bastırmış ve yorulma kırılması için gerekli işi artırmıştır [32].

LŞD ile eklemeli imalat üretim yöntemi olan SLE'nin birbiri ile entegre edildiği bir başka sistemin kullanıldığı çalışmada 316L alaşımından oluşan numuneler kullanılmıştır. Numuneler işlemsiz, yalnızca yüzeye LŞD uygulanmış (2B-LŞD) ve 10 katmanda bir LŞD (3B-LŞD) uygulanmış olarak hazırlanmıştır. Üretilen numuneler mikro sertlik, kalıntı gerilme ve yorulma özellikleri açısından karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. İşlemsiz numunede kalıntı gerilme yüzey bölgesinde 340 MPa iken 2B-LŞD ve 3B-LŞD için bu değer sırasıyla -730 MPa ve -756 MPa olarak elde edilmiştir. Öte yandan en yüksek BKG'nin elde edildiği derinlikler ise 2B-LŞD için 90 mikron iken 3B-LŞD için 250 mikrondur. BKG derinliği ise sırasıyla 800 mikron ve 1 mm şeklindedir. Mikro sertlik açısından numuneler

karşılaştırıldığında ise işlemsiz durumda 236 HV olan mikro sertlik, 2B ve 3B LŞD işlemleri için sırasıyla 281 HV ile 322 HV değerlerine yükselmiştir. Öte yandan yorulma sınırı açısından ise en yüksek iyileştirme yine 3B-LŞD ile işlemsiz duruma göre yaklaşık %50 artış olarak gözlenmiştir [33].

Kahlin ve diğerleri (2020) LI-TYE (Lazer Işını ile Toz Yataklı Ergitme) ve EI-TYE (Elektron Işını ile Toz Yataklı Ergitme) yöntemi ile üretilen Ti64 alaşımını beş farklı yüzey işlemine tabi tutmuşlardır. Bu işlemler, santrifüj bitirme (SB), bilyeli dövme (BD), lazer parlatma (LP), lazer ile yüzey dövme (LŞD) ve aşındırma şeklindedir. İşlemli numuneler işlemsiz durumdakiler ile yüzey pürüzlülüğü, sertlik, yüzey kalıntı gerilme, mikro yapı ve yorulma performansları açısından karşılaştırılmışlardır. Karşılaştırma yapılan özellikler açısından en iyi sonucu santrifüj bitirme işleminden elde edildiğini ifade etmişlerdir. Yüzey kalıntı gerilme durumu incelendiğinde SB ile ortalama -500 MPa BKG elde edilirken, SB işlemini takip eden BD ile -400 MPa ve LŞD ile -100 MPa BKG elde edilmiştir. Öte yandan yorulma performansı açısından ise SB yorulma dayanımını %125 artırırken, LŞD işleminin %20 artış sağladığını ifade etmişlerdir [34].

Benzer bir başka çalışmada ise SLE üretimi Ti64 numunelere önce yüzeyden talaş kaldırma ve ardından ısıtıl işlem uygulanmıştır. Son olarak ise yüzeye LŞD işlemi gerçekleştirilmiştir. EBSD analizleri sonucunda LŞD işleminin ortalama tane boyutunda küçülmeye neden olmadığını ancak iğne yapılı martenzit halden daha eş eksenli bir duruma dönüştüğü gözlenmiştir. Buna ek olarak ise EBSD analizi sonucu elde edilen KAM haritalarına göre LŞD işlemi esnasında gerçekleşen sertleşme ve kalıntı gerilme oluşumunun tane sınırlarında dizilim farklılığını artırdığını ifade etmişlerdir. Buna ek olarak ise yalnız yüzey için belirledikleri kalıntı gerilme değerleri işlemsiz SLE Ti64 numuneleri için 584 MPa iken LŞD işlemli numunede -505 MPa değerinde elde edilmiştir [35].

Bir başka eklemli imalat yöntemi olan doğrudan enerji yığıma (DEY) ile üretilen TC17 titanyum alaşımı numuneler, LŞD işlemine tabi tutulmuştur. Sonrasında işlemsiz ve LŞD uygulanmış örnekler mikro yapı, kalıntı gerilme, mikro sertlik ve çekme özellikleri üzerinden karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Önceki çalışmalara benzer şekilde mikro yapı analizi sonucunda LŞD işleminin dislokasyon mekanizmalarını tetikleyerek ikizlenmeleri meydana getirdiği ve düşük açılı tane sınırlarını artırdığı gözlenmiştir. Bu durum LŞD işleminin tane incelmesini sağladığını göstermektedir. Böylece yüzeyde hem

sertlik hem de kalıntı gerilme durumu işlemsiz numuneye göre iyileştirilmiştir. LŞD işlemi sonrasında mikro sertlikte ortalama %11 ve çekme özelliklerinden elastisite modülünde %4,97 artış elde edilmiştir. Öte yandan -596 MPa değerinde BKG yüzeyden yaklaşık 0,2 mm derinliğinde oluşturulurken, BKG toplam uzunluğu 1 mm derinliğe kadar uzanmaktadır [36].

Slawik ve diğerleri (2021) SLE ile ürettikleri ve sonrasında 730°C'ye ısıtıp 2 saat ısıtıl işlem uyguladıkları numunelerin yüzeyine LŞD ve BD işlemi uygulayarak karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. BD işlemi her ne kadar daha yüksek BKG oluşturabilse de LŞD işleminin oluşturduğu BKG derinlik yönünde daha uzun bir mesafeye tesir ettiğini ifade etmişlerdir. Öte yandan altı tekrarlı lazer darbesi kullanarak uyguladıkları LŞD işleminin sonucunda 2,4 mm gibi yüksek bir derinlikte BKG oluşturmayı başaramışlardır. Bunlara ek olarak ise yaptıkları yorulma deneyleri sonucunda aynı gerilme değeri için en iyi sonucu LŞD işleminden elde etmişlerdir [37].

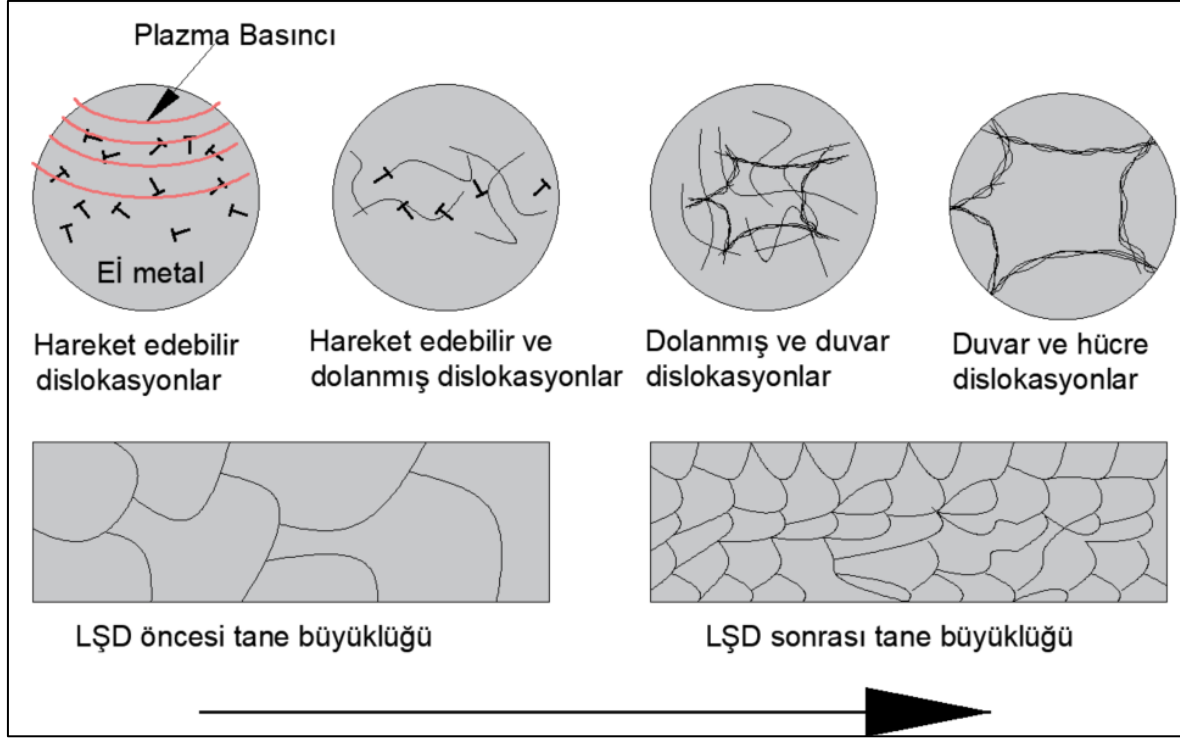
Literatürde LŞD işleminin Eİ malzemelerinin yüzey kalitesi ve buna bağlı olan mekanik özelliklerin iyileştirilmesi üzerine kullanılan alaşımlar çoğunlukla Ti64 ve 316L alaşımlarıdır. Bunun dışında AlSi10Mg[38, 39], CrMnFeCoNi[40] ve IN718[41] alaşımları da çalışmalarda incelenmiştir.

2.2.4. LŞD işleminin mikro yapıya etkileri

LŞD işleminde kalıntı gerilme oluşumu başlığında belirtildiği üzere yüksek enerjili lazer darbelerinin yüzeyde şok basıncı oluşturmaktadır. Bu şok basıncının yüzeyden derinliğe doğru malzemenin HEL değerini aştığı yerlerde bu bölgeyi sıkıştırdığı ifade edilmişti. Aynı anda metal enlemesine de Poisson etkisi nedeniyle hacmini korumak için genişler ve bası kalıntı gerilmesi oluşturur. Buna ek olarak ise bu bölgenin altında dengeleyici çeki gerilmeleri de oluşmaktadır (Bkz. Şekil 2.3).

LŞD işleminin bu etkiyi yaratmasında rol alan mekanizmalar ise mikro yapı düzeyinde incelenmektedir. LŞD işleminde yüksek enerjili lazer darbelerinin etkisiyle yüzeye yakın bölgede ciddi plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu plastik deformasyonları sağlayan mekanizmalar dislokasyonların hareketidir. Dislokasyon yığılmalı bölgeler, dislokasyon dolanmaları veya ikizlenme oluşumu gibi birçok farklı mekanizma sonucunda

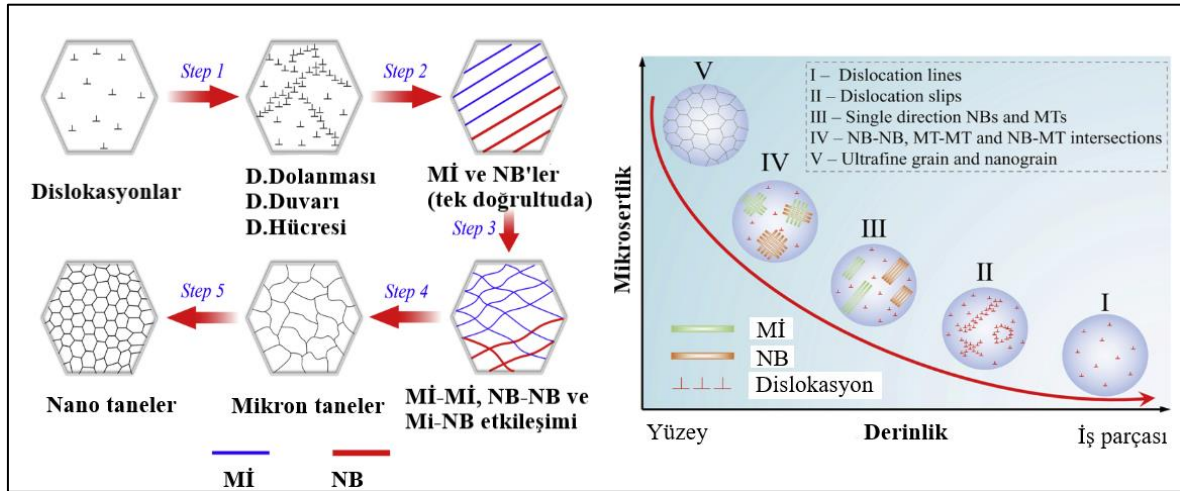
metal malzemenin yüzey bölgesinde tane incelmeye uğramış pekleştirilmiş bir bölge oluşmaktadır. Yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip bu bölge çatlak başlangıcı için gerekli enerjinin artmasına neden olmakta ve bu sayede yorulma hasarı gibi durumlarda bariyer görevi görmektedir [42].



Şekil 2.4. LŞD işleminin mukavemetlendirme mekanizmasının şematik gösterimi [43]

LŞD işleminin ardıl işlem olarak kullanıldığı çalışmada farklı oryantasyonlarda SLE ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. LŞD, numunelerin yüzeyindeki kalıcı gerilimi çekiden basıya dönüştürerek tüm numunelerin mukavemetinde belirgin bir artışa neden olmuştur, ancak 0° ve 45° yapım açılarına sahip numunelerin sünekliği azalmıştır. LSP sonrası güçlü $\langle 110 \rangle$ lif tekstürünün yoğunluğunda ve hacim fraksiyonunda azalma gözlemlenmiş, en zayıf yoğunluk ve en az hacim fraksiyonu 90° oryantasyonunda üretilen işlemsiz SLE numunesinde bulunmuştur. 90° yapım açısına sahip ve LŞD işlemine tabi tutulan 316L numunesi, en iyi mukavemet ve süneklik kombinasyonuna sahip olmuştur. Farklı yapım yönlerine sahip numunelerde önemli farklılıklar gözlemlenmiş ve kusurların anizotropiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, LŞD işlemi, dislokasyon yoğunluğunu artırarak ve mikro yapıdaki taneleri incelterek malzemenin mukavemetini artırmıştır. Bu süreçler, malzemenin daha fazla deformasyon direnci göstermesine ve mekanik özelliklerinin iyileşmesine neden olmuştur. Bu sonuçlar,

LŞD işleminin 316L paslanmaz çelikte kalıcı gerilme, mikro yapı, tekstür ve çekme özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu ve doğru yapım yönü ile kombine edildiğinde malzemenin mekanik özelliklerini optimize edebileceğini göstermektedir [44].



Şekil 2.5. LŞD işleminde tane incelmeye neden olan mekanizmalar [45]

Bir başka çalışmada LŞD işleminin, SLE ile üretilen CoCrFeMnNi yüksek entropili alaşımın mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde etkileri incelenmiştir. Özellikle, yüzey mikrosertliği işlem görmemiş numunelerde ortalama 203,2 HV'den, 3 J, 5 J ve 7 J lazer enerjileriyle işlem görmüş numuneler için sırasıyla 259,5 HV, 286,9 HV ve 320,9 HV'ye yükselmiştir. Sertleştirilmiş katman kalınlığı da 3 J'de 270 μm 'den 5 J'de 420 μm 'ye ve 7 J'de 510 μm 'ye yükselmiştir. Birincil güçlendirme mekanizması, yüksek yoğunluklu dislokasyon yapıları, mekanik ikizlenme ve dinamik yeniden kristalleşme ile kolaylaştırılan ve nano tanelerin oluşumuyla sonuçlanan tane inceltmeyi içerdiği ifade edilmiştir. Bu mekanizmaların meydana gelmesi ise şöyle açıklanmıştır. Çapraz-kayma mekanizmasının aktive olması ile dislokasyon oluşumu ve bunlara bağlı olarak tane sınırları etrafında dislokasyon kümelenmeleri ortaya çıkmaktadır. Bu dislokasyon kümelenmeleri pekleşmeye de katkı sağlamaktadır. Öte yandan plastik deformasyon mekanizmalarının diğer bir sonucu nano bant (NB) ve mekanik ikizlenmelerin (Mİ) oluşumudur. Her iki durumda ilk 100 mikronda gözlenmiş olup nano bantlar topografik açıdan mekanik ikizlenmelerden ayrılmaktadır. NB'lar ikizler kadar uzun ve düz değildir ve sınırları bulanıktır, bu da onları ikiz sınırlarından daha az belirgin hale getirir. NB'lar tek yönde hizalanarak matrisi NB/matris lamellerine bölerken, Mİ'ler tek yönde hizalanarak matrisi nano ikiz/matris lamel yapılarına bölmektedir. NB'lar ve dislokasyon duvarları (DD) arasındaki etkileşimler diğer

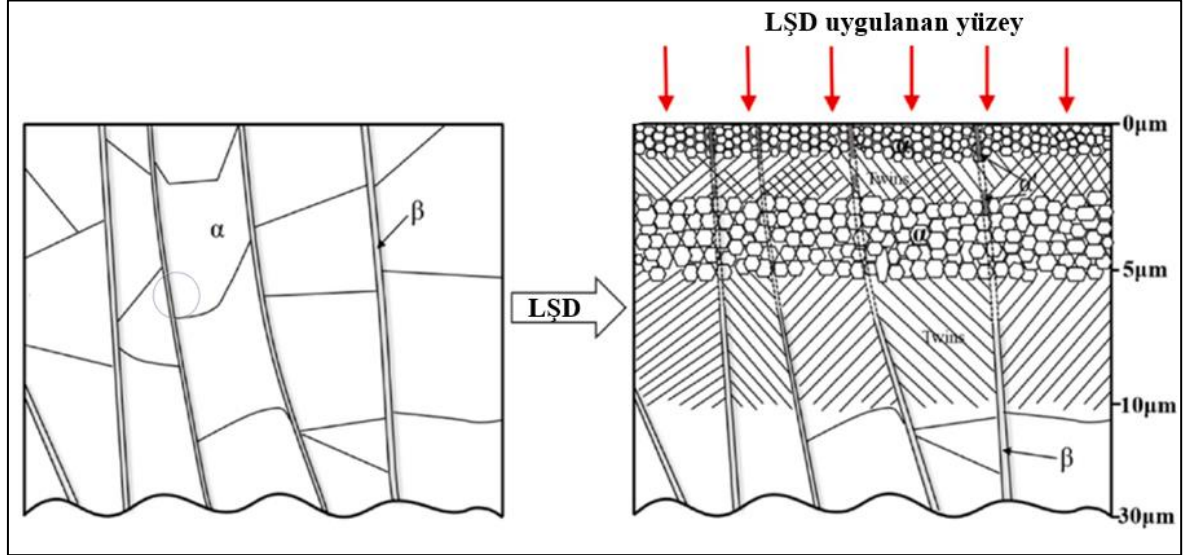
NB sistemlerini de aktive ederek taneleri mikron altı tanelere bölebileceği ifade edilmiştir. NB'ların oluşumu mevcut DD'ları ile yakından ilişkilidir. Ortalama genişliği 23 nm olan NB'lar iki yönde hizalanarak YMK kristalinin {111} kayma düzlemlerine paralel çok sayıda NB-NB kesişimine neden olur. Kesişen NB'lar iri taneleri, içinde yoğun deformasyon ikizleri görülebilen nano ölçekli eşkenar dörtgenlere ayırır. Özetle, nano bantların oluşumu, NB'ların, Mİ'lerin ve dislokasyon duvarlarının hizalanmasını ve etkileşimini içeren karmaşık bir süreçtir ve sonuçta matrisin nano ölçekli eşkenar dörtgen bloklara bölünmesine yol açar ve LSP tarafından indüklenen tane incelmeye katkıda bulunur. Bu değişiklikler LŞD sırasında yüksek plastik birim şekil değiştirmeler tarafından oluşturulmakta ve gelişmiş mekanik performansa sahip kalın bir sertleştirilmiş katmana yol açmaktadır. Daha yüksek lazer enerjileri sertleştirilmiş tabakanın kalınlığını artırmış, mikrosertliği iyileştirmiş ve genel güçlendirme etkisini artırmış, ancak malzemenin plastik deformasyon kapasitesi nedeniyle bu güçlendirmelerin bir sınırı olduğu belirtilmiştir [45]

2.2.5. Literatür özeti ve literatür açığı

Literatürde LŞD işleminin Eİ ürünü malzemelerde yüzey, mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmalarda elde edilen sonuçlardan şunlar göze çarpmaktadır;

- LD işleminde en önemli parametreler olarak güç yoğunluğu, lazer spot çapı, overlap (lazer spotlarının birbirine girinti miktarı), lazer pals süresi olduğu görülmüştür.
- LD işlemi yüzey pürüzlülüğüne çok az etki etmektedir. Genelde karşılaştırılan değerler Ra (ölçüm yapılan uzunluk üzerindeki profil yüksekliklerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması) ve Rz (ölçüm yapılan uzunluktaki en yüksek 5 nokta ve en derin 5 noktanın ortalama değeri) değerleri olup EIE yöntemiyle üretilen numunelerde üretim sonucu oluşan yüksek pürüzlülükte ufak farklılık oluşturabilse de SLE numunelerde anlamlı bir fark oluşturamamaktadır.
- LŞD işleminin mikro yapıya etkisi ise tartışmalıdır. Bazı çalışmalarda tane boyutunun oluşturulan yüksek plastik deformasyon sonucunda meydana gelen dislokasyon hareketleri ile tane küçülmesi olduğu belirtilirken diğerlerinde bu yönde bir bulguya rastlanılamamıştır.

Malzemenin plastik deformasyon kabiliyetine göre bu durum değişkenlik gösterebilmektedir.



Şekil 2.6. LŞD işleminin mikro yapıya etkilerinin şematik gösterimi [32]

- Çalışmalarda mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik testlerden çekme ve yorulma testleri uygulanmıştır. Yapılan çekme testi sonuçlarında çekme ve akma dayanımında artış elde edilmiştir. Öte yandan yorulma dayanımı değerinde %20 – 30 arası artışlar elde edilmiştir. Mekanik özelliklerdeki bu artışların yüzey ve yüzeye yakın bölgede LD işlemiyle yapılan plastik deformasyon sonucunda kalıntı gerilmelerin bası yönünde çevrilmesi sonucu ve bu bölgede dislokasyon yoğunluğunun artırılması ile çatlak başlangıcının geciktirilmesi ile sağlandığı belirtilmektedir.

LŞD işleminin etkileri malzeme özellikleri ve özellikle eklemeli imalat ile üretilmiş numunelerde yüzey karakteristiğine bağlı olarak değişebilmektedir. LŞD işleminin Eİ numunelerinin yüzey ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği çalışmalar bulunsa da sınırlı sayıda oldukları görülmektedir. Ayrıca, LŞD işlemi çoğu çalışmada uygulanmadan numuneye ısıtılma işlemi, yüzeyden talaş kaldırma veya sıcak izostatik pres gibi farklı işlemlerin ardından uygulanmaktadır. Bu uygulamalar LŞD işleminin etkilerinin tam olarak incelenmesini engelleyebilir. Öte yandan çalışmaların çoğunda siyah bant veya alüminyum bant kullanılarak LŞD uygulanmıştır. Ancak, bu sarf malzemeleri hem sökülürken zorluk oluşturmakta hem de endüstriyel uygulamalarda bu malzemelerin kullanılması her zaman mümkün olmayabilir. Öte yandan yüzey pürüzlülüğüne LŞD etkisi incelenmiş olsa da Eİ

ürünü numunelerin yüzey durumları üretim parametrelerine bağılı olarak değışkenlik gösterdiği için detaylı bir inceleme bu konuda ortaya konulmamıştır. Bunlara ek olarak ise literatürde bulunan çalışmalarda Eİ ürünü γ -TiAl ve IN939 alaşımlarına LŞD işleminin etkilerinin incelendiğı çalışmalara literatürde çok fazla yer almadığı gözlenmiştir. Bu bağlamda, yapılan tez çalışması öncü niteliğinde olup gelecekteki çalışmalara ışık tutmaktadır.

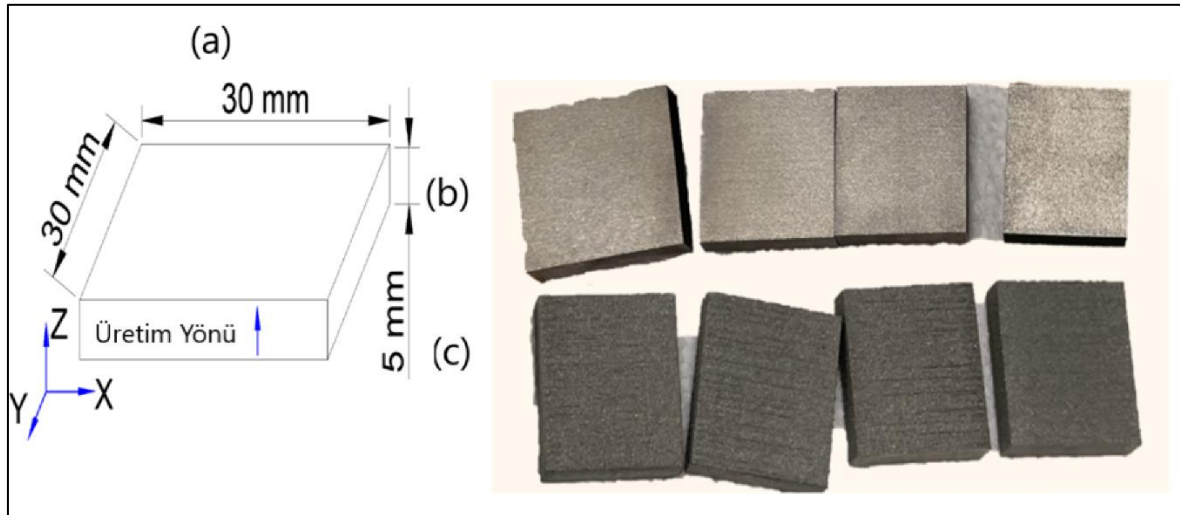


3. MATERYAL YÖNTEM

Bu başlık altında ilk olarak numunelerin hangi yöntem ve parametreler ile üretildiği ardından LŞD işleminde kullanılan parametrelerin nasıl belirlendiği açıklanmıştır. Sonrasında, öncelikle LŞD işleminin Eİ ürünü numunelerinin yüzey karakteristik özelliklerine etkisi optik mikroskop, SEM-EDS analizi, mikro sertlik, kalıntı gerilme ve yüzey pürüzlülük ölçümleri ile açıklanmıştır. Son olarak ise LŞD işleminin EIE γ -TiAl ve SLE IN939 numunelerinin mikro yapı ve yorulma özelliklerine etkisinin incelenmesi için yapılan mikro yapı analizi ile dört-nokta eğmeli yorulma deneylerinin uygulanış yöntemleri açıklanmıştır.

3.1. Numunelerin Üretimi

Ti48Al2Cr2Nb (γ -TiAl) alaşımından oluşan numuneler EIE ve IN939 alaşımından oluşan numuneler ise SLE yöntemleri ile üretilmişlerdir. Üretimde kullanılan parametreler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Numuneler iki farklı geometride üretilmiştir. Şekil 3.1’de mikro sertlik ve kalıntı gerilme analizleri için kullanılan geometrinin boyutları ve üretim sonrası numuneler görülmektedir.



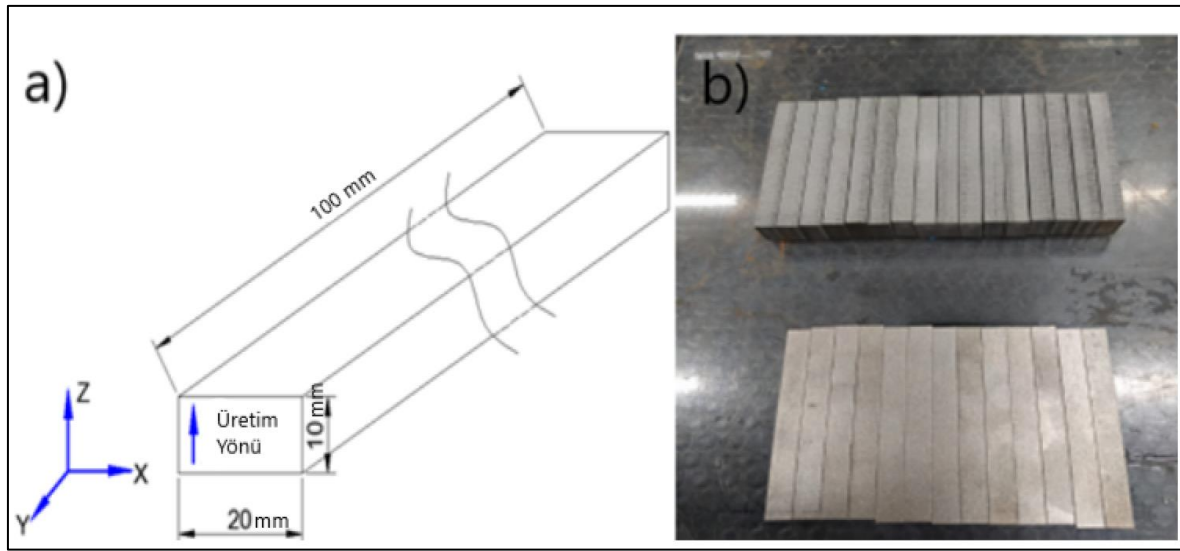
Şekil 3.1. Eİ numunelerinin (a) boyutları, (b) SLE üretimi IN939 alaşımı, (c) EIE üretimi γ -TiAl alaşımı

İkinci tip numuneler ise dört-noktalı eğmeli yorulma deneylerinde kullanılmak üzere Şekil 3.2’de gösterildiği gibi üretilmiştir. Yorulma deneylerinde kullanılan numunelerin

üretiminde kullanılan parametreler ise mikro sertlik ve kalıntı gerilme numuneleri ile aynı olup Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bütün numuneler Eskişehir Türkiye’de bulunan TEI (TUSAŞ Engine Industries) tesislerinde üretilmiştir.

