

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAYNAKLI TiAl6V4 ALAŞIMININ YORULMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**NAİL TÜZÜN**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2022**

**T.C.**  
**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KAYNAKLI TiAl6V4 ALAŞIMININ YORULMA**  
**DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**NAİL TÜZÜN**

**DENİZLİ, HAZİRAN - 2022**

**Bu tez çalışması Polonya Bilim ve Yüksek Öğrenim Bakanlığı tarafından Bölgesel Mükemmellik Girişimi 011/RID/2018/19 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**Nail TÜZÜN**

## ÖZET

**KAYNAKLI TiAl6V4 ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ  
DOKTORA TEZİ  
NAİL TÜZÜN  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ÖZLER KARAKAŞ)**

**DENİZLİ, HAZİRAN - 2022**

Kaynaklı birleştirme işleminin malzemeler üzerindeki ısı etkisi malzeme özelliklerini değiştirmektedir. Bu sebeple esas malzemeler üzerinde yapılan mekanik parametre değerlendirmelerinin tek başlarına kaynaklı birleştirmeler için geçerliliği sınırlıdır. Kaynaklı birleştirmelerin değişen malzeme özelliklerinin yanı sıra, kaynak dikişleri ve çevrelerinin tekrarlı yükler altındaki mekanik davranışları yapısal dayanımlarının özel olarak tespit edilmesini gerektirir.

Yüksek dayanım değerlerine kıyasla hafif olmaları ile bilinen titanyum alaşımları başta havacılık ve uzay sanayi olmak üzere birçok mühendislik sektöründe kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının yaygın uygulama alanlarına rağmen kaynaklı birleştirmelerinin mekanik özellikleri hakkında sınırlı sayıda bilimsel çalışma bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında TiAl6V4 alaşımından 1 mm inceliğindeki levhalar mikrop plazma ark kaynağı ile kaynaklanmıştır. Elde edilen kaynaklı birleştirmelerin yorulma davranışları incelenmiştir. Çalışma kapsamında kaynaklı, alın kaynaklı ve bindirme kaynaklı olmak üzere üç tip numune kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında çekme deneyleri, yük kontrollü yorulma deneyleri ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca monotonik yüklemeler sırasında uzama dağılımları temassız ölçüm sistemleri ve dijital görüntü korelasyonu teknolojisiyle gözlemlenmiştir. Elde edilen numuneler makro ve mikro incelemelere tabi tutulmuş, kaynak sonrası TiAl6V4 numunelerdeki değişimler incelenmiştir. Son olarak çekme ve yorulma deneyleri sonucunda numunelerdeki kırılma yüzeyleri değerlendirilmiştir.

Yapılan bu incelemelerde TiAl6V4 alaşımından kaynaklı ince levhaların çekme dayanımlarının kaynaklı numunelere yakın değerler göstermesine rağmen daha düşük yorulma performansı gösterdikleri tespit edilmiştir. Özellikle bindirme kaynaklı numunelerin yorulma ömrü diğer numunelere kıyasla oldukça düşüktür. Bu durum mikrop plazma ark kaynağının küçük çaplı plazma arkına rağmen oluşan ısı tesiri altındaki bölgenin numunelerin yorulma dayanımları üzerinde olumsuz bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Oldukça gevrek bir malzeme davranışı gösteren numunelerin kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan incelemeler bu tespitleri doğrulamaktadır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** titanyum alaşımları, mikrop plazma ark kaynağı, malzeme parametreleri, yorulma

# ABSTRACT

## FATIGUE BEHAVIOUR INVESTIGATION OF WELDED TiAl6V4 ALLOY

PH.D THESIS  
NAİL TÜZÜN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING  
(SUPERVISOR: PROF. DR. ÖZLER KARAKAŞ)

DENİZLİ, JUNE 2022

The heat effect of welding process on the materials changes the material properties. For this reason, the validity of mechanical parameter evaluations on base materials is limited for welded joints individually. In addition to the changing material properties of welded joints, the mechanical behaviour of weld seams and their surroundings under cyclic loads requires specific investigations of their structural durability.

Titanium alloys, known for their lightness compared to their high strength values, are used in many engineering sectors, especially in the aerospace industry. Despite the widespread application areas of titanium alloys, there are limited scientific studies on the mechanical properties of their welded joints.

In this thesis, 1 mm thin sheets from TiAl6V4 alloy were welded by microplasma arc welding. The fatigue behaviour of the manufactured welded joints was investigated. Within the scope of the study, three types of specimens were used as unwelded, butt welded and overlap welded samples. During the experimental studies, tensile tests, load-controlled fatigue tests and hardness measurements were performed. In addition, the elongation distributions during monotonic loadings were observed with non-contact measurement systems and digital image correlation technology. The obtained samples were subjected to macro and micro examinations, and the changes in TiAl6V4 samples after welding were examined. Finally, the fracture surfaces of the samples were evaluated as a result of tensile and fatigue tests.

In these examinations, it was determined that although the tensile strength of thin plates welded from TiAl6V4 alloy showed values close to the unwelded samples, they showed lower fatigue performance. Especially, the fatigue lives of overlap welded samples was quite low compared to other samples. This shows that the heat-affected zone of microplasma arc welding, despite the small diameter of the plasma arc, had a negative effect on the fatigue strength of the samples. Investigations on the fracture surfaces of the samples, which show a very brittle material behaviour, confirmed these findings.

**KEYWORDS:** titanium alloys, microplasma arc welding, material parameters, fatigue

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELER İÇİN YAYGIN YORULMA DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>12</b>
2.1 Nominal Gerilme Yöntemi .....	13
2.2 Yerel Gerilme Yaklaşımları .....	15
2.2.1 Yapısal gerilme yöntemleri.....	17
2.2.2 Çentik gerilmesi yöntemleri.....	20
2.2.3 Kırılma mekaniği yöntemleri.....	25
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>27</b>
3.1 Malzeme .....	27
3.2 Deney Numuneleri .....	29
3.3 Deneysel Çalışmalar .....	36
3.3.1 Deney düzeneği.....	36
3.3.2 Çekme deneyleri .....	38
3.3.3 Sertlik ölçümleri .....	39
3.3.4 Yük kontrollü yorulma deneyleri.....	40
3.3.5 Metalografik incelemeler .....	41
<b>4. BULGULAR</b> .....	<b>42</b>
4.1 Monotonik İncelemelerin Sonuçları .....	42
4.2 Yük kontrollü Yorulma Deney Sonuçları.....	55
4.3 Metalografik İnceleme Sonuçları .....	63
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>82</b>
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>84</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

<b>Şekil 1.1:</b> V2500 uçak motorundaki titanyum alaşımından bileşenler (Inagaki et al. 2014).....	2
<b>Şekil 1.2:</b> Kalça protezi parçaları (Liu et al. 2004).....	3
<b>Şekil 1.3:</b> Titanyum civatalı dental implant (Liu et al. 2004).....	3
<b>Şekil 2.1:</b> Eksenel yükleme altında numunede oluşan gerilmelerin şematik gösterimi (Macdonald 2011). ....	13
<b>Şekil 2.2:</b> Sabit genlikli yüklemelerde çelik için referans Wöhler eğrileri (Hobbacher 2016).....	15
<b>Şekil 2.3:</b> Yapısal gerilmelerin tespiti için yapılan ekstrapolasyonun şematik gösterimi (Hobbacher 2016).....	17
<b>Şekil 2.4:</b> Yapısal gerilmelerin tespitinde kullanılan farklı ekstrapolasyon yöntemleri, sonlu eleman kafesleri ve referans noktaları (Hobbacher 2016).....	19
<b>Şekil 2.5:</b> Mikroyapısal destek etkisinin şematik gösterimi a) Gerilme ortalaması yöntemi b) Hayali çentik yuvarlatma yöntemi (Sonsino et al. 2012).....	21
<b>Şekil 2.6:</b> Kaynaklı birleştirmelerin çentiklerinin hayali yuvarlatma yarıçapı kullanılarak yuvarlatılması (Baumgartner 2017; Hobbacher 2016).....	22
<b>Şekil 2.7:</b> Yerel koordinat sistemi (a), kritik mesafe yöntemi (b) ve gerilme ortalama yönteminin (c) şematik gösterimleri (Louks ve Susmel 2015).....	24
<b>Şekil 3.1:</b> TiAl6V4 alaşımının EDS spektrumları. ....	27
<b>Şekil 3.2:</b> Plazma ark kaynak yönteminin şematik gösterimi.....	30
<b>Şekil 3.3:</b> Titanyumdan kaynaklı deney numunesi. ....	30
<b>Şekil 3.4:</b> Titanyumdan alın kaynaklı deney numunesi.....	31
<b>Şekil 3.5:</b> Titanyumdan bindirme kaynaklı deney numunesi. ....	31
<b>Şekil 3.6:</b> a) Mikroplazma ark kaynak makinesi. b) Mikroplazma jeneratörü. ....	32
<b>Şekil 3.7:</b> Su jeti kesim makinesi.....	33
<b>Şekil 3.8:</b> Kesilmiş kaynaklı numuneler ve sabitleme cihazı. ....	34
<b>Şekil 3.9:</b> Su jeti ile kesilen kaynaklı numuneler. ....	35
<b>Şekil 3.10:</b> Deney düzeneği. ....	36
<b>Şekil 3.11:</b> Epsilon 50, 50 mm doğrusal ekstensometre. ....	37
<b>Şekil 3.12:</b> Mitutoyo kalibrasyon cihazı. ....	37
<b>Şekil 3.13:</b> Kaynaklı birleştirmedeki Vickers sertlik ölçüm noktalarının şematik gösterimi. ....	40
<b>Şekil 4.1:</b> Kaynaklı numunelerin gerilme-uzama çekme deney grafiği. ....	43
<b>Şekil 4.2:</b> Alın kaynaklı numunelerin gerilme-uzama çekme deney grafiği. ...	44
<b>Şekil 4.3:</b> Bindirme kaynaklı numunelerin gerilme-uzama çekme deney grafiği. ....	45
<b>Şekil 4.4:</b> Monotonik malzeme sertleşme eğrileri. ....	46
<b>Şekil 4.5:</b> Kaynaklı numunelerin toplam uzama bölgelerinin çeşitli gerilme değerlerine göre dağılımları. ....	48
<b>Şekil 4.6:</b> Alın kaynaklı numunelerin toplam uzama bölgelerinin çeşitli gerilme değerlerine göre dağılımları. ....	49



<b>Şekil 4.7:</b> Bindirme kaynaklı numunelerin toplam uzama bölgelerinin çeşitli gerilme değerlerine göre dağılımları. ....	49
<b>Şekil 4.8:</b> Kaynaksız numunelerin kopması sırasında toplam uzama dağılımlarının zamana göre değişimleri. ....	50
<b>Şekil 4.9:</b> Alın kaynaklı numunelerin kopması sırasında toplam uzama dağılımlarının zamana göre değişimleri. ....	50
<b>Şekil 4.10:</b> Bindirme kaynaklı numunelerin kopması sırasında toplam uzama dağılımlarının zamana göre değişimleri. ....	51
<b>Şekil 4.11:</b> Çekme deneyi sonucunda a) kopmuş alın kaynaklı numune ve b) numunenin kırılma yüzeyi. ....	53
<b>Şekil 4.12:</b> Çekme deneyi sonucunda a) kopmuş bindirme kaynaklı numune ve b) numunenin kırılma yüzeyi. ....	54
<b>Şekil 4.13:</b> Yük kontrollü yorulma deneylerinin Wöhler eğrileri. ....	56
<b>Şekil 4.14:</b> Alın kaynaklı numunenin yük kontrollü yorulma yüklemeleri sırasındaki maksimum uzama değişimleri. ....	57
<b>Şekil 4.15:</b> Alın kaynaklı numunenin yük kontrollü yorulma yüklemeleri sırasındaki minimum uzama değişimleri. ....	58
<b>Şekil 4.16:</b> Bindirme kaynaklı numunenin yük kontrollü yorulma yüklemeleri sırasındaki maksimum uzama değişimleri. ....	59
<b>Şekil 4.17:</b> Bindirme kaynaklı numunenin yük kontrollü yorulma yüklemeleri sırasındaki minimum uzama değişimleri. ....	60
<b>Şekil 4.18:</b> Alın kaynaklı numunenin yorulma deneyleri sonrası kırılma konumu. ....	62
<b>Şekil 4.19:</b> Bindirme kaynaklı numunenin yorulma deneyleri sonrası kırılma konumu. ....	63
<b>Şekil 4.20:</b> Alın kaynaklı numunenin kaynak dikişinin kesit görünümü (5x yakınlaştırma). ....	64
<b>Şekil 4.21:</b> Bindirme kaynaklı numunenin kaynak dikişlerinin kesit görünümleri (5x yakınlaştırma). ....	64
<b>Şekil 4.22:</b> Kaynaksız numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (500x yakınlaştırma). ....	66
<b>Şekil 4.23:</b> Kaynaksız numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (1000x yakınlaştırma). ....	66
<b>Şekil 4.24:</b> Kaynaksız numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (3000x yakınlaştırma). ....	67
<b>Şekil 4.25:</b> Alın kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (500x yakınlaştırma). ....	67
<b>Şekil 4.26:</b> Alın kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (1000x yakınlaştırma). ....	68
<b>Şekil 4.27:</b> Alın kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (3000x yakınlaştırma). ....	68
<b>Şekil 4.28:</b> Bindirme kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (500x yakınlaştırma). ....	69
<b>Şekil 4.29:</b> Bindirme kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (1000x yakınlaştırma). ....	69
<b>Şekil 4.30:</b> Bindirme kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (3000x yakınlaştırma). ....	70
<b>Şekil 4.31:</b> Yorulma deneylerinden önce a) alın kaynaklı deney numunesi ve b) kaynak bölgesinin detaylı resmi. ....	71

<b>Şekil 4.32:</b> Yorulma deneylerinden önce a) bindirme kaynaklı deney numunesi ve b) kaynak bölgesinin detaylı resmi. ....	72
<b>Şekil 4.33:</b> Yorulma deneylerinden sonra alın kaynaklı deney numunesinin a) kaynak bölgesinin detaylı resmi ve b) kırılma yüzeyleri. ....	73
<b>Şekil 4.34:</b> Yorulma deneylerinden sonra bindirme kaynaklı deney numunesi a) kaynak bölgesinin detaylı resmi ve b) kırılma yüzeyleri. ....	74
<b>Şekil 4.35:</b> a) Kaynaksız, b) alın kaynaklı ve c) bindirme kaynaklı deney numunelerinin 30x yakınlaştırmada mikro-yapıları. ....	75
<b>Şekil 4.36:</b> a) Kaynaksız, b) alın kaynaklı ve c) bindirme kaynaklı deney numunelerinin 145x yakınlaştırmada mikro-yapıları. ....	76
<b>Şekil 4.37:</b> Kaynaksız deney numunelerinin a) 2000x ve b) 4000x yakınlaştırmada kırılma yüzeyleri. ....	78
<b>Şekil 4.38:</b> Alın kaynaklı deney numunelerinin a) 2000x ve b) 4000x yakınlaştırmada kırılma yüzeyleri. ....	79
<b>Şekil 4.39:</b> Bindirme kaynaklı deney numunelerinin a) 2000x ve b) 4000x yakınlaştırmada kırılma yüzeyleri. ....	80

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1:</b> TiAl6V4 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	27
<b>Tablo 3.2:</b> TiAl6V4 alaşımının EDS analiz sonuçları.....	28
<b>Tablo 3.3:</b> TiAl6V4 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri (Oda sıcaklığında). ....	28
<b>Tablo 3.4:</b> TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numunelerin üretiminde kullanılan kaynak parametreleri. ....	32
<b>Tablo 3.5:</b> ARAMIS 4M gözlem sisteminin karakteristik ölçüm parametreleri.....	38
<b>Tablo 4.1:</b> TiAl6V4 alaşımından numunelerin monotonik çekme deneylerinden elde edilen malzeme parametreleri. ....	42
<b>Tablo 4.2:</b> TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numunelerin monotonik sertleşme eğrisi parametreleri.....	47
<b>Tablo 4.3:</b> Çeşitli malzemelerin uzama sertleşme üsleri. ....	48
<b>Tablo 4.4:</b> TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numunelerin Vickers sertlik değerleri.....	55
<b>Tablo 4.5:</b> Yorulma deney parametreleri ve elde edilen sonuçlar.....	55

## SEMBOL LİSTESİ

$\sigma$	:	Gerilme, MPa
$\varepsilon$	:	Birim uzama
$t$	:	Kalınlık, mm
$\sigma_n$	:	Nominal gerilme, MPa
$\sigma_{hs}$	:	Sıcak-nokta yapısal gerilmesi, MPa
$\sigma_k$	:	Çentik gerilmesi, MPa
$F$	:	Etkin kuvvet, N
$S$	:	Kesit alanı, mm <sup>2</sup>
$N$	:	Çevrim sayısı
$N_k$	:	Bükülme noktası çevrim sayısı
$k$	:	Eğim
$\sigma_{eff}$	:	Efektif gerilme, MPa
$\rho^*$	:	Mikroyapısal uzunluk, mm
$x$	:	Çentik köküne dik mesafe, mm
$r_f$	:	Hayali yuvarlatma yarıçapı, mm
$r_{reel}$	:	Gerçek çentik yarıçapı, mm
$s$	:	Çok-eksenlilik katsayısı
$a$	:	Kritik mesafe, mm
$a'$	:	Çatlak boyu, mm
$\Delta l$	:	Temel uzama hızı, mm/s
$R_\sigma$	:	Gerilme oranı
$R_{UTS}$	:	Çekme dayanımı, MPa
$E$	:	Young modülü, GPa
$R_{YP}$	:	Akma dayanımı, MPa
$R_U$	:	Kopma gerilmesi, MPa
$A$	:	Yüzde uzama, %
$Z$	:	Yüzde boyun verme, %
$\varepsilon_e$	:	Elastik birim uzama
$\varepsilon_p$	:	Plastik birim uzama
$K$	:	Dayanım katsayısı, MPa
$n$	:	Uzama sertleşme üssü
$n_x$	:	Statik sertleşme üssü
$C$	:	Manson-Coffin katsayısı
$k'$	:	Süneklik sabiti
$S_0$	:	Başlangıç kesit alanı, mm <sup>2</sup>
$S_u$	:	Kopma kesit alanı, mm <sup>2</sup>
$f$	:	Frekans, Hz
$\sigma_{maks}$	:	Maksimum gerilme, MPa
$\sigma_{min}$	:	Minimum gerilme, MPa
$\varepsilon_{maks}$	:	Maksimum birim uzama
$\varepsilon_{min}$	:	Minimum birim uzama
$N_f$	:	Yorulma ömrü

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında TiAl6V4 alaşımından ince levhalar mikroplazma ark kaynağı ile kaynaklanarak yorulma davranışları değerlendirilmiştir. Destekleriyle bu bilimsel çalışmanın gerçekleştirilmesini mümkün kılan kişi ve kurumlara teşekkür ederim;

Doktora tezi birinci danışmanım Sayın Prof. Dr. Özler Karakaş'a bilimsel çalışmalarında her zaman yanımda olduğu ve tecrübeleriyle yol gösterdiği için çok teşekkür ediyorum.