Çizelge 3.1. Numune üretim parametreleri

Alaşım	Yöntem	Güç	Katman Kalınlığı	Ön Isıtma
γ -Ti-Al	EIE	25,00 J/mm ³	0,09 mm	1060°C
IN939	SLE	72,80 J/mm ³	0,04 mm	80°C



Şekil 3.2. Dört-nokta eğmeli yorulma deneyi numuneleri (a) boyutları (b) γ -TiAl ve IN939 alaşımı numuneler

3.2. LŞD İşlemi Parametreleri

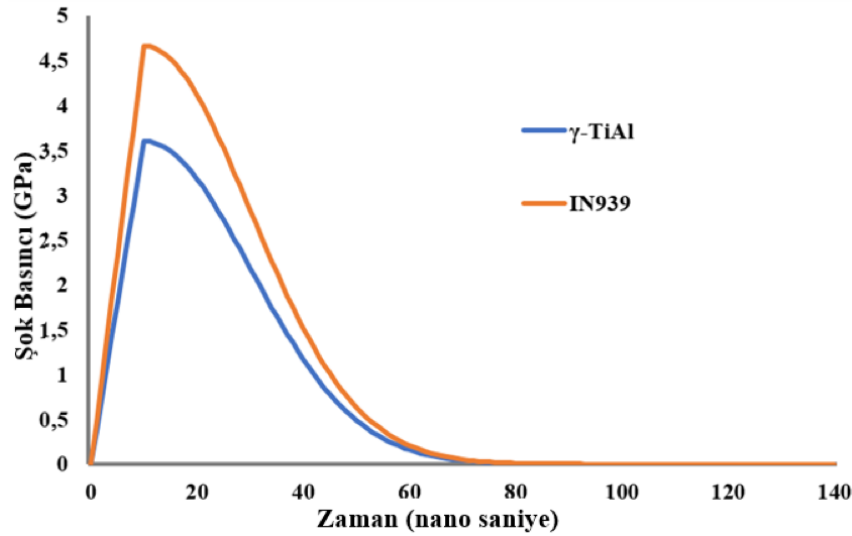
Lazer kaynaklı plazma basıncı, malzemelerin yüzeyinde BKG oluşturmak için metalin HES değerinden daha büyük olmalıdır. Ancak, eklemeli veya geleneksel olarak üretilen γ -TiAl ve IN939 alaşımlarının dinamik akma dayanımı ve HES değerleri hakkında literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle LŞD parametrelerinin belirlenmesinde benzer alaşımların özellikleri dikkate alınmıştır. Ti-6Al-4V ve IN718'in HES değerleri (sırasıyla 2,4 GPa ve 2,8 GPa), BKG oluşturabilmek için gereken basıncı hesaplamak için kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. LŞD işleminde kullanılan parametreler

Malzeme	γ -TiAl	IN939
Güç Yoğunluğu	5,0 GW/cm ²	8,0 GW/cm ²
Darbe başına enerji	4,5 J	5,0 J
Darbe süresi	10 ns	10 ns
Frekans	10 Hz	10 Hz
Spot boyutları	3x3 mm ²	2,5x2,5 mm ²
Overlap (%)	50	50
Darbe katman sayısı	1	1

LŞD sırasında üretilen tepe basıncını belirlemek için ampirik bir formül olan Eş. 3.1 kullanılabilir; burada P_{max} , bir lazer darbesi tarafından oluşturulan maksimum basınçtır ve I , güç yoğunluğudur. Bu nedenle Çizelge 3.2'de verilen güç yoğunluğu değerleri malzemelerin HEL sınırlarını aşacak şekilde seçilmiştir. Basıncın zaman dağılımı da literatürde birçok kez açıklanmaktadır [46–49]. Bu nedenle, her iki malzeme için dövme işleminin zamana karşı yaklaşık basınç dağılımı Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

$$P_{max} = 1,65\sqrt{I} \quad (3.1)$$



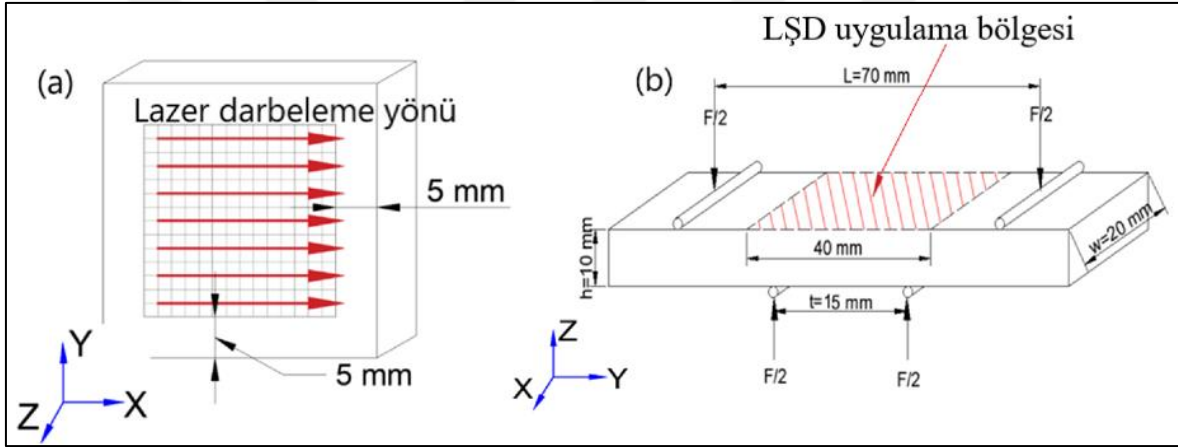
Şekil 3.3. LŞD işlemi esnasında kullanılan parametrelere karşılık gelen lazer şok basıncının zamana karşı dağılımı [50]

Çalışmada kullanılan lazer sistemi Çekya'daki HiLASE araştırma merkezi tarafından sağlanmıştır. Diyot pompalı lazer sistemi olan BIVOL lazer sisteminin özellikleri 1030 nm dalga boyu, 10 Hz tekrarlama frekansı ile 10 - 14 ns darbelerde 10-100 J enerjidir [51]. Bu bağlamda lazer gücü hesaplanılmak istenirse Eş. 3.2'den faydalanılabilir. P ortalama güç, E

darbe başına düşen enerji ve f frekansı ifade etmektedir. Böylece BIVÖJ lazer sistemi için lazer gücü 100 – 1000 W arasındadır.

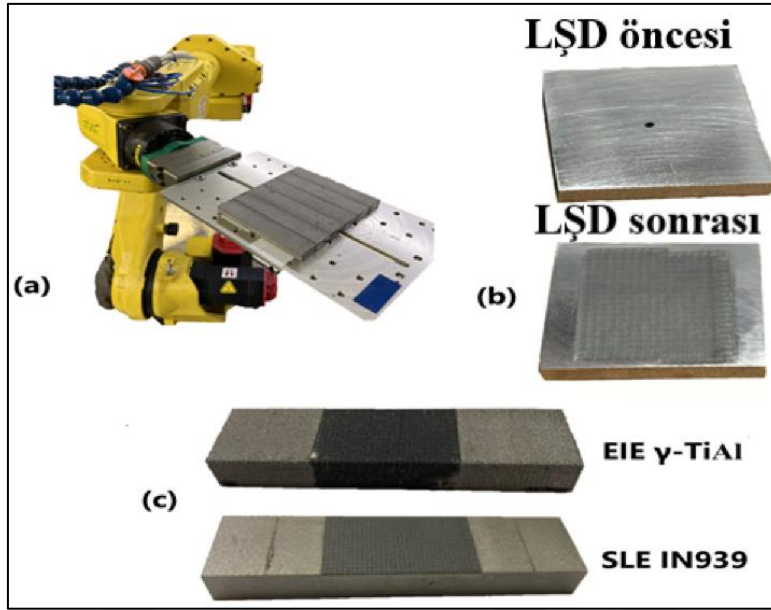
$$P = E \times f \quad (3.2)$$

Şekil 3.4’de her tip numune için LŞD işleminin uygulanışı gösterilmiştir. Tez çalışmasında LŞD işlemi herhangi bir koruma katmanı kullanılmadan uygulanmıştır. Kalıntı gerilme ve mikro sertlik için üretilen numunelerde ölçümlerin doğru şekilde yapılabilmesi için öncelikle yüzeyden bir miktar malzeme zımparalama ile kaldırılmıştır. Ancak, yorulma numunelerinde doğrudan üretim sonrası oluşan numuneye LŞD işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.4. LŞD işleminin uygulanışı, (a) yüzey karakterizasyonu numuneleri, (b) yorulma deneyi numuneleri

LŞD işlemi uygulanması için öncelikle numuneler Resim 3.1’de olduğu gibi robot bir kola bağlanır. İşlem sonrası ise oluşan yüzeyler yine Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1. LŞD işleminin uygulanması (a) robot kol üzerine bağlanmış numuneler, (b) LŞD işlemi öncesi ve sonrası yüzey, (d) dört-nokta eğmeli yorulma numuneleri

3.3. Yüzey Özelliklerinin Karakterizasyonu

Bu bölümde LŞD işleminin yüzey ve yüzey altı karakteristik özelliklerine etkilerinin incelenmesi amacıyla yapılan optik mikroskop, SEM-EDS, kalıntı gerilme, mikro sertlik ve yüzey pürüzlülük analizleri detaylı olarak açıklanmıştır.

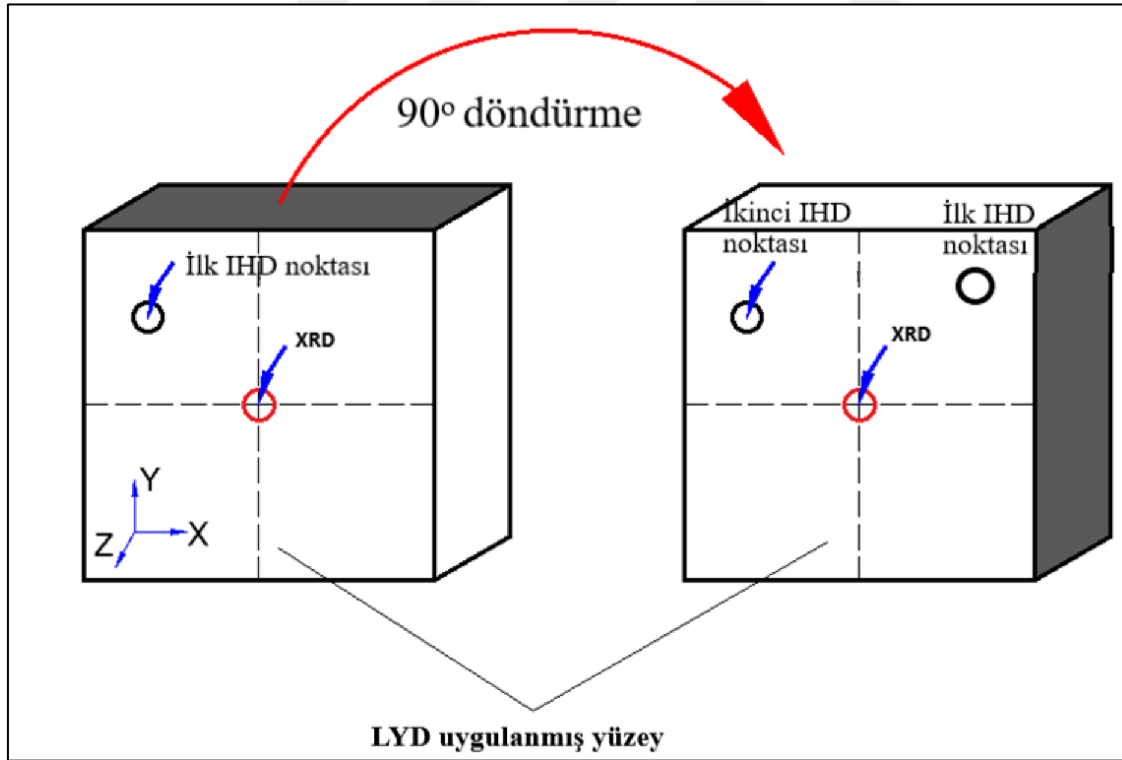
3.3.1. Yüzeyin optik mikroskop ve sem-eds analizi

LŞD işleminde malzeme yüzeyi doğrudan lazerin termal etkilerine maruz kalmaktadır. Yüksek enerjili lazer darbesinin yüzeyde bıraktığı termal etkileri ve lazer izlerini gözlemlemek için numuneler optik mikroskop görüntüleri kullanılarak analiz edildi. Ayrıca lazerle dövme işlemi sırasında basınç etkisinin artırılması için kullanılan su ve herhangi bir koruma katmanının kullanılmaması nedeniyle yüzeyde oksidasyon meydana gelmektedir. Bu nedenle, optik mikroskop ile gözlemin yanı sıra, malzemelerin LŞD esnasında etkilenen yüzeyinde oksijen varlığını belirlemek için SEM-EDS element analizi yapılmıştır.

3.3.2. Kalıntı gerilme ölçümleri

LŞD'nin temel amacı, malzemenin yüzeyinde yüksek gerilme hızlı deformasyonlar aracılığıyla BKG oluşturmaktır. Yüzeyin kalıntı gerilme profilini belirlenmek üzere X-ışını saçılımı (XRD) kullanılarak ölçümler yapıldı. XRD ölçümleri sırasında, başlangıçta malzeme için özgü en belirgin pikler tanımlandı. Ardından, cihaz bu pikler etrafında çeşitli

açılarda tarama yaparak kalıcı gerilimi hesaplamıştır. γ -TiAl için bu pikler 139° 'de belirlenirken ve IN939 için 127° 'deydi. İlgili tarama aralıkları sırasıyla $129^\circ - 149^\circ$ ve $117^\circ - 137^\circ$ idi ve bu tarama işlemi örnek merkezine yerleştirilmiş bir referans noktası etrafında iki yönde (x ve y) olacak şekilde gerçekleştirildi. Ancak, XRD yönteminin sadece parçanın yüzeyinden yaklaşık $10\text{-}30\text{ }\mu\text{m}$ derinliğini ölçebildiği ifade edilmektedir [52]. LŞD'nin etkilerini derinlik boyunca gözlemlemek için Stresstech Prism adlı İlerlemeli Delik Delme (ing. Incremental Hole Drilling, IHD) cihazı kullanıldı. Bu sistem, Elektron Speckle Pattern Interferometry (ESPI) olarak bilinen bir mekanizmayı kullanır [52, 53]. Örneklerin kalıntı gerilme derinlik profili yüzeyden 1 mm derinliğe kadar oluşturulmuştur. Sonuç olarak, örneklerin yüzey ve derinlik boyunca kalıntı gerilim profilleri hem XRD hem de ESPI-IHD yöntemlerinin bir kombinasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Kalıntı gerilme profilinin belirlenmesi için kullanılan ölçüm konumları, Şekil 3.5'te gösterilmiştir. XRD ölçümleri örnek döndürüldükten sonra aynı noktada gerçekleştirilirken, IHD, Şekil 3.5'te gösterilen belirli noktalarda uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Kalıntı gerilim ölçüm noktaları

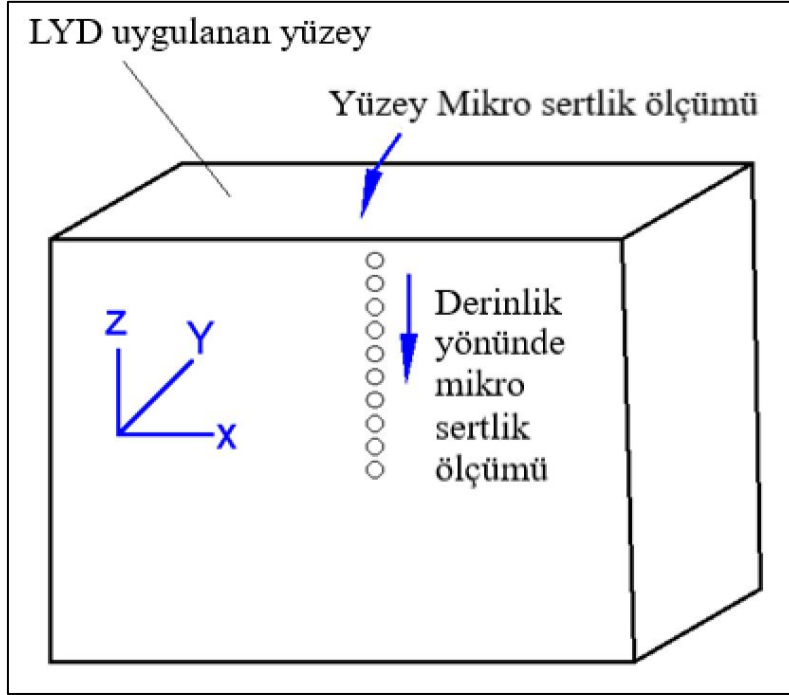
Tahribatlı bir yöntem olan IHD, ASTM E837 standardını takip eder ve kalıntı gerilimi hesaplamak için birim şekil değiştirme strengçelerini kullanır. Bu işlem, bir delik delindikten sonra strengçelerdeki boyut değişikliklerini ölçerek yapılır. ESPI-IHD yönteminde ise yüzey

deplasmanlarını ölçmek için yüksek hassasiyetli bir optik teknik kullanılır ve bu deplasmanlar daha sonra gerilimleri hesaplamak için kullanılır. ASTM E837 standardı tarafından önerilen prosedürü takip ederek, Integral yöntemi, regularizasyon seçeneği ile kalıntı gerilimleri hesaplamak için kullanılmıştır. ESPI-IHD yöntemi için önemli bir parametre, matkap dönüş hızıdır ve bu hız 5 000 rpm ile 50 000 rpm arasında değişebilir. Düzensiz ve kötü işlenmiş delikleri önlemek için 35 000 ile 50 000 rpm arasında bir dönüş hızı önerilmektedir [54]. Çalışmamızda, ESPI yöntemi ile yapılan IHD ölçümü 40 000 devir/dk ve 1,6 mm çapında bir matkap kullanılarak yüzeyden 1 mm derinliğe kadar olacak şekilde uygulanmıştır.

3.3.3. Mikro sertlik ölçümleri

Resim 3.1’de görüldüğü üzere LŞD işlemi sırasında koruyucu bir kaplama kullanılmadığından, yüzey bölgesinde oksidasyon izleri makro boyutta görülmektedir. Yüzey mikrosertlik değerlerinin doğru ölçülmesini sağlamak için numune yüzeyi oksitlenmiş tabakadan arındırılmak istenmiştir. Oksitlenmiş tabakanın kaldırılmasından önceki Ra pürüzlülük değerleri, IN939 ve γ -TiAl alaşım örnekleri için sırasıyla 1,514 μm ile 2,46 μm arasında değişmektedir. Tabakanın kaldırılmasının ardından, bu değerler sırasıyla IN939 ve γ -TiAl alaşım örnekleri için 0,41 μm ile 0,45 μm ’ye düşmüştür. Oksitlenmiş tabakanın zımparalama yöntemiyle yüzeyden kaldırılmıştır.

LŞD’nin sertlik üzerindeki etkisinin değerlendirmesi derinlik yönünde de yapılmıştır. Numuneler X-Z düzlemi boyunca kesilmiş ve ölçümler Z yönde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6’da ölçüm noktaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Yüzey ve derinlik yönünde mikro sertlik karakterizasyonu

Yüzey sertliği ölçümleri, minimum 5 farklı noktada 5 saniye boyunca 1000g/f yük uygulanarak gerçekleştirildi. Derinlik boyunca sertlik varyasyonlarının değerlendirilmesi için ölçümler, yüzeyin yaklaşık 50 μm altından başlatılmıştır. Değerler, derinlik 1 mm'ye kadar ilerledikçe 10 farklı pozisyonda toplanmıştır. Bu ölçümler için Metkon Duroline-M cihazı kullanılmıştır.

3.3.4. Yüzey pürüzlülük ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü, özellikle havacılık malzemelerinin yorulma performansı açısından değerlendirilmesi için kritik bir parametredir. Ancak, LŞD'nin yüzey pürüzlülüğü üzerinde minimal etkisi olduğu kabul edilmektedir [37]. Bununla birlikte, LŞD'nin yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini daha kapsamlı bir şekilde anlamak için yüzey pürüzlülüğü ölçümleri dört örnek türünde gerçekleştirilmiştir: işlemsiz, LŞD uygulanmış (LŞD), zımparalanmış (Z) ve zımparalanmış+LŞD (Z-LŞD).

Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün Ra ve Rz değerleri açısından karşılaştırıldı. Bu ölçümler, Mitutoyo SJ-210 pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak ISO-1997 standardını takip ederek gerçekleştirildi. Çizgisel yüzey pürüzlülük ölçümleri her ne kadar yüzey pürüzlülük durumu hakkında bilgi verse de üç boyutlu ölçüm yapabilen optik profilometre cihazları alan üzerinden daha kapsamlı sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle, LŞD işleminin pürüzlülük

özellikleri üzerine etkilerinin daha kapsamlı olarak incelenmesi için sadece zımparalanmamış numunelerin yüzeyleri, bir optik profilometre kullanılarak Sa, Sz ve Sq değerleri üzerinden incelenmiştir. Taranan alanın boyutları 20 x 15 mm²'dir. Bu ölçümler, ISO 25178 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3.4. LŞD İşlemini Sayısal Modelleme Çalışmaları

3.4.1. Basınç modeli

Lazer yüzey işleminin simülasyonun yapılabilmesi için öncelikle lazer güç yoğunluğu sonucunda oluşan basınç değerinin ve bu değer zamana yayılımının bilinmesi gerekmektedir. Lazer darbesinin oluşturduğu basınç değerinin matematiksel olarak karşılığı aşağıdaki Eş. 3.3'te [55] olduğu gibidir. Eş. 3.4'te ise P_0 en yüksek basınç değerinin işlem esnasında su kullanılması sonucu yaklaşık olarak değeri verilmiştir [50].

$$P_0 = 0.1 \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{1/2} Z^{1/2} I_0^{1/2} \quad (3.3)$$

$$P_0 \cong 1.65 \sqrt{I_0} \quad (3.4)$$

Lazer şok basıncı ile alakalı diğer önemli bir nokta ise basıncın hem zamana bağlı hem de lazer ışın çapı içindeki dağılımıdır. Plazma basıncının lazer çapı sınırları içinde Gauss dağılımı göstermektedir [22]. Yapılan analizlerde kullanılan parametreler ve faydalanılan kaynaklar Çizelge 3.3'de verildiği gibidir. Yapılan 2B analizlerde lazer darbesi tekli (single shot) olarak alınmıştır.

Çizelge 3.3. 2B analizlerde kullanılan malzemeler ve lazer parametreleri

Malzeme	Lazer Güç Yoğunluğu (GW/cm ²)	Lazer Pals Süresi (ns)	Lazer Spot Çapı/Kenarı (mm)	Frekans	Yaklaşık Basınç - P_0 (GPa)	Çalışma
Ti64	5,6	22	4	1	3,90	[28]
Ti17	13,26	15	4	-	6	[56]
IN718	9	7.2	3	-	7,2	[57]
XCR12	8	25	7	-	5	[50]
316L	7	10	5	-	4	[50]
γ -TiAl	5	20	3	5	3,7	[58]

3.4.2. Malzeme modeli

Lazer yüzey sertleştirme işleminin modellenmesinde gereken diğer parametreler ise malzemenin lazer plazma basıncı karşısındaki davranışını belirleyen parametrelerdir. Lazer yüzey sertleştirme işlemi yüksek birim şekil değiştirme hızları içerdiğinden bu durumu en iyi temsil eden modellerden biri olan Johnson – Cook (JC) malzeme modeli tercih edilmiştir. Literatürde bulunan çeşitli çalışmalarda LŞD işlemi için kullanılan JC malzeme modeli parametreleri Çizelge 3.4’te olduğu gibi elde edilmiştir. Bu parametreler elde edilirken sıklıkla Split – Hopkinson Basınç Barı deneyinden faydalanılmaktadır. Bu deneyin uygulanmasının nedeni LŞD, BD veya talaşlı imalat gibi $10^4 - 10^6$ mertebelerinde olan yüksek hızda birim şekil değiştirmeler içeren işlemlere benzer şekilde birim şekil değiştirme hızlarında numuneler test edilmektedir. Çizelge 3.4’te geleneksel yöntemlerle üretilmiş çeşitli metallerin JC parametreleri verilmiştir.

Johnson – Cook malzeme modeli malzemelerin yüksek birim şekil değiştirmeler altında tepkisinin tahmin edilebilmesi için yaygın olarak kullanılan amprik bir denklemdir. JC modeli malzemenin davranışını plastik bölge için tanımlamak için çeşitli terimler içermektedir. Eş. 3.5’te bu parametreler verilmiştir. A akma gerilmesi, B pekleşme katsayısı, n pekleşme, C gerinim hızına bağlılık, ϵ^{pl} eşlenik plastik gerinim, $\dot{\epsilon}$ eşlenik plastik gerinim oranı ve $\dot{\epsilon}_0$ referans gerinim oranı şeklindedir.

$$\sigma = A + B * (\epsilon^{pl})^n * (1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)) \quad (3.5)$$

Çizelge 3.4. Çeşitli metaller için elde edilen JC malzeme modeli parametreleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Young modülü (GPa)	Poisson Oranı	A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}$	Çalışma
X12CR Çelik	7800	204	0.293	870	400	0,4	0,0015	0,05	[50]
316L Çelik	7900	190	0.263	300	600	0,35	0,0045	0,045	[50]
INCONEL718	8250	177	0.273	900	1200	0,6	0,0092	0,001	[59]
Ti64	4500	113,8	0.342	950	1046	0,52	0,068	0,001	[60]
Ti17	4650	115	0.33	1100	590	0,41	0,0152	1	[56]
γ -TiAl	3900	176	0.342	290	1770	0,55	0,006	1	[61]

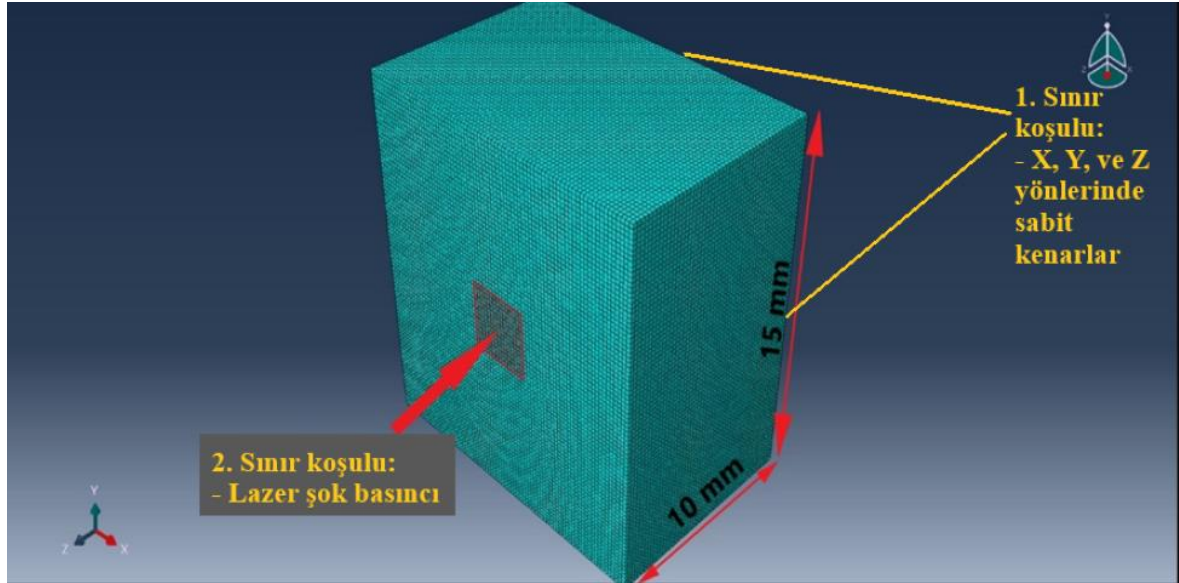
Ancak, eklemeli imalatın yeni bir üretim yöntemi olmasından dolayı bu tez çalışmasında kullanılan alaşımlar olan EİE γ -TiAl ve SLE-IN939 için literatür de herhangi bir JC malzeme

parametresi bulunamamıştır. Bu bağlamda, JC parametrelerinin belirlenebilmesi için basma testleri yapılmıştır. Basma testlerinde kullanılan numune geometrileri ise DIN5016 standardına göre 8mm çap ve 12 mm boy olarak belirlenmiştir [62]. Basma testinden elde edilen grafikler üzerinden ise eğri uydurma yöntemleri ile JC parametrelerinden A, B ve n elde edilmiştir. C parametresi ise literatürde bulunan değerler örnek alınarak simülasyonda kullanılmıştır.

3.4.3. Model kurgusu

LŞD işlemi yüksek derece de dinamik bir uygulamadır. Nanosaniye mertebesinde olan lazer darbesi literatürde bulunan çalışmalarda yoğun olarak tamamen açık (ing. explicit) hesaplama yöntemi ile simüle edilmektedir. Öte yandan bazı çalışmalarda ise öncelikle lazer darbeleri açık yöntemle uygulanıp ardından oluşan gerilmelerin denge haline gelmesi için kapalı (ing. implicit) yöntemle malzemenin son gerilme durumu hesaplanmaktadır.

Lazer şok işleminin simülasyonunda Abaqus® paket programının 2022 versiyonu kullanılmıştır. Şekil 3.7’de gösterilen sınır şartları kullanılarak model kurgusu yapılmıştır. İşlem tek bir lazer darbesi üzerinden değerlendirilmiştir. Element boyu en küçük 0,1 ve en büyük 0,4 mm olarak seçilmiştir. Açık yöntemle yapılan hesaplamada toplam süre 500 nanosaniye olarak seçilmiştir. Çünkü, daha uzun olarak seçilen sürelerde şok dalgası malzemenin diğer yüzeylerinden sekerek malzemenin gerilme durumunun hesaplanmasında hata oluşturmaktadır. Kapalı yöntemle yapılan hesaplamada ise yaklaşık 100 mikro saniyede gerilmeler denge durumuna gelmesi nedeniyle süre olarak da bu süre seçilmiştir.



Şekil 3.7. Sayısal modelleme için kullanılan üç boyutlu model

Sınır şartları oluşturulurken iki girdiden faydalanılmıştır. Birincisi numunelerin tabanında robot koluna sabitlenmesi, ikincisi ise lazer şok basıncıdır. Plazma şok basıncı belirlenirken ise Çizelge 3.2’de bulunan işlem parametreleri ve Eş. 3.1’den faydalanılmıştır. Ayrıca, Şekil 3.3’te bulunan lazer şok basıncının zaman içinde dağılımı da kullanılmıştır. Plazma basıncın lazer spot alanı içinde dağılımı ise eşit dağılımlı olarak seçilmiştir.

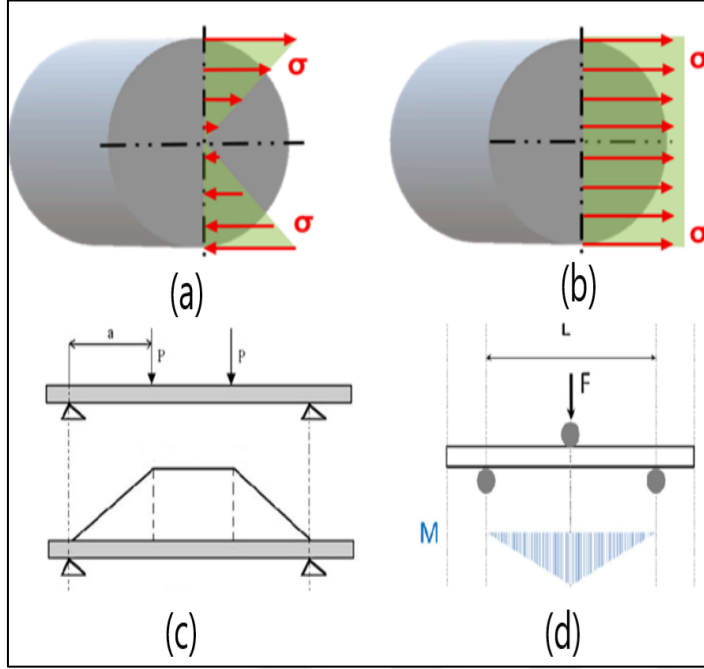
3.5. Mikro Yapı Analizi

Metal malzemelerde yorulma özellikleri yalnız yüzey karakteristiği ile değil mikro yapı durumu ile de ilgilidir. Bu nedenle, bu başlık altında yapılmış olan mikro yapı analizi detaylı olarak açıklanmıştır.

3.6. Dört-Nokta Eğmeli Yorulma Deneyleri

LŞD işleminin Eİ ürünü metal malzemelerin yorulma performansına etkilerinin incelenmesi için dört-nokta eğmeli yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. LŞD işleminin etkisi en çok yüzey ve yüzeye yakın bölgeleri ilgilendirdiğinden bu durumda en anlamlı sonuç 4-nokta eğmeli yorulma testinden alınacaktır. Öncelikle eksenel yönde yapılan yüklemelerde (bkz. Şekil 3.8.b) oluşturulan gerilme kesit boyunca eşit dağılımlıdır. Öte yandan, eğme yönünde malzeme yüklenirse (bkz. Şekil 3.8.a) gerilme dağılımının merkezde yüzeye göre azaldığı bilinmektedir. Çünkü, eğme esnasında en büyük gerilmeler yüzey bölgesinde oluşmaktadır. Ayrıca, 3-nokta eğme yerine 4-nokta eğmeli yorulma testinin tercih edilmesinin nedeni ise,

4-nokta eğmeli yorulma testinde yükleme mesnetleri arasında yük dağılımı 3-noktalı eğmeli yorulma testine göre daha eşit olarak (bkz. Şekil 3.8.c ve 3.8.d) görülmektedir.



Şekil 3.8. Malzemelerin yüklenme yönlerine göre oluşan gerilme dağılımları (a) eğilme, (b) çekme [63], (c) dört-nokta eğilme (d) üç-nokta eğilme

Bunlara ek olarak, 4-nokta eğmeli yorulma testinde kullanılacak numune geometrisinin belirlenmesinde ASTM E290 ve literatürden elde edilen bilgilerden faydalanılmıştır. Bu bağlamda, Slawik ve diğerleri (2021) belirttikleri üzere destek kolları arası mesafe numune geometrisine göre sınırlandırılmıştır. Buna göre, destek noktaları arası mesafe (L), yükleme noktaları arası mesafe (t) ve numune kalınlığı arasındaki oransal ilişkiler $L/t = 4-5$ ve $t/h = 1,2 - 1,5$ olacak şekilde numune boyutları belirlenmiştir [37]. Bu şartlara göre oluşturulan numune geometrisi Şekil 3.2 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

Yorulma deneyleri yüksek çevrim yorulma (YÇY) deneyleri şeklinde uygulanmış olup parametreleri; $R:0,1$ ($R:\sigma_{min}/\sigma_{max}$), 20 Hz frekans, Sabit gerilme genliği ve $N = 2E+6$ yorulma ömrü sınırı (ing. run-out limit) şartları altında gerçekleştirilmiştir. Bu şartların yanı sıra, yeterli numune sayısının ASTM E739 – 15 standardında önerildiği üzere yeterli tekrar seviyesinin (minimum %50 - %75) sağlanması için belirlenen 3 gerilme değerinde 2 tekrar olarak uygulanacaktır. Ayrıca yorulma deneylerinde gerilme seviyeleri alaşımların akma sınırlarının %80 - %70 ve %60'ı kadar olan değerleri alınarak gerçekleştirilmiştir. γ -TiAl ve

IN939 malzemelerinin çekme mekanik özellikleri TEİ'nin daha önce yaptığı testlerin verileri üzerinden alınmış olup Çizelge 3.5'te verilmiştir. Bu bilgiler ışığında yorulma deneylerinde kullanılmak üzere her bir alaşım için 12'şer adet (6 adet numune LD işlemlili + 6 adet numune LD işlemsiz) olacak şekilde toplam 24 adet numune üretilecektir. Yorulma deneyleri sonrası elde edilen veriler ile gerilme – yorulma ömrü eğrileri (S-N eğrileri) oluşturulacak ve veriler karşılaştırılacaktır. Ayrıca yorulma hasarının oluşumunda LD işleminin etkilerinin incelenmesi üzerine önceki başlıkta da belirtildiği üzere SEM analizi ile kırılma yüzeyleri incelenecektir.

Çizelge 3.5. Eİ üretimi γ -TiAl ve IN939 alaşımlarının mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Gerilmesi	En Yüksek Çekme Gerilmesi	Elastisite Modülü
γ -TiAl	560,63 MPa	636,87 MPa	188,50 GPa
IN939	732,3 MPa	1096 MPa	156 GPa

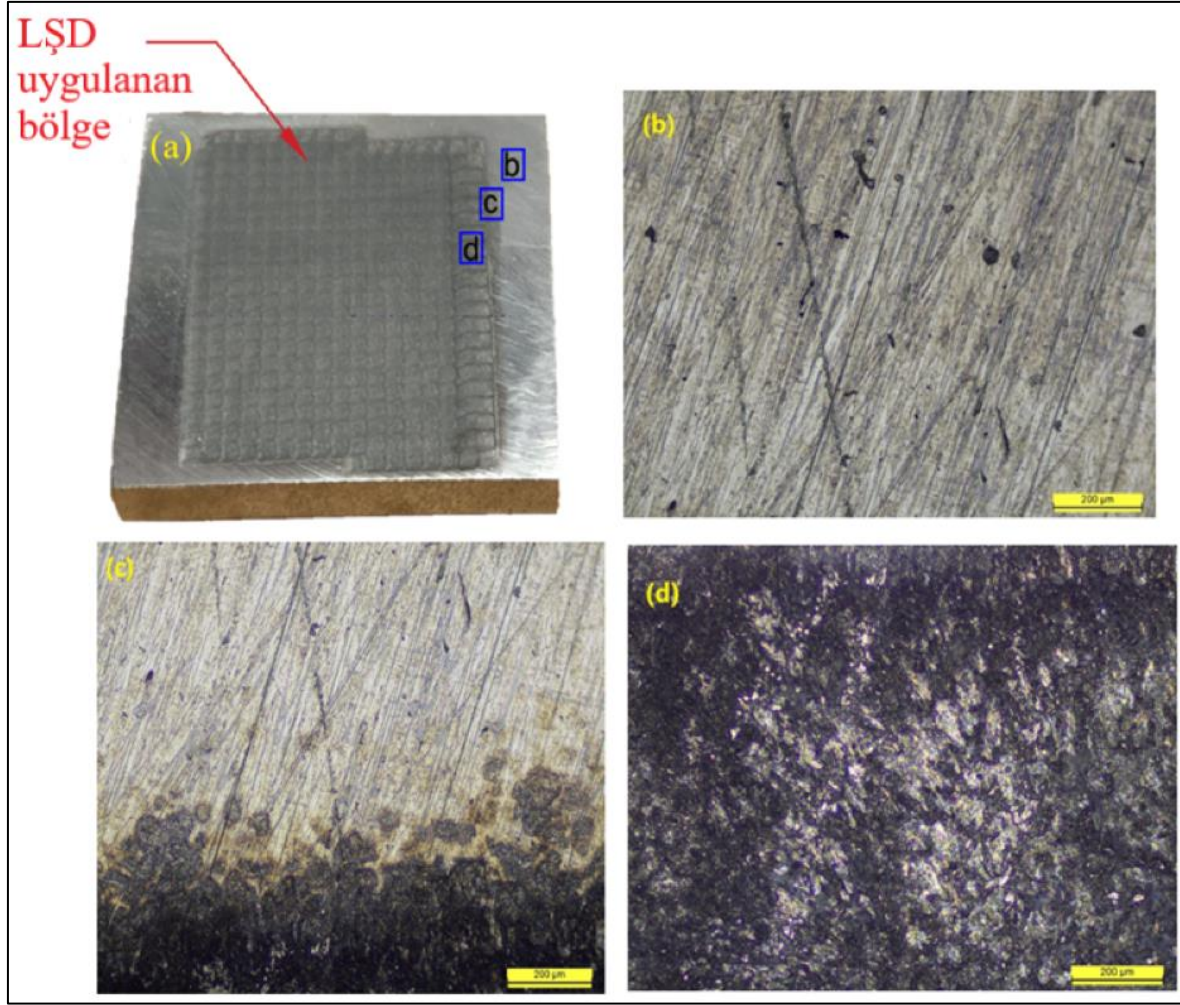
4. LŞD İŞLEMİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde amaç LŞD işleminin Eİ ürünü metal parçaların yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkilerini incelemektir. Ayrıca LŞD işlemi uygulanırken herhangi bir koruyucu katman kullanılmamıştır. Bu bağlamda ilk olarak optik mikroskop ve SEM-EDS analizi, ardından kalıntı gerilme ölçümleri, sonrasında mikro sertlik ölçümleri ve son olarak yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular işlemsiz ve LŞD işlemli numuneler arasında karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir.

4.1. Optik Mikroskop İncelemesi ve SEM-EDS analizi

LŞD işleminin yüzeyde oluşturduğu etkiler ilk olarak optik mikroskop ile elde edilen görseller üzerinden ve hem yüksek enerjili lazer darbesinin hem de işlemin su altında yapılmasından dolayı yüzeyde meydana gelen oksitlenme üzerinden değerlendirilmiştir.

Resim 4.1’de SLE IN939 numunesinin LŞD sonrasında yüzeyinde lazerin termal etkileri sonucunda bıraktığı izler net olarak görülebilmektedir. Resim 4.1’de görülen geçiş bölgesi incelenirse lazer darbesi sonrası oluşan ısı etkileri ile ergiyen katman hem yüksek lazer şok basıncı hem de robot sisteminin hareketi nedeniyle ergiyen metalin işlemsiz bölgeye doğru sıçramasına neden olmuştur. Öte yandan, yine Resim 4.1’de görülen LŞD bölgesinde yüzeyin en tepesinde meydana gelen yoğun ısı etkileri numunenin yüzeyinin oksidasyonuna yol açmıştır. Bu da oksitlenmiş alanların oluşmasına ve lazer atışlarının hedeflediği bölgelerin etrafında erimiş kalıntıların dağılmasına neden olmuştur.

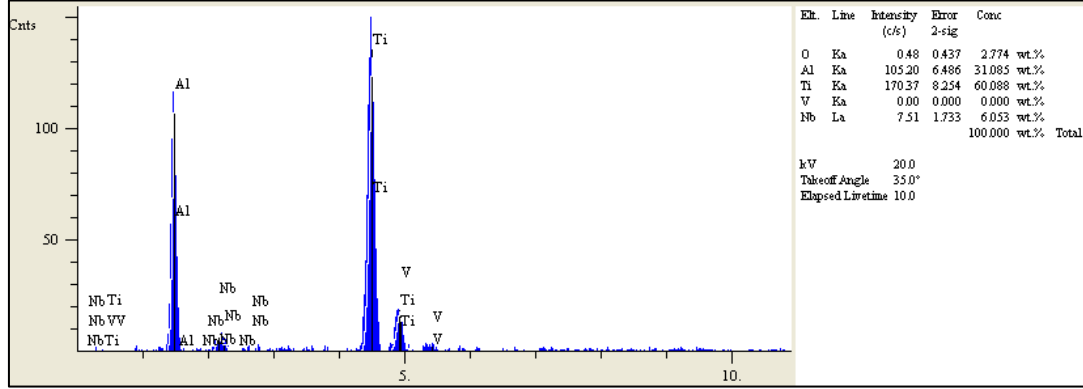


Resim 4.1. Lazer darbelerinin yüzeydeki etkisi, (a) optik mikroskop ile incelenen bölgeler, (b) işlemsiz bölge, (c) işlemsiz ve LŞD uygulanan alanlar arası geçiş bölgesi, (d) LŞD bölgesi

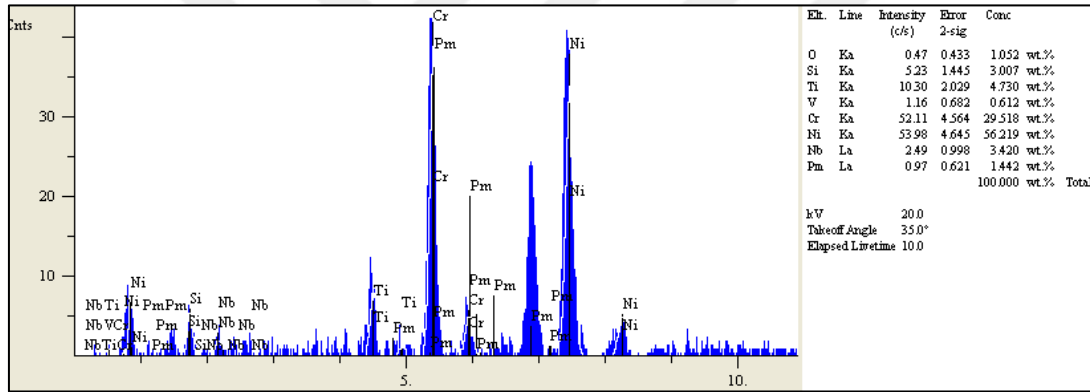
Şekil 4.1 ve 4.2’de ise SEM-EDS analizi ile yüzey bölgesinde bulunan elementlerin dağılımı gösterilmektedir. İşlemsiz numunelerde herhangi bir oksitlenmeye rastlanılmazken LŞD işlemi sonrasında EİE- γ -TiAl ve SLE-IN939 numuneleri için oksijen varlığı sırasıyla ağırlıkça %2,774 ve %1,052 olmuştur.

LŞD işlemi sonucunda yüzeyde oluşan oksitlenmiş bölge literatürde bulunan çalışmalarda da incelenmiştir. Sano ve diğerleri (2006) uyguladıkları LŞD işlemi sonrasında numune yüzeyinde 1 μ m kalınlığında bir oksit tabakası gözlemlemişlerdir [64]. Benzer bir çalışmada, koruma katmanı olmadan uygulanan LŞD işlemi sonucunda ise yüzeyde oksit varlığı %3’ten %35 değerine kadar artmıştır. Tez çalışmasında ise sertlik ölçümlerinin doğru yapılabilmesi numunelerin yüzeylerinden yaklaşık 1 mikron kalınlığında malzeme kaldırılmıştır. Bu kalınlık Sano ve diğerlerinin (2006) yaptıkları çalışmada elde ettikleri oksit tabaka kalınlığı

ile paraleldir. Oksit tabakasının zımparalama ile kaldırılmasına rağmen yüzey SEM-EDS analizi ile incelendiğinde oksijen varlığı gözlenmiştir.



Şekil 4.1. LŞD uygulanmış γ -TiAl numunesinin SEM-EDS sonucu



Şekil 4.2. LŞD uygulanmış IN939 numunesinin SEM-EDS sonucu

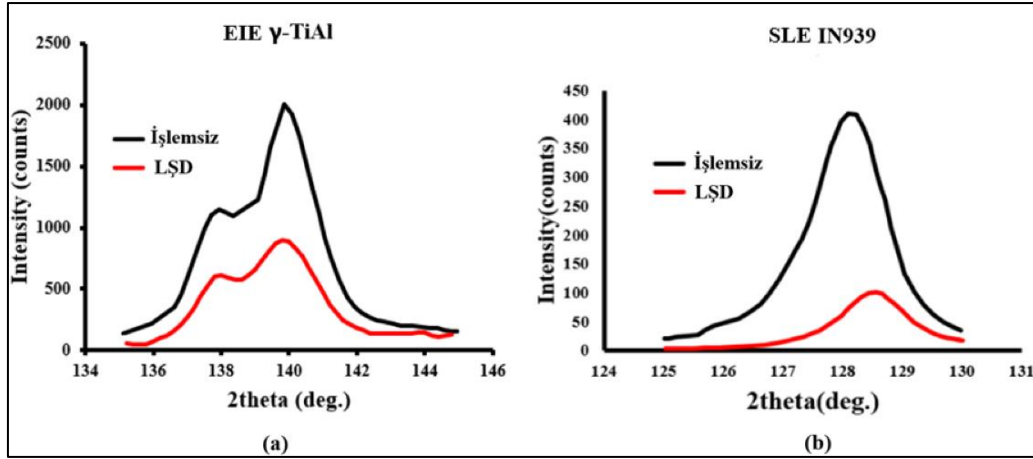
4.2. Kalıntı Gerilme Ölçümleri

Lazer şok dövme işleminin en önemli etkilerinden biri LŞD uygulanması sonucunda metal parçanın yüzey ve yüzey altında bası kalıntı gerilme oluşturmaktır. Bu amaç doğrultusunda EIE- γ -TiAl ve SLE-IN939 numunelerine uygulanan LŞD işlemi sonucunda meydana gelen kalıntı gerilme profilleri incelenmiştir. Kalıntı gerilme profili oluşturulurken ilk olarak XRD ardından ESPI-IHD yönteminden faydalanılmıştır. İki farklı ölçümün kullanılması amaç XRD en üst yüzeydeki kalıntı gerilme durumunu tespit edebilirken IHD yüzeyin biraz altından başlayarak ölçüm yapmasıdır.

Lazer dövme işleminin yüzeydeki kalıcı gerilme üzerindeki etkisi ilk olarak XRD ölçümleri aracılığıyla incelenmiştir. Bu ölçümler, yüzey altındaki 10 – 30 μ m derinlik aralığını

değerlendirebilen bir yeteneğe sahiptir. XRD kalıntı ölçümleri, yüzeydeki kalıcı gerilmelerin yönelimini belirlemek amacıyla σ_{xx} ve σ_{yy} yönlendirilmeleri boyunca gerçekleştirilmiştir. EIE ile oluşturulan ve SLE ile oluşturulan örneklerde LŞD işlemsiz durumda BKG değerleri tespit edilmiştir. LŞD uygulamasından sonra, yüzeye yakın kalıntı gerilme alanı, Çizelge 4.1'de belirtildiği gibi çeki gerilmesi olan bir duruma geçmiştir. EIE-işlemsiz numunesinde x ve y yönlerinde sırasıyla -252 MPa ve -159MPa değerleri gözlenirken, LŞD uygulaması ile bu değerler 36 MPa ve 103 MPa olmuştur. Benzer durum SLE IN939 numunesi için de geçerli olmuştur. X ve y yönleri boyunca işlemsiz numunede -141 MPa ve -0,46 MPa kalıntı gerilme tespit edilirken, LŞD sonrası bu değerler 221 MPa ve 242.46 MPa olmuştur.

Eklemeli imalata özgü belirgin termal döngü, üretim stratejileriyle birleştiğinde, bileşenin çekirdeğinde bası kalıcı gerilmelerin oluşmasına ve parçanın kenarlarına doğru çeki gerilmesine geçmesine neden olabilir [65]. XRD ile yapılan ölçümler parçanın merkezine yakın bir referans noktası etrafında yapıldığından (bkz. Şekil 3.5), BKG tespiti gözlemlerimizle uyumludur ve benzer sonuçlar mevcut literatürde belgelenmiştir [66–68]. LŞD işlemi sonrası meydana gelen çeki kalıntı gerilmeleri ise LŞD sürecinde koruyucu bir kaplamanın olmamasına bağlanabilir. Lazer şok dövme sürecinde, lazer enerjisinin yüzey tarafından emilmesiyle hızlı bir plazma genişlemesi meydana gelir. Bu genişleme, sonuç olarak bir şok dalgasına yol açan anlık bir basınç artışı oluşturur. Oluşan basınç, malzemenin Hugoniot elastik sınırını aştığında, BKG olmaktadır. Aynı zamanda, sıcaklıklar 10^3 K'nin üzerine çıkmaktadır. Yüksek sıcaklıklar, metalin erimesine neden olur. Aynı anda birikmiş olan gerilmeler ve şekil değiştirmeler, nokta alanı üzerinde serbest bırakılır. Bununla birlikte, plastik deformasyona uğramış bölgeler, lazer alanının etrafında etkilenmez. Daha sonra plazmanın soğuma aşamasına geçilir ve lazer noktasının altında erimiş metalin katılaşmasına yol açar. Bu katılaşma, termal büzülmeyi başlatır ve parçanın yüzeyinde çeki kalıcı gerilmenin oluşmasına neden olur [25]. Özetle, üst yüzeydeki ÇKG'nin ortaya çıkışı, lazerle oluşturulan plazmanın termal etkilerine bağlanabilir. Benzer sonuçlar, mevcut literatürde, LŞD sırasında yüksek sıcaklıklar nedeniyle BKG'nin ÇKG'ne dönüştüğü durumları göstermektedir [69]. Ayrıca, ÇKG değerlerinin Gill, Telang ve Vasudevan'ın (2015) yaptığı çalışma ile uyumlu olarak 80 μ m'ye kadar bir derinliğe kadar uzandığı gözlemlenmiştir. Ancak, ablasyon kaplaması uygulandığında termal etkiler sınırlanır ve empedans uyumsuzluğu (ing. impedance mismatch) sorunu olarak bilinen bir basınç artışı devreye girer. Bu bağlamda, kalıcı gerilme genellikle yüzeyden itibaren BKG olacak şekilde başlar [70].



Şekil 4.3. LŞD işlemi öncesi ve sonrası oluşan XRD desenleri, (a) TiAl, (b) IN939

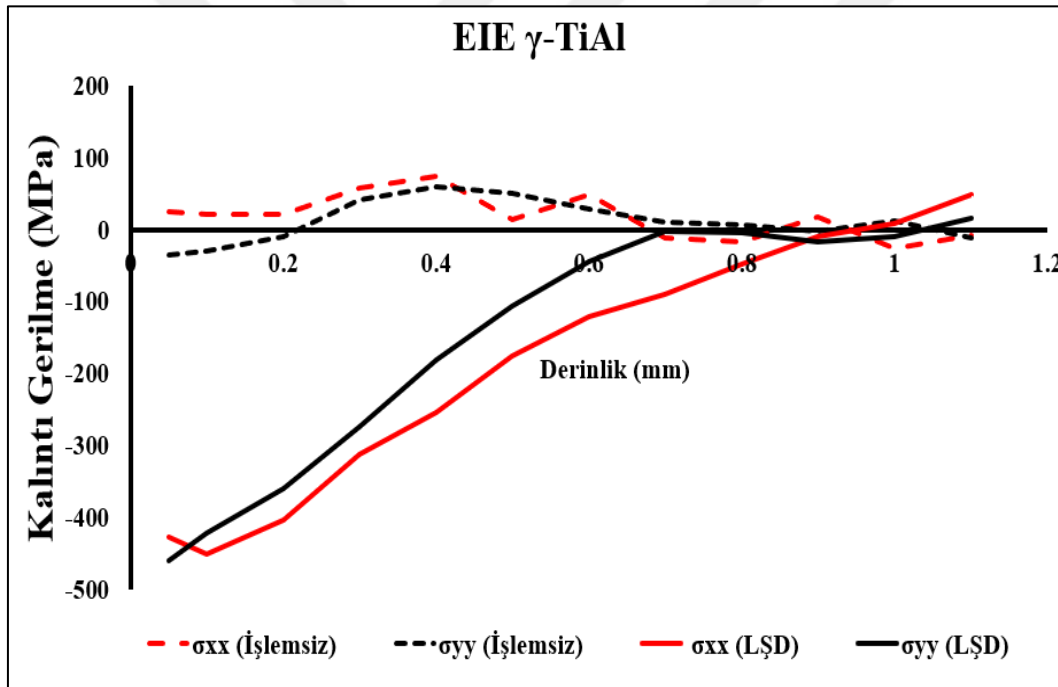
Şekil 4.3'te LŞD işleminin öncesi ve sonrasında EIE γ -TiAl ve SLE IN939 numunelerinin XRD desenleri görülmektedir. LŞD işlemsiz ve işlemlili yüzeyler arası kalıntı gerilme durumu XRD desenleri üzerinden de belirlenebilmektedir. XRD desenlerindeki farklar, işlenmemiş ve işlenmiş metal yüzeyleri arasında, LŞD süreci tarafından indüklenen yerel deformasyonlara bağlanabilir. Ayrıca, Eİ bileşenlerinin belirgin yüzey pürüzlülüğü, XRD'nin penetrasyon kapasitesini aşarsa, parçanın engebeli yüzeyi de benzer şekilde XRD desenlerinde değişikliklere katkıda bulunabilir [71]. Belirtilen çalışmada, LŞD işleminden sonra kalıntı gerilme durumu çekiden basıya geçmektedir. Ancak, kendi araştırmamızda, başlangıçta en üst yüzey bölgesinde kalıntı gerilme durumu bası şeklindedir ve lazerin termal etkisi nedeniyle LŞD sonrasında çeki gerilmesine dönüşmüştür.

Çizelge 4.1. XRD ölçümleri sonucunda elde edilen kalıntı gerilme değerleri

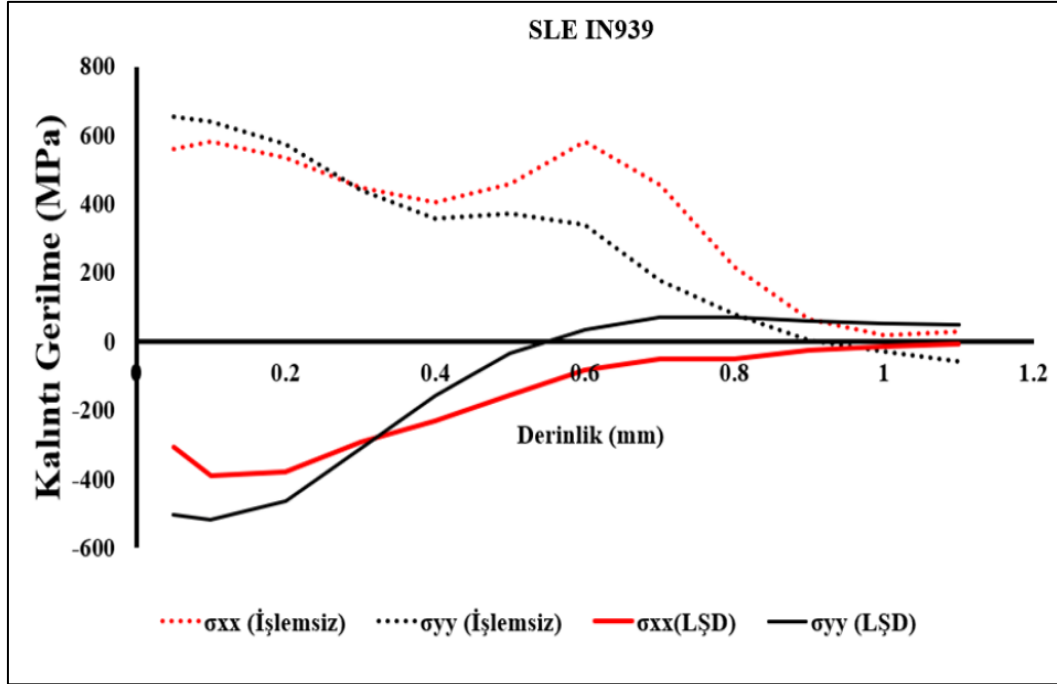
Numune	Ölçüm Yönü	Kalıntı Gerilme (MPa)
EIE-işlemsiz	σ_{xx}	-252,11
EIE-işlemsiz	σ_{yy}	-159,31
EIE-LŞD	σ_{xx}	36,18
EIE-LŞD	σ_{yy}	103,23
SLE-işlemsiz	σ_{xx}	-141,69
SLE-işlemsiz	σ_{yy}	-0,46
SLE-LŞD	σ_{xx}	221,24
SLE-LŞD	σ_{yy}	242,46

Bununla birlikte, XRD desenleri yüzey işleminden sonra önemli bir değişiklik göstermektedir. Bu fenomen, lazer darbeleme tarafından neden olunan yerel deformasyonlar ve termal etkilerle ilişkilendirilebilir. Tam tersine, yüzey pürüzlülüğünün kalıntı gerilme durumu üzerindeki etkisi çalışmamızda göz ardı edilebilir. Bunun nedeni, Eİ ile üretilen numunelerde oldukça düzensiz olan yüzeyin LŞD işleminden önce taşlama işlemine tabi tutulmuş olması ve bu sayede kalıntı gerilme verilerinin doğru bir şekilde elde edilmiş olmasıdır.