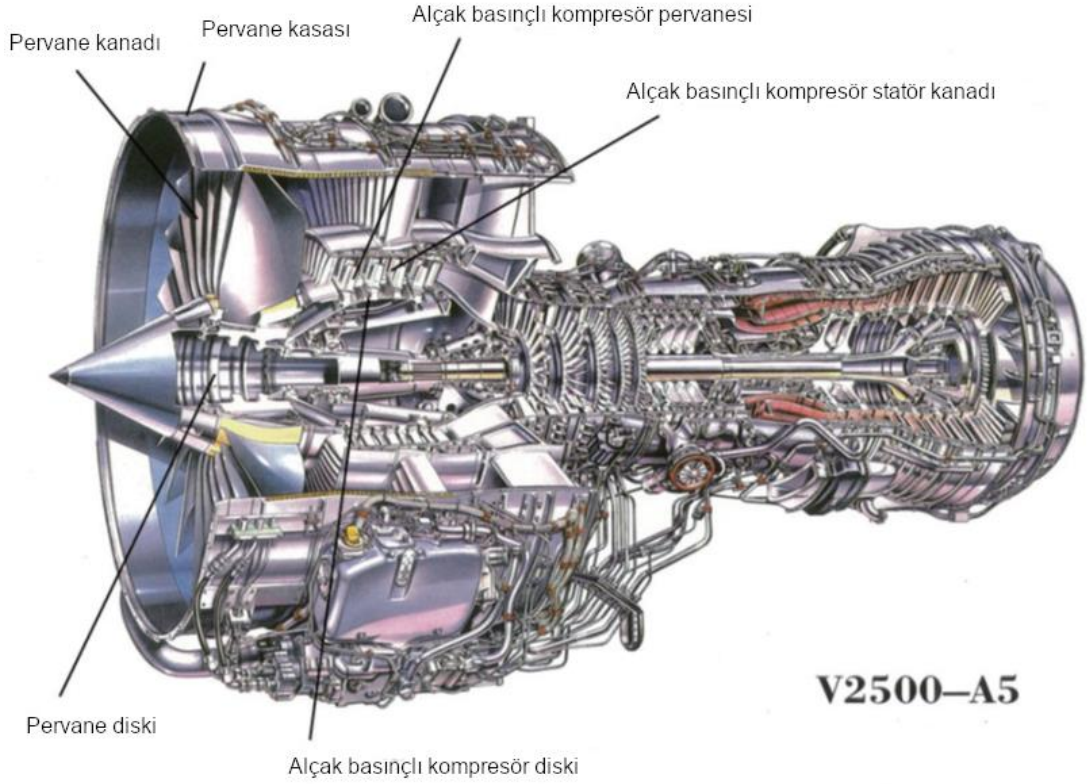
Bu tez çalışmasının deneysel aşamaları Polonya Bialystok Teknoloji Üniversitesi'nde (Politechnika Białostocka), Sayın Prof. Dr. Jaroslaw Szusta'nın denetiminde gerçekleşmiştir. Kendisine ve üniversitesine bana verdikleri bu fırsattan dolayı teşekkür ediyorum.

Sayın Wojciech Grodzki'ye (Bialystok Teknoloji Üniversitesi), deneysel çalışmalar sırasındaki emeklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Son olarak maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyerek akademik çalışmalarında beni cesaretlendiren Anneme ve Babama sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

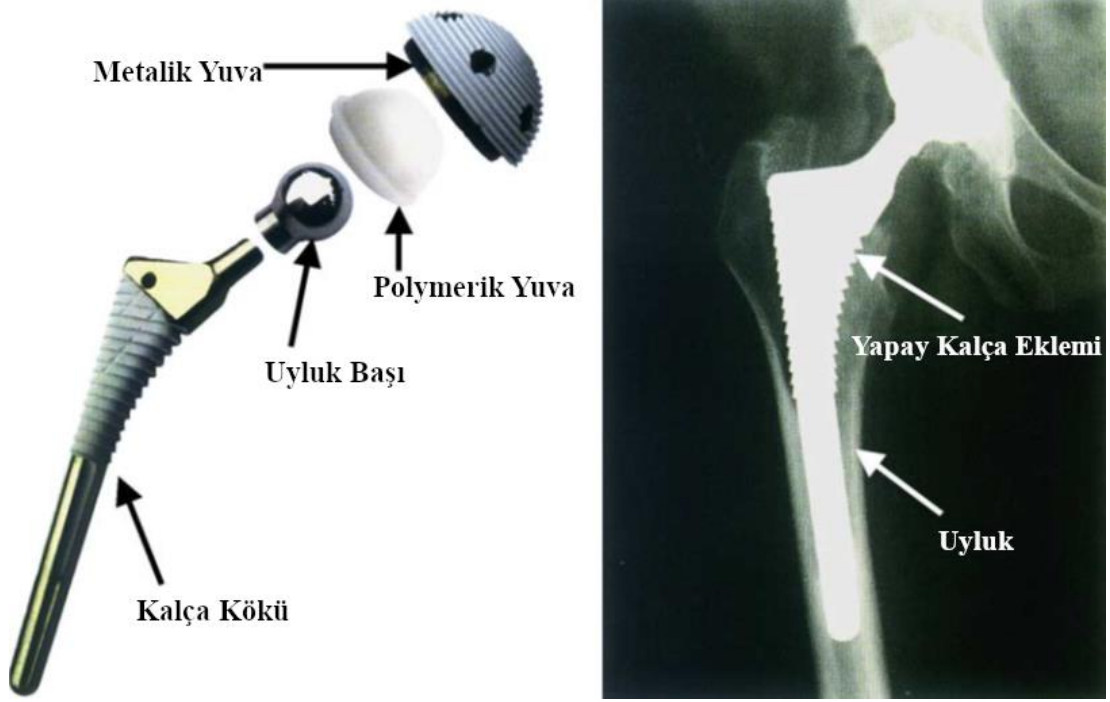
# 1. GİRİŞ

Titanyum birçok metalik mühendislik malzemesine kıyasla nispeten daha az incelenmiş bir metaldir. Ancak son dönemlerde titanyumun endüstriyel kullanım alanları gelişen üretim yöntemleri ve inceleme teknolojileri sayesinde giderek artmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının yüksek özgül dayanımları sayesinde, genelde çeliklerin dayanımına yakın dayanım değerleri göstermelerine rağmen çeliğe göre çok daha hafiftirler. Ayrıca titanyum alaşımları yüksek korozyon direnci göstermektedir. Bu özellikleri sebebi ile havacılık, uzay, denizcilik, kimya ve petrokimya sanayilerinde titanyum alaşımları tercih edilmektedir (Dutta ve Froes 2016; Ezugwu ve Wang 1997; Froes 2015; Leyens ve Peters 2003; Veiga et al. 2012). Boeing şirketinin 2018 yılında yaptığı açıklamaya göre uçak iskeletlerinin üretiminde titanyum alaşımlarının kullanımının konvansiyonel alüminyum iskelete göre uzun vadede daha ekonomik olduğu tespit edilmiştir ve bunun sebebi olarak titanyum iskeletlerin benzer yüklere daha kolay dayanarak, daha az bakıma ihtiyaç duyduğu gösterilmiştir (“AERO - Boeing 787 from the Ground Up” 2018). Ayrıca, uçak iskeletlerinin yanı sıra, uçak motorlarında da titanyum parçalar kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de, Airbus 320’de kullanılan bir V2500 motoru verilmiş ve titanyumdan imal edilen parçalar işaretlenmiştir.



**Şekil 1.1:** V2500 uçak motorundaki titanyum alaşımından bileşenler (Inagaki et al. 2014).

Ayrıca insan doku ve kemikleri ile gösterdiği yüksek biyolojik uyum sebebi ile tıbbi implant üretimlerinde de titanyum alaşımları tercih edilmektedir (Brunette et al. 2001; Lautenschlager ve Monaghan 1993; Li et al. 2014). Şekil 1.2’de verilen kalça protezlerinin üretiminde titanyum alaşımları, zirkonyum ve diğer polimerler ile birlikte kullanılmaktadır. Burada kalça kemiği içindeki yük taşıyan metalik kök titanyumdan imal edilmektedir. Bunun yanı sıra omurga cıvataları, vücut içi kemik destek protezleri titanyum alaşımlarının biyomedikal uygulamaları arasındadır. Ayrıca Şekil 1.3’te bir örneği verilen dental implantların üretiminde de titanyum kullanılmaktadır. Fakat yapılan araştırmalar insan vücudunun titanyuma karşı aşırı hassasiyet ve alerjik tepkiler verebildiğini göstermiştir (Kim et al. 2019). Yapılan çalışmalarda yeterli klinik veri bulunmayışı tıbbi sanrıların tespitini güçleştirdiğinden, titanyumun zirkonyum veya seramik kaplamalar ile kullanımı bazı tıbbi çevrelerce tercih edilmektedir (Markowska-Szczupak et al. 2020).



Şekil 1.2: Kalça protezi parçaları (Liu et al. 2004).



Şekil 1.3: Titanyum civatalı dental implant (Liu et al. 2004).

İlerleyen malzeme bilimi ve üretim yöntemleri sayesinde, titanyum alaşımları mühendislik uygulamalarında kullanımı giderek daha da yaygınlaşmaktadır. Birçok sanayide, özellikle parça ağırlığının önemli olduğu alanlarda çelik yerine titanyum alaşımları tercih edilmektedir. Bu alaşımların kullanım alanlarının artması ile kaynaklı birleştirmeleri ve bu birleştirmelerin maruz kaldıkları çalışma koşulları da artmaktadır (Auwal et al. 2018; Gangwar ve Ramulu 2018; Sai et al. 2020).



Titanyum alaşımlarının maruz kaldıkları koşulların tespiti ve mühendislik tasarımlarında bu koşulların dikkate alınması, ilgili yapı elemanlarının verimli ve sağlıklı olması için büyük önem taşır.

Bu yapı elemanları çalışma ömürleri boyunca sıklıkla tekrarlı yükler ve titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu tip tekrarlı yükler, malzemenin statik dayanımının altında olmalarına rağmen, belirli bir tekrar sayısından sonra parçada kalıcı hasar ve kopmaya sebep olabilirler. Bu olaya yorulma adı verilir. Yorulmanın makro gözlemler ile tespiti gayet güçtür. Genellikle yorulmaya maruz kalan bileşenler çıplak gözle görülür çatlaklar oluşturmadan veya oluşturduktan kısa süre sonra koparlar. Makine elemanlarında ani ve beklenmedik kopmalar sebep olabildiğinden yorulma büyük tehlike arz eder. Bu sebeple tekrarlı yüklemelere maruz kalan mühendislik bileşenlerinin tasarımında yorulmaya karşı alınan önlemler büyük önem taşır. Aksi takdirde yorulma kaynaklı hasarlar, maddi kayıpların yanı sıra, insan hayatını tehdit eden kazalara sebep olabilmektedir. Kazaların ölümcül sonuçlarının olduğu havacılık endüstrisi için bileşenlerin yorulma ömürlerinin incelenmesinde özel süreçler uygulanmaktadır. Bileşenler düzenli olarak kontrol edilmekte ve değiştirilmektedir. Buna rağmen, havacılık endüstrisinde yorulma kaynaklı kazalar yaşanmaya devam etmektedir. Pollock vd. yaptığı araştırmada yorulma kaynaklı 139 uçak kazasını incelemiş ve yapılan kazaların yaklaşık %50'sinin can kaybına sebep olduğunu tespit etmiştir (Wild et al. 2021). Ayrıca, incelenen kazalardan sadece 2003-2019 yılları arasındakilerin 400 kişinin hayatını kaybetmesine yol açtığı belirtilmelidir. Olayların yaşandığı yakın tarih gelişen inceleme teknolojilerinin bile tam olarak yeterli olmadığını göstermektedir ve yorulmanın çalışır bileşenlerde tespitinin ne kadar güç olduğunu ortaya koymaktadır. Schijve yaptığı incelemede, yorulma kaynaklı kazaların önlenmesinde yorulmaya karşı tasarımların rutin kontrollerden ve ekonomik kaygılarla yapılan hasar dayanımından daha etkili olabileceğine dikkat çekmiştir (Schijve 2009). Ayrıca, yorulma incelemelerinin uçuş simülasyonları gibi çalışma koşullarını taklit eden testler ile desteklenmesini önermiştir.

Kaynak sırasında ve sonrasında malzemelerin özelliklerinin değişmesinden dolayı, kaynaklı birleştirmelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin ayrıca tespit edilmesi gerekir. Bu nedenlerle, kaynaklı birleştirmenin yorulma dayanımının tespiti

dinamik yüklere maruz kalan birçok diğer mühendislik uygulamasından farklı değerlendirilmelidir (Macdonald 2011). Değişen malzeme özelliklerinin yanı sıra ortaya çıkan yapısal düzensizlikler yüke maruz kalan kaynaklı bileşenlerde çentik etkisi ve benzeri etkilere sebep olabilirler (Radaj et al. 2006). Bu etkiler kaynaklı birleştirmelerin fiziksel dayanımlarının düşmesine sebep olabilir. Buda kaynaklı birleştirmelerin yorulma davranışlarının ayrıca değerlendirilmesinin gerekliliğine işaret etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında yorulma değerlendirmeleri için gerekli teorik altyapı için temel yayınlardan faydalanılmıştır (Hobbacher 2016; Macdonald 2011; Radaj et al. 2006; Radaj ve Vormwald 2013; Taylor et al. 2010). Yapılan literatür incelemeleri konu ile ilgili yakın zamanda birçok bilimsel çalışmanın yapıldığını gözler önüne sermektedir (Alencar et al. 2019; Baumgartner 2017; Chattopadhyay et al. 2011; Fischer et al. 2016; Fricke 2003; Haagensen and Maddox 2013; Kang and Luo 2020; Maddox 2003; Meneghetti and Campagnolo 2020; Pedersen 2019; Radaj et al. 2009). Yapılan bu incelemeler ve güncel literatür incelendiğinde malzeme, üretim yöntemleri ve çalışma koşulları gibi üretim öncesi yorulmaya karşı tasarım öğelerinin ağırlıklı olarak değerlendirildiği görülebilir (Alioua et al. 2018; Da Silva et al. 2019; Karakaş 2006; Ma et al. 2021; Ordoñez et al. 2019; Rozumek et al. 2020; Sága et al. 2020; Wang et al. 2021). Ancak bu çalışmaların yanı sıra, kaynaklı birleştirmelerin yorulma davranışlarının incelenmesi ve değerlendirilmesinde kullanılan deneysel ve nümerik yöntemlerin geliştirilmesi ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Ahola et al. 2021; Amiri et al. 2020; Braun et al. 2020; Foti ve Berto 2020; Karakaş et al. 2018; Luo et al. 2018; Tsutsumi et al. 2022).

Titanyum sınıf 5 veya GR5 (yaygın adı ile TiAl6V4) alaşımı, titanyum alaşımları arasında en sık kullanılanı olup, sanayideki titanyum uygulamalarının %50'sinden fazlasında tercih edilmektedir (Leyens ve Peters 2003). TiAl6V4, titanyum alaşımları için karakteristik olan yüksek özgül dayanım (mukavemet/yoğunluk oranı), korozyon direnci ve biyolojik uyumluluk özelliklerine sahiptir. Bu özellikleri özellikle havacılık ve uzay sanayinde tercih edilmesine sebep olmuştur. Diğer titanyum alaşımlara kıyasla daha yaygın oluşu TiAl6V4 alaşımının deneysel çalışmalarda tercih edilmesinde başta gelen etken olmuştur. Bunun yanı sıra, malzemenin elde edilebilirliğinin yüksek oluşu ve diğer titanyum alaşımlara

kıyasla maliyetini daha düşük olması bu tez çalışmasında da TiAl6V4 alaşımının tercih edilmesinin başlıca sebeplerindedir.

TiAl6V4 alaşımından kaynaklı birleştirmelerin düşük çevrim sayılı yorulma davranışlarının belirlenmesi özellikle havacılık sektöründe parçaların maruz kaldıkları tekrarlı yüklemelerin kaynak bölgesi üzerinde etkilerinin gözlemlenmesine imkân sağlayacaktır. Kaynak işleminin malzeme özellikleri üzerindeki olumsuz etkilerinin en aza indirgenmesi, titanyum gibi göreceli olarak daha değerli olan metallerin kaynağında daha da önem kazanmaktadır. Bu yaklaşımların ışığında, bu tez çalışmasında dar bir alanda yüksek ısı üretebilen mikrop plazma ark kaynağının kullanılmasına karar verilmiştir. Mikrop plazma ark kaynağı ile 1 mm kalınlığında TiAl6V4 levhalardan hazırlanan iki farklı geometrideki kaynaklı numuneler, yapılan yük kontrollü yorulma deneyleri sonucunda elde edilen verilerden faydalanılarak yorulma davranışı açısından incelenmiştir. Bu sayede TiAl6V4 alaşımının ince sacdan mikrop plazma ark kaynaklı numunelerinin mekanik özelliklerinin tespiti ve farklı yükleme koşulları altında yorulma açısından detaylı bir değerlendirilmesinin yapılması hedeflenmiştir.

Tez çalışmasının konusu ile ilgili olarak, titanyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin tespiti için yapılan deneysel çalışmalar taranmıştır. Yapılan incelemelerde genel olarak TiAl6V4 alaşımı üzerinde yapılan yorulma çalışmaları değerlendirilmiş ve özellikle kaynaklı birleştirilmelerin değerlendirildiği çalışmalara üzerine ağırlık verilmiştir. Yapılan literatür taraması sonucunda ulaşılan kaynakların kısa literatür özetleri aşağıda verilmiştir;

Froes; titanyumun tarihi, fiziksel metalürjisi, korozyon davranışı, maliyetini, günümüzdeki ve gelecekte beklenen kullanım alanlarını detaylı bir şekilde bu kitabında incelemiştir (Froes 2015).

Dutta ve Froes bu yayınlarında titanyum ve alaşımlarından yapı elemanlarının geleneksel yöntemleri yerine katmanlı imalat teknolojileri kullanarak imal edilmelerini incelemiştir (Dutta ve Froes 2016).

Leyens ve Peters bu yayınlarında titanyum ve alaşımları hakkında temel bilgileri sunmuş, malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri yanı sıra kullanım alanlarını incelemiştir (Leyens ve Peters 2003).

Brunette vd. titanyumun tıbbi uygulamaları üzerinde çalışmış, titanyum ve alaşımlarının üretim yöntemlerinin tıbbi uygulamalara etkilerini değerlendirmiştir (Brunette et al. 2001).

Li vd. titanyum alaşımlarının biyomedikal uygulamalarında yaşanan son gelişmeleri derleyerek, titanyum kullanımın avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmiş, gelişmeleri ve karşılaşılan zorlukları incelemiştir (Li et al. 2014).

Srivatsan vd. bu çalışmada TiAl6V4 alaşımından hazırlanan test numunelerinin mikroyapısını ve mikroyapının yk kontrollü yorulma deneylerindeki yorulma davranışı, hasar başlangıcı, hasar ilerlemesi ve çatlak davranışı üzerine etkilerini değerlendirmiştir. (Srivatsan et al. 2010).

Balasubramanian vd. bu makalede TIG, elektron ışın kaynağı ve lazer ışın kaynağı ile kaynaklanmış TiAl6V4 titanyum alaşımının kırılma mekaniği yaklaşımları kullanılarak çalışma ömürleri tespit etmişlerdir (Balasubramanian et al. 2011).

Mathisen vd. plazma ark kaynağı ile birleştirilen TiAl6V4 alaşımlı kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı ve uzama davranışlarını elektron geri saılma kırımını incelemesi ve yerinde uzama incelemesi yöntemlerini kullanarak değerlendirmiştir. (Mathisen et al. 2014).

Casavola vd. lazer kaynaklı GR2 ve GR5 titanyumun statik ve tekrarlı yüklemeler altında davranışlarını incelemiş, kaynak dikişindeki gerilme ve uzamanın gözlenebilmesi için deneysel verilere dayanan sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur (Casavola et al. 2009).

Casavola vd. GR2 ve GR5 titanyumun lazer ve hibrit kaynak yöntemi ile hazırlanan numunelerinin yorulma davranışlarını incelemiş, bu alaşımlar ve kaynak yöntemlerinin kendi aralarında kıyaslamalarını ortaya koymuştur (Casavola et al. 2011).

Walker vd. bu çalışmada seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen TiAl6V4 alaşımından numunelerin çatlak ilerleme davranışlarını inceleyerek üretim hatalarının malzemenin yorulma davranışına etkilerini incelemiştir (Walker et al. 2017).

Gallo vd. yüksek sıcaklıkta GR2 titanyumun yorulma davranışını incelemek için çentikli numuneleri 500° C'ta yorulma deneylerine tabi tutmuş ve elde edilen deneysel sonuçları uzama enerji yoğunluğu yöntemini kullanarak değerlendirmiştir (Gallo et al. 2015).

Kikuchi vd. bu çalışmada çift modlu harmonik yapılu TiAl6V4 alaşımlarını dört nokta bükme altında incelemiş ve titanyum alaşımının yapısının çatlak ilerleyişi üzerindeki etkisini gözlemlemiştir (Kikuchi et al. 2018).

Li vd. bu makalede %50-70 poroziteye ve farklı gözenek boyutlarına sahip saf titanyum numunelerin bası yorula dayanımları incelenmiş ve gözeneklerin yorulma davranışları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Li et al. 2017).

Carrion vd. TiAl6V4 ELI alaşımının ortalama gerilme etkisi ile ve bu etki olmadan yorulma davranışlarını inceleyerek bir karşılaştırma ortaya koymuştur (Carrion et al. 2017).