LŞD işleminin malzeme yüzeyinden derinlik yönünde oluşturduğu kalıntı gerilmelerin incelenmesi amacıyla ESPI-IHD yöntemiyle ölçümler yapılmıştır. Bu yöntemle elde edilen kalıntı gerilme sonuçları Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.4. EIE γ -TiAl numunelerinin derinlik yönünde kalıntı gerilme profilleri



Şekil 4.5. IN939 numunelerinin derinlik yönünde kalıntı gerilme profilleri

XRD ve IHD yöntemleri için yüzeydeki kalıntı gerilme durumlarını karşılaştırdığımızda bir fark görülmektedir. Bu iki ölçüm yöntemi arasındaki bu uyumsuzluk literatürde geniş bir şekilde araştırılmıştır. Peral, De Vicente, Porro ve Ocana (2017) yaptıkları çalışmada malzemenin yüzeyine yakın yapılan IHD ölçümleri için belirsizliklerin olabileceğini belirtmişlerdir [72]. Dolayısıyla, iki yöntem arasındaki uyumsuzluğun olası açıklaması IHD ölçümü olarak düşünülebilir.

LSD işlemi öncesi her iki alaşımın numuneleri incelendiğinde kalıntı gerilme profilinin çeki yönünde olduğu Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görülmektedir. İşlemsiz durumdaki numunelerden IN939 alaşımından oluşanlarda ÇKG değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Bu durum numunelerin farklı yöntemlerle üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Çizelge 3.1 incelendiğinde ön ısıtma safhasındaki sıcaklık değerinin EIE γ -TiAl alaşımı için oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak soğuma safhasının da EIE γ -TiAl alaşımında daha yavaş olacağından ÇKG değerlerinin daha düşük çıkması olası bir durumdur.

LSD işlemi sonrasında oluşan kalıntı gerilme profili en yüksek bası kalıntı gerilmesi (EY-BKG), bası kalıntı gerilme profilinin toplam derinliği (BKGD) ve ölçüm yapılan oryantasyona göre BKG dağılımı parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir.

İşlemsiz ve LŞD uygulanmış durumundaki numuneler için kalıntı gerilme durumlarının maksimum değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. EY-BKG değeri LŞD işlemi öncesinde EIE numunesi için x ve y yönlerinde sırasıyla 74 MPa ve 61 MPa olarak elde edilmiştir. EIE- γ -TiAl numunesine uygulanan LŞD işlemi sonucunda bu değerler -451 MPa ve -460 MPa olarak gözlenmiştir. SLE-IN939 numunesi için ise LŞD öncesi ve sonrası değerler sırasıyla 581 MPa/654 MPa ile -389 MPa/-516 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Numunelerin en yüksek kalıntı gerilme değerleri

Numune	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	Numune	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)
EIE-işlemsiz	74	61	EIE-LŞD	-451	-460
SLE-işlemsiz	581	654	SLE-LŞD	-389	-516

Öte yandan, EIE-LŞD numuneleri için BKGD yaklaşık 1 mm iken, SLE-LŞD numuneleri için 0.7 mm olarak elde edilmiştir. Her iki tip numune içinde kalıntı gerilme durumu BKGD'den sonra bası halden çeki hale evrilmiştir. İşlemsiz SLE numunelerinin yüzeyinde çok yüksek ÇKG bulunduğu açıkça görülmektedir. Yüzeyde bu derece yüksek ÇKG olmasına rağmen bası kalıntı gerilmesinin son bulunduğu derinlik olan 1 mm'den sonra her iki durum içinde aynı miktarda ÇKG görülmektedir. Elde edilen kalıntı gerilme sonuçları göstermektedir ki LŞD işlemi malzeme yüzeyi yüksek çeki kalıntı gerilmeleri içerse bile lazer darbelerinin oluşturduğu yüksek basınç sonucunda BKG'ne çevirebilmektedir.

Kalıntı gerilme değerleri yüzey ve derinlik boyunca hem x hem de y yönleri için incelenmiştir. Numune yüzeylerinde LŞD öncesi ve sonrası kalıntı gerilmeleri oryantasyonlara göre farklılık göstermektedir. XRD sonuçları incelendiğinde, her iki alaşım içinde, y yönünde olan gerilme değerleri x yönünde olanlara göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Benzer bir durum tarama yönünün x olduğu bir çalışmada da elde edilmiştir [73]. Yüzeyde görülen bu anizotropi durumunun derinlik içinde benzer şekilde olduğu Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görülmektedir. Kalıntı gerilme değerleri BKGD noktasından sonra her iki tip alaşımda da hem x hem de y yönleri için aynı seviyelere gelmektedir. Kalıntı gerilme değerlerinde görülen anizotropinin başka bir potansiyel açıklaması işlem sırasındaki robot kolunun hareketi ile ilgili olabilir. Süreç boyunca numuneler bir robot kola sabitlenir ve lazer hareketsiz kalırken darbenin yönünün tersine doğru hareket eder. Bu nedenle, lazerin yoğun ısı etkisi ve robot kol hareketi gerilme dağılımında anizotropinin oluşturulmasına neden olabilir.

Literatürde bulunan diğer çalışmalarda EY-BKG değerinde farklılıklar görülmektedir (bkz. Çizelge 2.2). Örneğin Slawik ve diğerlerinin (2021) yaptıkları çalışmada malzeme yüzeyine birden fazla lazer darbe katmanı uygulanmıştır [37]. Bir başka çalışmada ise 3B-LŞD olarak adlandırılan işlem Eİ ile üretim esnasında belirli katman sayısından sonra LŞD uygulanarak yapılmıştır [33]. LŞD işleminin tekrarlı lazer darbeleriyle uygulanması durumunda yüzeyde oluşturulacak dislokasyon yoğunluğu üst yüzeyde belirli bir sınırdan sonra gerçekleşmeyeceği için oluşturulan basınç daha derinlere etki edebilir. Tekrarlı olarak uygulanan lazer darbeleri sonucunda oluşan BKGD tek katman olarak uygulanana göre iki kat veya daha fazla derinlikte bası kalıntı gerilmesi oluşturabilmektedir [33, 37]. Bu parametrelerin dışında, LŞD işlem parametrelerinin kombinasyonu olan eşdeğer girinti yoğunluğu (EOD), eşdeğer enerji yoğunluğu (EED) ve eşdeğer lokal girinti faktörü gibi etmenler de kalıntı gerilme profilini etkilemektedir [74]. Sonuç olarak LŞD işlemi, Eİ ürünü olan yüksek dayanımlı metal alaşımlarının yüzey karakteristiğinin güçlendirilmesi için oldukça faydalı bir işlemdir. Metal alaşımının özelliklerine ve LŞD işlem parametrelerinin optimize edilmesine bağlı olarak LŞD işleminin etkinliği artırılabilir.

4.3. Mikro Sertlik Ölçümleri

LŞD işleminin metal malzemelerin yüzey karakteristiğinde bir diğer önemli etkisi mikro sertlik üzerinedir. LŞD işleminin EIE γ -TiAl ve SLE IN939 numunelerinin yüzey ve yüzey altı bölgesinin sertliğe etkisi incelenmiştir.

Yapılan tez çalışmasında LŞD işlemi koruma katmanı olmadan uygulanmıştır. Bu durumun bir sonucu olan oksidasyondan önceki bölümlerde bahsedilmişti. Oksit tabakasının LŞD sonucu oluşan gerçek sertlik değerlerinin ölçümünü etkilememesi için öncelikle yaklaşık 1-2 mikron kalınlığında olan oksit tabakası zımparalanarak yüzey temizlenmiştir. Oksitlenmiş tabakanın kaldırılması öncesinde LŞD uygulanan IN939 ve γ -TiAl alaşım örnekleri için Ra pürüzlülük değerleri sırasıyla 1,514 μm ile 2,46 μm arasında değişirken, tabakanın kaldırılmasının ardından bu değerler sırasıyla 0,41 μm ile 0,45 μm arasına düşmüştür.

Yüzeyin temizlenmesinden sonra numunelerin öncelikle yüzey mikro sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3'te Vickers türünden yüzey mikro sertlik değerleri görülmektedir. EIE işlemsiz ile EIE LŞD ve SLE işlemsiz ile SLE LŞD numuneleri karşılaştırıldığında γ -TiAl alaşımı için %44,4 ve IN939 alaşımı için %18,2 oranında yüzey

mikro sertliğinde artış tespit edilmiştir. Bu sertlik değerlerindeki artış, esasen lazer darbesi tarafından tetiklenen yoğun plastik deformasyonlardan kaynaklanmaktadır. LŞD işlemi sırasında malzeme, şok basıncından kaynaklanan yüksek deformasyon hızı olan 10^6 s^{-1} değerini aşan şiddetteki bir basınca maruz kalır. Bu, özellikle yüzeye yakın bölgelerde artan bir dislokasyon yoğunluğuna yol açarak sertlikte bir iyileşmeye neden olur. Qiao, Zhao, Zhang ve Gao (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, dökme bir TiAl alaşımı LŞD işlemine tabi tutulmuştur ve mikro sertlikte %30'luk bir artış elde edilmiştir. Bu artışın, mekanik ikizleme tarafından tetiklenen dislokasyon yoğunluğundaki bir artışa bağlandığı belirtilmiştir [58]. Benzer bir diğer çalışmada ise nikel süper alaşımı olan IN718 alaşımına uygulanan LŞD sonucunda yüzey mikro sertliğinde %17'lik bir artış elde edilmiştir [75]. Sonuç olarak yüzey bölgesi için mikro sertliğe LŞD işleminin etkisi sonucu ortaya çıkan sonuçlar literatürde elde edilen sonuçlar ile paraleldir.

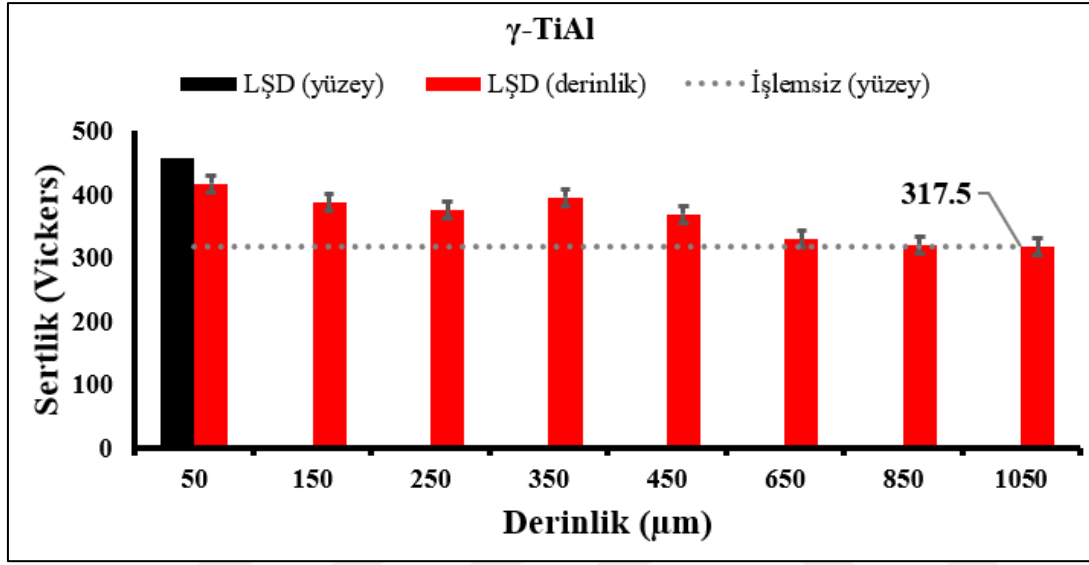
LŞD işleminin oluşturduğu yüksek şok basıncı yüzeye yakın bölgede ciddi anlamda dislokasyonları tetiklemekte ve soğuk şekillendirmeye neden olmaktadır. Bu durumun yüzey altı bölgesi için nasıl olduğunu gözlemlenmesi de gerekmektedir. Çünkü genelde yüzeyden başlayan çatlakların iyi anlamda engellenmesi için derinlik yönünde de belirli bir noktaya kadar soğuk şekillendirme yapılması önem arz etmektedir.

Çizelge 4.3. Eİ ürünü numunelerin yüzey mikro sertlik değerleri

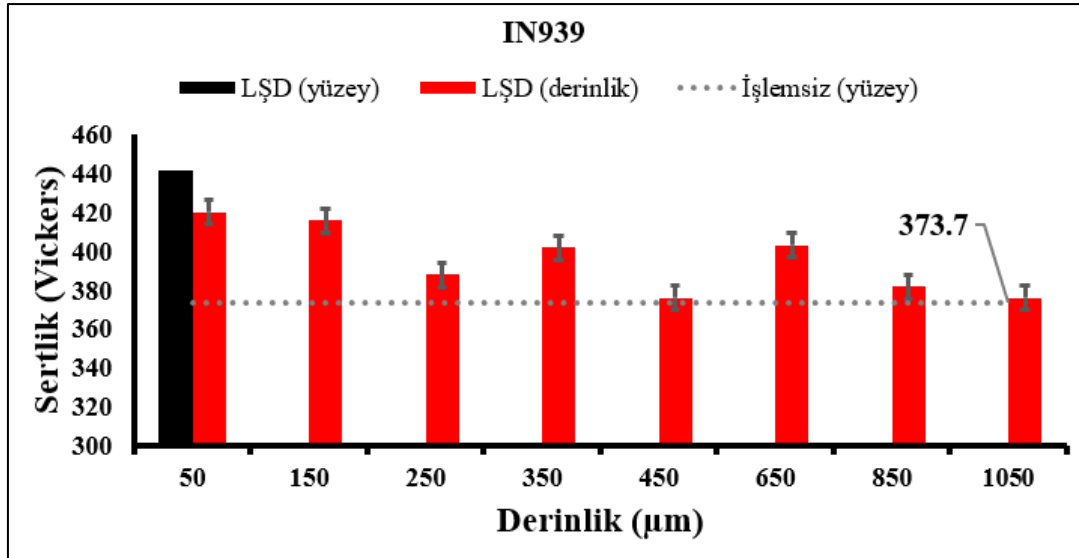
Numune	Sertlik (Vickers)	Sertlik değerlerindeki değişim
EIE işlemsiz	317,5	-
EIE LŞD	458,5	%44,4 artış
SLE işlemsiz	373,7	-
SLE LŞD	441,75	%18,2 artış

Mikro sertlik değerleri EIE işlemsiz, EIE LŞD, SLE işlemsiz ve SLE LŞD numuneleri için derinlik yönünde elde edilmiştir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sırasıyla EIE γ -TiAl ve SLE IN939 numunelerinin derinlik boyunca olan mikro sertlik değerlerinin sonuçları görülmektedir. Sertlik değerleri LŞD sırasında oluşan şok dalgasının kalınlık boyunca azalması nedeniyle derinlikle birlikte azalmaktadır. Her iki alaşım için de yakın yüzey bölgesi LŞD tarafından sertleştirilmiştir. LŞD işlemi sırasında anlık bir sıcaklık artışı ve ardından hızlı bir soğuma meydana gelmektedir. Ayrıca, lazer darbesi malzemeyi önemli ölçüde plastik deformasyona

maruz bırakmaktadır. Yüksek sıcaklık gradyanı ve plastik deformasyon mekanizmalarının birleşimi sonucunda Eİ numunelerinin mikro sertliğinde artışa yol açmaktadır. Yüzeyin hemen altındaki sertlikte hızlı bir düşüş göze çarpmaktadır. Bu durum, LŞD'nin termal etkisinin temel olarak malzemenin en üst tabakasını etkilemesinden kaynaklanabilir. Benzer bulgular mevcut literatürde de bulunabilir [76, 77].



Şekil 4.6. EİE TiAl numuneleri için derinlik yönünde mikro sertlik değerleri



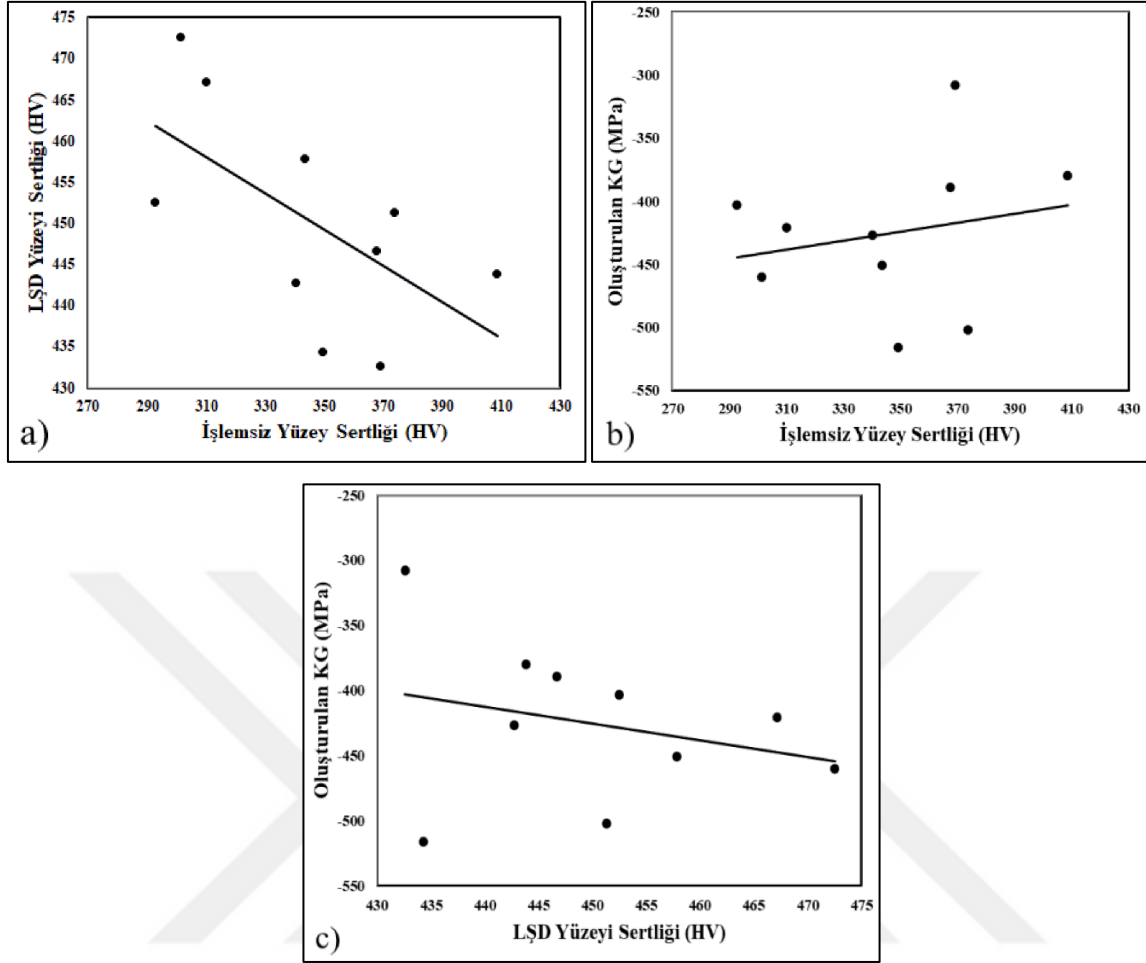
Şekil 4.7. SLE IN939 numuneleri için derinlik yönünde mikro sertlik değerleri

LŞD işleminin pekleştirme etkisi istatistiksel olarak incelenebilmektedir. Böylece, LŞD işleminin etkinliği de ortaya konulabilir. Soyama ve Korsunsky (2022) yaptıkları çalışmada elde edilen sertlik ve kalıntı gerilme değerleri korelasyon oluşturarak LŞD işleminin ve

benzer yöntemlerin etkinliklerini karşılaştırmışlardır [78]. Şekil 4.8’de LŞD işleminin soğuk iş etkisi işlemli ve işlemsiz yüzeylerin Vickers sertliği, LŞD sonucunda oluşan BKG ile işlemsiz yüzeyin sertliği ve BKG ile işlemli yüzeyin sertliği arasında olan korelasyonlar üzerinden değerlendirilmiştir. Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da ise literatürden alınan bilgiler doğrultusunda LŞD benzeri yöntemler ile karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge 4.4’de verilen pekleşme oranı (k_{HV}) Eş. 4.1 ile hesaplanmıştır.

$$H_{Vişlenmiş} = k_{HV} + H_{HVişlenmemiş} \quad (4.1)$$

Buna ek olarak ise, korelasyon olasılıksızlığı ilişkinin anlamlılığını ifade etmektedir. Eğer korelasyon olasılıksızlığı %1 değerinden düşük ise iki parametre arasındaki ilişki oldukça anlamlıdır.



Şekil 4.8. L&S işleminin pekleştirme etkisi, (a) yüzeylerin sertlikleri arası korelasyon, (b) yüzeylerin BKG değerleri arası korelasyon, (c) L&S yüzeylerin sertlik ve BKG değerleri arası korelasyon

Bahsedilen çalışmaya benzer şekilde, L&S işleminin Çizelge 4.4'te verilmiş olan diğer pekleştirme etkisi oluşturan darbeleme yöntemlerine göre daha düşük korelasyon katsayısına sahip olmasının nedeni L&S işleminin termal etkilerinden kaynaklanabilir. Öte yandan L&S işlemi için elde edilen pekleştirme oranındaki artış %131 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, L&S işleminin pekleştirme etkisinin %30 olduğunu ifade etmektedir. Öte yandan işlemsiz yüzey sertliği – işlenmiş yüzey BKG ve işlenmiş yüzey sertliği – işlenmiş yüzey BKG arası ilişkiler incelendiğinde L&S işlemi için diğer yöntemlere göre daha düşük korelasyon değerleri elde edilmiştir. L&S işleminin korumasız olarak uygulanması termal etkileri arttırdığından, sonuçlarda elde edilen sertlik değerine L&S etkisinin sadece pekleştirme ile değil termal etkiler ile de olduğu anlaşılmaktadır. Bunlara ek olarak ise Çizelge 4.5 ile Çizelge 4.6 incelenirse, L&S işleminin korelasyon katsayısında bir artış gözlenmiştir. Bu artış, L&S işleminin sertlik artışına etkisi olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 4.4. Yüzey darbeleme yöntemi uygulanmış ve uygulanmamış malzemelerin yüzey Vickers sertlikleri arası ilişki

Yöntem	Geliştirme oranı, k_{HV}	Korelasyon katsayısı	Veri sayısı	Korelasyon olasılıksızlığı
LŞD (bu çalışma)	131%	0,614	10	%0,004
Su jeti ile kavitasyon *	128%	0,948	25	%7,0 x 10 ⁻¹¹
Ultrasonik kavitasyon *	157%	0,904	8	%0,21
Bilyeli dövme *	140%	0,973	11	%5,3 x 10 ⁻⁵

*Veriler literatürden alınmıştır [78].

Çizelge 4.5. Yüzey darbeleme yöntemi uygulanmamış malzemelerin yüzey Vickers sertlikleri ve uygulanmışların BKG değerleri arası ilişki

Yöntem	Korelasyon katsayısı	Veri sayısı	Korelasyon olasılıksızlığı
LŞD (bu çalışma)	0,21	10	%3,0 x 10 ⁻⁹
Su jeti ile kavitasyon *	0,948	25	%7,0 x 10 ⁻¹¹
Ultrasonik kavitasyon *	0,904	8	%0,21
Bilyeli dövme *	0,973	11	%5,3 x 10 ⁻⁵

*Veriler literatürden alınmıştır [78].

Çizelge 4.6. Yüzey darbeleme yöntemi uygulanmış malzemelerin yüzey Vickers sertlikleri ve BKG değerleri arası ilişki

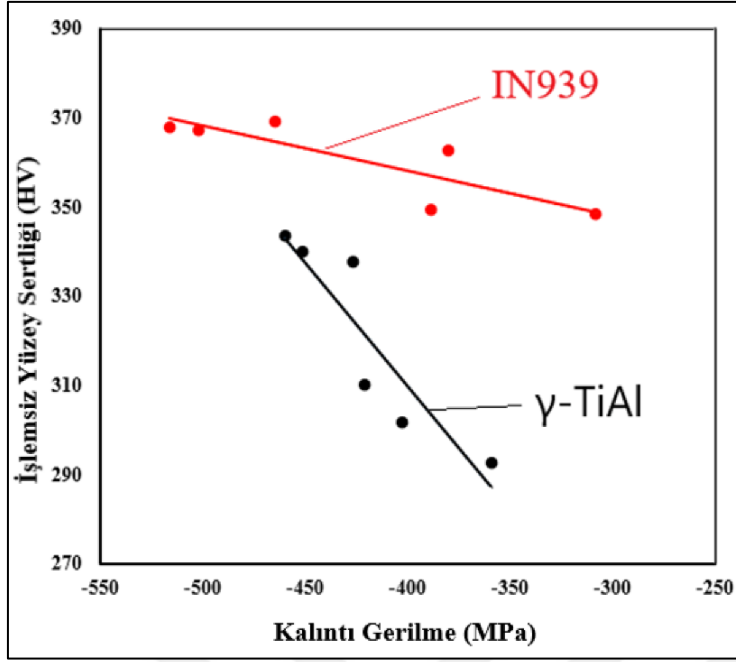
Yöntem	Korelasyon katsayısı	Veri sayısı	Korelasyon olasılıksızlığı
LŞD (bu çalışma)	0,27	10	%1,2 x 10 ⁻⁹
Su jeti ile kavitasyon *	0,948	25	%7,0 x 10 ⁻¹¹
Ultrasonik kavitasyon *	0,904	8	%0,21
Bilyeli dövme *	0,973	11	%5,3 x 10 ⁻⁵

*Veriler literatürden alınmıştır [78].

Vickers sertliğinde oluşan değişim bası kalıntı gerilmesindeki değişimin bir fonksiyonu olarak elde edilebilir. Eş. 4.2, deneysel sonuçlar üzerinden elde edilmiş olup sertlik – BKG arası ilişki Şekil 4,9’da görülmektedir.

$$H_{VAB} = -k_1 \sigma_R + k_2 \quad (4.2)$$

k_1 ve k_2 katsayıları γ -TiAl alaşımı için sırasıyla 0,553 ve 88,42 olarak, IN939 alaşımı için sırasıyla 0,1001 ve 317,96 olarak elde edilmiştir. Sertliğin darbeleme işlemi sonrası oluşan BKG ile arttığı Soyama ve Korsunsky (2022) çalışmasında da ifade edilmiştir [78].



Şekil 4.9. LŞD sonrası oluşturulan BKG ve işlemsiz yüzeyin sertliği arası ilişki

4.4. Yüzey Pürüzlülük

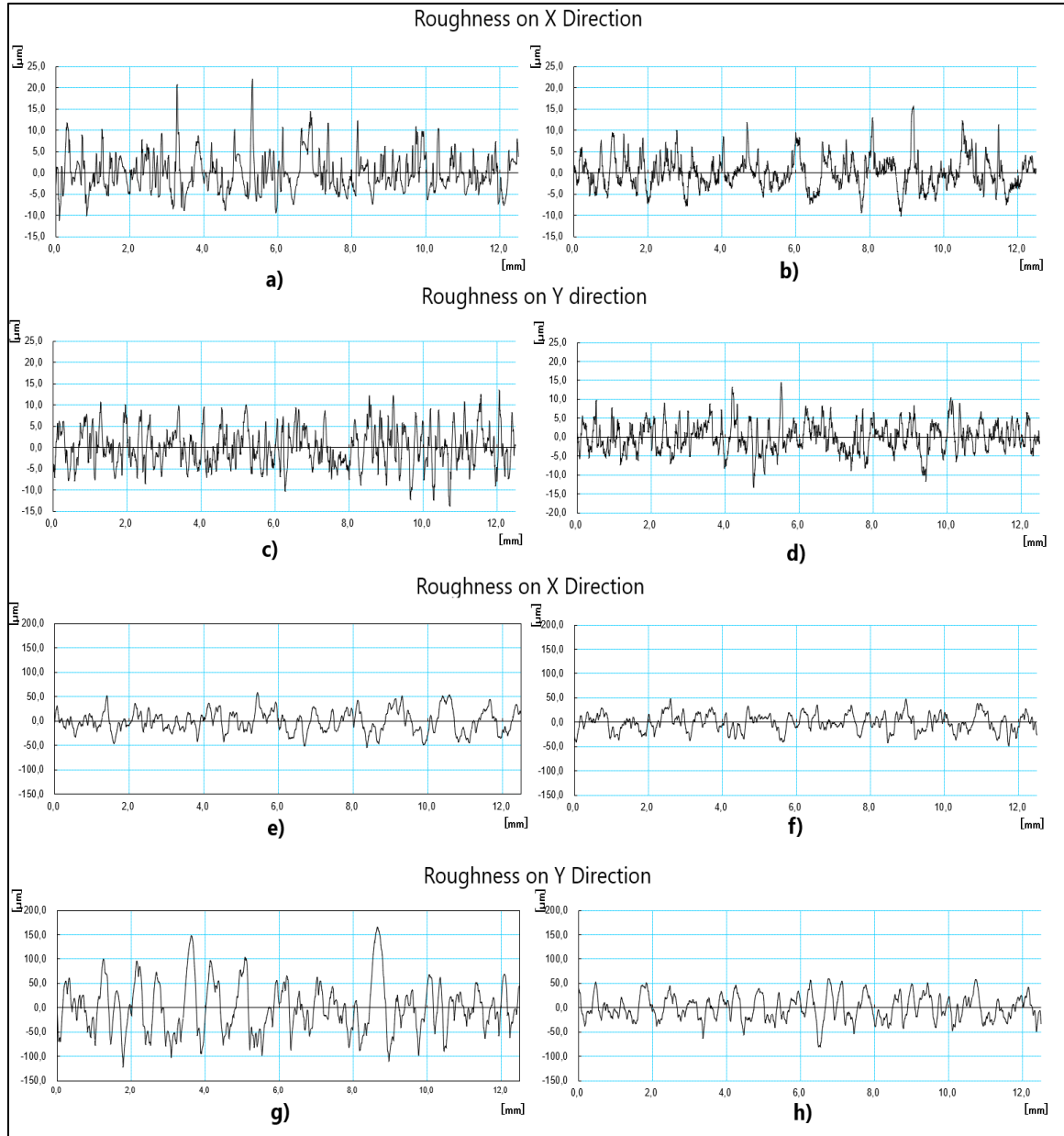
Metal malzemelerde özellikle yorulma hasarı açısından bakıldığında çatlakların çoğunlukla yüzeyden başladığı bilinmektedir [7, 8]. Buna ek olarak, toz yataklı eklemeli imalat yöntemiyle üretilen malzemelerde yüzey pürüzlülüğü ergimeyen tozlar, merdiven etkisi gibi sebeplerle oldukça yüksek olarak elde edilmektedir. Bu bağlamda yüzey özelliklerinden yüzey pürüzlülüğünün de incelenmesi yorulma davranışı açısından önemlidir. Bu bölümde LŞD işleminin metal Eİ numunelerin pürüzlülüklerini nasıl etkilediği incelenmiştir.

Numuneler öncelikle iki grupta değerlendirilmiştir. İlk grup numunelerin yüzeyinden herhangi bir malzeme temizliği olmamış yani Eİ sonrası olan yüzeydeki pürüzlülükler ölçülmüştür. İkinci grupta ise yüzeyden zımparalama yolu ile yapılan düzleştirme sonrası olan yüzeyde ölçümler gerçekleştirilmiştir. İlk grupta (zımparalanmamış) çizgisel olarak hem çizgisel (R_a , R_z) hem de alansal (S_a , S_z , S_q) pürüzlülük değerleri üzerinden değerlendirilme yapılırken ikinci grupta (zımparalanmış) ise sadece R_a , R_z parametreleri üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin değerlendirilmesinde hem çizgisel (R) hem de alansal (S) olarak ölçümler üzerinden yapılabilmektedir. Pürüzlülük sonucunda elde edilen parametreler maksimum yükseklik (R_z , S_z), maksimum vadi derinliği (R_v , S_v), maksimum

tepe noktası yüksekliği (R_p , S_p), aritmetik ortalama sapma (R_a , S_a) ve kök ortalama kare sapması (R_q , S_q) şeklindedir. Bu parametrelere ek olarak ise elde edilen sonuçların istatistiksel olarak dağılımlarını ifade eden çarpıklık (R_{sk} , S_{sk} , ing. skewness) ve basıklık (R_k , S_k , ing. kurtosis) parametreleri üzerinden de yüzey pürüzlülüğü üzerine çıkarımlar yapılabilir. Çarpıklık pürüzlülük değerlerinin dağılımının simetrikliği ile ilgilidir. Eğer çarpıklık değeri sıfıra dağılım simetriklik gösterir. Öte yandan dağılım sıfırın altında kalan bölgedeysen çarpıklık negatif, sıfırın üstünde kalan bölgedeysen pozitif çarpıklık olarak adlandırılmaktadır. Basıklık parametresi ise elde edilen pürüzlülük değerlerinin dağılımdaki keskinliği bildirmektedir. Basıklık değeri eğer üçten küçükse yükseklik dağılımı ortalamanın üstünde, üçe eşitse normal dağılım ve üçten büyükse sivrilmiş şekildedir.

Çizelge 4.7-8-9-10’da çizgisel olarak yapılan pürüzlülük ölçüm sonuçları görülmektedir. LŞD işleminin tek kat yapılan darbelemde pürüzlülüğe etkileri zımparalanmamış+işlemsiz ile zımparalanmamış+LŞD işlemlisi, zımparalanmış+işlemsiz, ile zımparalanmış+LŞD işlemlisi numunelerin karşılaştırmalı olarak incelenmesi sonucunda değerlendirilmiştir. Ek olarak Resim 4.10’da zımparalanmamış numunelerin yüzeylerinin çizgisel ölçümü grafiksel olarak verilmiştir. Bu değerlendirmelere ek olarak, zımparalanmamış numunelerde alansal pürüzlülük ölçümleri de yapılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çizelge 4.11’de üç boyutlu optik profilometre ile yapılan ölçümlerin sonuçları, Resim 4.12 – 13 ‘de ise profilometre ölçüm yapılan alanların görüntüsü grafiksel olarak verilmiştir. Böylece LŞD işleminin toz yataklı Eİ ürünü yüzeylerin pürüzlülük değerleri üzerine etkisi detaylıca incelenmiştir.



Şekil 4.10. İki boyutlu yüzey pürüzlülük profilleri, (a-c) SLE IN939, (b-d) SLE+LŞD IN939, (e-g) EIE γ -TiAl, (f-h) EIE+LŞD γ -TiAl

Çizelge 4.7. Zımparalanmamış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrasında çizgisel pürüzlülük değerleri

Zımparalanmamış Numuneler (Y yönü)				
Numune	Ra (μm)	Rz (μm)	Değişim (Ra)	Değişim (Rz)
SLE işlemsiz	4,456	30,489	%21,3 ↓	%39,3 ↓
SLE-LŞD	3,506	18,498		
EIE işlemsiz	22,505	95,81	%0,99 ↓	%14,2 ↑
EIE-LŞD	22,281	109,47		

Çizelge 4.8. Zımparalanmamış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrasında çizgisel pürüzlülük değerleri

Zımparalanmamış Numuneler (X yönü)				
Numune	Ra (µm)	Rz (µm)	Değişim (Ra)	Değişim (Rz)
SLE işlemsiz	4,996	29,968	%14,7 ↓	%3,34 ↓
SLE-LŞD	4,262	28,966		
EIE işlemsiz	26,67	141,075	%5,3 ↑	%2,2 ↓
EIE-LŞD	28,084	137,925		

Çizelge 4.9. Zımparalanmış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrasında çizgisel pürüzlülük değerleri

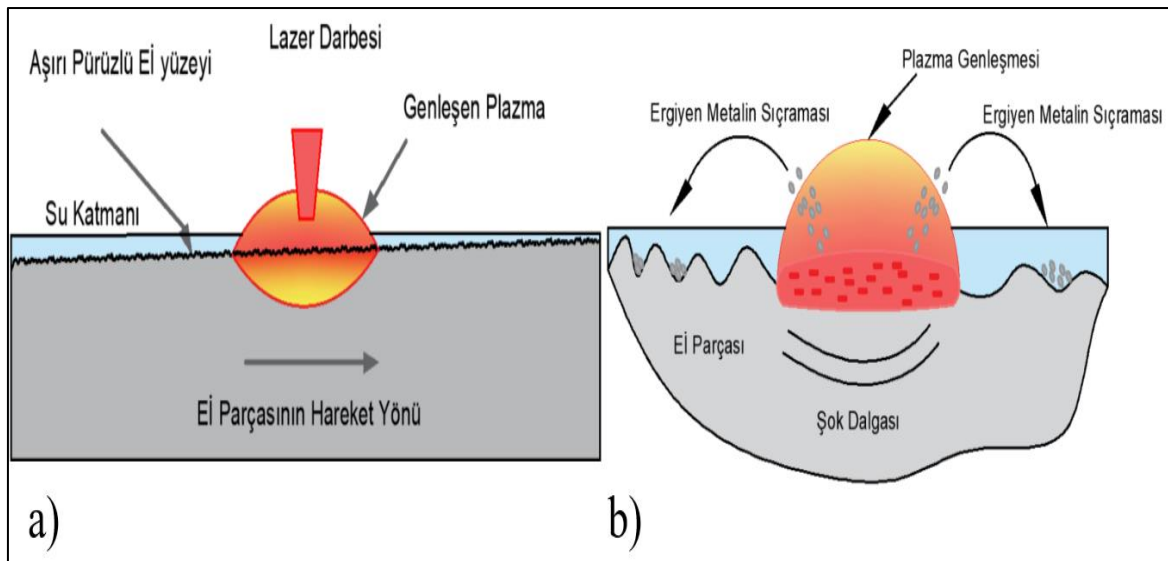
Zımparalanmış Numuneler (Y yönü)				
Numune	Ra (µm)	Rz (µm)	Değişim (Ra)	Değişim (Rz)
SLE işlemsiz	0,258	2,223	4x ↑	3x ↑
SLE-LŞD	1,377	9,343		
EIE işlemsiz	1,142	15,427	1,5x ↑	1,4x ↑
EIE-LŞD	2,878	36,880		

Çizelge 4.10. Zımparalanmış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrasında çizgisel pürüzlülük değerleri

Zımparalanmış Numuneler (X yönü)				
Numune	Ra (µm)	Rz (µm)	Değişim (Ra)	Değişim (Rz)
SLE işlemsiz	0,203	2,15	7x ↑	4x ↑
SLE-LŞD	1,628	10,788		
EIE işlemsiz	1,523	10,26	%42,1 ↑	%66,7 ↑
EIE-LŞD	2,165	17,109		

Çizgisel ölçüm sonucu elde edilen Ra ve Rz parametreleri incelendiğinde, toz yataklı Eİ üretimi sonrası pürüzlü bir yüzeye sahip olan EIE γ -TiAl ve SLE IN939 numunelerinde, LŞD işleminin sonrasında pürüzlülük değerlerinde bir azalma meydana geldiği gözlenmiştir (bkz. Çizelge 4.7 – 8). LŞD işlemi sonrası numune yüzeyi incelendiğinde lazerin termal etkileri nedeniyle LŞD alanı sınırı dışında kalan bölgelere ergimiş metallerin sıçradığı görülmektedir (bkz. Resim 4.1). Bu bölgesel olarak ergiyen ve etrafa sıçrayan metaller derin vadileri doldurmuş ve bu nedenle de yüzey pürüzlülüğünde azalma elde edilmiş olabilir. Benzer bir uygulama olan nano saniye lazer parlatma (ns-LP) işleminin uygulandığı çalışmada ns-LP etkileri toz yataklı Eİ yöntemleri ile üretilen Ti64 ve Scalmalloy (Skandiyum-Alüminyum-Magnezyum) alaşımları üzerinden karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. İşlem parametreleri lazer pals süresi (ns) ve lazerin enerjisinin lazer spot alanı üzerine dağılımı olarak bilinen lazer etkinliği (J/cm^2) Ti64 için 100 ns – 3,1 J/cm^2 ve Scalmalloy için 200 ns – 23,4 J/cm^2 şeklindedir. Lazer spot çapı ise 70 – 135 mikron

arası değişmektedir. Elde edilen sonuçlara göre Ti64 alaşımı için %84 ve Scalmalloy için ise %65 pürüzlülük azalması elde etmişlerdir. Öte yandan ns-LP işlemi için en önemli parametreleri lazer pals süresi (ns) ve lazer etkinliği (J/cm^2) olarak belirlenmiştir [79]. LŞD işleminin öncelikli görevi yüzey kalıntı gerilme profilini değiştirmek olduğundan asıl amaç yüksek şok basınçları oluşturarak yüzeyde plastik deformasyon sağlamaktır. Bu nedenle, ns-LP işleminden farklı olarak lazer pals süresi ve lazer etkinlik değerleri daha farklı olarak uygulanmaktadır. Yapılan tez çalışmasında lazer darbe süresi 10 ns değerindedir. Buna ek olarak EİE γ -TiAl ve SLE IN939 numuneleri için lazer etkinliği sırasıyla $50 J/cm^2$ ve $80 J/cm^2$ şeklindedir. İki uygulamadaki parametrelerdeki farklılık açıkça görülmektedir. LŞD işleminde alan başına düşen enerji oldukça fazla ancak süre oldukça kısadır. Bu nedenle parlatma işleminde olduğu gibi kontrollü bir ergitme elde edilememesi normaldir. Ayrıca, LŞD işleminde daha güçlü bir enerji girdisiyle yüzeye çarpan lazer darbeleri ve buna ek olarak robot kolunun hareketi sonucu az miktarda yüzeyden ergiyerek kopan malzeme diğer bölgelere sıçrayarak vadileri doldurabilir. Bu durumun şematik olarak gösterimi Şekil 4.11'de verilmiştir. Ayrıca, bahsedilen çalışmada pürüzlülüğün önemli ölçüde azaltılabilmesi için lazer işleminin tekrarlı olarak en az 10 kez uygulanmasının gerekliliği ifade edilmiştir [79] Yapılan tez çalışmasında ise işlem tek katman olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, toz yataklı Eİ yöntemleriyle üretilen numunelerin yüksek pürüzlü yüzeylerinde LŞD işleminin olumlu anlamda etkileri az da olsa bulunmaktadır.



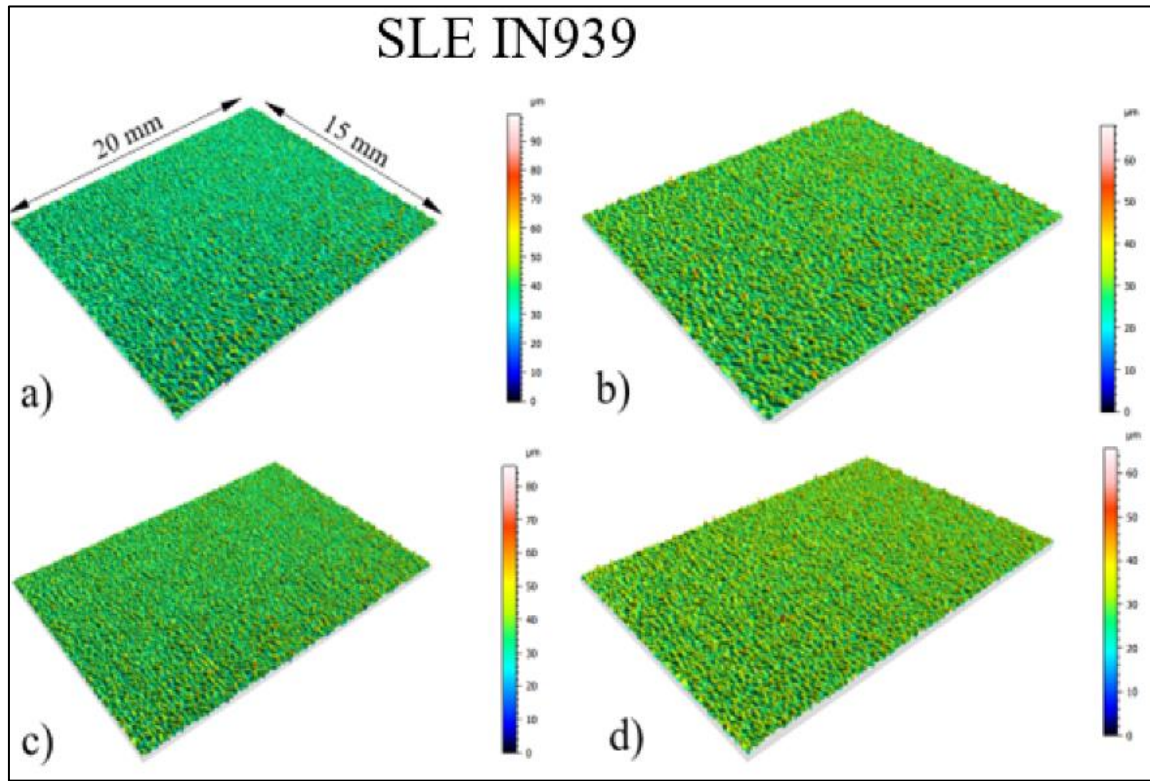
Şekil 4.11. LŞD işleminin pürüzlülüğe etkisi, (a) yüksek pürüzlülüğe sahip Eİ yüzeyi, (b) plazma genişlemesi ile etrafa yayılan ergimiş metaller

LŞD işleminin zımparalanmış Eİ numunelerin yüzey pürüzlülüklerine etkisi ise Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir. LŞD işleminin yüksek pürüzlü Eİ yüzeyine etkisi pürüzlülüğü azaltma yönünde iken, düzleştirilmiş yüzeyde LŞD ciddi anlamda pürüzlülüğü artırmıştır. Benzer yüzeylerde lazer darbelemenin uygulandığı çalışmalarda yakın sonuçlar gözlenmiştir [70, 80, 81]. Salimianrizi, Foroozhmer, Bardossamay ve Farrokhpour (2016) yaptıkları çalışmada pürüzlülüğü az olan düz yüzeylere LŞD uygulaması sonucunda pürüzlülükte artış tespit etmişlerdir. Ek olarak, koruma katmanı kullanılsa bile yüksek tekrarlı lazer darbeleme sonrasında veya overlap miktarının %70'i geçmesi durumunda koruma katmanının kalktığı gözlenmiştir [80]. Gill, Telang ve Vasudevan'ın (2015) yaptığı çalışmada ise LŞD işlemini düşük pürüzlülüğe sahip yüzeylere koruma katmanlı ve koruma katmansız olarak uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar ise Ra değeri işlemsiz yüzeyde 0,12 mikron iken korumalı LŞD işlemi sonucu 1,87 mikrona ve korumasız LŞD işlemi sonucu 19 mikrona yükselmiştir [70]. LŞD işleminin korumasız olarak uygulanması sonucunda pürüzlülüğün düşük olduğu yüzeylerde ciddi anlamda pürüzlülükte artışlar meydana gelmektedir. Bu durum, yüksek ısı etkilerden kaynaklı meydana geldiği düşünülmektedir. Yüksek pürüzlü yüzeylerde lazerin ısı etkileri sonucunda etrafa sıçrayan eriyik metaller pürüzlülükte azaltma meydana getirirken, yüzey düşük pürüzlülükte iken tersine etki göstererek pürüzlülüğü artırmaktadır.

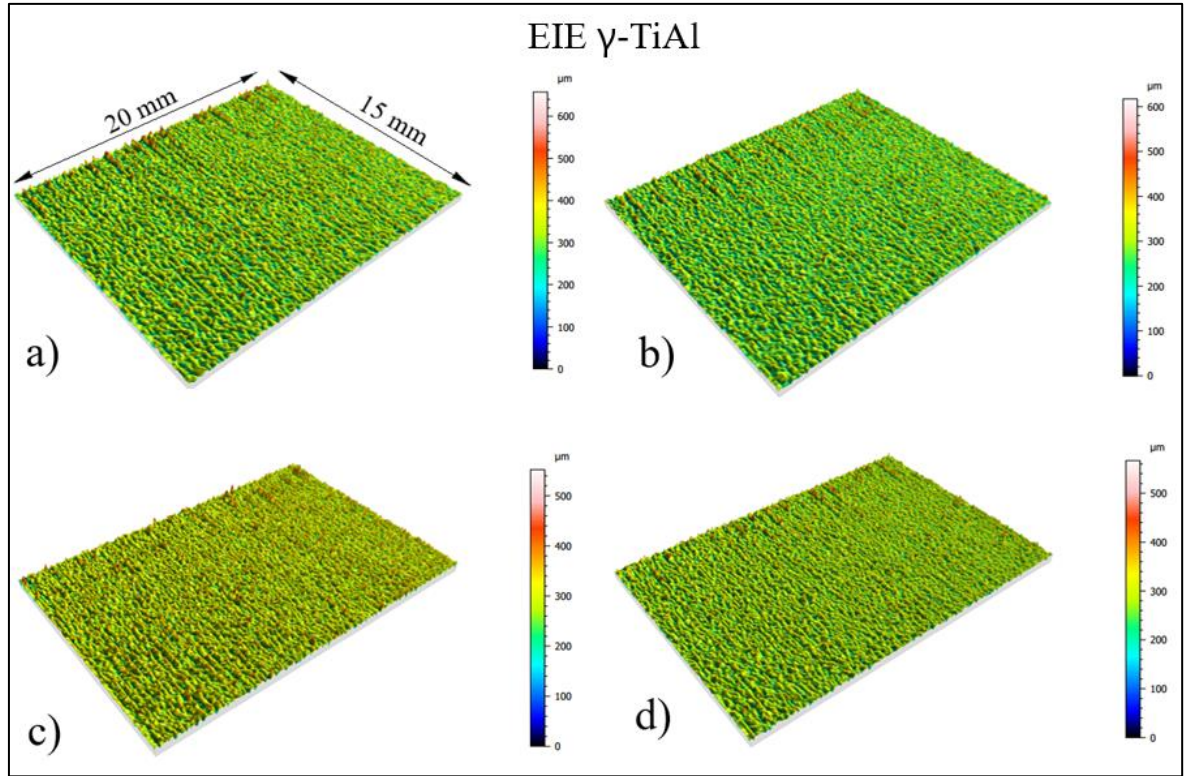
Yüksek pürüzlülüğe sahip olan zımparalanmamış EİE γ -TiAl ve SLE IN939 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri alansal ölçüm sonucunda elde edilen Sa, Sz ve Sq üzerinden incelenmiştir. Çizelge 4.11'e bakıldığında çizgisel ölçüm sonuçlarına paralel şekilde LŞD işlemi sonrası pürüzlülük değerlerinde azalma gözlenmiştir. LŞD işleminin yüzey karakteristik özelliklerine etkisi öncelikli olarak mikro sertlik ve kalıntı gerilme profilleri üzerinde görülmektedir. Buna ek olarak ise LŞD işlemi korumasız yapıldığında pürüzlülük üzerine de olumlu etkiler bırakabilmektedir. Her ne kadar LŞD işlemi üretim sonrası yüksek pürüzlü yüzey ile meydana gelen parçaların pürüzlülüğünü azaltsa da yine de gerçek uygulamalarda kabul edilebilir sınırlar içine çekilebilmesi için parametrelerin farklı bu duruma uygun seçilmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.11. Zımparalanmamış yüzeylerin LŞD işlemi öncesi ve sonrası alansal pürüzlülük değerleri

Numune	Zımparalanmamış numuneler					
	Sa (μm)	Sz(μm)	Sq (μm)	Değişim (Sa)	Değişim (Sz)	Değişim (Sq)
SLE	5,71	83,65	7,36			
SLE-LŞD	5,23	75,8	6,74	%8,41 ↓	%9,38 ↓	%8,42 ↓
EIE	50	637,5	63,25			
EIE-LŞD	42,1	559,5	52,7	%15,8 ↓	%12,23 ↓	%16,68 ↓



Şekil 4.12. IN939 numunelerin optik profilometre görüntüleri, (a-b) SLE IN939, (c-d) SLE+LŞD IN939



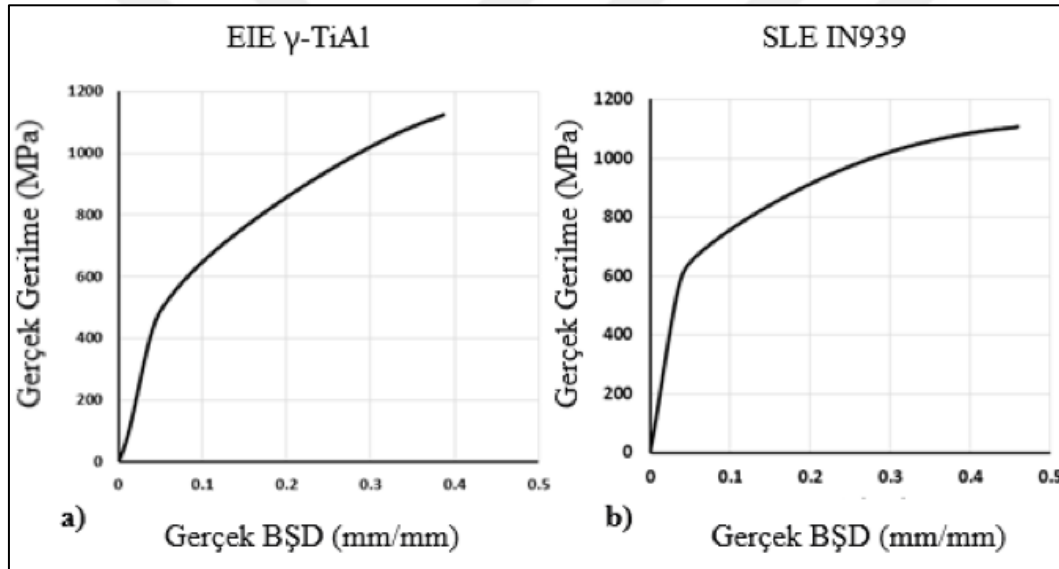
Şekil 4.13. γ -TiAl numunelerin optik profilometre görüntüleri, (a-b) EIE γ -TiAl, (c-d) EIE+LŞD γ -TiAl

5. LŞD İŞLEMİNİN SAYISAL MODELLEMESİ

Bu bölümde LŞD işleminin simülasyon ortamında modellenerek elde edilecek kalıntı gerilme profili ile deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır.

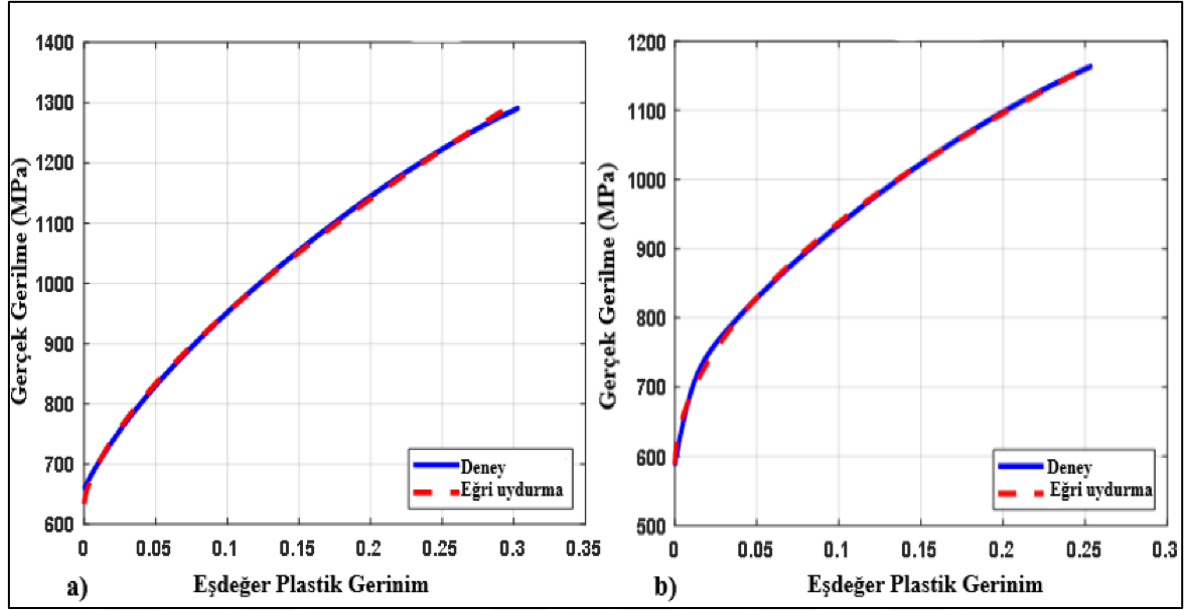
5.1. Malzeme Modeli Parametrelerinin Belirlenmesi

LŞD işleminin sayısal modellemesinin yapılabilmesi için öncelikle JC parametrelerinin belirlenmesi gerekmiştir. Bu bağlamda yapılan basma deneyleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme – gerçek birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 5.1.’de görülmektedir. Basma deneyi sonuçlarına göre ilk olarak akma gerilmesi ile temsil edilen A parametresi belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Basma deneyi sonuçları: (a) EIE γ -TiAl, (b) SLE-IN939

B ve n parametrelerinin belirlenmesi için ise elde edilen gerilme – birim şekilde eğrilerinin plastik bölgelerinden faydalanılmıştır. Johnson – Cook malzeme modeline göre bu bölgeyi tanımlayan ilişkiler Eş. 3.4’de verilmiştir. Bu eşitliğe göre Matlab programında eğri uydurma özelliğinden faydalanılarak B ve n parametreleri elde edilmiştir. Yapılan eğri uydurma işlemi Şekil 5.2’de görülmektedir. Sonuç olarak A, B ve n parametreleri Çizelge 5.1’deki gibi belirlenmiştir.



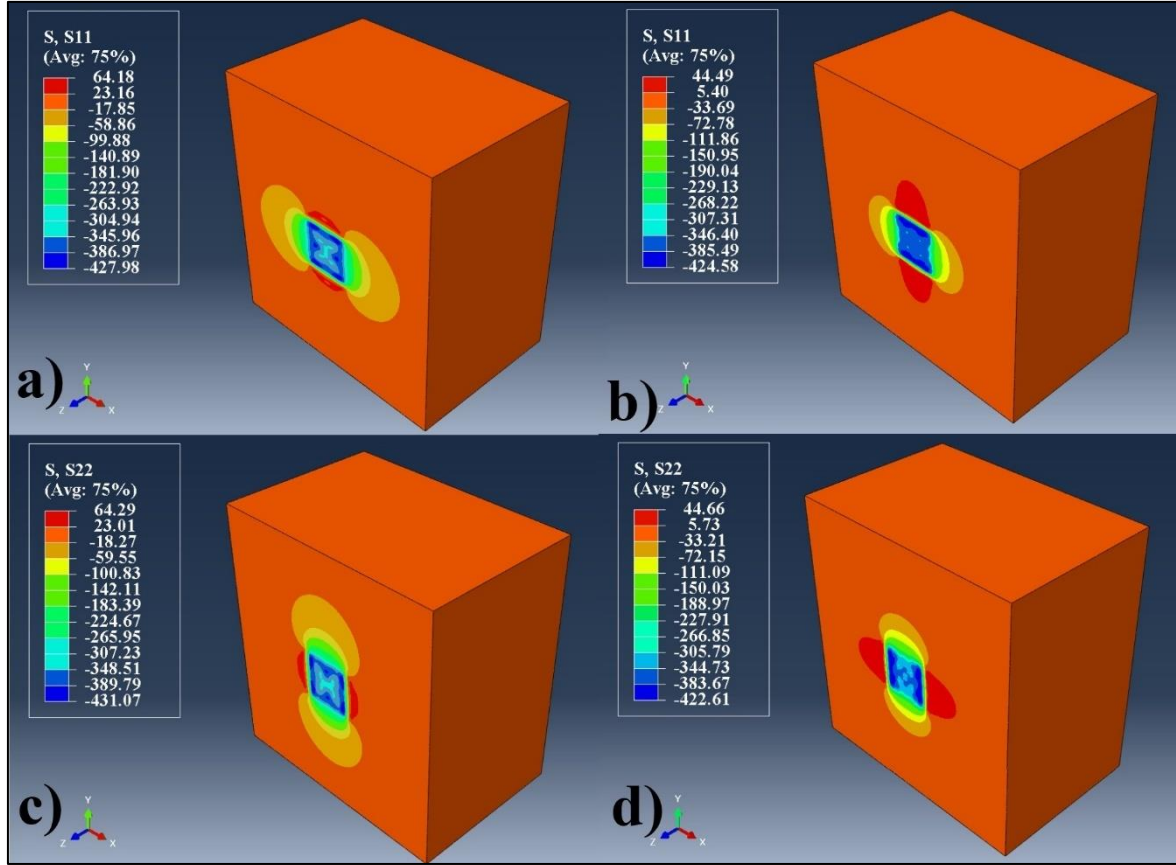
Şekil 5.2. Plastik bölge için yapılan eğri uydurma işlemi: (a) γ -TiAl (b) IN939

Çizelge 5.1. Basma deneyleri sonucunda elde edilen JC parametreleri

Malzeme	A	B	n	C
γ -TiAl	520	1299	0,6754	0,05031
IN939	684	1116	0,5419	0,0092

5.2. Simülasyon ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan simülasyon çalışmalarında elde edilen kalıntı gerilme sonuçlarının üç boyutlu model üzerinde görüntüsü Şekil 5.3'teki gibidir. Elde edilen sonuçlar deneyler ile yakın olarak gözlenmektedir. Ancak, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te verilen kalıntı gerilmelerin derinlik yönünde karşılaştırılması incelendiğinde uyumsuzluklar göze çarpmaktadır. Bu durumun birden fazla nedeni olabilir. Örneğin, ölçümlerin yapıldığı nokta ile simülasyonda incelenen bölge birebir aynı olmayabilir. Diğer bir neden yapılan simülasyon kısa süreli olması amacıyla ve şok basıncının modelin kenarlarından sekmesi nedeniyle tek darbe üzerinden yapılmıştır. Bunların yanı sıra elde edilen JC parametreleri statik basma deneylerinden olmasından dolayı yüksek birim şekil değiştirme içeren LŞD işlemini tam anlamıyla yansıtamamaktadır.