Carvalho vd. bu çalışmada uçak pnömatik sistemlerinde kullanılan lazer kaynaklı titanyum tüplerin yorulma davranışları tespit edilerek TIG kaynağı ile üretilen tüpler ile karşılaştırılmıştır (Carvalho et al. 2016).

Wang ve Wei, ticari saflıkta titanyum, TiAl6V4 ve TiV15Al3Sn3Cr3 alaşımlarının kaynaksız ve TIG kaynaklı numunelerinin farklı uzama oranlarındaki çekme özelliklerini incelemiştir. (Wang ve Wei 2004).

Tseng vd. mikrop plazma ark kaynağı kullanılarak farklı kaynak parametreleri ile kaynaklanmış, kenar birleştirme kaynaklı, tip 304 paslanmaz çelikten numunelerin kaynak kaliteleri ve morfolojik yapıları incelenerek ideal kaynak parametreleri belirlenmiştir (Tseng et al. 2003).

Prasad vd. darbeli akım ile mikroplazma ark kaynağı kullanılarak kaynaklanmış tip 304L paslanmaz çelik sacları incelemiş, farklı kaynak parametrelerinin kaynak bölgesindeki kaynak havuz geometrisi, mikroyapı ve çekme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir (Prasad et al. 2011).

Karimzahed vd. mikroplazma ark kaynağı kullanılarak kaynaklanmış ince TiAl6V4 alaşımından sacların ısı tesiri altında kalan bölgelerindeki mikroyapıları incelemiş, bu bölgelerdeki tane boyutlarındaki değişimleri ve poroziteyi gözlemlemiştir (Karimzadeh et al. 2005).

Baruah ve Bag, TiAl6V4 alaşımından 500 µm kalınlığındaki sacların mikroplazma ark kaynağı ile kaynaklanması için uygun kaynak parametrelerinin tespitini sağlamış ve sacların başarılı şekilde birleştirilmesini gerçekleştirmiştir (Baruah ve Bag 2016).

Wang vd. ultra-ince titanyum folyonun özel olarak tasarlanmış bir mikroplazma ark kaynak makinesi ile kaynaklanmasını sağlayarak farklı kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir (Wang et al. 2012).

L.W. Tsay ve C. Y. Tsay, lazer ile kaynaklanmış TiAl6V4 alaşımından levhaları yorulma testlerine tabi tutmuş ve mikroyapılarının yorulma çatlak ilerleme hızı üzerindeki etkilerini incelemiştir (Tsay ve Tsay 1997).

Greitemeier vd. TiAl6V4 alaşımından lazer ve elektron demeti ergitmeli eklemeli üretim yöntemleri kullanılarak üretilmiş numunelerin mekanik özelliklerini test etmiş ve yorulma davranışlarını değerlendirmiştir (Greitemeier et al. 2017).

Vaidya vd. lazer demeti kaynağı ile birbirlerine kaynaklanan AA6056 ve TiAl6V4 sacların kaynak bölgesindeki mikroyapıları monotonik yüklemelerdeki mekanik özelliklerini araştırmıştır (Vaidya et al. 2009a).

Vaidya vd. lazer demeti kaynağı ile birbirlerine kaynaklanan AA6056 ve TiAl6V4 saclarını yorulma deneylerine tabi tutarak, yorulma çatlak başlangıcı ve çatlak ilerleme hızları incelemiştir (Vaidya et al. 2009b).

Liu vd. sürtünme kartirma kaynağı kullanılarak kaynaklanmış TiAl6V4 alaşımının kaynak bölgesindeki mikroyapısını ve monotonik yüklemeler altında mekanik özelliklerini değerlendirmiştir (Liu et al. 2010).

Iwata, ve Matsuoka gemi yapılarında titanyum kullanılmasını yaygınlaştırmak amacıyla ticari saflıkta titanyum GR2'den köşe kaynaklı levhaların yorulma dayanımlarını tespit etmişlerdir (Iwata ve Matsuoka 2004).

Mohandas vd. elektron demeti kaynağı ve sürtünme kartirma kaynağı kullanılarak kaynaklanmış VT9 titanyum alaşımının düşük çevrimli yorulma davranışlarını incelemiştir (Mohandas et al. 1996).

Roggensack vd. saf titanyumdan lazer ve plazma ile kaynaklı numuneleri yorulma testlerine tabi tutarak kaynak yöntemlerinin numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır (Roggensack et al. 1993).

Wiskott vd. ticari saflıkta GR2 titanyumdan lazer, elektron demeti, elektrik ark kaynağı, titanyum ve altın dolgulu sert lehim ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapılarındaki değerimleri değerlendirmiştir (Wiskott et al. 2001).

Karakaş, magnezyum alaşımlarından kaynaklı birleştirmelerin yorulma davranışlarını mikro destek ve farzedilen eşdeğer yarıçap yöntemlerini kullanarak değerlendirmiştir (Karakaş 2006).

Karakaş vd. AZ31 magnezyum alaşımlarından kaynaklı birleştirmelerin yorulma ömrünün tespiti için mikro-destek etkisi konsepti uygulanmış ve bu konseptin farklı içyapılar için uygulama imknları ve sınırları gösterilmiştir (Karakaş et al. 2007).

Karakaş ve Glsz bu çalışmada kaynaklı birleştirmelerin statik ve yorulma dayanımına etki eden çeşitli faktörleri belirtmişlerdir (Karakaş ve Glsz 2007).

Karakaş vd. bu makalede kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımı değerlendirmelerinde kullanılan yerel yöntemlerden yapısal zorlama yöntemi incelenmiştir. (Karakaş et al. 2009).

Karakaş; bu makalede Smith, Watson ve Topper'e göre ortalama gerilme hasar parametresi modeline dayanarak magnezyum alaşımlarından kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımını değerlendirmiştir (Karakas 2013).

Karakaş bu çalışmada, magnezyumdan kaynaklı birleştirmeler için deneysel verileri kullanarak Neuber'in gerilme ortalama yönteminin uygulanabilirliğini kontrol etmiş ve magnezyum alaşımları için mikroyapısal uzunluk tespit etmiştir (Karakaş 2017).

Yapılan literatür taramasında kaynaklı titanyum alaşımları üzerine yapılan yorulma deney çalışmalarında genelde alın kaynağı tercih edildiği gözlemlenmiş olup, bu tez için önerilen bindirme kaynaklı numunelere sık rastlanılmamaktadır. Ayrıca mikroplazma ark kaynağı ile kaynaklanan ince titanyum levhaların mekanik özellikleri ve yorulma davranışları üzerine yeterli çalışma olmadığı gözlemlenmiştir. Literatürdeki bu eksikliklerin bu tez çalışması ile kapatılabileceği düşünölmektedir.

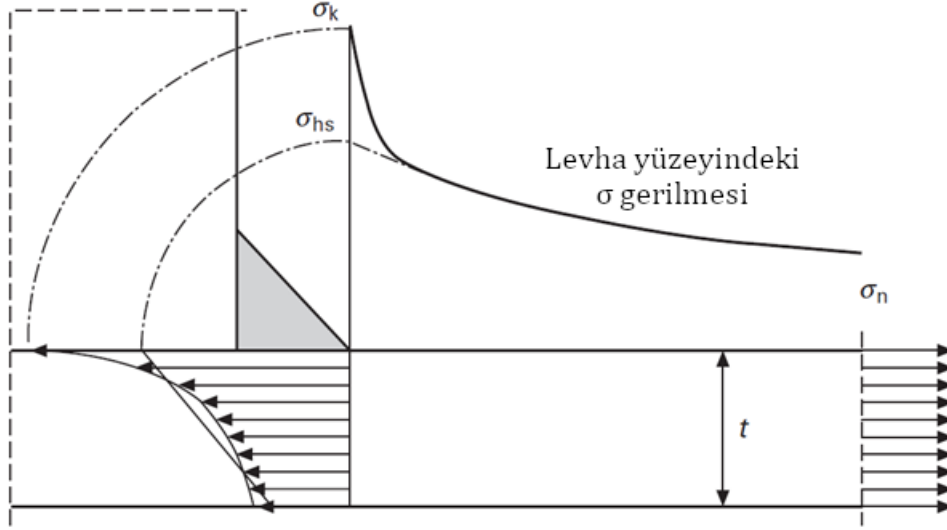


## 2. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELER İÇİN YAYGIN YORULMA DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Mühendislik bileşenlerinin güvenli tasarımları için dikkat edilmesi gereken en önemli faktörlerden birisi olan yorulmanın hassas ve hızlı bir şekilde değerlendirilebilmesi, tasarım kalitesinin artmasına ve maliyetlerin düşmesine imkân verecektir. Bu sebeple kırılma mekaniği, yapısal dayanım ve malzeme yorulması hakkındaki bilimsel çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Konu hakkındaki hızla artan akademik çalışmalara rağmen, malzeme yorulması hakkındaki temel prensipler günümüzde geçerliliğini korumaktadır. Bu tez çalışmasının geleceği ile ilgili daha isabetli bir öngörü ortaya koyabilmek için sık kullanılan güncel yorulma değerlendirme yöntemleri bu bölümde özetlenmiştir.

Yorulma deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilerek anlamlı bir biçimde yorumlanabilmesi amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin hepsinin kaynaklı birleştirmelerin karmaşık genel ve yerel gerilmeleri, değişen malzeme özelliklerini de hesaba katarak değerlendirebilmesi mümkün değildir. Dolayısıyla yorulma verilerinin değerlendirmesinde kullanılan yöntemler yapılan çalışmalar sonucu özelleşmiştir.

Kaynaklı birleştirmelerin yorulma davranışlarının incelenmesinde kaynaklı parçalarda da olduğu gibi gerilmelerin değerlendirilmesi büyük önem taşır. Ancak, kaynaklı birleştirmelerin birçok yapısal düzensizlikte olduğu gibi gerilme dağılımında değişikliklere sebep olacağı unutulmamalıdır (Macdonald 2011; Radaj et al. 2006). Kopan kaynaklı birleştirmelerin çatlak başlangıç noktaları gözlemlendiğinde hasarların genelde kaynak dikişi veya kaynak kökünde olması bu sebeptir. Kaynaklı birleştirmelerdeki gerilme dağılım ve konsantrasyonlarının tespiti, yorulma davranışlarının belirlenmesinde büyük rol oynar. Tek eksenli bir yük altındaki kaynaklı bir birleştirmedeki gerilme dağılımlarının temsili gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



**Şekil 2.1:** Eksenel yüklemeye altınada numunede oluşan gerilmelerin şematik gsterimi (Macdonald 2011).

Şekil 2.1’de, kaynaklı parçaların yorulma dayanımlarının değerlendirilmesinde etkin olan üç gerilme tipi verilmiştir. Kaynaklı birleştirmenin yerel etkilerinden bağımsız olarak yük ve kesit alanı etkisi ile oluşan gerilmeye nominal gerilme ( $\sigma_n$ ) denir. Boyuna gerilme  $\sigma$ ’nın kaynak dikişine yaklaşıldıkça arttığı gözlemlenebilir. Dikiş geçiş noktasında, levha yüzeyinde gerilmenin ulaştığı değere sıcak-nokta yapısal gerilmesi ( $\sigma_{hs}$ ) adı verilir. Kaynak dikişi adeta geometrik bir çentik gibi davranarak gerilmelerin daha da artmasına sebep olmaktadır. Bu gerilmelerin ulaştığı en yüksek değere ise çentik gerilmeleri ( $\sigma_k$ ) adı verilir. Yorulma yüklemeleri sonucu oluşan gerilmeleri esas alan yöntemler genelde bu üç gerilmenin değişen geometriler ve yüklemeye koşullarında tespitini esas alırlar.

## 2.1 Nominal Gerilme Yöntemi

Nominal gerilme, en basit haliyle bölüm 2’de de tanımlandığı gibi, yerel düzensizlikler göz ardı edilerek sadece yük, yüklemeye şekli ve kesit alanının dikkate alındığı gerilme şeklidir. Genel olarak nominal gerilme denklem 2.1’deki gibi ifade edilebilir.

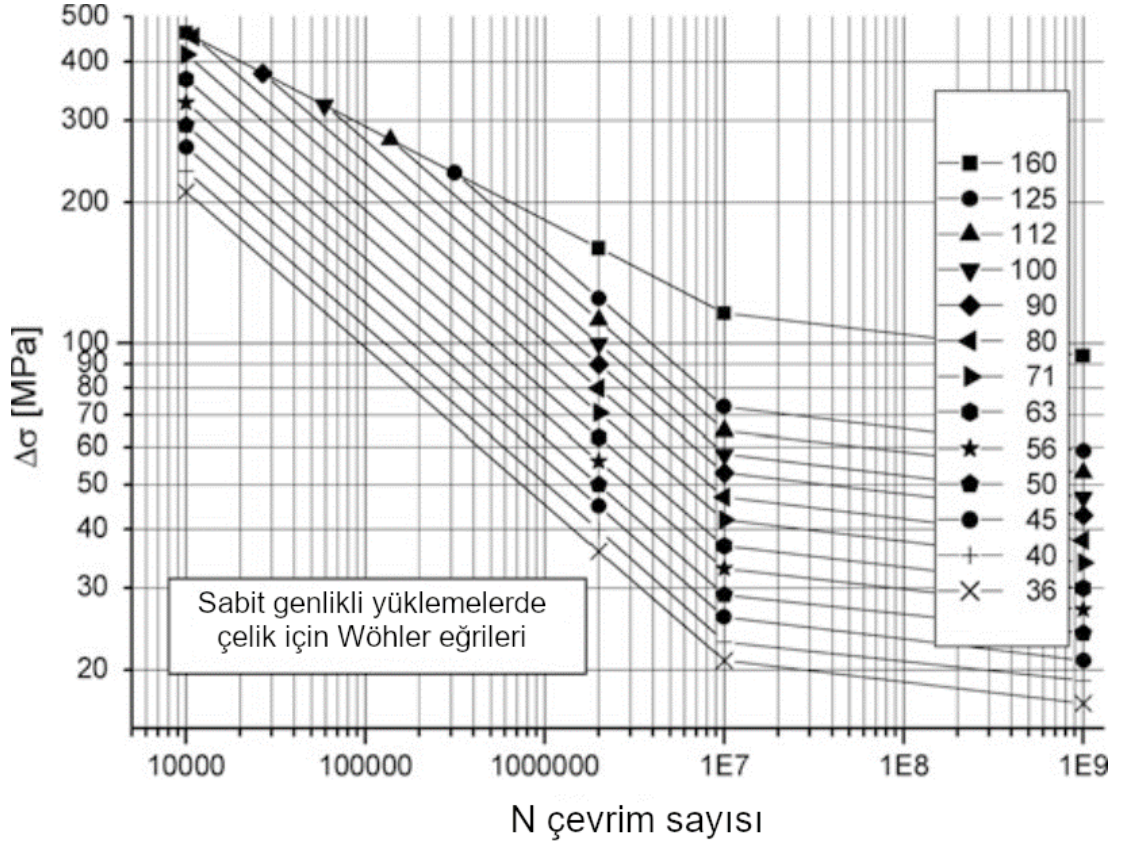
$$\sigma_n = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

Burada  $F$  etkin kuvvet,  $S$  ise kesit alanıdır. Yükleme şekli ve yük altındaki parçanın geometrisi etkin kuvvetin ve uygun kesit alanının belirlenmesinde büyük rol oynar. Yorulma değerlendirmelerinde kesit alanı yorulma-kritik bölgelerin kesitine karşılık gelir.

Nominal gerilmeye dayanan yorulma değerlendirmeleri, malzeme yorulmasının incelenmesinde sık başvurulan bir mühendislik aracıdır. Yapısal detaylardan kaynaklanan yerel gerilme konsantrasyonları ve kaynaklı birleştirmelerin yarattığı çentik etkisi genelde nominal gerilme değerlendirmelerinde dikkate alınmaz. Sadece etkin kuvvet ve geometriyi inceleyerek hızlı ve kolay hesaplamalara olanak vermesi sayesinde nominal yöntemler birçok alanda önemini korumaktadır. Fakat, nominal gerilme yöntemlerinin kaynaklı bağlantıların oluşturduğu karmaşık geometri ve değişen iç yapıyı beklenen hassasiyette yorumlayamadığı bilinmektedir.

Nominal gerilme yöntemi için uygun Wöhler eğrileri belirlenerek ve kaynak geometrisine uygun çentik etkisinin değerlendirildiği bir yorulma sınıfı seçilerek, kaynaklı birleştirmelerin yorulma değerlendirmeleri mümkündür. Wöhler eğrilerinin belirlenmesinde malzeme, kaynak dikiş geometrisine bağlı çentik sınıfı ve üretim kalitesi esas alınır. Bu sayede belirtilen bu parametrelere uyan veya yakın değerlere sahip mühendislik bileşenlerinin yorulma dayanımları tespit edilebilir.

Uluslararası Kaynak Enstitüsü (International Institute of Welding - IIW), kaynaklı birleştirmelerin yorulmaya karşı tasarımları için verdiği tavsiyelerde standartlaştırdığı Wöhler eğrilerini sunmuştur (Hobbacher 2016). Bu tavsiyelere göre verilen referans Wöhler eğrileri, on milyon çevrim sayısındaki bükülme noktasından ( $N_k = 10^7$ ) önce  $k = 3$  eğime, sonra ise  $k = 22$  eğime sahiptir. Şekil 2.2'de sabit gerilme genlikli yüklemelere maruz bırakılan çelikten kaynaklı birleştirmeler için referans Wöhler eğrileri verilmiştir. Bu şekilde bükülme noktasındaki eğimdeki değişim gözlemlenebilmektedir. Ancak çok yüksek çevrim sayılı uygulamalar haricinde bükülme noktasından sonra Wöhler eğrisinin yatay bir doğru olduğu varsayılabilir. Değişken genlikli yüklemeler için ise bükülme noktasından önceki eğimin  $k = 5$  olması önerilmiştir. Verilen bu referans Wöhler eğrilerinin iki milyon çevrim sayısındaki ( $N = 2 \cdot 10^6$ ) yorulma dayanımının  $N/mm^2$  cinsinden değerine yorulma dayanım sınıfı (FAT-sınıfı) adı verilir (Hobbacher 2016; Macdonald 2011).



Şekil 2.2: Sabit genlikli yüklemelerde çelik için referans Wöhler eğrileri (Hobbacher 2016).

Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerde oluşabilecek dayanım azaltıcı unsurlar göz önüne alınarak emniyetli nominal gerilmeler de kullanılabilir. Bu emniyetli nominal gerilmeler, dayanılabilir nominal gerilme değerlerinin bir emniyet katsayısı kadar azaltılması ile belirlenir. Bu emniyet katsayısının tespitinde diğer yorulma değerlendirme yöntemlerinden de yararlanılabilir.

Açıklanan bu sebeplerden de görülebileceği gibi nominal gerilme yöntemlerin yaygın kullanılmasındaki en önemli faktör kolay uygulanabilirliğidir. Sık kullanılan birleştirme şekilleri, yaygın malzemeler ve ortalama üstü kaynak kalitesine imkân veren uygulama koşulları nominal değerlendirmeler için idealdir.

## 2.2 Yerel Gerilme Yaklaşımları

Yerel yöntemler, nominal yaklaşımların göz ardı ettiği yerel değişkenleri, değişen malzeme karakteristik özelliklerini ve yerel yorulma davranışını değerlendirebilmektedir. İncelemelerde çentik etkileri, kırılma ilerleme hızı, gerilme

dağılımı gibi yorulma parametreleri değerlendirmelere dahil edilerek malzeme davranışı isabetli bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu durum, daha hassas referans Wöhler eğrilerinin bulunmasına ve dolayısıyla yorulmaya karşı daha hassas tasarımlara olanak sağlamaktadır.

Yerel yöntemler birçok mühendislik alanında kaynaklı ve kaynaklı olmayan bileşenlerin yorulmasını değerlendirmek amacıyla çok sayıda çeşitli alt yöntemi kapsamaktadır. Bu yöntemler, kullandıkları yaklaşımlar ve değerlendirdikleri parametreler esas alınarak üç ana başlıkta incelenebilirler;

1. Yapısal gerilme yöntemleri
2. Çentik gerilmesi yöntemleri
3. Kırılma mekaniği yöntemleri

Yapısal gerilme yöntemleri nominal gerilme yöntemlerinin göz ardı ettiği kaynak geometri kaynaklı yapısal değişikliklerden kaynaklanan gerilme yoğun bölgeleri değerlendirir. Fakat bu değerlendirmelerde, doğrudan yerel gerilme artışlarına sebep olan geometrik öğeleri (örneğin çentikler) çoğunlukla göz ardı etmektedir. Dolayısıyla yerel gerilme artışlarının belli bir oranda göz ardı edilebilir olan büyük mühendislik yapılarında sağladığı hızlı hesap yetenekleri için tercih edilirler.

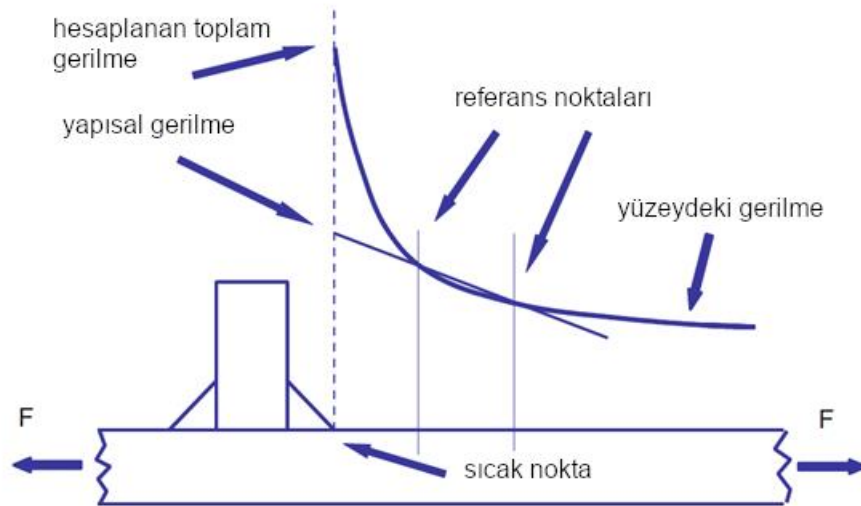
Çentik gerilmesi yöntemleri ise kaynakların kaynak dikiş geçişi ve dikiş kökündeki gerilmelerin hesaplanarak değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Bilindiği üzere kaynak dikiş geçiş bölgesi ve dikiş kökleri hep gerilme konsantrasyonu hem de dayanım düşüşü olarak geometrik bir çentik gibi davranmaktadır. Dolayısıyla kaynaklı birleştirmelerde işlemde kaynaklanan çentik davranışı hesaplamalarda geometrik bir çentiğe yaklaştırılarak çentik form sayıları ve bağlı olarak çentik gerilmeleri hesaplanabilmektedir. Bu yöntemlerin temel avantajı göreceli olarak hassas sonuçlar verirken, uygulamaları zor değildir. Ancak sonlu eleman analizlerinde, özellikle çentik davranışı gösteren bölgelerde yeterli hassasiyette modellemeler ve simülasyonlar yapılması gerekmektedir.

Yorulma değerlendirme yöntemleri kaynak gibi karmaşık geometrilerin yorulma analizleri sırasında hesapları makul sürelerde ve mümkün olan en az gayret ile tamamlamayı hedeflediklerinden bazı sadeleştirmeler ve ön kabuller yapmak

zorundadır. Ancak bu yaklaşım yapılan hesaplamaları mühendislik bileşenlerinin çalışma koşullarındaki gerçek davranışlarından uzaklaştırır. Bu durumu en aza indirmek üzere kırılma mekaniği yöntemleri gerilme ve uzama değerlerinin yanı sıra, kırılma mekaniğini doğrudan ilgilendiren çatlak boyu, çatlak başlangıcı ve çatlak ilerleme hızı gibi parametreleri yorulma davranışını değerlendirmekte kullanılmaktadır. Ancak bu yaklaşım aynı zamanda hesapları karmaşıklaştırmaktadır.

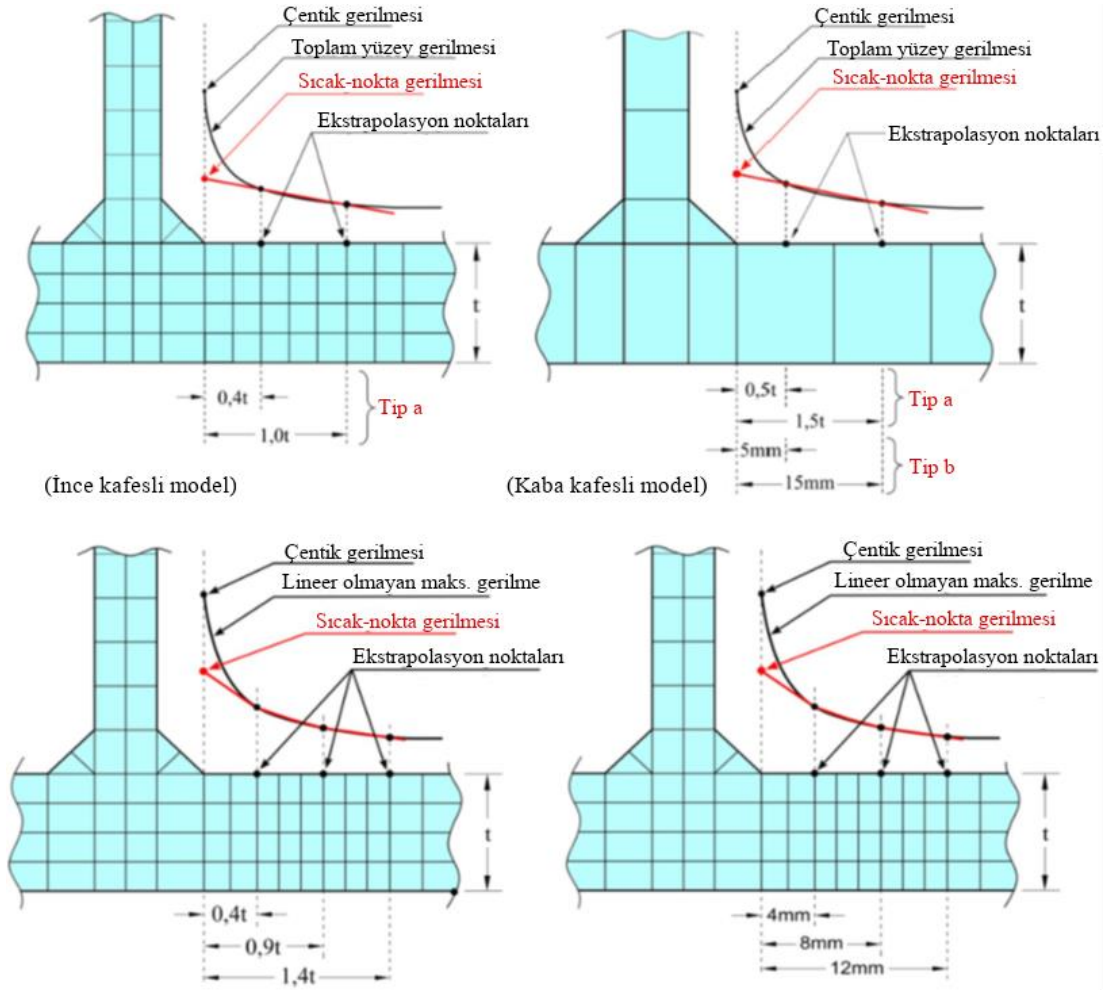
### 2.2.1 Yapısal gerilme yöntemleri

Yapısal gerilmeler, nominal gerilmelerin aksine, kaynak konfigürasyonu ve bileşen şekli sebebiyle gerilme dağılımında farklılıklara yol açan etkenlerin de değerlendirildiği gerilmelerdir. Başka bir deyişle, yapısal gerilmeler yerel gerilme artırıcı, çentik benzeri etkenler göz ardı edilerek yorulma hasarının olduğu kritik bölgelerdeki gerilme değerleridir. Genelde çentik başlangıç noktası olan bu kritik bölgelerde tespit edilen çevrimsel yüklemeler sırasındaki sıcaklık artışı sebebiyle “sıcak-nokta” adı verilmiştir. Bu sebeple, yapısal gerilme yöntemlerine sıcak-nokta gerilmesi yöntemleri de denmektedir. Bu sıcak-noktaların tespitinde kaynak geometrisi ve çentik başlangıç noktaları büyük rol oynamaktadır. Ancak kaynak dikişinin sebep olduğu yerel gerilme konsantrasyonları genelde göz ardı edilir.



Şekil 2.3: Yapısal gerilmelerin tespiti için yapılan ekstrapolasyonun şematik gösterimi (Hobbacher 2016).

Şekil 2.3'te şematik olarak gösterildiği üzere gerilmeler bileşenin yüzeyinde ölçülürse, kaynak dikişinden uzaklaştıkça azalır. Bunun sebebi kaynak dikişinin sebep olduğu gerilme konsantrasyonunun etkisinin, dikişten belirli bir uzaklıktaki referans noktasından sonra etkisiz hale gelmesidir. Yapısal gerilmelerin kaynak dikiş geçiş noktasında tespiti için ise bu referans noktasından sonra ölçülen gerilmelerin dağılımının, kaynak dikiş geçiş noktasına doğrusal veya doğrusal olmayan ekstrapolasyonu kullanılabilir. İşte bu hesaplanan veya ölçülen hayali gerilmeye sıcak-nokta yapısal gerilmesi  $\sigma_{hs}$  adı verilir. Çentik etkisinin bu gerilmede hesaba katılmaması da bu ekstrapolasyon sebebiyledir. Özellikle bilgisayar destekli sonlu eleman analizlerinin yaygınlaşması ile yapısal gerilmelerin yorulma değerlendirmelerinde kullanımları artmıştır. Referans noktasından sonraki gerilme dağılımlarının hassas tespiti bu sonlu elemanlar analizleri ile mümkün olmuştur. Referans noktaları ise bileşenin et kalınlığı  $t$  değerine bağlı olarak hesaplanır veya dikiş geçiş noktasından itibaren sabit bir mesafe alınır. Kullanılan sonlu elemanlar modellerinin kafes boyu (ince veya kaba kafesli oluşları), ekstrapolasyonun tipi ve referans noktaları incelenen kaynak geometrisi ve yükleme koşullarına göre belirlenir. Yapısal gerilmelerin tespitinde kullanılan bu parametreler şematik olarak Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Genelde yüzeyden kaynaklı (tip a) birleştirmelerin parçaların referans noktaları genellikle plaka kalınlığına bağlı olarak hesaplanırken, kenarlarından kaynaklı birleştirilen (tip b) parçaların referans noktaları yorulma kritik noktadan sabit bir mesafe seçilir (Niemi et al. 2006).



**Şekil 2.4:** Yapısal gerilmelerin tespitinde kullanılan farklı ekstrapolasyon yöntemleri, sonlu eleman kafesleri ve referans noktaları (Hobbacher 2016).

Bu yaklaşım kaynak dikiş geçiş bölgesinde başlayan yorulma çatlakları için kullanılır. Ancak, yapısal gerilme yaklaşımları, kaynak kökünde başlayan yorulma çatlakları için de genişletilmiştir. Sonlu eleman analizleri yardımıyla sıcak-nokta yapısal gerilmeleri doğrusallaştırılarak, kaynak kökündeki yorulma çatlakları için ekten parametre kabul edilip yorumlanabilirler (Fricke 2006; Fricke ve Doerk 2006; Savaidis ve Vormwald 2000).

Yapısal gerilmeler ayrıca kalınlık boyunca iç gerilmelerin ekstrapolasyonları ile tespit edilebilir (Dong 2001). Bu ekstrapolasyonların tespitinde kaynaklı bileşenin kalınlığı ve kopma sırasındaki çatlak uzunluğu büyük rol oynar. Bu yaklaşım özellikle yapısal gerilmelerin köşe birleştirmelerde kullanılmasına olanak sağlar. Ancak, bu yaklaşımın isabetli yorulma değerlendirmeleri yapabilmesi için ekstrapolasyonun derinliğinin deneysel çalışmalar ile tespitine ihtiyaç vardır.



Karmaşık kaynaklı birleştirmelerin yorulma değerlendirmelerinin sadece nominal gerilme yöntemleri kullanılarak yapılması çok zordur. Çentik gerilme yaklaşımları ise karmaşık kaynaklı birleştirmeleri değerlendirebilir. Fakat, genellikle karmaşık hesaplamalara ve ince kafes örgülü sonlu eleman analizlerine ihtiyaç duyarlar. Büyük mühendislik yapılarında ise böyle detaylı hesaplama ve analizler yapmak pratik ve verimli değildir. Yapısal gerilme yaklaşımları ise bu tip büyük yapıların geometrisinden kaynaklı gerilme etkilerini değerlendirirken, bölgesel gerilme yoğunluklarını göz ardı ederek yorulma değerlendirmelerinin makul kolaylık ve hassasiyetle gerçekleştirilmesine olanak verir. Bu sebeple, köprü, çelik konstrüksiyon, uzay kafes çatı gibi kaynaklı birleştirmeler içeren mühendislik bileşenleri genelde yapısal gerilme yaklaşımları ile değerlendirilirler.

### 2.2.2 Çentik gerilmesi yöntemleri

Çentik gerilmesi yöntemleri yerel geometri ve yapının geometrik oranlarını dikkate olarak çentik etkisinin değerlendirilmesi esasına dayanır. Çentik etkisinin belirlenmesi sayesinde yerel çentik gerilmeleri hesaplanabilir. Hesaplanan bu gerilmeler yorulma kritik noktadaki gerilmelere karşılık gelmektedir. Kaynaklı birleştirmeler için bu noktalar hem gerilme konsantrasyonu hem de dayanım düşüşü olarak bir çentik gibi davranan kaynak dikiş geçiş bölgesi veya kaynak köküne karşılık gelmektedir.

Keskin çentikler değerlendirildiğinde, çentik kökünün yarıçapının sıfır olduğu varsayılır. Mühendislik tasarımı açısından en kötü durumu tasvir eden bu yaklaşım, çentik kökündeki gerilmelerin sonsuza yaklaşmasına sebep olur. Çentik kökünde varsayılan çok yüksek gerilmelere rağmen malzeme davranışındaki mikroyapısal değişimlerin yerel akmaları zorlaştırdığı gözlemlenmiştir. Yani yorulmada etkin olduğu düşünülen efektif çentik gerilmeleri ( $\sigma_{eff}$ ), çentik kökündeki çentik gerilmelerinden daha düşüktür. Yerel gerilme dağılımı değerlendirilerek bu mikroyapısal destek etkisi değerlendirilebilir (Neuber 1946, 1968, 2013). Belirlenen bu yerel gerilme dağılımı mikroyapısal uzunluk ( $\rho^*$ ) adı verilen mesafede ortalaması alınarak efektif çentik gerilmesi elde edilir (Denklemler 2.2). Bu yaklaşıma Neuber'in gerilme ortalaması yöntemi denir. Gerilme ortalaması yöntemi yerel gerilme

dağılımını hesaplamalara dahil ederek gerilmelerde farklılıklara sebep olabilecek bütün değişkenlerin yorulma davranışı üzerindeki etkilerini hesaplara dahil etmiştir. Fakat, bu yöntem gerilme dağılımının tespiti için detaylı sonlu eleman analizlerine ihtiyaç duymaktadır.

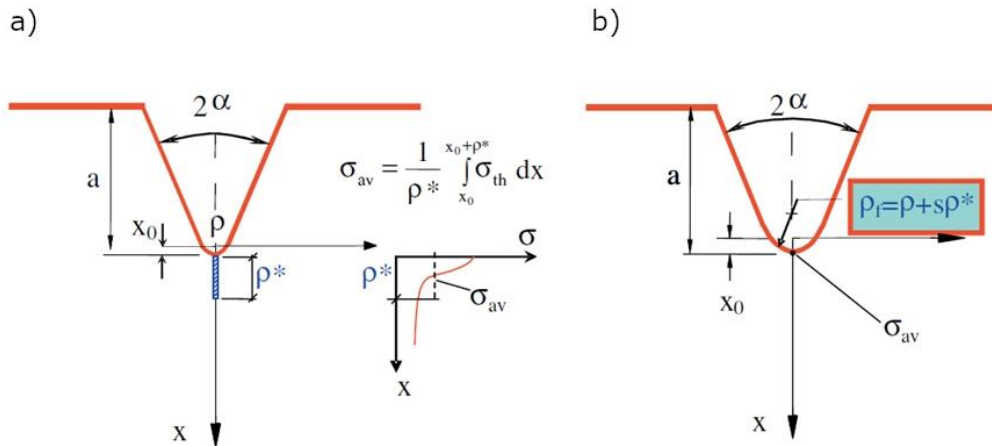
$$\sigma_{eff} = \frac{1}{\rho^*} \int_0^{\rho^*} \sigma(x) dx \quad (2.2)$$

Burada yerel gerilme dağılımı, çentik köküne dik  $x$  mesafesine bağlı  $\sigma(x)$  fonksiyonu olarak verilmiştir.

Gerilme ortalaması yönteminin her çalışmada detaylı sonlu eleman analizlerine ihtiyaç duyması, daha kolay uygulanabilir hayali çentik yuvarlatma yönteminin geliştirilmesine sebep olmuştur (Radaj 1990). Gerilme ortalaması yönteminin varsayımları esas alınarak çentik kökünün sahip olduğu yarıçapın mikroyapı etkisini dikkate alan hayali bir yarıçap ( $r_f$ ) ile yuvarlatıldığı düşünülebilir (Neuber 1946, 1968, 2013). Gerilme ortalaması yöntemi ile hayali çentik yuvarlatma yönteminin kıyaslaması Şekil 2.5'te sunulmuştur. Ayrıca bu hayali yuvarlatma yarıçapının hesaplanması Denklem 2.3'te verilmiştir (Radaj 1990).

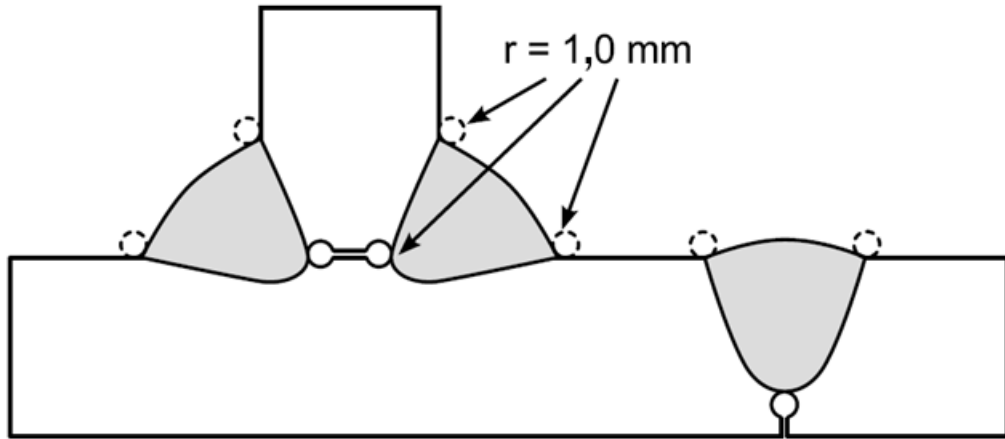
$$r_f = r_{reel} + \rho^* \cdot s \quad (2.3)$$

Burada  $r_{reel}$  gerçek çentik yarıçapı ve  $s$  çok-eksenlilik katsayısıdır.



Şekil 2.5: Mikroyapısal destek etkisinin şematik gösterimi a) Gerilme ortalaması yöntemi b) Hayali çentik yuvarlatma yöntemi (Sonsino et al. 2012).

Hayali çentik yuvarlatma yöntemi bütün çentiklerin değerlendirilmesinde kullanılabilir olmasına rağmen, uygulama kolaylığı amacıyla keskin çentikler için geçerli olan en kötü durum varsayılır ve  $r_{reel} = 0$  kabul edilir. Bu sayede hayali yuvarlatma yarıçapı, yükleme şekli parametresi olan  $s$  ve malzeme parametresi olan mikroyapısal uzunluk  $\rho^*$  kullanılarak hesaplanabilir. Çekme gerilmelerine maruz kalan düşük dayanımlı çelik numuneler için yapılan hesaplamalarda  $s = 2,5$  ve  $\rho^* = 0,4$  mm bulunmuş ve çelikler için  $r_f = 1$  mm değerini hesaplanmıştır. Her ne kadar düşük dayanımlı çelikler için hesaplanmış olsa da  $r_f = 1$  mm değerinin tüm çelikler için 5 mm'den büyük kalınlıklardaki kaynaklı birleştirmelerde uygulanabilir. Hatta alüminyum ve magnezyum alaşımları için uygulaması olumlu sonuçlar vermiştir (Karakas et al. 2008; Morgenstern et al. 2006). Daha düşük kalınlıklarda ise kırılma mekaniği hesaplamaları ile tespit edilmiş  $r_f = 0,05$  mm değeri (Eibl et al. 2003; Eibl ve Sonsino 2001; Schlemmer et al. 2003; Zang et al. 2002; Zhang ve Sonsino 2005) ve son dönemlerde endüstriyel talep sebebiyle kullanılmaya başlayan  $r_f = 0,3$  mm değeri bulunmaktadır. Kaynaklı birleştirmelerde çentik etkisi değerlendirilirken bu hayali yuvarlatma yarıçapı Şekil 2.6'da gösterildiği şekli ile uygulanır.