Şekil 5.3. Sayısal modelleme sonucu elde edilen kalıntı gerilme sonuçları: (a-c) IN939 için S11 ve S22 yönlerinde KG değerleri, (b-d) TiAl için S11 ve S22 yönlerinde KG değerleri.

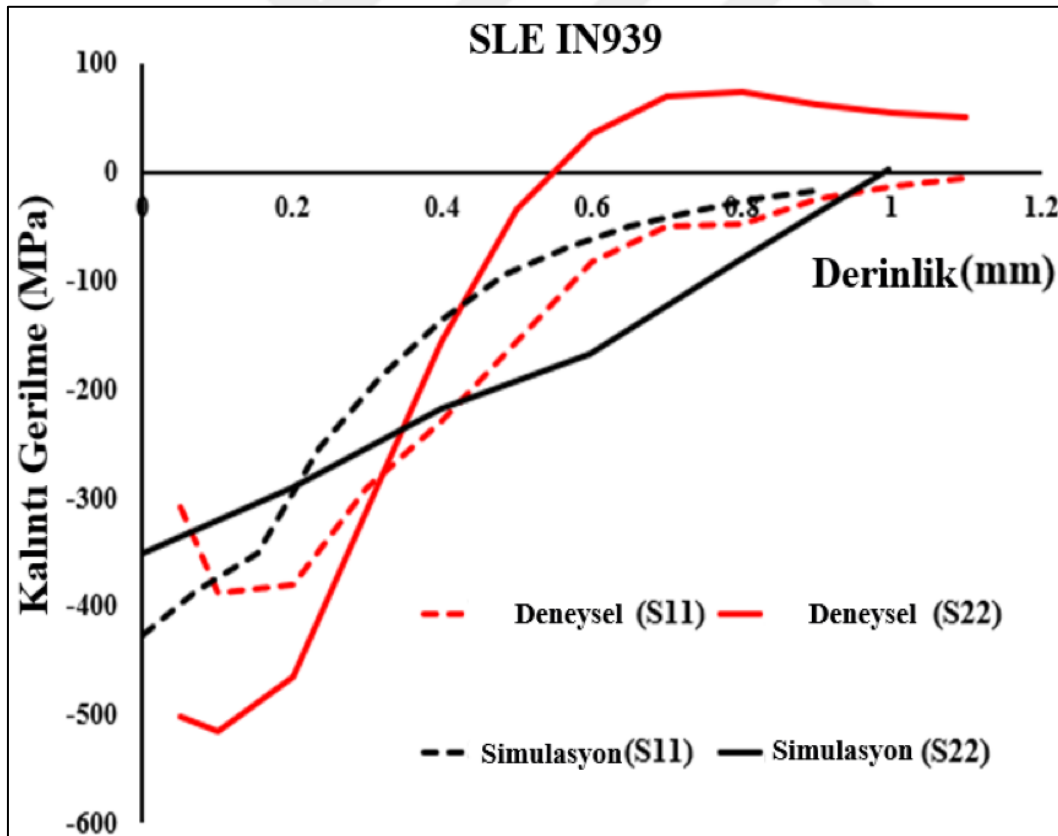
Çizelge 5.2. Deneysel ve simülasyondan KG profillerinin karşılaştırılması

Malzeme	Oryantasyon	MBKG (MPa)	% Hata	MBKGD (μm)	% Hata
EIE- γ -TiAl	S11 (Deney)	-451		900	
	S11 (Simülasyon)	-422	6,44	800	11
	S22 (Deney)	-460		700	
	S22 (Simülasyon)	-424	7,88	990	41
SLE-IN939	S11 (Deney)	-389		1150	
	S11 (Simülasyon)	-427	9,7	990	14
	S22 (Deney)	-519		600	
	S22 (Simülasyon)	-431	16,7	970	60

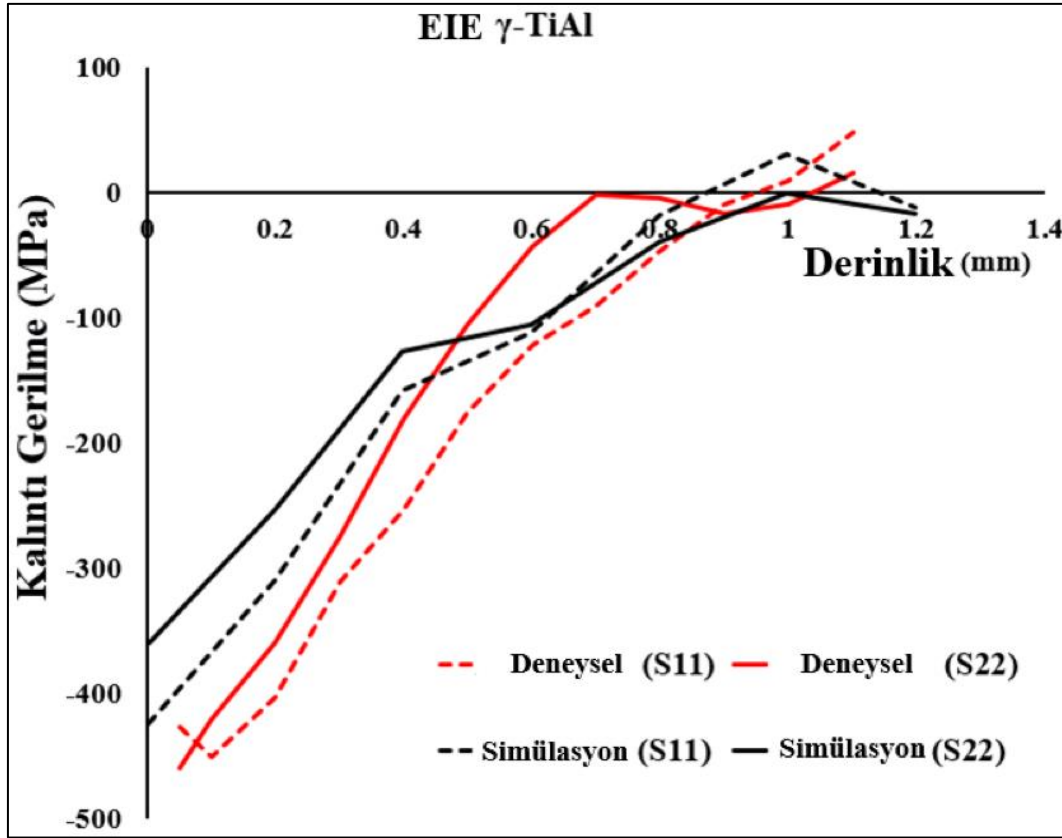
Her ne kadar KG değerleri yönünden deneysel sonuçlar ile tamamen aynı olmasa da yakın sonuçlarda görülmektedir. Şekil 5.4 incelendiğinde S11 yönündeki değerler IN939 alaşımı için uyumlu olduğu görülmektedir. Öte yandan, γ -TiAl alaşımı için hem S11 hem de S22 yönünde olan kalıntı gerilmeler arasındaki uyum göze çarpmaktadır. Bu kalıntı gerilme profilleri arasındaki uyum maksimum bası kalıntı gerilmesi (MBKG), bası kalıntı gerilmesi

maksimum derinliği (MBKGD) parametreleri üzerinden de incelenmiştir. Çizelge 5.2’de bu incelemeye yer verilmiştir. MBKG değerleri açısından simülasyonlar en az %6,44 en çok ise %16,7 hata gözlenmiştir. Öte yandan hata payı MBKGD parametresinde daha yüksek çıkmıştır. En az hata EIE- γ -TiAl S11 için %11 ve en çok hata SLE-IN939 S22 için %60 olarak gözlenmiştir.

Literatürde yapılan benzer çalışmalarda ise MBKG açısından simülasyon ve deneysel sonuçlar arası en iyi uyum %3’lük gibi düşük bir hata ile elde edilmiştir. IN718 için yapılan bu çalışmaların birinde JC parametresi belirlenirken [82], diğerinde deneysel olarak kalıntı gerilmeler elde edilmiştir [83]. Yapılan tez çalışmasında olduğu gibi simülasyonlar yapılarak bu iki çalışma karşılaştırıldığında MBKG deneysel için -702 MPa iken simülasyon için -678 MPa olarak belirlenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmasının deneysel çalışma ile derinlik boyunca olan kalıntı gerilmeler üzerinden karşılaştırılması Şekil 5.6’da verilmiştir.

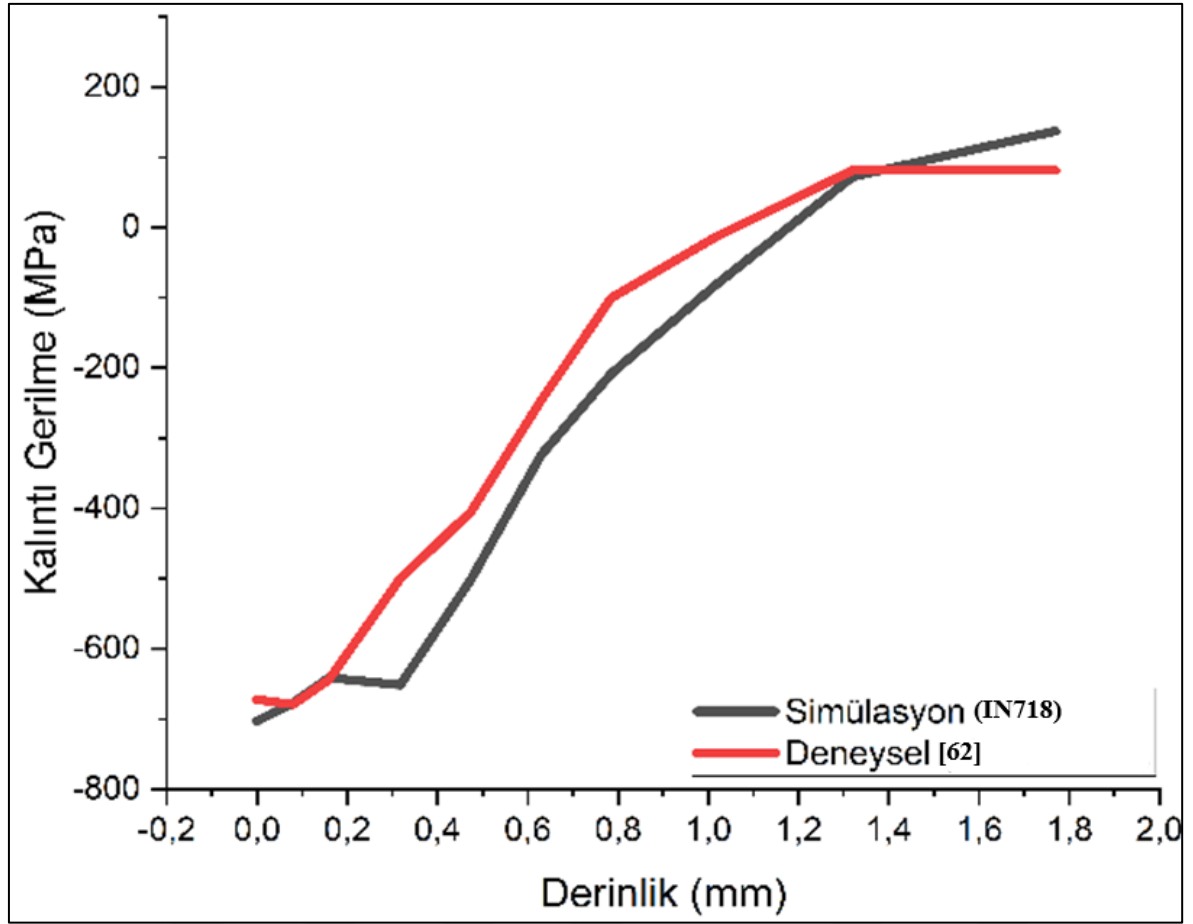


Şekil 5.4. SLE IN939 alaşımı için derinlik yönünde deneysel ve sayısal KG sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.5. EIE γ -TiAl alaşımı için derinlik yönünde deneysel ve sayısal KG sonuçlarının karşılaştırılması

LŞD işleminin simülasyonu önemli ölçüde yapılabilmektedir. Sayısal analiz için ise en önemli parametreler uygulanan plazma basıncının değeri, plazma basıncının zaman içinde dağılımı, malzemenin plazma basıncı altında davranışını belirleyen JC malzeme modeli şeklindedir. Özellikle malzeme davranışını belirleyen parametrelerin tespiti bu bağlamda daha önemlidir. Genelde bu parametrelerin eldesinde kullanılan Split-Hopkinson bar veya balistik testlerden faydalanılmaktadır. Ancak bu testler hem pahalı hem de oldukça zorlu süreçler içermektedir. Bu tez kapsamında malzeme parametreleri standart basma testleri ile elde edilmiştir. Sayısal modelleme sonuçları ile deney sonuçları arasındaki fark büyük ölçüde buradan kaynaklanmakla birlikte sayısal modelin tek darbe LŞD olarak yapılması da diğer bir etkidir. Yine de standart basma testlerinde de elde edilecek parametreler de kısmen kullanılabileceği bu tez çalışmasında gözlenmiştir.



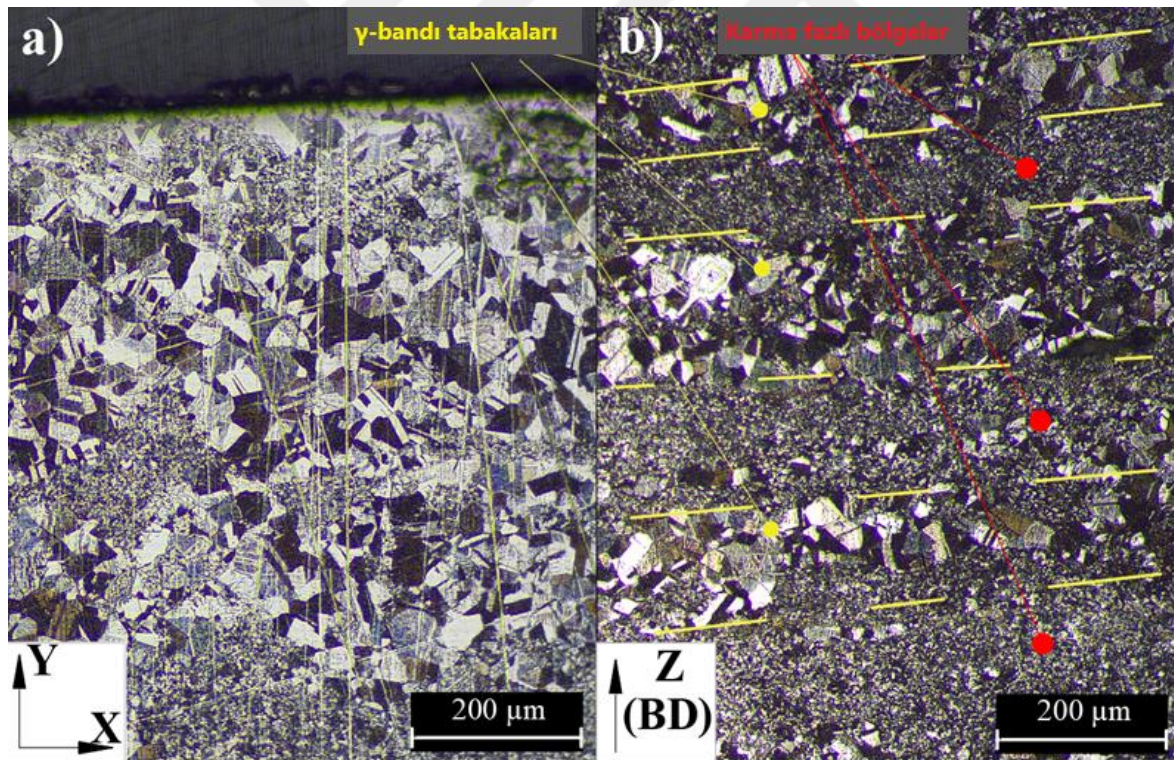
Şekil 5.6. Literatürde bulunan çalışmaların karşılaştırılması

6. LŞD İŞLEMİNİN YORULMA PERFORMANSINA ETKİLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde LŞD işleminin EIE γ -TiAl ve SLE IN939 alaşımlarının yorulma performanslarına etkileri incelenmiştir. Ek olarak ise yorulma davranışını açısından önemli olan diğer bir parametre mikro yapılarda bu bölümde incelenmiştir.

6.1. Mikro Yapı Analizi

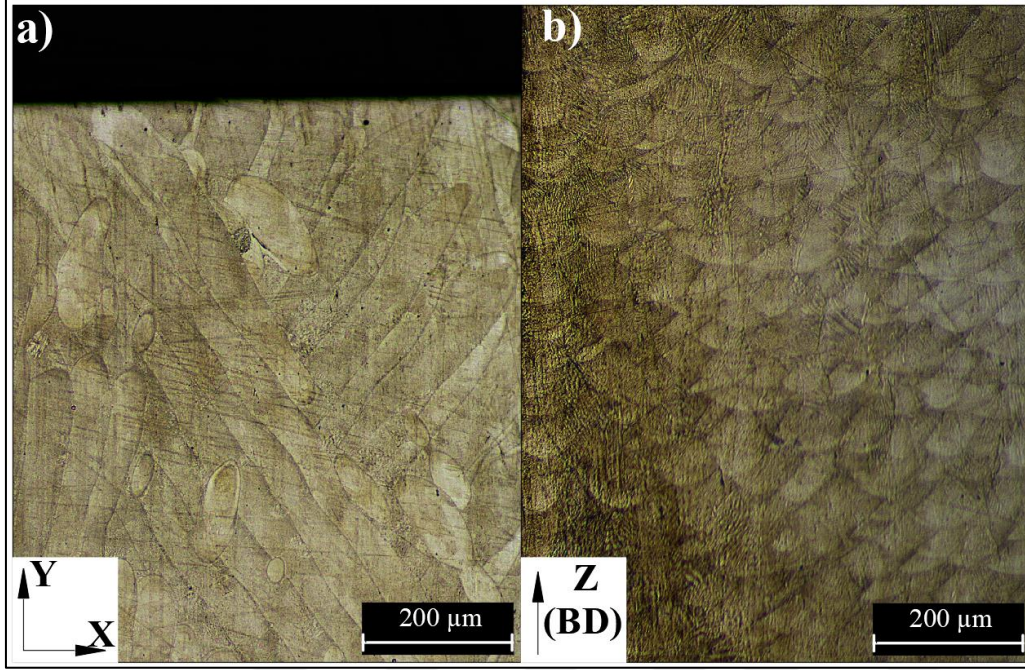
Resim 6.1'te, EIE γ -TiAl'in mikroyapısı yönlerle ilgili olarak görülebilir. Z yönündeki mikroyapı iki farklı katmana sahiptir. Bu katmanlar γ -bantları ve karma fazlı bölgeler olarak bilinir. γ -bant tabakaları iri eş eksenli γ tanelerinden oluşurken, karma fazlı bölgeler ince γ/α_2 lamel yapısı ve ince eş eksenli γ tanelerinden oluşur. EIE ile γ -TiAl üretildikten sonra benzer bir katmanlı oluşum başkalarının çalışmalarında da görülebilir [84, 85].



Resim 6.1. EIE γ -TiAl numunelerinin mikroyapısı, (a) X-Y düzleminde, (b) Z-yığıma yönünde.

SLE IN939 alaışımının mikroyapısının optik görüntüsü Resim 6.2'de görülebilir. Yapı yönündeki taneler SLE prosesi sırasında oluşturulan eriyik havuzu şeklindedir. Öte yandan,

X-Y düzlemindeki tanelerin şekli uzamıştır, bu da üretim sırasında lazer hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Benzer sonuçlar diğer çalışmalar tarafından da elde edilmiştir [86, 87].



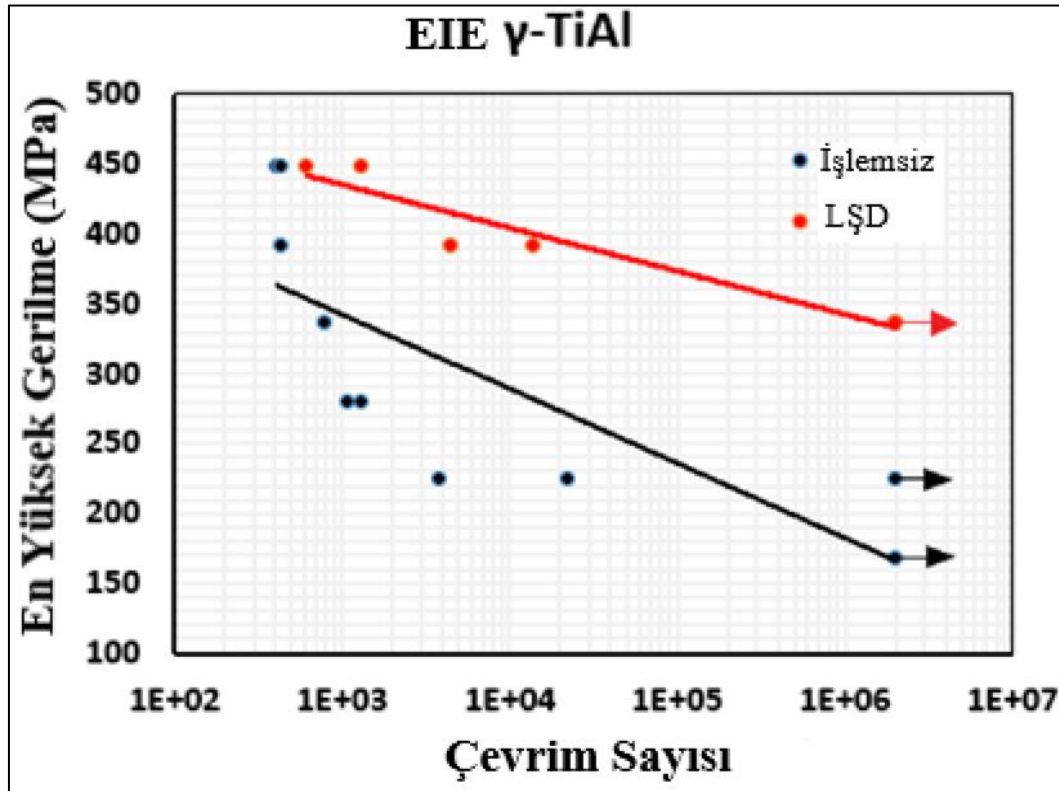
Resim 6.2. SLE IN939 numunelerinin mikroyapısı, (a) X-Y düzleminde, (b) Z-yığıma yönünde.

6.2. 4-Nokta Eğmeli Yorulma Deneyleri

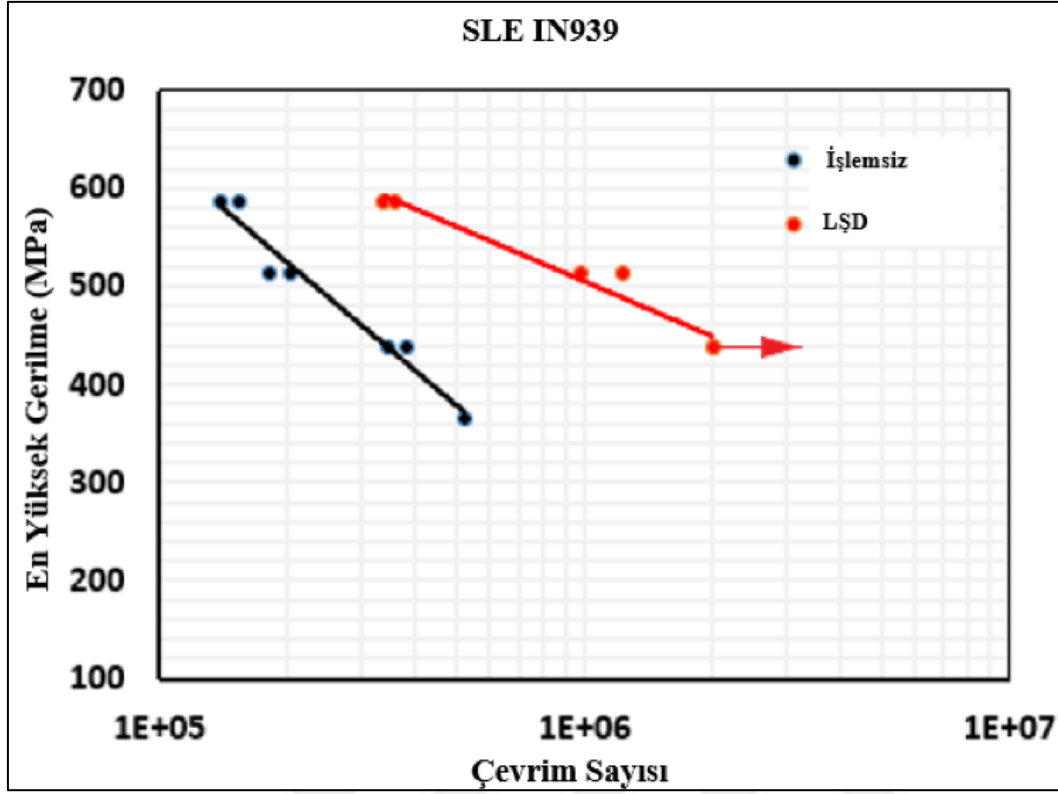
Şekil 6.1 – 6.2’de sırasıyla EIE γ -TiAl ve SLE IN939 numunelerin LŞD işlemli ve işlemsiz hallerinin yorulma performansları en yüksek gerilme değeri – çevrim sayısı olarak verilmiştir. Her iki şekilde ok ile ifade edilen veriler, ilgili numunenin çevrim sayısının iki milyon çevrime hasar görmeden ulaştığını belirtmektedir.

EIE γ -TiAl numunelerin yorulma performansı LŞD işlemi sonrası da %80 ve %70 akma değerlerinde önemli ölçüde bir artış elde edilememiştir. EIE γ -TiAl alaşımının kırılkan bir mikro yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Her ne kadar EIE ile üretimde ön ısıtma ile bu sorunlar azaltılmak istense de üretilen numunelerde meydana gelen bantlaşma bölgeleri, iri taneli yapılar ve buna ek olarak TiAl alaşımının sahip olduğu sıkı düzenli hekzagonal yapıda kayma sistemlerinin az olması gibi etkenler kırılkanlığa sebebiyet vermektedir. Bunlara ek olarak yüzey pürüzlülük durumunun da malzemelerin yorulma dayanımına etkisi bilinmektedir. EIE γ -TiAl alaşımı numunelerin pürüzlük değerlerinin ise çok yüksek

olduğu pürüzlülük ölçümleri sonucunda görülmektedir. Her ne kadar LŞD işleminin ısı etkileri pürüzlülüğü kısmen azaltmış olsa da EIE γ -TiAl alaşımı numunelerin pürüzlülüğü yine de çok yüksek olarak elde edilmiştir. Öte yandan, γ -TiAl malzemesinin yorulma limiti işlemsiz haldeyken %40 akma gerilmesi değeri olan 224,2 MPa, LŞD uygulanmış γ -TiAl numuneler için ise %60 akma gerilmesi değeri olan 336,5 MPa olarak elde edilmiştir. Böylece LŞD işlemi sonucunda EIE γ -TiAl numuneleri için yorulma limitinde %50 oranında bir artış gözlenmiştir.