Şekil 2.6: Kaynaklı birleştirmelerin çentiklerinin hayali yuvarlatma yarıçapı kullanılarak yuvarlatılması (Baumgartner 2017; Hobbacher 2016).

Kritik mesafe yöntemi ise gerilme ortalaması yöntemine benzer bir şekilde efektif çentik gerilmesinin hesaplanmasında yerel gerilme dağılımını kullanmaktadır. Bu yöntemle göre, yerel gerilme dağılımı değerlendirilirken çentik kökünden itibaren

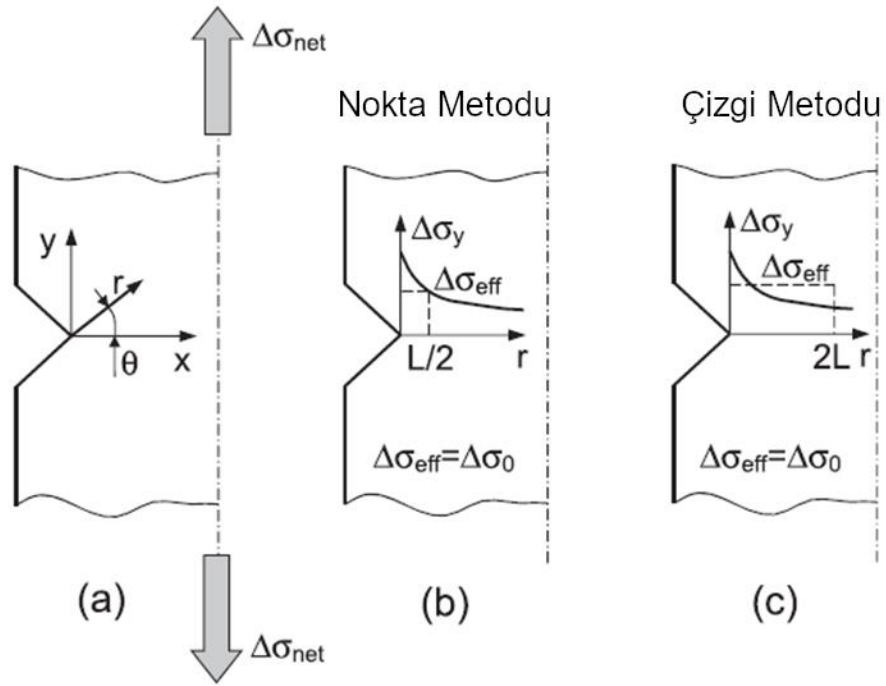
belirli bir mesafe uzaklıktaki gerilme değerinin yorulma davranışında etken gerilmeye karşılık geldiği değerlendirilir (Peterson 1950, 1953, 1959). Başka bir deyişle, çentik kökünden belirli bir  $a$  kritik mesafedeki gerilme değeri, efektif çentik gerilmesi  $\sigma_{eff}$  değerine eşittir. Bu ilişki denklem 2.4'te verilmiştir.

$$\sigma_{eff} = \sigma(x = a) \quad (2.4)$$

Görölebileceği üzere gerilme ortalaması yöntemi ve kritik mesafe yöntemi arasında benzerlikler bulunmaktadır. Kritik mesafe  $a$  değeri de mikroyapısal uzunluk  $\rho^*$  gibi bir malzeme parametresi olduğundan aralarındaki ilişki basitçe denklem 2.5'teki şekilde tanımlanabilir (Taylor 2008; Taylor et al. 2010).

$$\rho^* = 4 \cdot a \quad (2.5)$$

Kritik mesafe yöntemi temelinde geliştirilen Kritik Mesafeler Teorisi'ne (KMT) göre bu malzeme parametreleri karakteristik uzunluk parametresi  $L$  cinsinden tanımlanabilirler (Taylor et al. 2010). KMT, benzer malzeme temelli parametreleri kullanan yöntemleri tek bir  $L$  parametresi ile birleştirmeyi amaçlamaktadır. KMT'ye göre, bir doğru parçası üzerindeki gerilme dağılımının ortalamasını aldığından gerilme ortalama yöntemine "çizgi metodu" adı verilmiştir. Kritik mesafe yöntemine ise gerilme dağılımı üzerindeki tek noktadaki gerilmeyi değerlendirdiğinden KMT'de "nokta metodu" adı verilmiştir. Bu yöntemlerin şematik gösterimleri ve  $L$  cinsinden gösterimleri şekil 2.7'de sunulmuştur. Bu verilen iki yöntemin yanı sıra KMT dahilinde "alan metodu" ve "hacim metodu" denilen iki yöntem daha bulunmaktadır. Ancak bu yöntemlerin hesaplanması güçtür ve yapılan çalışmalarda hesap hassasiyeti olarak çizgi ve nokta metotlarından dikkate değer bir oranda üstün olmadıkları gözlemlenmiştir.



**Şekil 2.7:** Yerel koordinat sistemi (a), kritik mesafe yöntemi (b) ve gerilme ortalama yönteminin (c) şematik gösterimleri (Louks ve Susmel 2015).

Her ne kadar gerilme ortalaması metodu ve kritik mesafe metodu bu tezde yerel yöntemler arasında verilse de KMT'ye göre yerel olmayan bir yaklaşım olarak değerlendirilmelilerdir. Bunun sebebi olarak bu yöntemlerde çentik kökünden belirli bir mesafe uzaklıktaki gerilmelerin değerlendirilmesi ve gerilme dağılımının yorulma değerlendirmelerine dahil edilmesi gösterilmiştir. Literatür incelendiğinde gerilme ortalama yöntemi ve kritik mesafe yönteminin farklı bilim adamlarınca hem yerel (Radaj et al. 2006) hem de yerel olmayan (Taylor et al. 2010) yöntemler arasında kabul edildiği gözlemlenebilir. Ancak bu tezde, yöntemler yerel gerilme yaklaşımları arasında sınıflandırılmışlardır.

Çentik gerilmelerinin değerlendirildiği bir diğer yöntem ise yüksek gerilmeli hacim yöntemidir. Bu yöntem çentik gerilmesinin yanı sıra çentik boyut etkisini ve mikroyapısal destek etkilerini değerlendirebilmektedir (Sonsino 1993, 1994). Bu yöntem yüksek çevrim sayılı yorulmada çatlak başlangıcının kritik yerel gerilme genliği ile ifade edilmesine dayanmaktadır. Yerel gerilme genliği çentik kökünde tanımlanan yüksek gerilmeli malzeme hacmine bağlıdır. Çentik başlangıcına kadarki yorulma dayanımı değerlendirildiğinde daha küçük yüksek gerilmeli hacimlerin daha büyük yorulma dayanımları ile sonuçlandığı gözlemlenebilir.

### 2.2.3 Kırılma mekaniği yöntemleri

Kırılma mekaniğinin mühendislik yapıları için yapısal dayanım ve yorulma değerlendirmelerindeki kullanımını oldukça geniş bir konudur. Esas olarak kırılma mekaniği parametrelerinin yorulma değerlendirmelerinde yorumlanabilir parametreler halinde incelenmesine dayandıklarından bu yaklaşımlar birçok farklı bakış açısı ve duruma uyarlanmış birçok yöntemi içlerine alırlar. Çatlak boyutu, çatlak başlangıcı ve çatlak ilerleme hızı gibi yorulma parametrelerinin yorulma davranışlarının incelenmesinde değerlendirmeye dahil edilmesi daha gerçekçi hesaplamalara imkân sağlar. Diğer konvansiyonel yaklaşımlar gerilme, malzeme ve yapı ile ilgili ideal kabuller yaparak hesapları basitleştirirken, kırılma mekaniği yöntemleri daha hassas sonuçlar verebilirler. Ancak değerlendirmeler için gereken parametrelerin çokluğu beklendiği üzere bu yöntemlerin uygulamalarını, diğer yerel yöntemlere kıyasla güçleştirmektedir. Çok sayıda kırılma mekaniği yöntemi bulunduğundan bu bölümde sadece iki popüler yöntem yer verilmiştir; çatlak ilerlemesi yöntemi ve çentik gerilme yoğunluk faktörü (ÇGYF) yöntemi.

Çatlak ilerlemesi yöntemleri genellikle kırılma mekaniğinin Paris-Erdoğan yasasını (Paris ve Erdogan 1963) çatlak ilerleme hızı ile ilgili analizler yapmak için kullanır. Paris-Erdoğan yasası denklem 2.6'da verilmiştir.

$$\frac{da'}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.6)$$

Burada  $a'$  çatlak boyu,  $N$  çevrim sayısı,  $C$  ve  $m$  malzeme parametreleri ve  $K$  gerilme yoğunluk faktörüdür.

Çatlak ilerlemesi yöntemleri genelde çatlak başlangıç safhasını görmezden gelir veya yorulma verilerine dayanarak çatlak başlangıcıyla ilgili varsayımlarda bulunur. Ancak bu yaklaşım çatlaklı veya çatlak benzeri kusurlu numunelerin yorulma değerlendirmelerinin çatlak ilerlemesi yöntemleri ile yapılmasına imkân verir. Kaynak dikiş geçiş bölgesi ve kaynak kökünün kaynaklı birleştirmelerdeki mekanik davranışları düşünüldüğünde, çatlak ilerlemesinin safhasının ilk çevrimde başladığı varsayılabilir. Bu sebeple kaynaklı birleştirmelerde çatlak başlangıcı göz

ardı edilse dahi yorulma davranışlarının isabetli şekilde değerlendirilmesi mümkündür.

ÇGYF yöntemi kaynaklı birleştirmelerdeki keskin V çentikler için gerilme yoğunluk faktörünün belirlenmesi esasına dayanır (Lazzarin et al. 2003, 2009; Livieri ve Lazzarin 2005; Radaj ve Lazzarin 2005). Belirlenen gerilme yoğunluk faktörleri yorulma davranışının değerlendirilmesinde bir parametre olarak kullanılabilir. Çentik açıklığının açısı ve çentik kökündeki yerel gerilme bölgelerinin sonlu eleman analizleri yardımıyla belirlenmesi sonucu ÇGYF belirlenebilir. Belirlenen ÇGYF, yorulma dayanımının bir göstergesi olarak değerlendirmelerde kullanılır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

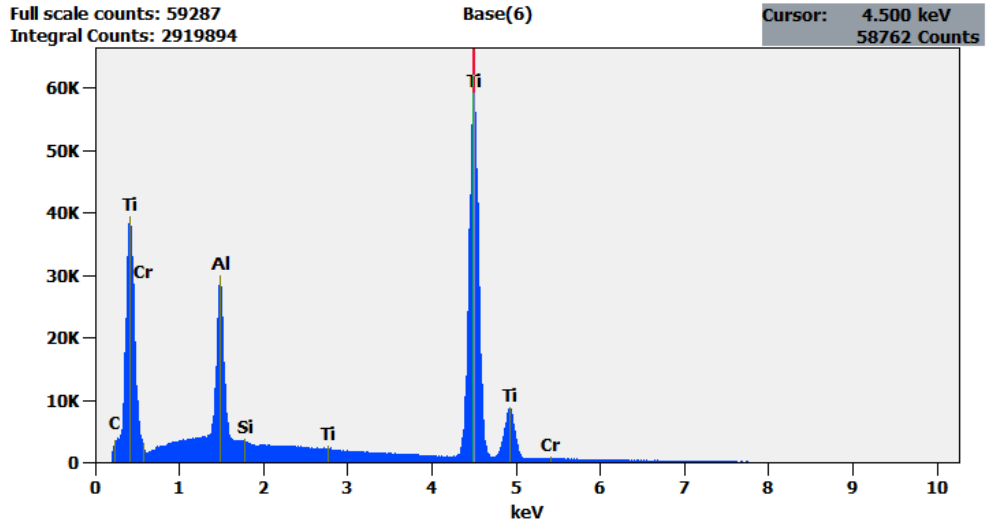
#### 3.1 Malzeme

Bu çalışmada kullanılmak üzere TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numuneler tercih edilmiştir. En yaygın kullanılan titanyum alaşımlarından olan TiAl6V4 alaşımından levhaların kimyasal bileşimi THERMO NORAN, QUEST tip EDS, X-ışını mikroanaliz adaptörlü HITACHI S-3000N tarama mikroskobu kullanılarak tespit edilmiştir. Test edilen malzemenin kimyasal bileşenleri 50x yakınlaştırmada tespit edilmiştir. Test numunesinde dört ayrı nokta incelenmiş ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Alaşımın kimyasal bileşimi % ağırlık olarak Tablo 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** TiAl6V4 alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık).

	Fe	C	N	O	H	Al	V	Ti	Diğer
TiAl6V4	0,21	0,014	0,01	0,07	0,001	6,2	4,2	Kalan	-

Ayrıca elde edilen EDS spektrumları Şekil 3.1’de gösterilmiş ve EDS analizinin detaylı sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.1:** TiAl6V4 alaşımının EDS spektrumları.



**Tablo 3.2:** TiAl6V4 alaşımının EDS analiz sonuçları.

Element	Tam Sayım	Ağırlık %	Ağırlık % Hata	Atom %	Atom % Hata
Al	263482	5,94	±0,03	10,00	±0,05
Ti	890621	93,25	±0,33	88,51	±0,31
V	2500	0,49	±0,04	0,43	±0,04
Diğer	14881	0,33	±0,01	1,05	±0,02
Toplam	-	100,00	-	100,00	-

Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere TiAl6V4 alaşımı yüksek özgül mukavemeti (mukavemet/özgül ağırlık) sayesinde hafif ve dayanıklı makine elemanlarının üretimine imkân tanır. Ayrıca yüzeyinde oluşan oksit tabakası sayesinde korozyon dayanımı çok yüksektir. Bunun yanı sıra TiAl6V4 biyomedikal implantların üretiminde de kullanılır. Piyasadaki standart TiAl6V4 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Tabloda verilen dayanım değerleri referans için verilmiş standart değerler olup, tez çalışmasında bahsi geçen numunelerden elde edilmiş veriler değillerdir.

**Tablo 3.3:** TiAl6V4 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri (Oda sıcaklığında).

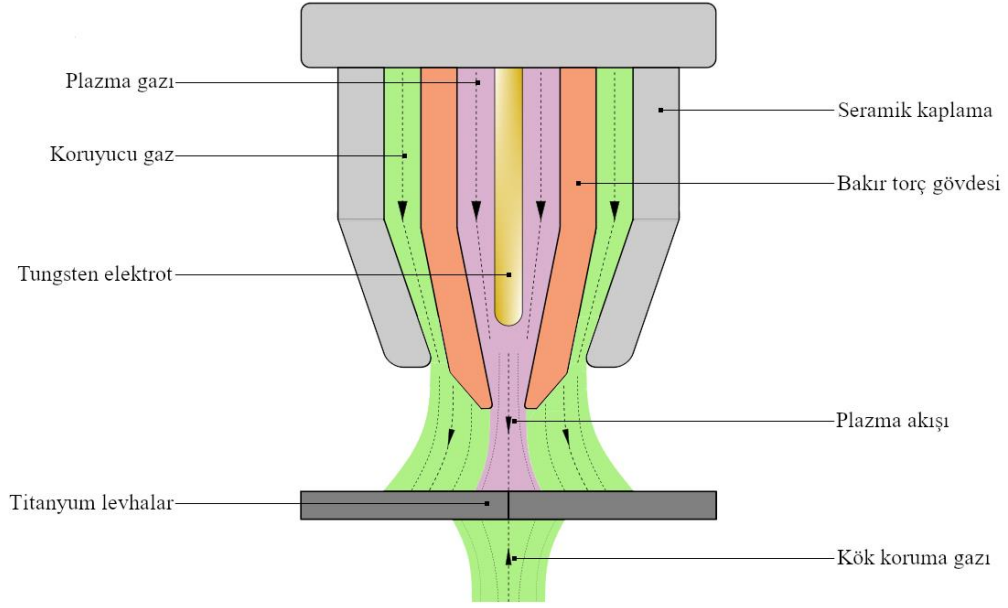
<b>Ergime sıcaklığı</b>	1650 [°C]
<b>Özgül ağırlık</b>	4,420 [kg · m-3]
<b>Elastisite modülü (yaklaşık)</b>	114 [GPa]
<b>Akma dayanımı</b>	≥ 828 [MPa]
<b>Kopma dayanımı</b>	≥ 895 [MPa]
<b>Uzama A min.</b>	≥ 10 [%]

### 3.2 Deney Numuneleri

TiAl6V4 alaşımının kaynak edilebilirliği, son dönemlerde kaynak teknolojilerinde yaşanan gelişmeler sayesinde artmaktadır. Titanyum yüksek sıcaklıklarda oksijen ve nitrojen ile reaksiyona girerek mekanik özellikleri düştüğünden dolayı kaynak sırasında hava ile teması kesilmelidir. Yüksek saflıkta inert gazlar kullanılarak kaynak bölgesinin korunması ile sağlıklı kaynak dikişleri elde etmek mümkündür. Bu tez çalışmasında kaynak yöntemi olarak mikroplazma ark kaynağı kullanılmıştır.

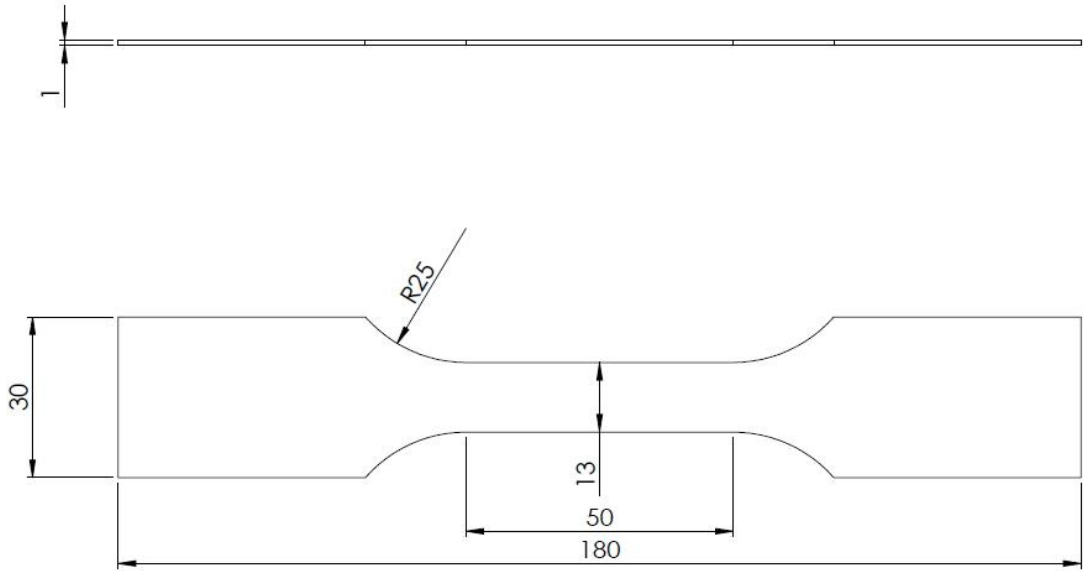
Mikroplazma ark kaynağı, plazma ark kaynağının özel bir türüdür. Daha düşük amperli akımlar (genelde 0,1-15 A) kullanılarak ince parçaların küçük ve kontrollü kaynak dikişleri ile kaynaklanmasına olanak tanıyan bir yöntemdir (Gorman 1969; Lucas 1990). Bu yöntem 0,5 mm'den ince parçaların kaynağına imkân tanır. Çalışma prensibi olarak mikroplazma ark kaynağı, plazma ark kaynağı ile aynıdır.

Plazma ark kaynağında ergimeyen tungsten bir elektrot kullanılarak iş parçası ile elektrot arasındaki plazma gazı yüksek sıcaklıklara çıkar ve iyonize olur. İyonize olan gaz bir plazma arkı oluşturur. Oluşan bu ark genellikle toz halinde bulunan dolgu metalini ergiterek kaynaklı birleştirmeyi sağlar. Kaynak dikişini atmosferin etkilerinden korumak için ayrıca koruyucu inert gazlar da plazma gazından ayrı olarak kullanılır. Plazma ark kaynak yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir.

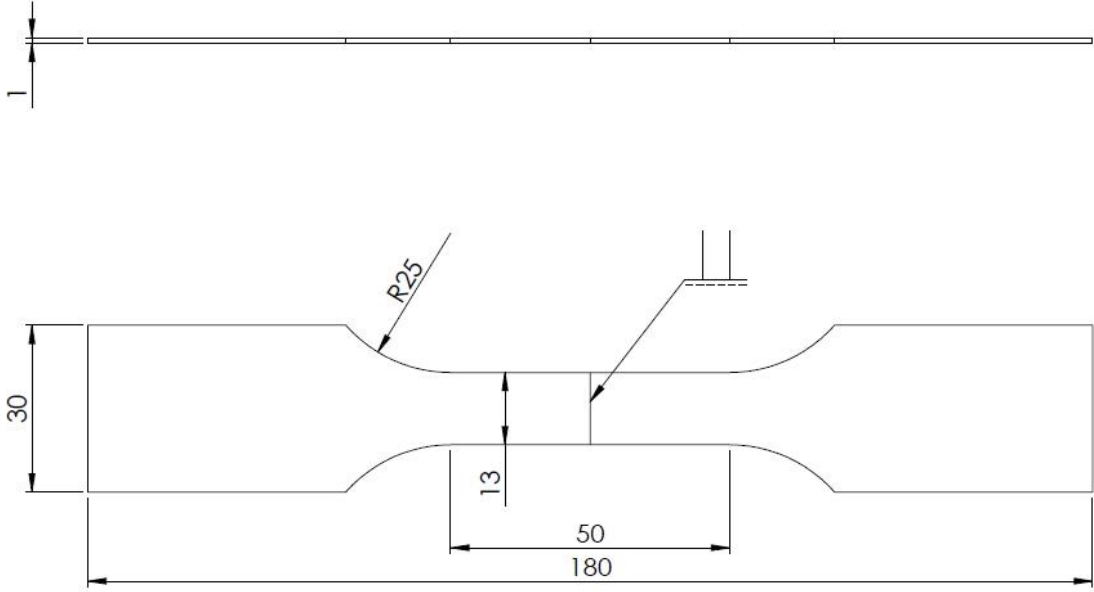


**Şekil 3.2:** Plazma ark kaynak yönteminin şematik gösterimi.

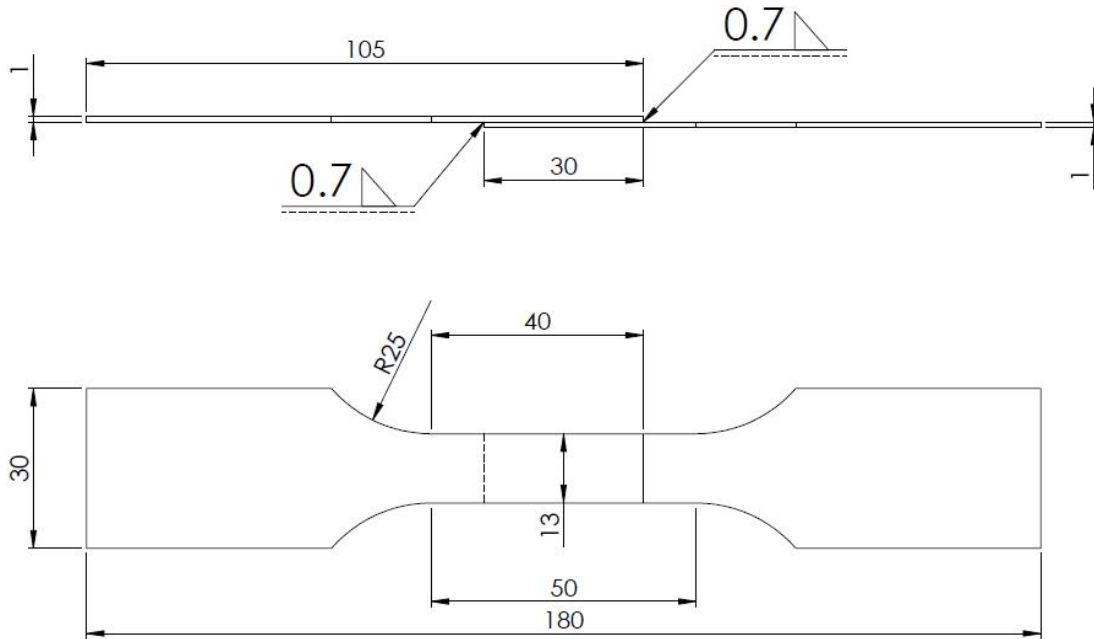
Bu tez çalışması dahilindeki deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere biri kaynaksız, toplamda üç numune tipi kullanılmıştır. Bu numunelerin teknik resimleri Şekil 3.3, 3.4 ve 3.5’te sunulmuştur.



**Şekil 3.3:** Titanyumdan kaynaksız deney numunesi.



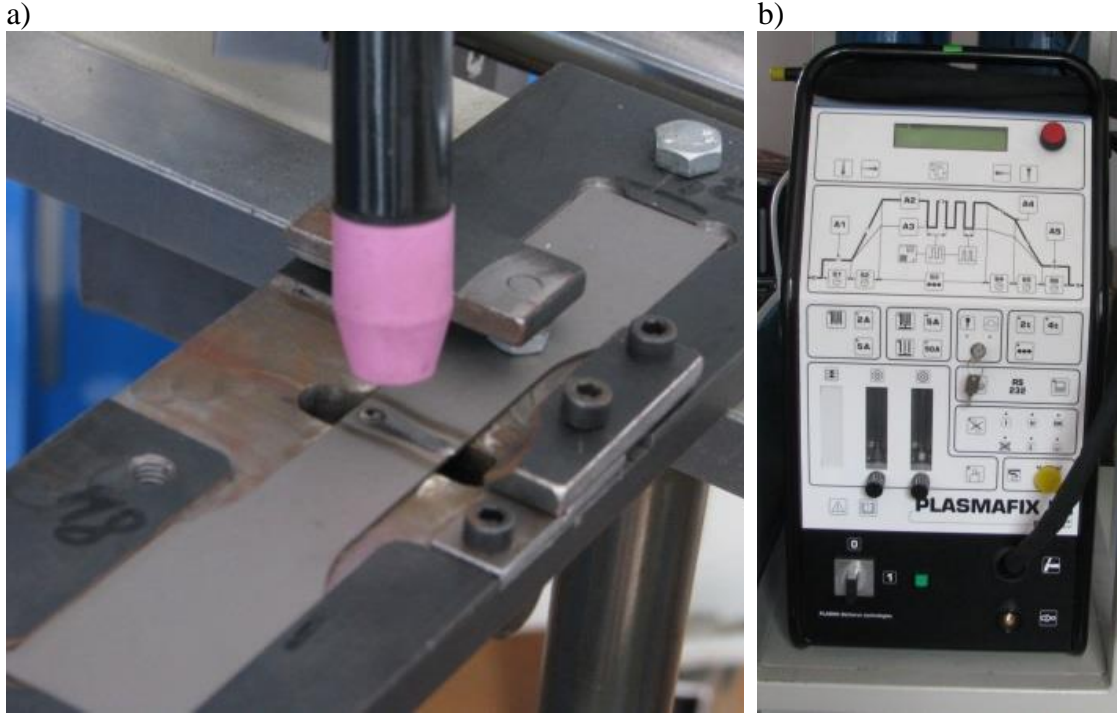
Şekil 3.4: Titanyumdan alın kaynaklı deney numunesi.



Şekil 3.5: Titanyumdan bindirme kaynaklı deney numunesi.

Titanyum numunelerin boyutlarında tutarlılık sağlayabilmek amacıyla numunelerin üretimleri özellikle tasarlanan bir seri aşamadan geçmiştir. İlk olarak bir lazer kesici kullanılarak haddelenmiş titanyum levhalardan numunelerin bileşenleri boyuna eksenleri hadde yönünde olacak şekilde kesilmiştir. Daha sonra numune bileşenleri kaynak makinesinde özel bir destek çerçevesi ile sabitlenmiştir.

Numunelerin üretimde kullanılan mikroplazma ark kaynak makinesi Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu aşamada kullanılan kaynak makinesi otomatik olup sabit bir hızda kaynaklama yapabilmektedir. Kaynak sırasında destek çerçevesi ayrıca somunlarla tezgâha sabitlenerek aksel kaçıklıkların önüne geçilmiştir. Kaynak sırasında ve iş parçaları soğuyana kadar helyum koruyucu gaz kullanılmaya devam edilmiştir. Numunelerin üretiminde kullanılan kaynak parametreleri Tablo 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.6: a) Mikroplazma ark kaynak makinesi. b) Mikroplazma jeneratörü.

Tablo 3.4: TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numunelerin üretiminde kullanılan kaynak parametreleri.

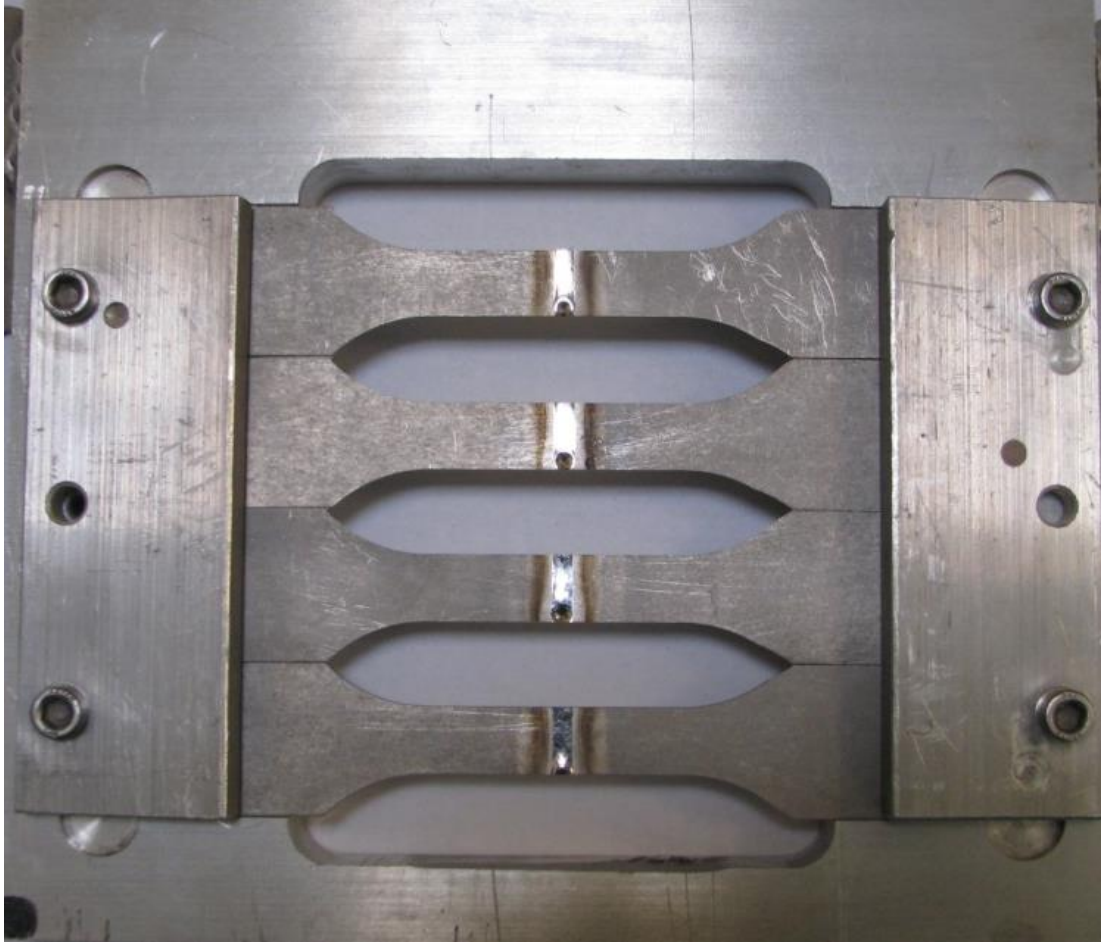
Parametre	Değer	
Akım	18	A
Voltaj	14,8	V
Kaynak hızı	2	mm/s
Gaz akış hızı (He):		
Plazma gazı	6	l/min
Koruyucu gaz	12	l/min
Kök koruma gazı	20	l/min

Son olarak kaynaklı iş parçaları özellikle parçaları hizalamak için imal edilmiş bir destek cihazına bağlanmıştır. Destek cihazındaki parçalar Waterjet Kimla Streamcut 1510 su jeti kesim makinesi kullanılarak son boyutlarında kesilmiştir. Bu işlemde kullanılan su jeti kesim cihazı Şekil 3.7'de verilmiştir. Parçaların son

boyutları için su jeti kullanılmasının sebebi zaten ince olan numunelerin diğerkesme yöntemlerindeki artık ısıdan dolayı oluşabilecek kusurların önüne geçmektir. Son boyutlarında kesilmiş kaynaklı numunelerin sabitleme cihazındaki resmi Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.7: Su jeti kesim makinesi.



**Şekil 3.8:** Kesilmiş kaynaklı numuneler ve sabitleme cihazı.

Kaynaksız numunelerin üretimde kaynaklı numunelerin aksine özel bir çerçeveye veya hizalamaya ihtiyaç duyulmamıştır. Parçaların boyuna eksenleri hadde yönünde olacak şekilde hizalandıktan sonra standart şekilde su jeti kesme makinesi ile kesilmişlerdir. Kesilen kaynaksız numunelerin görüntüsü Şekil 3.9’da verilmiştir.

Deney numunelerinin üretiminde kullanılan bu aşamalar, numunelerin boyutlarının birbiriyle aynı olmasını sağlamakla birlikte, numune sayısının artırılması gerektiği durumlarda tekrar eden üretimlerin de tutarlı olmasını garantilemiştir. Ayrıca her ne kadar mikrop plazma ark kaynağı ince levhaların kaynaklanmasında kullanılsa da kaynak dikişinin başladığı ve bittiği noktalarda ince levhalarda istenmeyen delinmelere sebep olabilmektedir. Belirlenen numune boyutlarından daha geniş tasarlanan ve lazer kesiciler ile kesilen numune elemanları kaynaklandıktan sonra kenarları tekrar su jeti ile kesildiğinden bu kusurlar kaynak

kalitesini etkilememiştir. Özel olarak tasarlanan bu üretim aşamaları şu şekilde özetlenebilir:

1. Lazer kesiciler kullanılarak 1 mm kalınlığındaki titanyum levhalardan numuneler için ön bileşenler kesilmiştir.
2. Kesilen bileşenler mikroplazma ark kaynak makinesindeki çerçevelerde sabitlenerek kaynaklanmıştır.
3. Birbirlerine kaynaklanmış levhalar ve kaynaksız levhalar standart deney numunesi şeklinde su jeti ile kesilerek son halini almıştır.



**Şekil 3.9:** Su jeti ile kesilen kaynaksız numuneler.

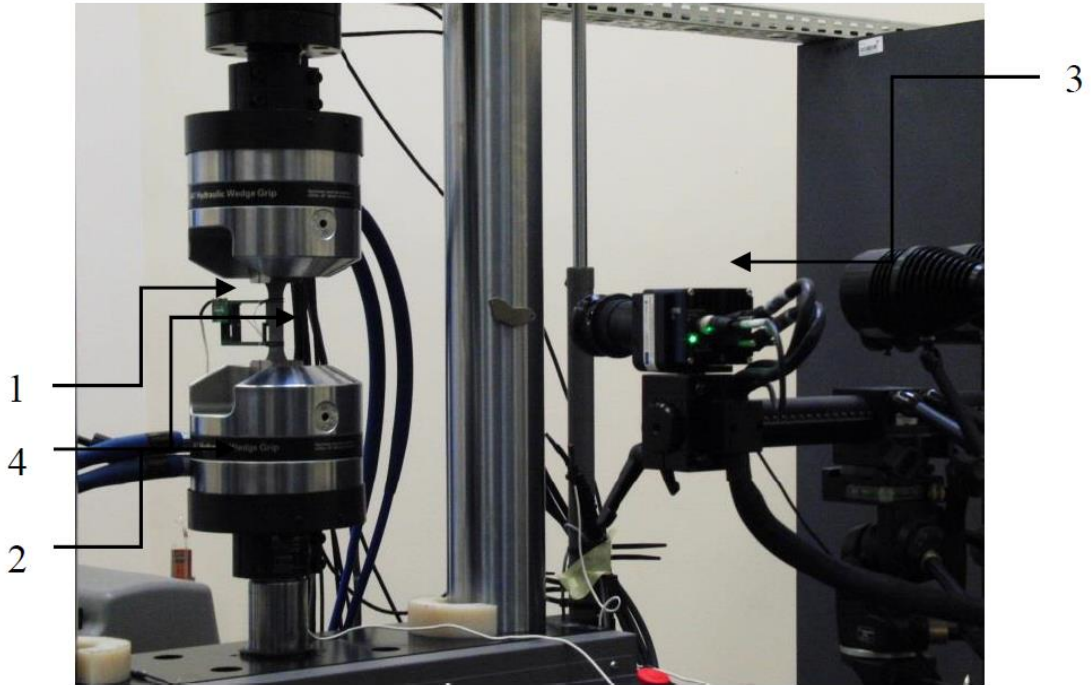


### 3.3 Deneysel Çalışmalar

#### 3.3.1 Deney düzeneği

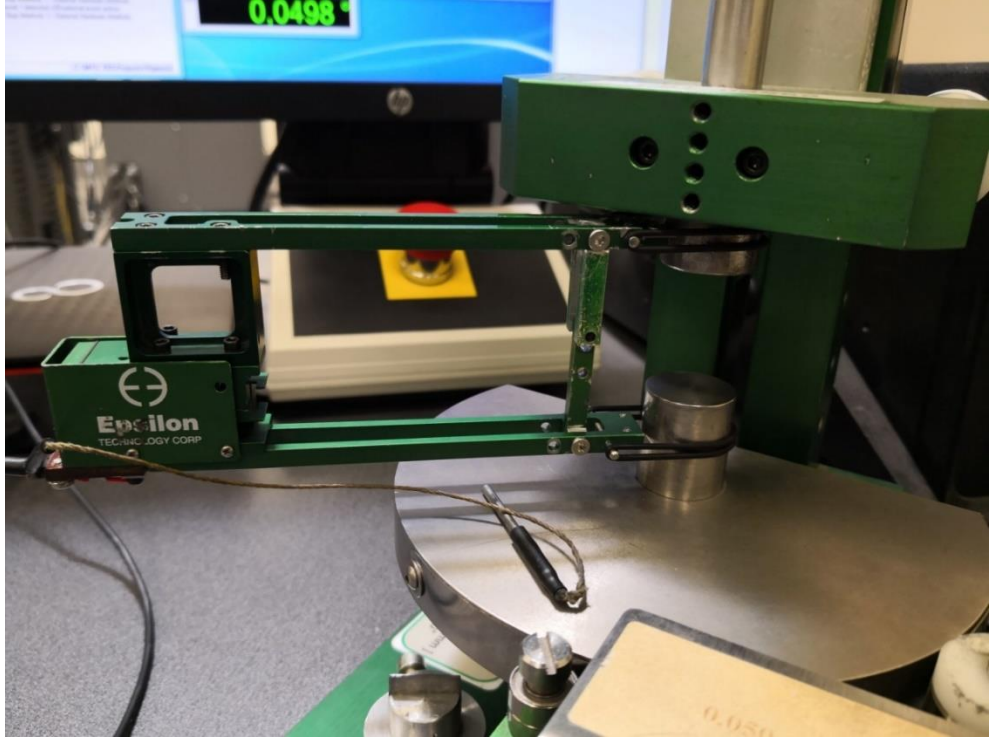
Deneylerde kullanılan deney düzeneği Şekil 3.10'da sunulmuştur. Resimde numaralandırılarak işaretlenen alanlar sırasıyla şunlardır;

1. Epsilon 50, 50 mm doğrusal ekstensometre
2. MTS 809 A/T, servohidrolik malzeme test makinesi
3. ARAMIS 4M, temassız uzama ölçüm sistemi
4. Deney numunesi

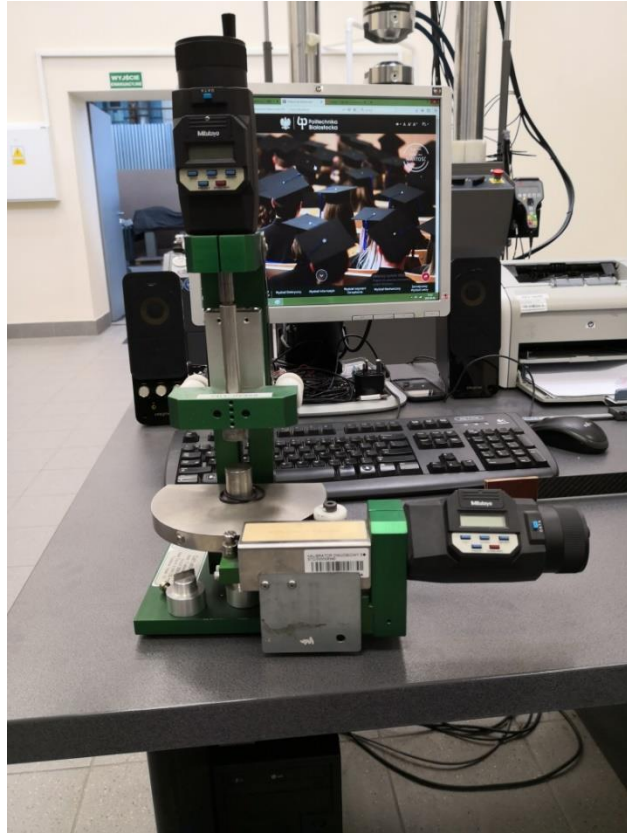


Şekil 3.10: Deney düzeneği.