Şekil 6.1. EIE γ -TiAl numunelerinin 4-nokta eğmeli yorulma deneyi sonuçları



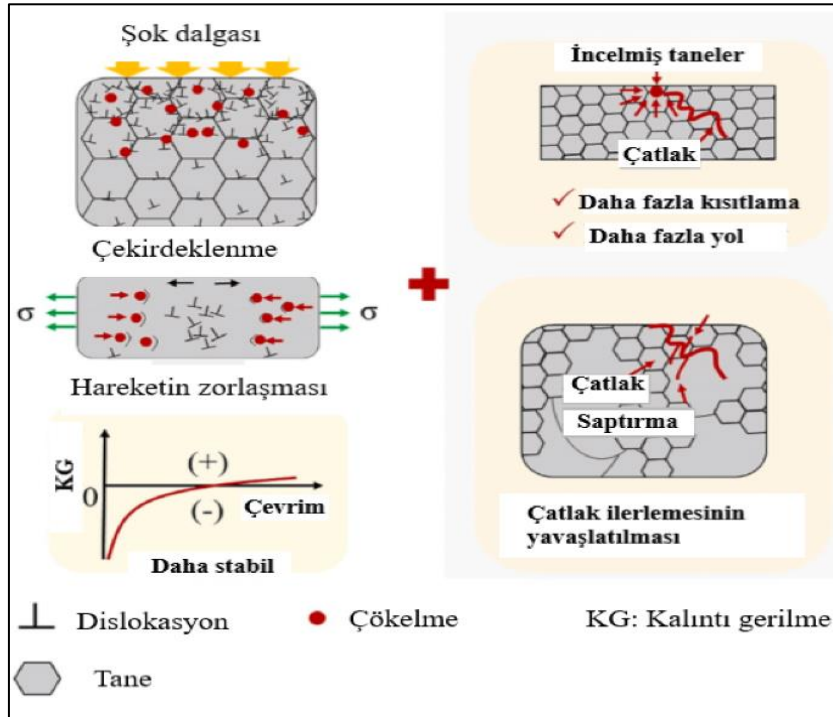
Şekil 6.2. IN939 numunelerinin 4-nokta eğmeli yorulma deneyi sonuçları

SLE IN939 numunelerinin sonuçları incelendiğinde ise γ -TiAl numunelerine göre farklı bir durum gözlenmektedir. IN939 alaşımı olan bütün numuneler yüksek çevrim yorulma bölgesi olan $10^5 - 10^7$ çevrim değeri aralığındadır. Ancak, SLE IN939 alaşımı işlemsiz numuneler için yorulma limiti değeri elde edilememiştir. Bu nedenle karşılaştırmalar aynı gerilme seviyesindeki çevrim sayısı üzerinden yapılmıştır. Çizelge 6.1’de aynı gerilme seviyelerinde SLE IN939 numunelerinde LŞD işlemi ile yorulma performansında meydana gelen değişimler görülmektedir. Akma gerilmesi değerinin %80’i olan 585,6 MPa değerinde işlemsiz SLE IN939 numuneleri 147 088 çevrim sayısında hasara uğrarken, LŞD işlemi sonrasında bu değer 1,37 kat artarak 348 260 değerine çıkmıştır. %60 ve %70 akma gerilmesi değerinde ise LŞD işlemi sonucunda sırasıyla 4,53 ve 4,76 kat daha yüksek çevrim sayısı elde edilmiştir. SLE IN939 alaşımının kristal yapısı yüzey merkezli kübik sistemine sahip olup daha çok kayma sistemine sahiptir. Buna ek olarak ise IN939 numunelerinin pürüzlülük değerleri γ -TiAl alaşımı numunelerine göre oldukça düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. LŞD işleminin de oluşturmuş olduğu yüksek bası kalıntı gerilmesi sonucu SLE IN939 numunelerin yorulma performansı önemli ölçüde artırılmıştır.

Çizelge 6.1. SLE IN939 numunelerinin aynı gerilme seviyelerinde 4-nokta eğmeli yorulma deneyi sonuçları

En Yüksek Gerilme (MPa)	Ortalama Çevrim Sayısı (İşlemsiz)	Ortalama Çevrim Sayısı (LŞD)	Ortalama İyileştirme
438,3	361 987,0	2E+6	4,53x
512,6	192 399,5	1 108 322,5	4,76x
585,6	147 088,5	348 260	1,37x

LŞD işlemi sonrasında yorulma performansında meydana gelen artışlar LŞD işlemi sonucunda yüzeyde meydana gelen plastik deformasyonlara dayandırılmaktadır. Yüksek enerjili lazer darbelerinin yüzey bölgesinde dislokasyon yoğunluklarını artırmakta ve yüzey bölgesinde tane sınırlarında dislokasyonların yığılmasına ve kitlenmesine neden olabilmektedir. Lazer şok basıncının yüzey bölgesinde bu sayede tane incelmeye de neden olduğu ifade edilmektedir. Bu durum metalin plastik şekil alabilme kabiliyetine de güçlü şekilde bağlıdır. LŞD sonrası malzemenin tekrar yüklemeye maruz kalması durumunda ise birbirine girmiş dislokasyonların hareketlenebilmesi için normalden daha yüksek gerilmeler gerekmekte ve bu sayede yorulma hasarının başlaması geciktirilebilmektedir [31, 37, 45].



Şekil 6.3. LŞD sonucu oluşan mikro yapının yorulma çatlaklarına direncinin şematik gösterimi [88]

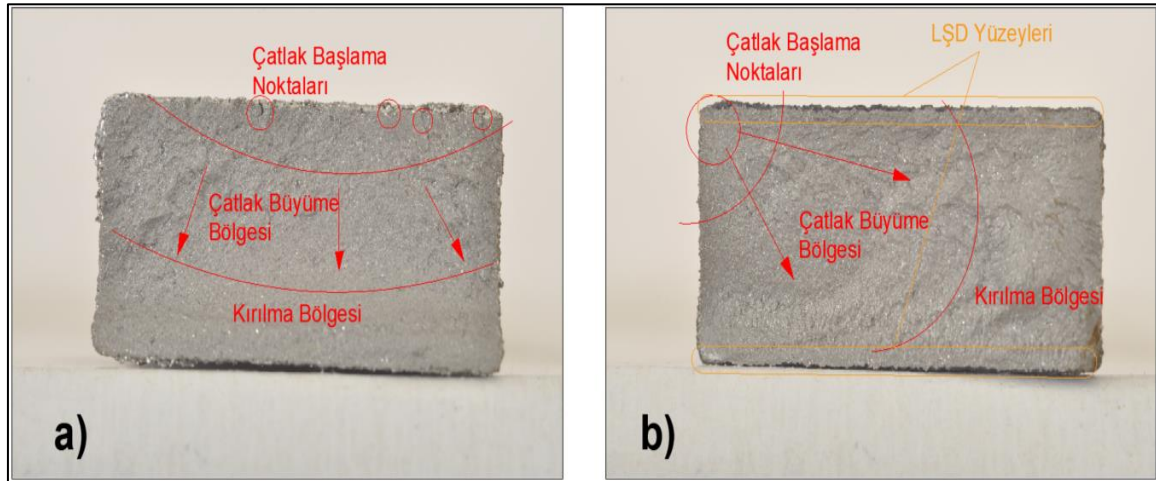
Literatürde LŞD işleminin Eİ ürünü alaşımların yorulma davranışlarına etkilerini inceleyen çalışmalar Çizelge 6.2’de özetlenmiştir. LŞD’nin yorulma performansını iyileştirmede faydalı olduğu literatürde bulunan çalışmalarda da net olarak görülmektedir. Tez çalışmasını bu çalışmalardan ayıran parametreler incelenen alaşımların farklılığı, LŞD dışında başka bir ardıl işlemin uygulanmaması ve LŞD uygulanma şekli olarak düşünülebilir. Farklı mikro yapıya sahip olan malzemelerde LŞD işleminin yüzeyde oluşturacağı güçlendirme mekanizması farklılaşabilir. Örneğin sıkı-düzenli hekzagonal kafes yapısına sahip malzemelerde sınırlı kayma sistemi nedeniyle ikizlenme mekanizması daha kolay meydana gelmektedir [31]. Öte yandan bazı çalışmalarda ise LŞD işlemi uygulanırken farklı yollar da denenmiştir. Örneğin, Kalentics ve diğerleri (2020) LŞD işlemini Eİ üretimine entegre etmişler ve malzemenin iç bölgelerinde de BKG oluşturmayı hedeflemişlerdir [33]. Öte yandan, diğer bir çalışmada ise yorulma dayanımında %97 gibi oldukça yüksek bir artış elde edilmiş ve bu çalışmada LŞD işlemi 6 tekrarlı lazer darbesi kullanılarak uygulanmıştır. Lazer darbesinin birden fazla uygulanması hem daha derinde BKG oluşturmakta hem de EY-BKG değerini daha derinde oluşturma imkanını artırmaktadır [89]. İşlem esnasında koruyucu katmanın kullanılması da dahil bu tür farklılıklar hali hazırda pahalı olan LŞD işlemini daha da pahalı hale getirmekte ayrıca işlem süresini de uzatmakta ve pratik olan işlemi karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, gerçek uygulamalarda geçerlilikleri tartışmalı hale gelmektedir. Bu tez çalışmasında ise bu tür yaklaşımlardan kaçınılmış Eİ üretimi sonrası en az ardıl işlemle yorulma performansını artırma yoluna gidilmiştir.

Çizelge 6.2. Eİ üretimi metallerde LŞD işleminin yorulma performansına etkilerinin araştırıldığı çalışmalar.

Malzeme	Eİ Yöntemi	Yorulma Dayanımında Artış	Çalışma
Ti-6Al-4V	EIE	%17	[32]
316L	SLE	%20 - %44	[33]
Ti-6Al-4V	SLE	%20	[34]
Ti-6Al-4V	EIE	%5	[34]
Ti-6Al-4V	SLE	%30	[37]
Ti-6Al-4V	SLE	%97	[89]
Maraging Çeliği	SLE	%43	[90]
15-5 PH SS	DMLS	%30	[91]
AlSi7Mg	SLE	%53	[92]
Al-2319	TAEİ	%62,5	[93]
IN718	SLE	%18-22 (yorulma ömrü)	[94]

6.3. Kırılma Yüzeyleri

Yorulma numunelerinin tüm kırılma yüzeyleri öncelikle fotoğraflanmış ve ardından çatlak başlangıcı, çatlak büyümesi ve kırılma bölgeleri belirlenmiştir. Bu aşamayı takiben, PBF işlemsiz ve PBF LŞD numunelerinin yorulma davranışını incelemek için SEM analizi yapılmıştır.

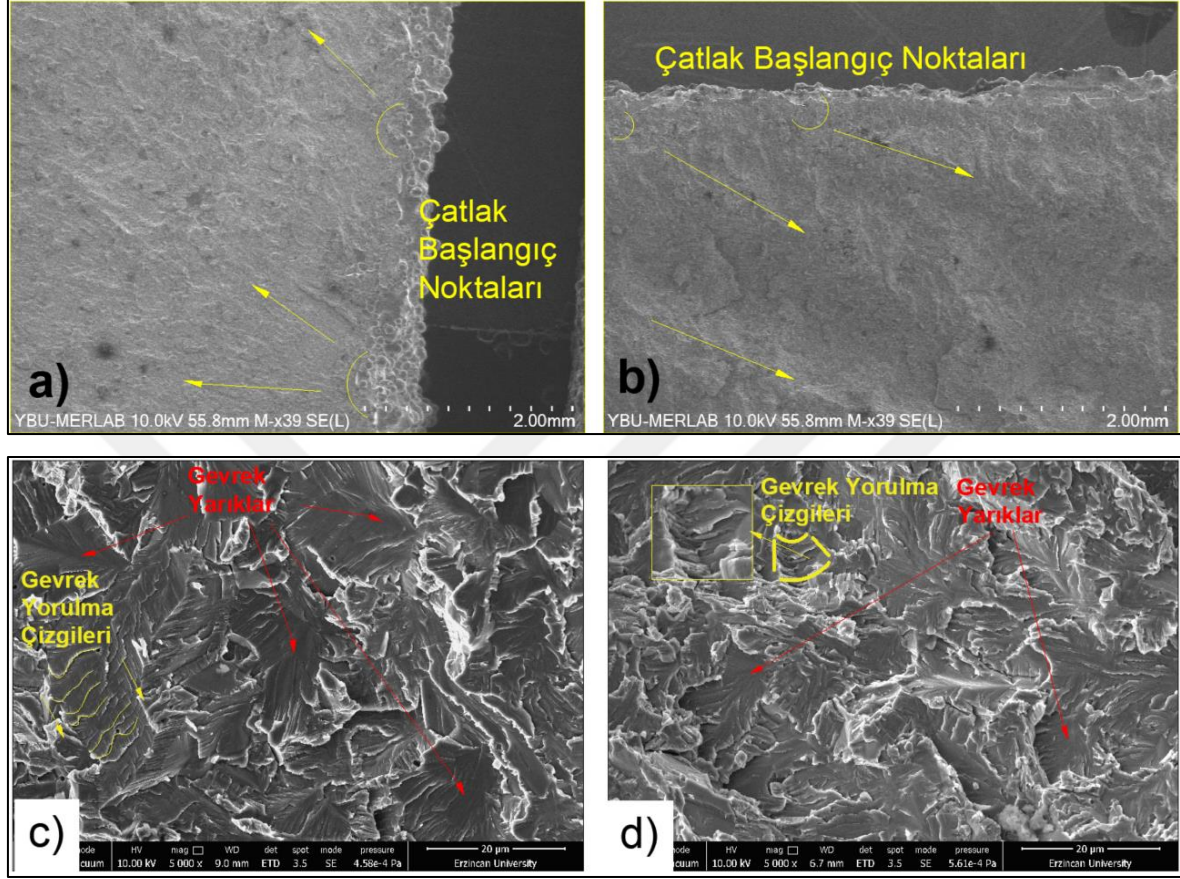


Resim 6.3. Dört-nokta eğme testlerinden sonra kırılma yüzeyleri, (a) EIE γ -TiAl numunesi (b) EIE γ -TiAl numunesi.

Resim 6.3'te EIE γ -TiAl numunelerinin tam kırılma yüzeyi görülebilir. Her iki numune türü için de gevrek bir kırılma davranışı tespit edilmiştir. Lazer son işlem yüzey sertliğini artırabilse ve artık gerilmenin etkisini bir seviyeye kadar azaltabilse de yüzeyin aşırı pürüzlülüğü ve alaşımın kırılma davranışı PBF γ -TiAl'in yorulma davranışı üzerinde daha fazla etkiye sahip olabilir.

Resim 6.4'te EIE γ -TiAl numuneleri için SEM incelemeleri görülebilir. Sonuç olarak, hem işlemsiz hem de LSP numuneleri gevrek bir şekilde hareket etmiş, yorulma davranışları da birbirine benzer olmuştur. Her iki tip EIE γ -TiAl numunesinde de yorulma çatlağı birden fazla noktadan başlamıştır. Numunelerin yüzeyi son derece pürüzlüdür ve Resim 5.6 (a-b)'de olduğu gibi erimemiş parçacıklar gözlemlenebilir. Bu nedenle, yorulma çatlağının başlama aşaması yüzeyde birden fazla yerde gerçekleşmiştir. γ -TiAl alaşımının gevrek davranışı aynı zamanda içsel mikro yapısından da kaynaklanmaktadır. γ -TiAl, α_2/γ lamel kolonileri veya metastabil α_2 - β_2 fazları olan farklı faz bileşimlerinden oluşur. Wang, Liu, Du, Liu ve Liao (2021) çalışmasında, γ -TiAl için çatlak oluşum mekanizması araştırılmıştır. Gözlemler,

yorulma çatlağının çoğunlukla α_2 ve β_2 fazları arasındaki bölgede başladığını göstermiştir [95].

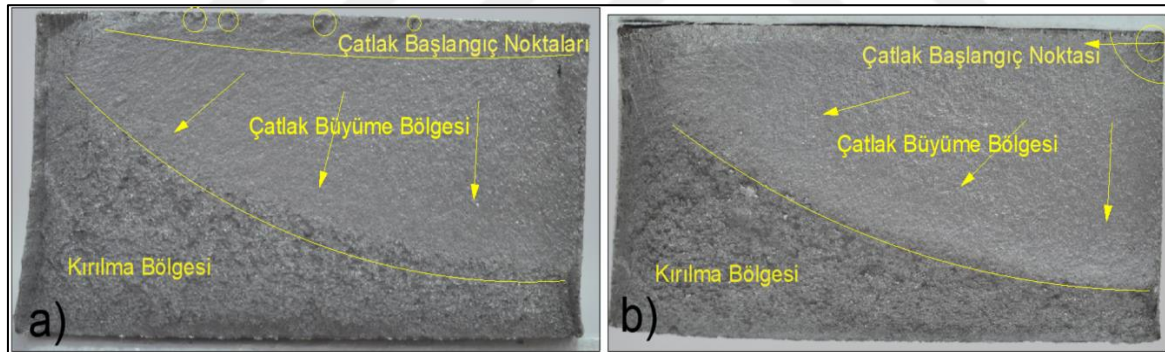


Resim 6.4.Kırılmış yüzeylerin SEM fotoğrafları, (a) EIE için çatlak başlangıç yerleri, (b) EIE-LSD için çatlak başlangıç yerleri, (c) EIE için kırılma mekanizmaları, (d) EIE-LSD için kırılma mekanizmaları.,

Çatlak ilerleme aşaması Resim 6.4 (c-d)'de görülebilir. Bu bölgede görülen yarıklar (ing. cleavage) yüzeyleri gevrek yorulma davranışının bir göstergesidir. γ -TiAl numunelerinin kırılma yüzeyleri Resim 6.4 (c-d)'de görüldüğü gibi çoğunlukla yarıklardan oluşmaktadır. Ayrıca, kırılma yüzeylerinde belirli bölgelerde az miktarda yorulma çizgileri (ing. striation) gözlenmiştir. Benzer bir sonuç Yu W. ve diğerlerinin (2022) çalışmasında da elde edilmiştir. Yazarlar, Ti47Al2Cr2NB alaşımı için oda ve 700°C sıcaklıklarda yüksek çevrimli yorulma davranışını ve deformasyon mekanizmalarını incelemişlerdir. Oda sıcaklığında test edilen numunelerin kırılma yüzeylerinde, çalışmamızda olduğu gibi yorulma arızasının çatlak ilerleme aşamasında bükülme ve dallanma göstermiştir. Ayrıca

α_2/β arayüzeyinde ve lamel kolonileri ile eş eksenli γ taneleri arasındaki sınırlarda mikro çatlakları uyaraabilen dislokasyon yığılmaları gözlemlemiştirler [96].

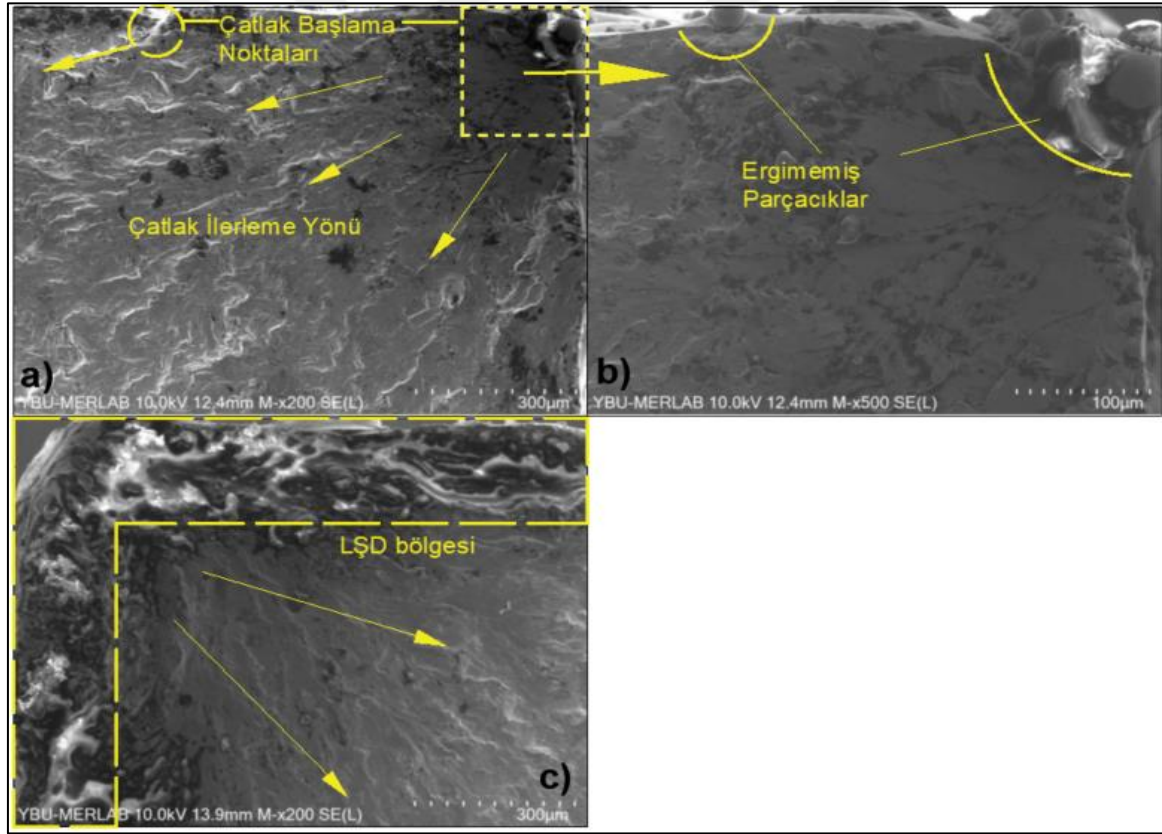
LŞD uygulanmış EIE γ -TiAl numuneleri, alaşımanın karakteristiği nedeniyle düşük yorulma performansı göstermiş olsa da 4-nokta eğme sonuçlarına göre yorulma limiti %50 artmıştır (bkz. Şekil 6.1). Yorulma limitindeki artış pürüzlülükteki azalmaya ve LŞD sonucu yüzeyde oluşan BKG'ne bağlanabilir. LŞD işleminin EIE γ -TiAl alaışının pürüzlülüğü üzerindeki etkisi Sa, Sz ve Sq değerlerin de sırasıyla %15,8, %12,23 ve %16,68 azalma yönünde tespit edilmiştir (bkz. Çizelge 4.11). Ek olarak BKG değerleri incelenirse (bkz. Şekil 4.4) yüzeyde LŞD sonucu -450 MPa civarında maksimum bir BKG oluşumu gözlenmiştir. Bu nedenle, LŞD'nin BKG etkisiyle birleşen pürüzlülük değerlerindeki azalma, yorulma limitindeki iyileşmenin açıklaması olabilir. Bununla birlikte, lazer şok işleme, yüzey veya ısıt işlemler gibi diğer işlemlerle birleştirilebilir. Bu nedenle, EIE γ -TiAl alaışının veya benzer alaşımların sorunlu doğası ortadan kaldırılabilir ve eklemeli üretimin avantajlarından daha iyi bir şekilde yararlanılabilir.



Resim 6.5. Dört-nokta eğme testlerinden sonra kırılma yüzeyleri, (a) SLE IN939 numunesi (b) SLE-LŞD IN939 numunesi.

SLE IN939 numunelerinin yorulma davranışı Resim 6.5'te görülebileceği gibi EIE γ -TiAl'den farklıdır. İşlemsiz ve lazerle soyulmuş IN939 numuneleri, EIE γ -TiAl alaışım numunelerinin aksine sünek bir davranış sergilemiştir. Resim 6.5 (a-b) hem işlemsiz hem de LŞD IN939 numuneleri için genel kırılma yüzeyini göstermektedir. Çatlak başlangıcı, ilerlemesi ve son kırılma bölgeleri IN939 numuneleri için daha belirgin olarak görülebilir. Hem üretildiği gibi hem de SLE-LŞD IN939 numuneleri için, yorulma çatlaklarının çoğu yüzeyden başlamıştır. İşlemsiz SLE numuneleri için birden fazla çatlak başlama yeri varken, LŞD numuneleri için yorulma çatlakları genellikle köşelerden başlamıştır. Çatlak

başlangıcını takiben çatlak ilerlemesi yüzeydeki nehir izlerinden (ing. river mark) tespit edilebilir [97]. LŞD işlemi ile yüzeyde sertlik artırabildiğinden ve BKG oluşumu sağlanmasından dolayı, yorulma çatlağı başlangıç yerleri köşelere doğru bastırılmış olabilir [98]. Ayrıca, LŞD uygulanmamış IN939 numunelerinin yüzeyindeki erimemiş parçalar yorulma performanslarını düşürebilir. Ancak, lazer yüzey işleminin ısı etkisi bu erimemiş parçacıkları hafifçe eritmiş olabilir. Resim 6.6 (a-b)'de, 512 MPa'da test edilen SLE IN939 numunesi üzerindeki çatlak başlangıç yerleri ve erimemiş bir parçacık gözlemlenebilir. Resim 6.6 (c)'de, LŞD işleminin oluşturduğu ısıdan etkilenmiş bölge açıkça görülmektedir. Buna ek olarak ise LŞD işlemli yüzeyde ergimemiş parçacıklar gözlenmemiştir. Nehir izleri SEM görüntülerinde kırık yüzeylerinin makro boyutta çekilen görüntülere göre daha görünürdür ve her iki numune türü için de çatlak büyüme yönüne paraleldir.

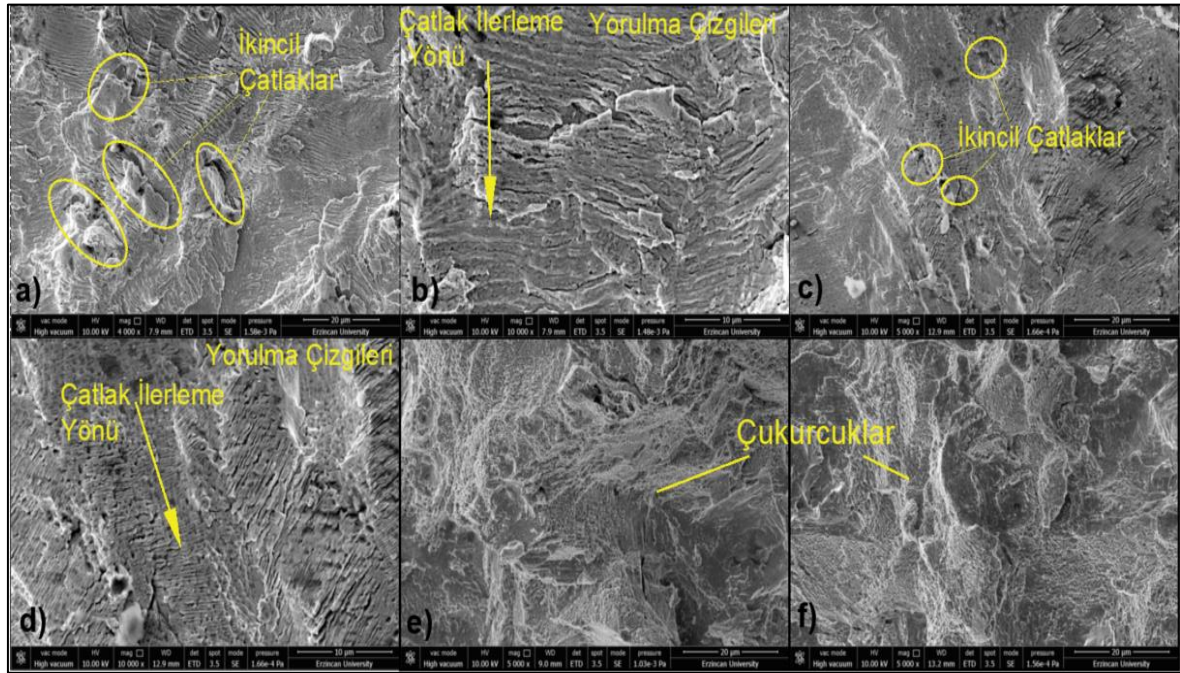


Resim 6.6. Kırılma yüzeylerinin SEM gözlemleri, (a) SLE IN939 numunesi için çatlak başlangıcı, (b) çatlak başlangıç noktasındaki erimemiş parçacıklar, (c) SLE-LŞD IN939 numunesi için çatlak başlangıç noktası.

Metaller için sünek yorulma davranışının bir başka göstergesi olan yorulma çizgileri, Resim 6.7 (b) - (d)'de IN939 numuneleri için net bir şekilde gözlemlenebilir. Yorulma çizgilerinin

aralığı ve dağılımı çatlak ilerleme hızı ile ilişkilendirilebilir. İkincil çatlaklar çatlak yönünü değiştirir ve çatlak ilerleme hızını azaltır [99]. İkincil çatlakların oluşumu, Resim 6.7 (a) - (c)'de görüldüğü gibi hem SLE hem de SLE-LŞD numuneleri için görülmektedir. Yorulma çizgilerinin arasındaki mesafe işlemsiz SLE numuneleri için daha yüksek olarak gözlenmiştir. Yorulma çizgisi aralığının büyüklüğü daha hızlı çatlak ilerlemesini ve daha düşük yorulma performansını ifade etmektedir [100]. Resim 6.7 (e)-(f) sırasıyla SLE ve SLE-LŞD IN939 numunelerinin son kırılma bölgelerini göstermektedir. Kırılma bölgesindeki çukurcuk (ing. dimple) oluşumu, SLE IN939 alaşımı için sünek yorulma davranışını da vurgulamaktadır.

SLE IN939 alaşımının yorulma performansında LSP sonrasında elde edilen artış, indüklenen BKG ve iyileştirilmiş sertlik ile ilişkilendirilebilir. LŞD'nin her iki etkisi de yüzeyden çatlak oluşumunu geciktirebilir. Ayrıca, Resim 6.7 (c)'de görülebileceği gibi LSP sonrasında erimemiş parçacıkları ortadan kaldırılmıştır. Bu nedenle, yüksek enerjili lazer atışlarının ısısının bir sonucu olarak pürüzlülük hafifçe iyileştirilebilmektedir. Lazer şok işleme sonrası işlemin tüm etkileri birleştirildiğinde, SLE IN939 yorulma performansı önemli ölçüde iyileştirilmiştir.