Epsilon 50, 50 mm doğrusal ekstensometre, deneylerden önce Mitutoyo kalibrasyon cihazı ve bilgisayar yardımı ile kalibre edilmiştir. Kullanılan ekstensometre ve kalibrasyon cihazı sırasıyla Şekil 3.11 ve 3.12'de sunulmuştur.



Şekil 3.11: Epsilon 50, 50 mm doğrusal ekstensometre.



Şekil 3.12: Mitutoyo kalibrasyon cihazı.

### 3.3.2 Çekme deneyleri

Çekme deneyleri PN-EN ISO 6892-1: 2016-09 standardına uygun olarak uygulanmıştır. Numuneler sabit ekstensometre temel uzama hızı  $\Delta l = 0,001$  mm/s olacak şekilde çekme yüklemelerine maruz bırakılmışlardır. Test sırasında malzemenin dayanım ve şekil değiştirme değerleri devamlı olarak ekstensometre ve malzeme test makinesi dinamometresi aracılığı ile kaydedilmiştir.

Bunun yanı sıra ARAMIS 4M gözlem sistemi ile yük arttıkça numune deformasyonu dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile kaydedilmiştir. ARAMIS 4M gözlem sistemi yüksek çözünürlüklü dijital bir kamera ile düzenli aralıklarla numune fotoğrafları çekerek numune üzerindeki değişimleri kaydeden bir temassız uzama ölçüm sistemidir. Kullanılan ARAMIS 4M sisteminin karakteristik ölçüm parametreleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

**Tablo 3.5:** ARAMIS 4M gözlem sisteminin karakteristik ölçüm parametreleri.

<b>Parametre</b>	<b>Değer</b>
<b>Kamera çözünürlüğü</b>	2352×1728 piksel
<b>Maksimum kare oranı</b>	60 Hz
<b>Objektif hızı aralığı</b>	0,1 ms - 2 s
<b>Uzama ölçüm aralığı</b>	%0,02 - %100
<b>Uzama ölçüm hassasiyeti</b>	%0,02
<b>Ölçüm mesafesi</b>	500 mm
<b>Desen tekniği</b>	Stokastik benek deseni

İlk olarak numunelerin bir yüzeyi özel bir boya ile kaplanır. Bu boyayı özel yapan numuneyi tek bir renkte değil, tanecikli yapısı sayesinde siyah, beyaz ve grinin tonlarında belirgin noktalı bir şekilde kaplamasıdır. Çekilen dijital fotoğraflar doğrudan bilgisayara aktarılarak sisteme özel yazılım ile incelenir. Numuneler üzerindeki boya sayesinde ayırt edilebilen noktaların hareketleri fotoğraflar arasındaki farkların dijital görüntü korelasyonu ile değerlendirilmesi sayesinde ölçülür. Elde edilen bu veriler seçilen gerilme değerlerine karşılık gelen uzama

değerleri ile ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak deney sırasında numunelerin maruz kaldığı yerel uzamalar detaylı ve isabetli bir şekilde grafikler ile ifade edilebilir.

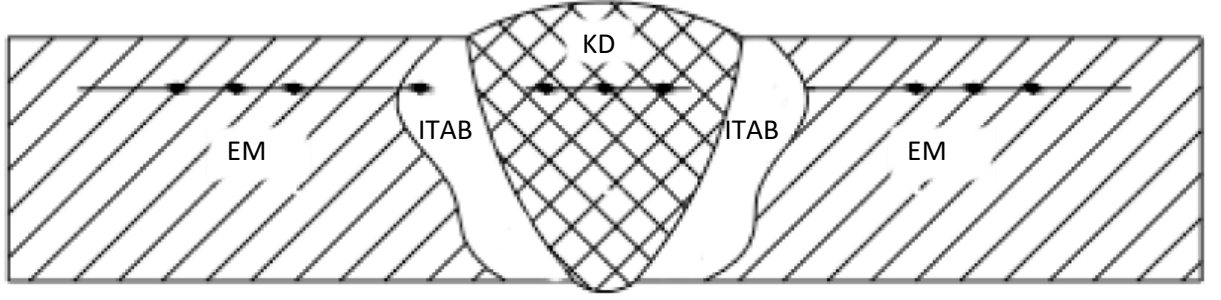
Numunelerdeki deformasyon sürecinin dijital görüntü korelasyonu ile incelenebilmesi amacıyla ekstensometre numunenin aksi yüzeyine monte edilmiştir. Ayrıca, ekstensometrenin ayaklarını sabitlemek için kullanılan lastiklerin bağlantı çenelerine değmesi engellenmiştir. Titanyum alaşımlarının yüzeyindeki sert oksit tabakası, aynı zamanda yükleme sırasında ekstensometre ayaklarında kaymalara sebep olabilmektedir. Bu durumun önüne geçmek için özel ekstensometre ayakları ve tek bir yüzeye yapıştırılan etiketler kullanılmıştır.

Bindirme kaynaklı numunelerin testlerinde numuneleri çenelere doğrudan bağlamak, numunenin ekseninin çekme yönüne paralel olmasını engellemektedir ve istenmeyen eğilme momentine yol açacaktır. Bu durumu engellemek için aynı kalınlıktaki parçalar epoksi reçinesi ile numunelerin iki ucuna, yapıştırılmıştır. Bu ekler sadece numunelerin test makinesindeki bağlantı çeneleri arasında kalan kısımlarına yapıldığından test sonuçları üzerinde etkileri yoktur.

Yapılan bu testler ile kaynaklı ve kaynaklı olmayan numunelerin monotonik malzeme karakteristikleri ve yük altında şekil değiştirme dağılımları gözlemlenmiştir. Testler her numune tipi için üçer defa tekrarlanmış ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması esas alınmıştır.

### **3.3.3 Sertlik ölçümleri**

Numunelerin sertlik değerleri Vickers sertlik deneyi kullanılarak PN-EN ISO 6507-1: 2018-05 standardına uygun biçimde belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri Vickers Sertlik Test Cihazı HV-50A ile 5 kg'lık deney yükü kullanılarak yapılmıştır. Boyuna kesilen kaynaklı numunelerden esas malzeme (EM), kaynak dikişi (KD) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olmak üzere 3 ayrı bölgede belli aralıklar ile alınan 3'er ölçüm ile sertlik testi yapılmıştır. Yapılan ölçümler şematik olarak Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Elde edilen değerlerin kendi aralarında aritmetik ortalamaları alınarak mikrop plazma ark kaynağının malzeme sertliği üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.



Şekil 3.13: Kaynaklı birleştirmedeki Vickers sertlik ölçüm noktalarının şematik gösterimi.

### 3.3.4 Yük kontrollü yorulma deneyleri

Çekme deneylerinde kullanılan deney düzeneği (bkz. Şekil 3.10) yük kontrollü yorulma deneylerinde de kullanılmıştır. Fakat, çekme deneylerinin aksine ARAMIS 4M gözlem sistemi devre dışı bırakılmıştır.

Temassız uzama ölçüm sistemi dijital görüntü korelasyonu ile malzeme üzerindeki uzama değişimini devamlı olarak kaydeder. Bu değişim çok kısa aralıklarla çekilmiş detaylı fotoğraflar olarak saklanır. Alakalı bilgisayar yazılımı ve numune üzerindeki işaretlemeler esas alınarak, operatör denetimi ile numunenin yerel uzama değerleri hesaplanarak bir uzama haritası oluşturulur. Bilindiği üzere yorulma deneyleri, çekme deneylerine kıyasla daha uzun sürer ve numunelerdeki uzamalar nispeten küçük artımlar ile ortaya çıkar. Bütün deney süresince bu sistemin çalıştırılması ve elde edilen yüksek çözünürlüklü fotoğrafların saklanması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple yorulma deneylerinin sadece saniyeler ile ifade edilebilecek bir aralığı daha önceden belirlenerek sistem çalıştırılabilir. Süre zarfının darlığı ve yorulma deneylerinin tahmin edilmesi güç yapısı göz önüne alındığında ARAMIS 4M gözlem sisteminin yorulma deneylerinde kullanılmasının pratik olmayacağı kararlaştırılmıştır. Bu açıklamaya ek olarak, incelenen numunelerin özgünlüğü ve daha önce yapılmış detaylı yorulma deneylerine sahip olmayışı sistemin yorulma için daha da kullanılmaz olmasına sebep olmaktadır.

Kaynaksız ve kaynaklı deney numuneler (bkz. Şekil 3.3, 3.4 ve 3.5) gerilme oranı  $R_{\sigma} = 0$  olan yük kontrollü yorulma deneylerine maruz bırakılmışlardır. Maksimum gerilme genlikleri çekme deneylerinden elde edilen maksimum çekme dayanımı ( $R_{UTS}$ ) esas alınarak belirlenmiştir. Bu gerilme değerleri;  $0,92 R_{UTS}$ ,

0,82  $R_{UTS}$ , 0,72  $R_{UTS}$  ve 0,50  $R_{UTS}$  olarak belirlenmiştir. Gözlemlenebileceği üzere deneyler yüksek maksimum gerilmeye ve gerilme aralığına sahiptir. Bu sayede deneylerin düşük çevrimli yorulma bölgesinde olması sağlanmıştır. Deneyler her maksimum gerilme ve kaynaklı numune için üçer defa tekrarlanmış ve sonuçlar elde edilen verilerin aritmetik ortalaması olarak sunulmuştur.

### 3.3.5 Metalografik incelemeler

İncelenen malzemenin mikroyapısı üzerinde daha detaylı bir bilgiye sahip olmak için numuneler metalografik ve fraktografik incelemelere tabi tutulmuştur. Bu incelemeler için makro gözlemler ve optik mikroskopun yanı sıra, taramalı elektron mikroskopları (SEM) kullanılmıştır.

Optik mikroskop incelemelerinde kaynaklı ve kaynaksız numunelerin boyuna kesitleri tane yapısı açısından gözlemlenmiştir. İncelenen yüzeyler önce kaba daha sonra ince taşlama ile taşlandıktan sonra elmas macun ile parlatılmıştır. Son olarak yüzeyler 10% hidroflorik asit (bileşen: 10 ml  $HNO_3$  + 20 ml  $HF$  + 20 ml gliserol) kullanılarak 4 s boyunca dağlanmışır. İncelemeler optik mikroskop kullanılarak 30x ve 145x yakınlaştırma altında gerçekleştirilmiştir.

SEM taramalı elektron mikroskopları çekme ve yorulma deneylerinin sonucundaki kırılma yüzeylerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Çekme numunelerin kırılma yüzeyleri HITACHI S-3000N tarama mikroskobu kullanılarak 500x, 1000x ve 3000x yakınlaştırma oranında incelenmiştir. Bu tez çalışmasının asıl konusu olduğundan dolayı kopmuş yorulma deney numunelerinin kırılma yüzeylerinin incelemelerinde daha güçlü olan Phenom-World Phenom XL taramalı elektron mikroskopu tercih edilmiş ve incelemeler 2000x ve 4000x yakınlaştırmalarda yapılmıştır.

## 4. BULGULAR

Bu bölümde tez programı dahilinde yapılan deneysel çalışmalarından elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Ayrıca, elde edilen deneysel bulgular değerlendirilerek yorumlanmıştır.

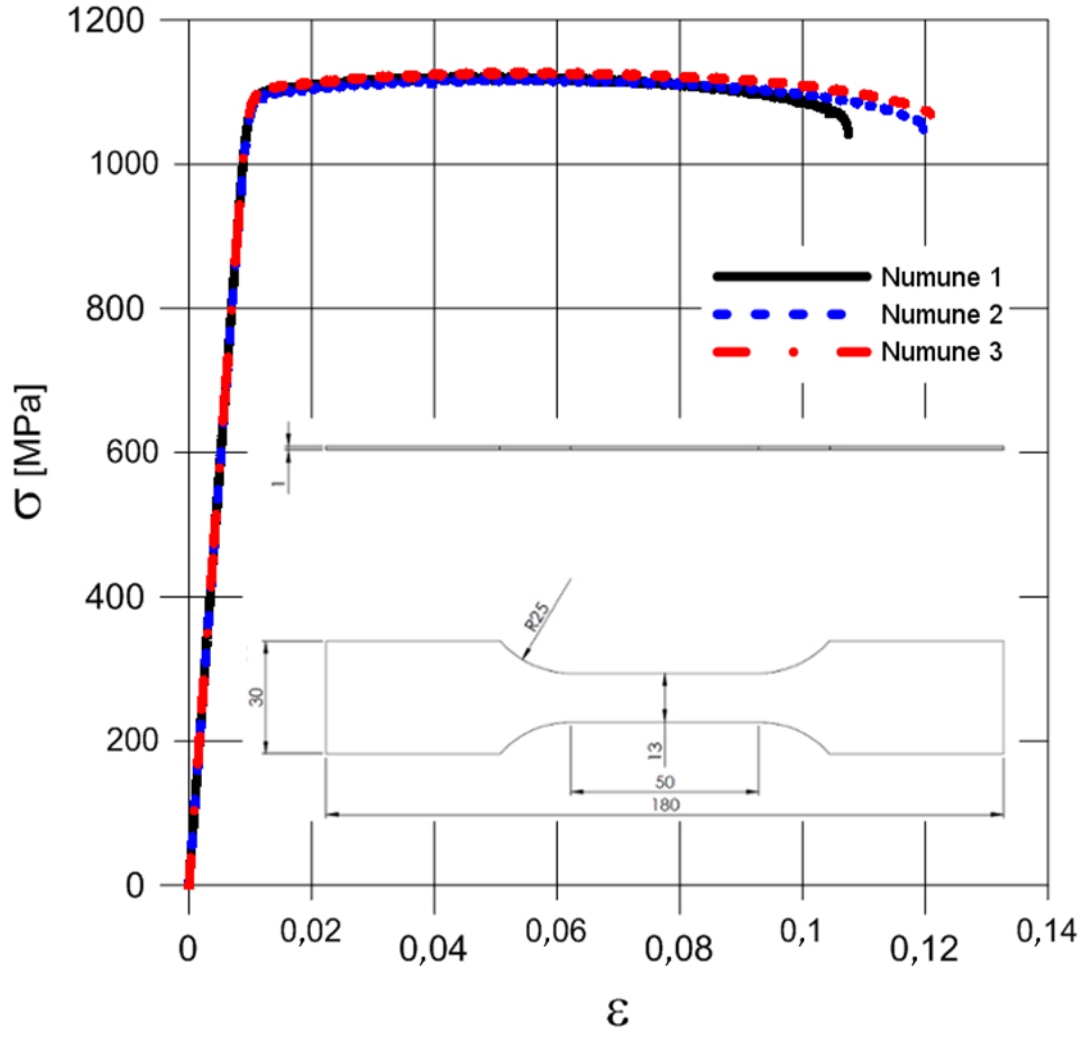
### 4.1 Monotonik İncelemelerin Sonuçları

Monotonik çekme deneyleri sonucunda tespit edilen malzeme parametreleri; Young modülü  $E$ , akma dayanımı  $R_{YP}$ , maksimum çekme dayanımı  $R_{UTS}$ , kopma gerilmesi  $R_U$ , yüzde uzama  $A$  ve yüzde boyun verme  $Z$ , Tablo 4.1’de sunulmuştur. Burada en dikkat çekici veriler numunelerin  $A$  yüzde uzama değerleri arasındaki farklardır. Kaynaklı numuneler kaynaklı numunelerden çok daha az yüzde uzama değerlerine sahiptirler. Bu kaynak sırasında malzeme iç yapısında oluşan değişimlerin alaşımın çok daha gevrek davranmasına sebep olduğunu göstermektedir.

**Tablo 4.1:** TiAl6V4 alaşımından numunelerin monotonik çekme deneylerinden elde edilen malzeme parametreleri.

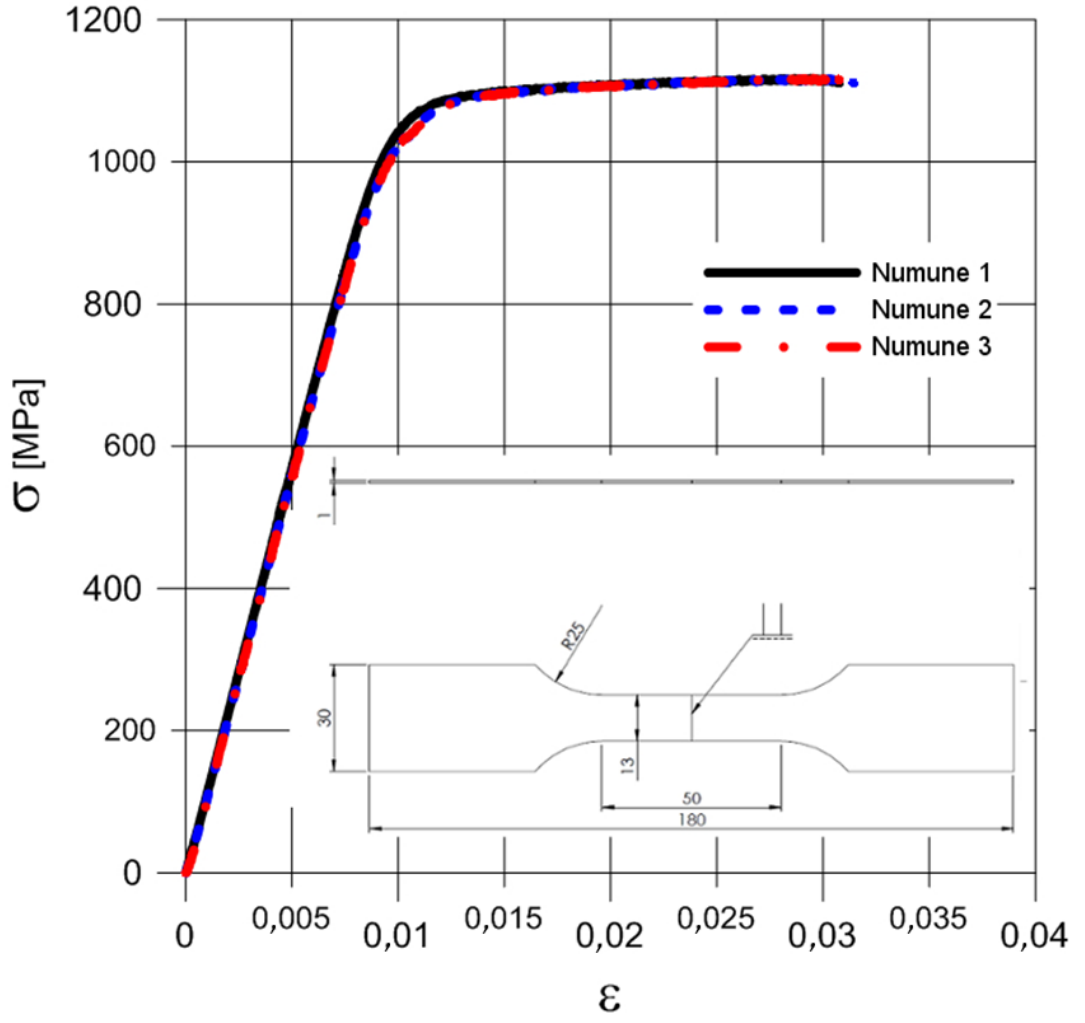
Numune tipi	$E$ [GPa]	$R_{YP}$ [MPa]	$R_{UTS}$ [MPa]	$R_U$ [MPa]	$A$ [%]	$Z$ [%]
Kaynaklı	115	1095	1122	1053	11,5	0,84
Alın kaynaklı	103	1084	1114	1112	3	1,67
Bindirme kaynaklı	114	1098	1146	1106	1,7	1,51

Ayrıca deneylerden elde edilen veriler kullanılarak her numune için gerilme-uzama eğrileri çizilmiştir. Kaynaklı numuneler için gerilme-uzama eğrisi Şekil 4.1’de, alın kaynaklı numuneler için gerilme-uzama eğrisi Şekil 4.2’de ve bindirme kaynaklı numuneler için gerilme-uzama eğrisi Şekil 4.3’te verilmiştir. Bu eğrilerde de görülebileceği gibi her numunenin  $R_{YP}$ ,  $R_{UTS}$  ve  $R_U$  değerleri birbirleri ile kıyaslandığında farklar çok azdır. Yani numune akma dayanımına ulaştıktan sonra gerilme daha fazla artmadan hızla kırılmaktadır.