Resim 6.7. IN939 numunelerinde gözlemlenen yorulma kırılması mekanizmaları, (a)-(b)-(e) SLE IN939 numunesi, (c)-(d)-(f) SLE-LŞD IN939 numunesi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında EIE ile üretilen γ -TiAl ve SLE ile üretilen IN939 alaşımlarının yüzeylerine LŞD işlemi uygulanmıştır. Çalışmada ilk olarak LŞD işleminde yüksek lazer enerjisinin oluşturduğu plazma ve plazmanın genişmesi sonucunda oluşan basıncın Eİ ile üretilen malzemelerin yüzey bütünlüğüne etkileri kalıntı gerilme, mikro sertlik ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri üzerinden değerlendirilmiştir. Sonrasında ise Eİ ürünü metallerde çoğunluklar yüzeyde imalat sonrası oluşan kalıntı gerilmeler nedeniyle zayıf olan yorulma performanslarına LŞD işleminin etkisi 4-nokta eğmeli yorulma ve kırık yüzeylerin fotoğraflanması ile incelenmiştir. Sonuç olarak aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Bu çalışmada LŞD işlemi uygulanırken koruyucu bir katman kullanılmadığı için yüzeyde oksidasyon meydana gelmiştir. Yapılan SEM-EDS analizlerine göre işlem sonrası EIE γ -TiAl ve IN939 numuneleri için oksijen varlığı sırasıyla ağırlıkça %2,774 ve %1,052 şeklindedir.
- EIE γ -TiAl alaşımının üretim sonrası yüzeyden 1 mm derinliğe kadar olan bölgede kalıntı gerilme değeri 0 –75 MPa aralığında iken, SLE IN939 alaşımında üretim sonrası 0 – 660 MPa aralığında değerler gözlenmiştir, LŞD işlemi sonrası ise her iki numune içinde kalıntı gerilmeler bası yönüne çevrilmiştir. EIE γ -TiAl numunesi için en yüksek değerler X ve Y yönleri için sırasıyla -451 MPa ve -460 MPa şeklinde elde edilirken, SLE IN939 için bu değerler sırasıyla -389 MPa ve -516 MPa şeklindedir. Öte yandan, LŞD uygulanmış numunelerin BKG derinlikleri sırasıyla EIE γ -TiAl için 1000 μ m ve SLE IN939 için 700 μ m olarak ölçülmüştür.
- LŞD işleminin bir diğer önemli etkisi mikro sertlik ölçümleri sonucunda gözlenmiştir. Yüzeyde mikro sertlik değerleri EIE γ -TiAl için 317,5 HV değerinden 458,5 HV değerine, SLE IN939 için ise 373,7 HV değerinden 441,75 HV değerine yükselmiştir. LŞD işlemi sonucunda yüzey mikro sertlik değerlerinde γ -TiAl için %44,4 ve SLE IN939 için %18,2 artış elde edilmiştir.
- Mikro sertlik değerleri derinlik yönünde de ölçülmüştür. Yüzeyden derinlik yönünde mikro sertlik değerinin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca LŞD işleminin etkinliği mikro

sertlik ve kalıntı gerilme sonuçları üzerinden istatistiksel olarak incelenerek değerlendirmiştir. Bu analiz sonucunda LŞD işleminin pekleşme etkisinin %30 olduğu ve mikro sertlik ile kalıntı gerilme arası korelasyon gösterilmiştir.

- LŞD işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Zımparalanmış numunelerde LŞD işlemi sonrasında EIE γ -TiAl numunelerde Ra değerinde %42,1 – 1,5 kat aralığında, Rz değerinde %66,7 – 1,4 kat aralığında artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde zımparalanmış SLE IN939 numunelerinde Ra değerinde 4 – 7 kat, ve Rz değerinde 3 – 4 kat artış gözlenmiştir.
- Zımparalanmamış yüzeylerde ise LŞD sonrası Sa, Sz ve Sq değerleri üzerinden değerlendirildiğinde EIE γ -TiAl numunelerde sırasıyla %15,8; %12,23 ve %16,68 azalma, SLE IN939 numunelerinde sırasıyla %8,41; %9,38 ve %8,42 azalma ölçülmüştür.
- LŞD işleminin simülasyonu için çalışmalar ile de oldukça önemli sonuçlar elde edilmiştir. Basma deneyleri ile belirlenen malzeme davranışını ifade eden JC parametreleri en yüksek bası kalıntı gerilmesinin tespit edilmesi yönünden %6,44 – %16,7 hata aralığında başarı sağlamıştır. Ancak, bası kalıntı gerilmesinin profil derinliğinin belirlenmesi açısından hata oranları %11 - %60 arasında olacak şekilde yüksek çıkmıştır.
- LŞD işleminin yorulma performansına olan etkileri de önem arz etmektedir. EIE γ -TiAl numunelerinde yorulma limitinde %50 değerinde bir artış elde edilmiştir. İşlemsiz numunelerde yorulma limitini belirlemek için seçilen 2 milyon çevrim değerine 224 MPa'da ulaşılırken, LŞD uygulanmış numunelerde yorulma limiti 336 MPa değerine yükselmiştir.
- SLE IN939 numunelerinin yorulma performansına LŞD etkisi daha yüksek olmuştur. Aynı gerilme değerleri için SLE IN939 numunelerinde LŞD işlemi ile artışlar 438,3 MPa'da 4,53 kat, 512 MPa'da 4,76 kat ve 585,6 MPa'da 1,37 kat olarak elde edilmiştir.

- Yorulma testleri sonucu oluşan hasarlı yüzeyler, malzemelerin yorulma davranışına LŞD işleminin etkilerini incelemek amacıyla karşılaştırılmıştır. γ -TiAl numunelerinde geniş düzlükler, malzemenin gevrek yorulma davranışını göstermektedir. SLE IN939 numunelerinde lazer darbeleri yüzeyin kısmen erimesine ve çatlak başlangıcının tek noktadan başlamasına neden olmuştur. İşlemsiz numunelerde ise ergimemiş parçacıklar nedeniyle çatlaklar birçok noktadan başlamış ve malzeme hasar görmüştür.

Bütün bu sonuçlar göz önüne alındığında aşağıdaki öneriler Eİ üretimi malzemelerde LŞD işleminin etkileri açısından gelecek çalışmalar için değerlendirilebilir:

- LŞD işlemi farklı darbe başına lazer enerjisi, lazer darbe süresi gibi lazer parametreleri veya farklı girinti miktarı (ing. overlap), katman sayısı gibi işlem parametreleri kullanılarak özellikle yüksek pürüzlü olan EİE üretimi yüzeylerde etkileri incelenebilir.
- LŞD işleminin yalnızca yorulma değil korozyon, sürünme gibi farklı malzeme davranışlarına olan etkileri de incelenmelidir. Ayrıca, sıcak ortamlarda çalışacak alaşımlar için sıcaklık sonucu LŞD ile oluşturulan BKG değerlerinin nasıl etkilendiği de gözlemlenebilir.
- Eİ'nin en önemli avantajlarından olan karmaşık geometrilerin üretilebilmesinden tam anlamda faydalanabilmesi amacıyla serbest yüzeyler içeren numunelerin özelliklerine LŞD işleminin etkileri de incelenebilir.
- LŞD işleminin simülasyonun daha tutarlı yapılabilmesi için malzeme davranışını ifade eden daha doğru parametreler belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Eİ literatüründe bulunmayan bu parametreler şok deneyleri veya ısı altında yapılan çekme/basma gibi deneyler üzerinden belirlenebilir. Öte yandan simülasyon işleminin karmaşık geometriler üzerinde de uygulanması önemli bir inceleme olabilir.

KAYNAKLAR

1. Armstrong, M., Mehrabi, H., and Naveed, N. (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1001–1029.
2. Sanaei, N., and Fatemi, A. (2021). Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: A state-of-the-art review. *Progress in Materials Science*, 117, 273-284.
3. Fidan, I., Huseynov, O., Ali, M. A., Alkunte, S., Rajeshirke, M., Gupta, A., Hasanov, S., Tantawi, K., Yasa, E., Yilmaz, O., Loy, J., Popov, V., and Sharma, A. (2023). Recent Inventions in Additive Manufacturing: Holistic Review. *Inventions*, 8(4), 102-114.
4. Fayazfar, H., Salarian, M., Rogalsky, A., Sarker, D., Russo, P., Paserin, V., and Toyserkani, E. (2018). A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*, 144, 98–128.
5. Yadollahi, A., and Shamsaei, N. (2017). Additive manufacturing of fatigue resistant materials: Challenges and opportunities. *International Journal of Fatigue*, 98, 14–31.
6. Bellini, C., Berto, F., Di Cocco, V., Iacoviello, F., Mocanu, L. P., and Razavi, N. (2021). Additive manufacturing processes for metals and effects of defects on mechanical strength: A review. In *Procedia Structural Integrity*, 33, 498–508.
7. Santecchia, E., Hamouda, A. M. S., Musharavati, F., Zalnezhad, E., Cabibbo, M., El Mehtedi, M., and Spigarelli, S. (2016). A Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metals. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.
8. Makkonen, M. (2009). Predicting the total fatigue life in metals. *International Journal of Fatigue*, 31(7), 1163–1175.
9. Karakaş, Ö., Kardeş, F. B., Foti, P., and Berto, F. (2023). An overview of factors affecting high-cycle fatigue of additive manufacturing metals. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 46(5), 1649–1668.
10. Ye, C., Zhang, C., Zhao, J., and Dong, Y. (2021). Effects of Post-processing on the Surface Finish, Porosity, Residual Stresses, and Fatigue Performance of Additive Manufactured Metals: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(9), 6407–6425.
11. Malakizadi, A., Mallipeddi, D., Dadbakhsh, S., M'Saoubi, R., and Krajnik, P. (2022). Post-processing of additively manufactured metallic alloys – A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 179, 302–319.
12. Peng, X., Kong, L., Fuh, J. Y. H., and Wang, H. (2021). A review of post-processing technologies in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2), 117–128.

13. du Plessis, A., and Macdonald, E. (2020). Hot isostatic pressing in metal additive manufacturing: X-ray tomography reveals details of pore closure. *Additive Manufacturing*, 34, 459 – 492.
14. Nesli, S., and Yilmaz, O. (2021). Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(1–2), 271–289.
15. Zhang, C., Dong, Y., and Ye, C. (2021). Recent Developments and Novel Applications of Laser Shock Peening: A Review. *Advanced Engineering Materials*, 23(7), 917–928.
16. Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., Leary, M., Berto, F., and du Plessis, A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials and Design*, 7(2), 656 – 670.
17. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928.
18. Molaei, R., and Fatemi, A. (2018). Fatigue Design with Additive Manufactured Metals: Issues to Consider and Perspective for Future Research. *Procedia Engineering*, 213(2017), 5–16.
19. Fabbro, R., Fournier, J., Ballard, P., Devaux, D., and Virmont, J. (1990). Physical study of laser-produced plasma in confined geometry. *Journal of Applied Physics*, 68(2), 775–784.
20. Wu, B., and Shin, Y. C. (2005). A self-closed thermal model for laser shock peening under the water confinement regime configuration and comparisons to experiments. *Journal of Applied Physics*, 97(11), 175 – 184.
21. Zhang, Z., Nian, Q., Doumanidis, C. C., and Liao, Y. (2018). First-principles modeling of laser-matter interaction and plasma dynamics in nanosecond pulsed laser shock processing. *Journal of Applied Physics*, 123(5), 92 – 112.
22. Zhang, W., Yao, Y. L., and Noyan, I. C. (2004). Microscale laser shock peening of thin films, Part 1: Experiment, modeling and simulation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 126(1), 10–17.
23. Jiang, X., Yu, X., Deng, X., Shao, Y., and Peng, P. (2019). Investigation on Laser-Induced Shock Pressure with Condensed Matter Model and Experimental Verification. *Experimental Techniques*, 43(2), 161–167.
24. R, S., P, G., Gupta, R. K., G, R., Pant, B. K., Kain, V., K, R., Kaul, R., and Bindra, K. S. (2019). Laser Shock Peening and its Applications: A Review. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 6(4), 424–463.
25. Sano, Y., Akita, K., and Sano, T. (2020). A mechanism for inducing compressive residual stresses on a surface by laser peening without coating. *Metals*, 10(6), 1–12.
26. Ozer, M., Yilmaz, O., Subasi, L., Gunaydin, A., Mert Bilgin, G., Zulić, S., and Kaufman, J. (2024). Enhancement of surface characteristics of additively manufactured γ -TiAl and IN939 alloys after laser shock processing. *Optics and Laser Technology*, 5(2), 170 – 194.

27. Kalentics, N., Boillat, E., Peyre, P., Ćirić-Kostić, S., Bogojević, N., and Logé, R. E. (2017). Tailoring residual stress profile of Selective Laser Melted parts by Laser Shock Peening. *Additive Manufacturing*, 16, 90–97.
28. Guo, W., Sun, R., Song, B., Zhu, Y., Li, F., Che, Z., Li, B., Guo, C., Liu, L., and Peng, P. (2018). Laser shock peening of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 349, 503–510.
29. Hackel, L., Rankin, J. R., Rubenchik, A., King, W. E., and Matthews, M. (2018). Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing. *Additive Manufacturing*, 6(3), 98 – 112.
30. Hu, Y., Lai, M., Hu, Z., and Yao, Z. (2019). Effect of multiple laser peening on surface integrity and microstructure of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy. *Rapid Prototyping Journal*, 25(8), 1379–1387.
31. Lu, J., Lu, H., Xu, X., Yao, J., Cai, J., and Luo, K. (2020). High-performance integrated additive manufacturing with laser shock peening –induced microstructural evolution and improvement in mechanical properties of Ti6Al4V alloy components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 148, 103 – 115.
32. Jin, X., Lan, L., Gao, S., He, B., and Rong, Y. (2020). Effects of laser shock peening on microstructure and fatigue behavior of Ti–6Al–4V alloy fabricated via electron beam melting. *Materials Science and Engineering: A*, 7(3), 557 – 570.
33. Kalentics, N., de Seijas, M. O. V., Griffiths, S., Leinenbach, C., and Logé, R. E. (2020). 3D laser shock peening – A new method for improving fatigue properties of selective laser melted parts. *Additive Manufacturing*, 33(2), 982 – 992.
34. Kahlin, M., Ansell, H., Basu, D., Kerwin, A., Newton, L., Smith, B., and Moverare, J. J. (2020). Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing. *International Journal of Fatigue*, 12(4), 120 – 134.
35. Yeo, I., Bae, S., Amanov, A., and Jeong, S. (2021). Effect of Laser Shock Peening on Properties of Heat-Treated Ti–6Al–4V Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 8(4), 1137–1150.
36. Chi, J., Cai, Z., Zhang, H., Zhang, H., Guo, W., Wan, Z., Han, G., Peng, P., and Zeng, Z. (2021). Combining manufacturing of titanium alloy through direct energy deposition and laser shock peening processes. *Materials and Design*, 20(3), 982 – 992.
37. Slawik, S., Bernarding, S., Lasagni, F., Navarro, C., Perinán, A., Bobby, F., Migot-Choux, S., Domínguez, J., and Mücklich, F. (2021). Microstructural analysis of selective laser melted Ti6Al4V modified by laser peening and shot peening for enhanced fatigue characteristics. *Materials Characterization*, 6(2), 173 – 185.
38. Maleki, E., Bagherifard, S., Unal, O., Jam, A., Shao, S., Guagliano, M., and Shamsaei, N. (2023). Superior effects of hybrid laser shock peening and ultrasonic nanocrystalline surface modification on fatigue behavior of additive manufactured AlSi10Mg. *Surface and Coatings Technology*, 46(3), 234 – 245.

39. Maleki, E., Unal, O., Guagliano, M., and Bagherifard, S. (2021). The effects of shot peening, laser shock peening and ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue strength of Inconel 718. *Materials Science and Engineering A*, 8(10), 141 – 157.
40. Tong, Z., Wan, W., Liu, H., Zhou, W., Ye, Y. X., and Ren, X. (2023). Combination of annealing and laser shock peening for tailoring microstructure and mechanical properties of laser directed energy deposited CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Additive Manufacturing*, 6(1), 432 – 452.
41. Jinoop, A. N., Subbu, S. K., Paul, C. P., and Palani, I. A. (2019). Post-processing of Laser Additive Manufactured Inconel 718 Using Laser Shock Peening. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(9), 1621–1628.
42. Munther, M., Martin, T., Tajyar, A., Hackel, L., Beheshti, A., and Davami, K. (2020). Laser shock peening and its effects on microstructure and properties of additively manufactured metal alloys: A review. *Engineering Research Express*, 2(2), 982 – 992.
43. Zhang, H., Cai, Z., Chi, J., Han, G., Sun, R., Che, Z., Zhang, H., and Guo, W. (2022). Microstructural evolution, mechanical behaviors and strengthening mechanism of 300 M steel subjected to multi-pass laser shock peening. *Optics and Laser Technology*, 14(8), 35 – 53.
44. Deng, W. W., Lu, H. F., Xing, Y. H., Luo, K. Y., and Lu, J. Z. (2022). Effect of laser shock peening on tensile properties and microstructure of selective laser melted 316L stainless steel with different build directions. *Materials Science and Engineering: A*, 8(5), 56 – 73.
45. Tong, Z., Liu, H., Jiao, J., Zhou, W., Yang, Y., and Ren, X. (2020). Microstructure, microhardness and residual stress of laser additive manufactured CoCrFeMnNi high-entropy alloy subjected to laser shock peening. *Journal of Materials Processing Technology*, 28(5), 116 – 128.
46. Hfaiedh, N., Peyre, P., Song, H., Popa, I., Ji, V., and Vignal, V. (2015). Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*, 70, 480–489.
47. Angulo, I., Cordovilla, F., García-Beltrán, A., Smyth, N. S., Langer, K., Fitzpatrick, M. E., and Ocaña, J. L. (2019). The effect of material cyclic deformation properties on residual stress generation by laser shock processing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 15(6), 370–381.
48. Berthe, L., Fabbro, R., Peyre, P., Tollier, L., and Bartnicki, E. (1997). Shock waves from a water-confined laser-generated plasma. *Journal of Applied Physics*, 82(6), 2826–2832.
49. Sunny, S., Gleason, G., Sitaula, K., and Malik, A. (2021). Predictive Modeling of Laser Shock Peening Induced Near-Surface Residual Stress in Alumina. *Procedia Manufacturing*, 5(3), 80–91.
50. Peyre, P., Chaieb, I., and Braham, C. (2007). FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 15(3), 205–221.

51. Zulić, S., Rostohar, D., Kaufman, J., Pathak, S., Kopeček, J., Böhm, M., Brajer, J., and Mocek, T. (2022). Fatigue life enhancement of additive manufactured 316L stainless steel by LSP using a DPSS laser system. *Surface Engineering*, 38(2), 183–190.
52. Guo, J., Fu, H., Pan, B., and Kang, R. (2021). Recent progress of residual stress measurement methods: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(2), 54–78.
53. Nau, A., and Scholtes, B. (2013). Evaluation of the High-Speed Drilling Technique for the Incremental Hole-Drilling Method. *Experimental Mechanics*, 53(4), 531–542.
54. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., and Pappalettere, C. (2014). Analysis of the effects of process parameters in residual stress measurements on Titanium plates by HDM/ESPI. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 48(1), 220–227.
55. Fabbro, R., Peyre, P., Berthe, L., Scherpereel, X., Fabbro, R., Peyre, P., Berthe, L., and Scherpereel, X. (1998). Physics and applications of laser-shock processing Physics and applications of laser-shock processing, 20(3), 265 – 279.
56. Sun, R., Keller, S., Zhu, Y., Guo, W., Kashaev, N., and Klusemann, B. (2021). Experimental-numerical study of laser-shock-peening-induced retardation of fatigue crack propagation in Ti-17 titanium alloy. *International Journal of Fatigue*, 14(5), 180 – 192.
57. Xu, S., Huang, S., Meng, X., Sheng, J., Zhang, H., and Zhou, J. (2017). Thermal evolution of residual stress in IN718 alloy subjected to laser peening. *Optics and Lasers in Engineering*, 9(4), 70–75.
58. Qiao, H., Zhao, J., Zhang, G., and Gao, Y. (2015). Effects of laser shock peening on microstructure and residual stress evolution in Ti-45Al-2Cr-2Nb-0.2B alloy. *Surface and Coatings Technology*, 276, 145–151.
59. Farahani, H. K., Ketabchi, M., and Zangeneh, S. (2017). Determination of Johnson–Cook Plasticity Model Parameters for Inconel718. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(11), 5284–5293.
60. Brown, A. D., Ameri, A. H., Gregg, A., Austin, D. C., Escobedo, J. P., Hazell, P. J., East, D., and Quadir, M. Z. (2018). Dynamic mechanical response of additive manufactured Ti-6Al-4V. *AIP Conference Proceedings*, 1979, 1–6.
61. Gardiner, P., Miguélez, H., Cortés, R., Lepetitcorps, Y., Dodd, B., and Navarro, C. (1997). Dynamic characterization of TiAl intermetallic in hot compression. *Journal De Physique. IV : JP*, 7(3), 12 – 25.
62. Storchak, M., Rupp, P., Möhring, H. C., and Stehle, T. (2019). Determination of Johnson–Cook constitutive parameters for cutting simulations. *Metals*, 9(4), 110 – 132.
63. Shrestha, R., Simsiriwong, J., and Shamsaei, N. (2021). Fatigue behavior of additive manufactured 316L stainless steel under axial versus rotating-bending loading: Synergistic effects of stress gradient, surface roughness, and volumetric defects. *International Journal of Fatigue*, 14(4), 654 – 670.

64. Sano, Y., Obata, M., Kubo, T., Mukai, N., Yoda, M., Masaki, K., and Ochi, Y. (2006). Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating, 41(7), 334–340.
65. Li, C., Liu, Z. Y., Fang, X. Y., and Guo, Y. B. (2018). Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 7(1), 348–353.
66. Wu, A. S., Brown, D. W., Kumar, M., Gallegos, G. F., and King, W. E. (2014). An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 45(13), 6260–6270.
67. Mercelis, P., and Kruth, J. P. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5), 254–265.
68. Sochalski-Kolbus, L. M., Payzant, E. A., Cornwell, P. A., Watkins, T. R., Babu, S. S., Dehoff, R. R., Lorenz, M., Ovchinnikova, O., and Duty, C. (2015). Comparison of Residual Stresses in Inconel 718 Simple Parts Made by Electron Beam Melting and Direct Laser Metal Sintering. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 46(3), 1419–1432.
69. Hereñú, S., Strubbia, R., Rubio-González, C., Spadaro, L., Bolmaro, R., and Gomez-Rosas, G. (2022). High cycle fatigue life improvement of superferritic stainless steel by laser shock peening without coating. *Optics and Laser Technology*, 15(5), 147 – 162.
70. Gill, A. S., Telang, A., and Vasudevan, V. K. (2015). Characteristics of surface layers formed on inconel 718 by laser shock peening with and without a protective coating. *Journal of Materials Processing Technology*, 22(5), 463–472.
71. Soyama, H., and Takeo, F. (2020). Effect of various peening methods on the fatigue properties of Titanium alloy Ti6Al4V manufactured by direct metal laser sintering and electron beam melting. *Materials*, 13(10), 245 – 258.
72. Peral, D., Vicente, J. De, Porro, J. A., and Ocaña, J. L. (2017). Uncertainty analysis for non-uniform residual stresses determined by the hole drilling strain gauge method. *Measurement*, 9(7), 51–63.
73. Sano, Y., Akita, K., Masaki, K., Ochi, Y., Altenberger, I., and Scholtes, B. (2006). Laser peening without coating as a surface enhancement technology. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 1(3), 161–166.
74. Ocaña, J. L., Porro, J. A., Díaz, M., Ruiz de Lara, L., García-Beltrán, A., Santiago, J. A., and Peral, D. (2017). Improvement of surface and mechanical properties of high strength metallic alloys by laser shock processing. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 3(1), 12–22.
75. Navin Kumar, N., Yadav, A. C., Raja, K., Prabhakaran, S., Naiju, C. D., and Kalainathan, S. (2019). Study on Effect of Laser Peening on Inconel 718 Produced by DMLS Technique. *SAE Technical Papers*, 13(10), 245 – 258.
76. Mostafa, A. M., Hameed, M. F., and Obayya, S. S. (2019). Effect of laser shock peening on the hardness of AL-7075 alloy. *Journal of King Saud University - Science*, 31(4), 472–478.

77. Liu, L., Wang, J., and Zhou, J. (2019). Characterization and analysis on micro-hardness and microstructure evolution of brass subjected to laser shock peening. *Optics and Laser Technology*, 11(5), 325–330.
78. Soyama, H., and Korsunsky, A. M. (2022). A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 30(7), 117 – 131.
79. Kuisat, F., Lasagni, F., and Lasagni, A. F. (2021). Smoothing additive manufactured parts using ns-pulsed laser radiation. *Progress in Additive Manufacturing*, 6(2), 297–306.
80. Salimianrizi, A., Foroozmehr, E., Badrossamay, M., and Farrokhpour, H. (2016). Effect of Laser Shock Peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6. *Optics and Lasers in Engineering*, 7(7), 112–117.
81. Petronić, S., Čolić, K., Đorđević, B., Milovanović, D., Burzić, M., and Vučetić, F. (2020). Effect of laser shock peening with and without protective coating on the microstructure and mechanical properties of Ti-alloy. *Optics and Lasers in Engineering*, 12(9), 42 – 60.
82. Farahani, H. K., Ketabchi, M., and Zangeneh, S. (2017). Determination of Johnson–Cook Plasticity Model Parameters for Inconel718. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(11), 5284–5293.
83. Xu, S., Huang, S., Meng, X., Sheng, J., Zhang, H., and Zhou, J. (2017). Thermal evolution of residual stress in IN718 alloy subjected to laser peening. *Optics and Lasers in Engineering*, 94, 70–75.
84. Todai, M., Nakano, T., Liu, T., Yasuda, H. Y., Hagihara, K., Cho, K., Ueda, M., and Takeyama, M. (2017). Effect of building direction on the microstructure and tensile properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 13(7), 61–70.
85. Cho, K., Kobayashi, R., Oh, J. Y., Yasuda, H. Y., Todai, M., Nakano, T., Ikeda, A., Ueda, M., and Takeyama, M. (2018). Influence of unique layered microstructure on fatigue properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloys fabricated by electron beam melting. *Intermetallics*, 9(5), 1–10.
86. Doğu, M. N., Ozer, S., Yalçın, M. A., Davut, K., Bilgin, G. M., Obeidi, M. A., Brodin, H., Gu, H., and Brabazon, D. (2023). Effect of solution heat treatment on the microstructure and crystallographic texture of IN939 fabricated by powder bed fusion-laser beam. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 8909–8923.
87. Kanagarajah, P., Brenne, F., Niendorf, T., and Maier, H. J. (2013). Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading. *Materials Science and Engineering: A*, 28(8), 188–195.
88. Pan, X., Zhou, L., Wang, C., Yu, K., Zhu, Y., Yi, M., Wang, L., Wen, S., He, W., and Liang, X. (2023). Microstructure and residual stress modulation of 7075 aluminum alloy for improving fatigue performance by laser shock peening. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 18(4), 111 – 122.

89. Aguado-Montero, S., Navarro, C., Vázquez, J., Lasagni, F., Slawik, S., and Domínguez, J. (2022). Fatigue behaviour of PBF additive manufactured Ti6Al4V alloy after shot and laser peening. *International Journal of Fatigue*, 15(4), 702 – 714.
90. Tsuchiya, S., and Takahashi, K. (2022). Improving fatigue limit and rendering defects harmless through laser peening in additive-manufactured maraging steel. *Metals*, 12(1), 670 – 678.
91. Ramadas, H., Sarkar, S., Ganesh, P., Kaul, R., Majumdar, J. D., and Nath, A. K. (2023). Enhancing the static and dynamic mechanical properties of laser powder bed fusion process built 15–5 precipitation hardening stainless steel specimens by laser shock peening. *Materials Science and Engineering: A*, 8(6), 144 – 156.
92. Hamidi Nasab, M., Vedani, M., Logé, R. E., Sohrabi, N., Jamili, A. M., du Plessis, A., and Beretta, S. (2023). An investigation on the fatigue behavior of additively manufactured laser shock peened AlSi7Mg alloy surfaces. *Materials Characterization*, 20(10), 69 – 82.
93. Jing, Y., Fang, X., Xi, N., Chang, T., Duan, Y., and Huang, K. (2023). Improved tensile strength and fatigue properties of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy by surface laser shock peening. *Materials Science and Engineering: A*, 6(4), 563 – 572.
94. Banderas-Hernández, J. A., Rubio-González, C., Gómez-Ortega, A., Flores-García, S., and Martínez-Pérez, C. E. (2024). Laser shock peening as a post-processing technique for Inconel 718 components manufactured by laser powder bed fusion. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(1–2), 669–687.
95. Wang, M. S., Liu, E. W., Du, Y. L., Liu, T. T., and Liao, W. H. (2021). Cracking mechanism and a novel strategy to eliminate cracks in TiAl alloy additively manufactured by selective laser melting. *Scripta Materialia*, 204.
96. Yu, W., Yin, Y., Zhou, J., Li, W., Zuo, J., Lin, J., and Feng, X. (2022). High cycle fatigue behaviors and deformation mechanisms in Ti47Al2Cr2Nb alloy at room temperature and 700 °C. *Journal of Materials Research and Technology*, 21(8), 2642–2652.
97. Sun, R., Che, Z., Cao, Z., Zou, S., Wu, J., Guo, W., and Zhu, Y. (2020). Fatigue behavior of Ti-17 titanium alloy subjected to different laser shock peened regions and its microstructural response. *Surface and Coatings Technology*, 33(8), 245 – 258.
98. Dwivedi, P. K., Vinjamuri, R., Rai, A. K., Ganesh, P., Ranganathan, K., Bindra, K. S., and Dutta, K. (2022). Effect of laser shock peening on ratcheting strain accumulation, fatigue life and bulk texture evolution in HSLA steel. *International Journal of Fatigue*, 16(3), 876 – 887.
99. Ayan, Y., and Kahraman, N. (2022). Bending fatigue properties of structural steel fabricated through wire arc additive manufacturing (WAAM). *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 35(12), 856 – 871.
100. Luo, X., Dang, N., and Wang, X. (2021). The effect of laser shock peening shot peening and their combination on the microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy. *International Journal of Fatigue*, 15(3), 92 – 104.



Gazili olmak ayrıcalıktır