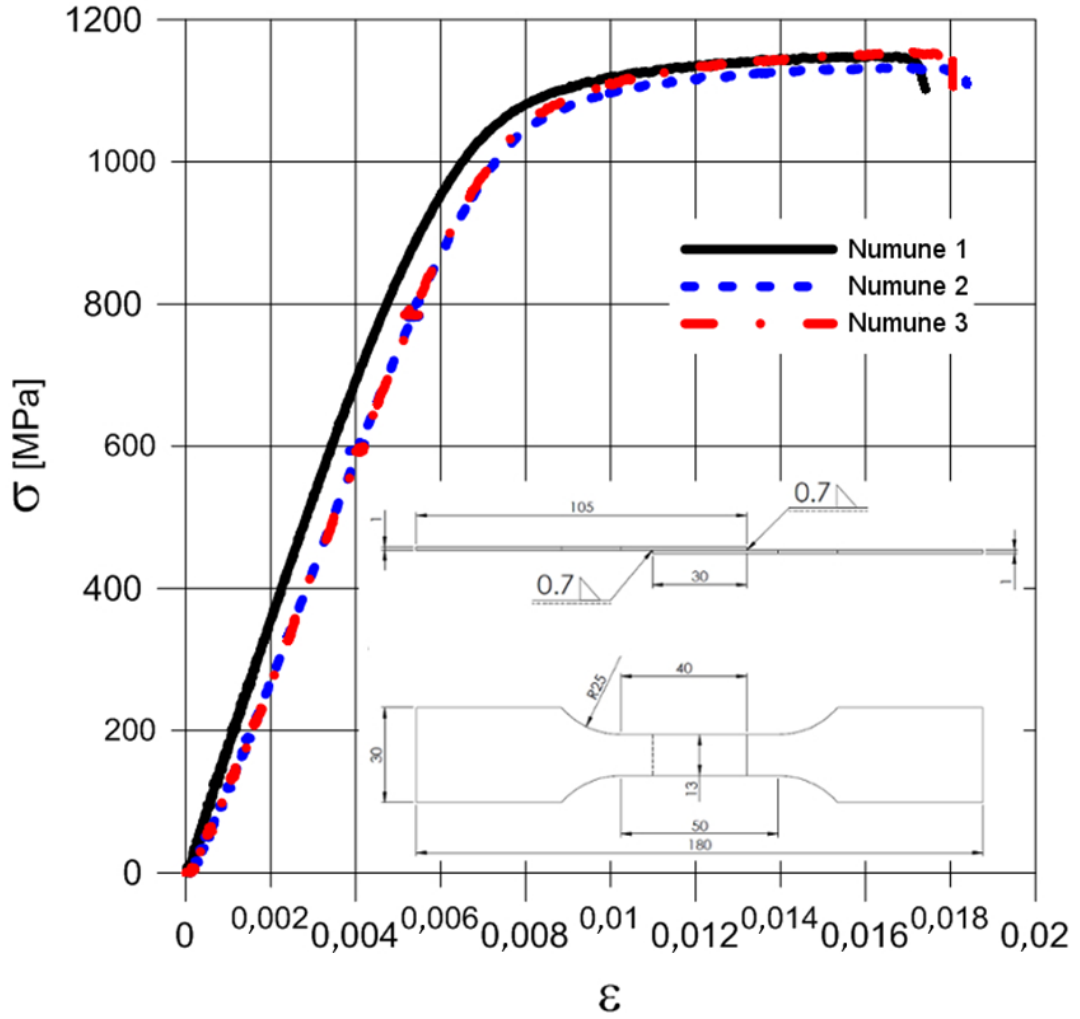


Şekil 4.1: Kaynaksız numunelerin gerilme-uzama çekme deney grafiği.





Şekil 4.2: Alın kaynaklı numunelerin gerilme-uzama çekme deney grafiği.



Şekil 4.3: Bindirme kaynaklı numunelerin gerilme-uzama çekme deney grafiği.

Bunlara ek olarak, numunelerin monotonik sertleşme eğrileri Ramberg-Osgood ilişkisine dayanan denklem 4.1 (Ramberg ve Osgood 1943) kullanılarak çizilmiştir. Bu eşitliğin açılımı denklem 4.2’de verilmiştir. Denklem 4.2’nin logaritmik koordinat sisteminde ( $\varepsilon_p, \sigma$ ) düzenlenip sadeleştirilmesi ile denklem 4.3 elde edilir. Elde edilen bu denklem kullanılarak doğrusal ifade edilen monotonik sertleşme eğrileri Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

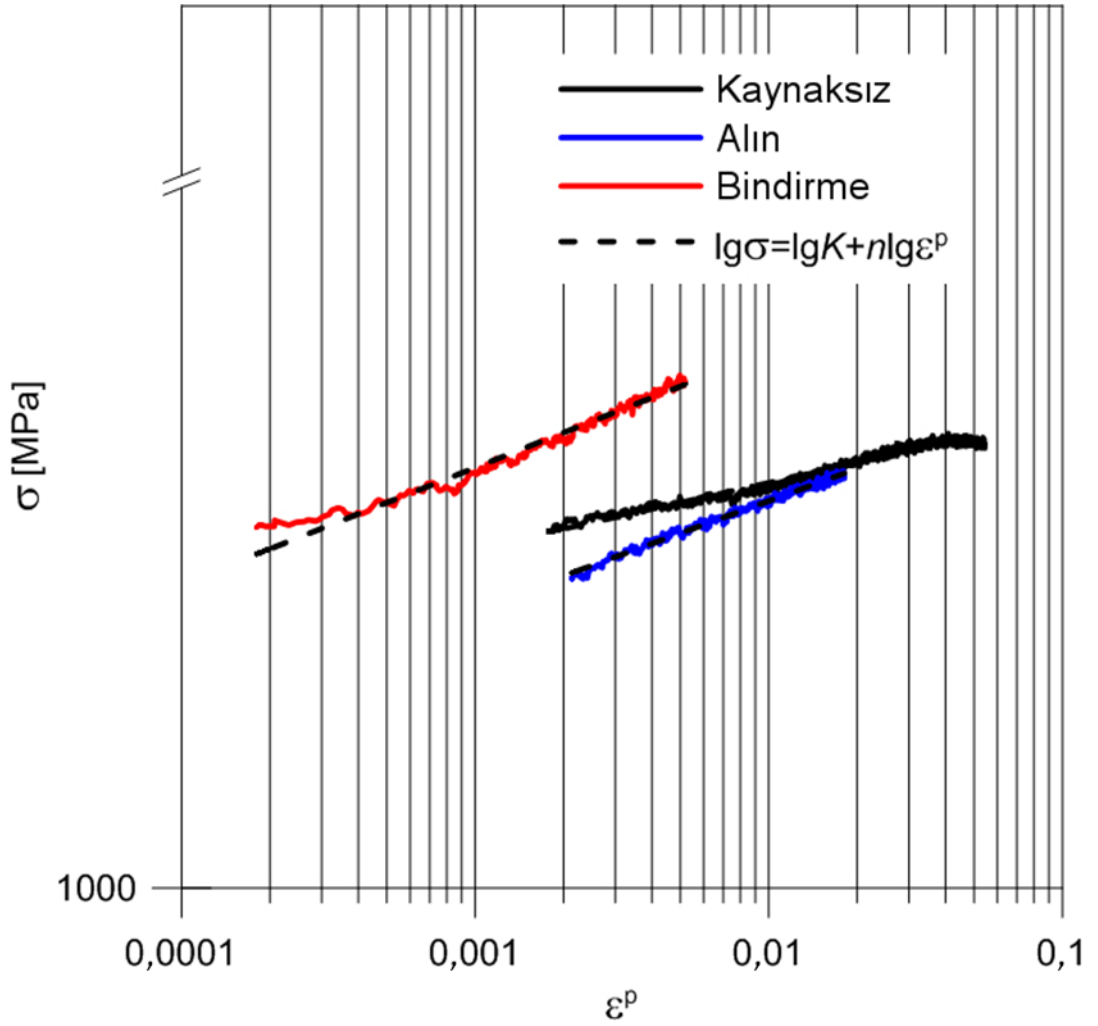
$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (4.2)$$

$$\lg \sigma = \lg K + n \lg \varepsilon_p \quad (4.3)$$

Burada,  $\sigma$  aksenal gerilme,  $\varepsilon_e$  elastik uzama ve  $\varepsilon_p$  plastik uzama,  $K$  dayanım katsayısı ve  $n$  uzama sertleşme üssüdür.  $K$  ve  $n$  değerleri denklem 4.3 yardımı ile yaklaşık olarak hesaplanmıştır. Statik sertleşme üssü  $n_x$  ise denklem 4.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$n_x = \frac{\lg \frac{R_{UTS}}{R_{YP}}}{\lg \frac{\ln \frac{100}{100-Z}}{\frac{R_{YP}}{E}}} \quad (4.4)$$



Şekil 4.4: Monotonik malzeme sertleşme eğrileri.

Son olarak denklem 4.5'te verilen Manson-Coffin eşitliği (Coffin Jr 1954; Manson 1953) kullanılarak TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numunelerin  $C$  katsayısı hesaplanmıştır.

$$C = k' \ln \frac{S_0}{S_u} \quad (4.5)$$

Burada  $k'$  süneklik sabiti,  $S_0$  deney numunesinin kesit alanı,  $S_u$  kopmadan sonra deney numunesinin kesit alanıdır. Süneklik sabiti  $k'=0,5$  alınmıştır. Elde edilen tüm monotonic sertleşme değerleri Tablo 4.2'de sunulmuştur.

**Tablo 4.2:** TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numunelerin monotonic sertleşme eğrisi parametreleri.

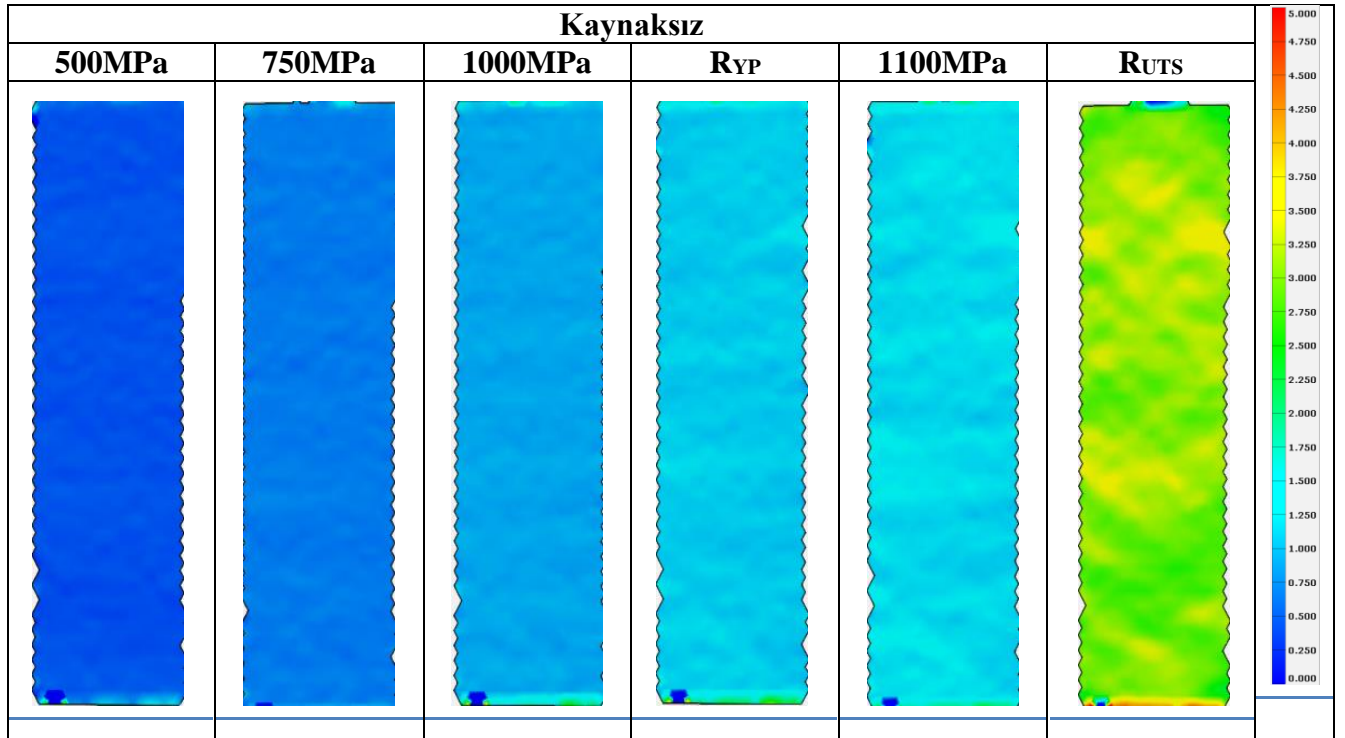
	<b>Kaynaksız</b>	<b>Alın Kaynaklı</b>	<b>Bindirme Kaynaklı</b>
<b><math>K</math></b>	1153 MPa	1173 MPa	1226 MPa
<b><math>n</math></b>	0,0076	0,0123	0,0134
<b><math>n_x</math></b>	0,362	0,052	0,0066
<b><math>C</math></b>	0,0144	0,024	0,044

Hesaplanan uzama sertleşme üslerine göre, kaynaklı numuneler, kaynaklı referans numunelerine göre az farkla daha fazla şekillendirilebilirlik göstermektedir. Ancak, en yüksek uzama sertleşme üssüne sahip bindirme kaynaklı numunelerin bile bu parametresi birçok diğer metalik malzemeye göre düşüktür. Numuneler kaynaktan sonra da yüksek dayanım katsayılarını korumuşlardır. Kıyaslama amacıyla bazı metallerin ve deney numunelerinin monotonic uzama sertleşme üsleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Buradaki değerler incelendiğinde deney numuneleriyle aralarındaki büyük fark gözlemlenebilir. Bu kopma gerçekleşmeden önce asgari düzeyde plastik deformasyon olduğunun bir göstergesi kabul edilebilir. Uzama sertleşme üssü malzeme sünekliği için doğrudan bir gösterge değildir. Ancak, daha önce verilen yüzde uzama değerleri göz önüne alındığında mikrop plazma ark kaynaklı TiAl6V4 alaşımından numunelerin kaynak ısısı sebebiyle mikroyapısal değişimlere uğradığı ve gevrekleştiği sonucuna varılmıştır. Bu değişimler sebebiyle bu tip kaynaklı numunelerin yüksek dayanım değerlerine rağmen yüksek darbeli yüklemelere maruz kaldıkları çalışma koşullarında kullanılmamaları gerektiği sonucuna varılmıştır. Fakat, bu tez çalışması kapsamında darbeli yükleme testleri yapılmadığından bu çıkarımların tahmin olduğu belirtilmelidir.

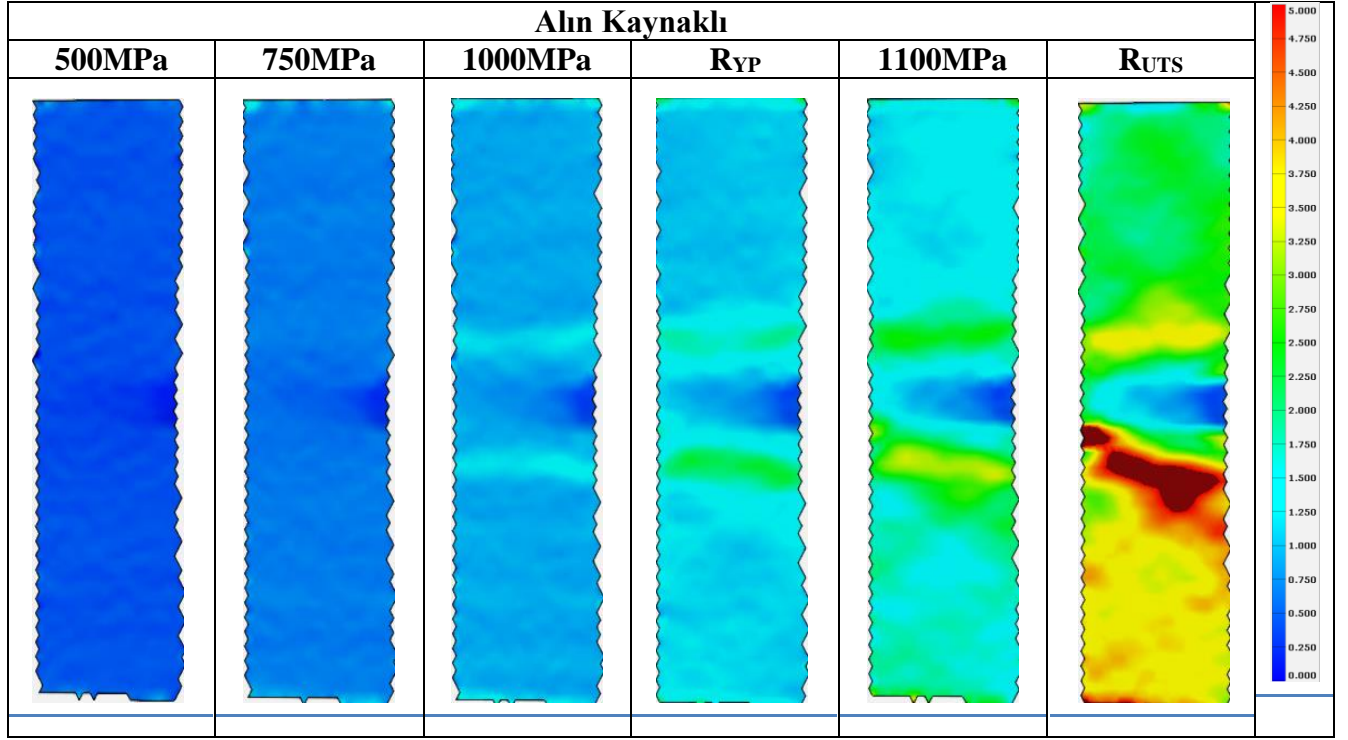
**Tablo 4.3:** Çeşitli malzemelerin uzama sertleşme üsleri.

Malzeme	<i>n</i>
Düşük karbonlu çelik (Hosford ve Caddell 2011)	0,20–0,25
Ferritik paslanmaz çelik (Hosford ve Caddell 2011)	0,16–0,23
Ostenitik paslanmaz çelik (Hosford ve Caddell 2011)	0,40–0,55
Alüminyum alaşımları (Hosford ve Caddell 2011)	0,20–0,30
AZ31 (Karakas et al. 2007)	0,211
Kaynaksız TiAl6V4 numune	0,0076
Alın kaynaklı TiAl6V4 numune	0,0123
Bindirme kaynaklı TiAl6V4 numune	0,0134

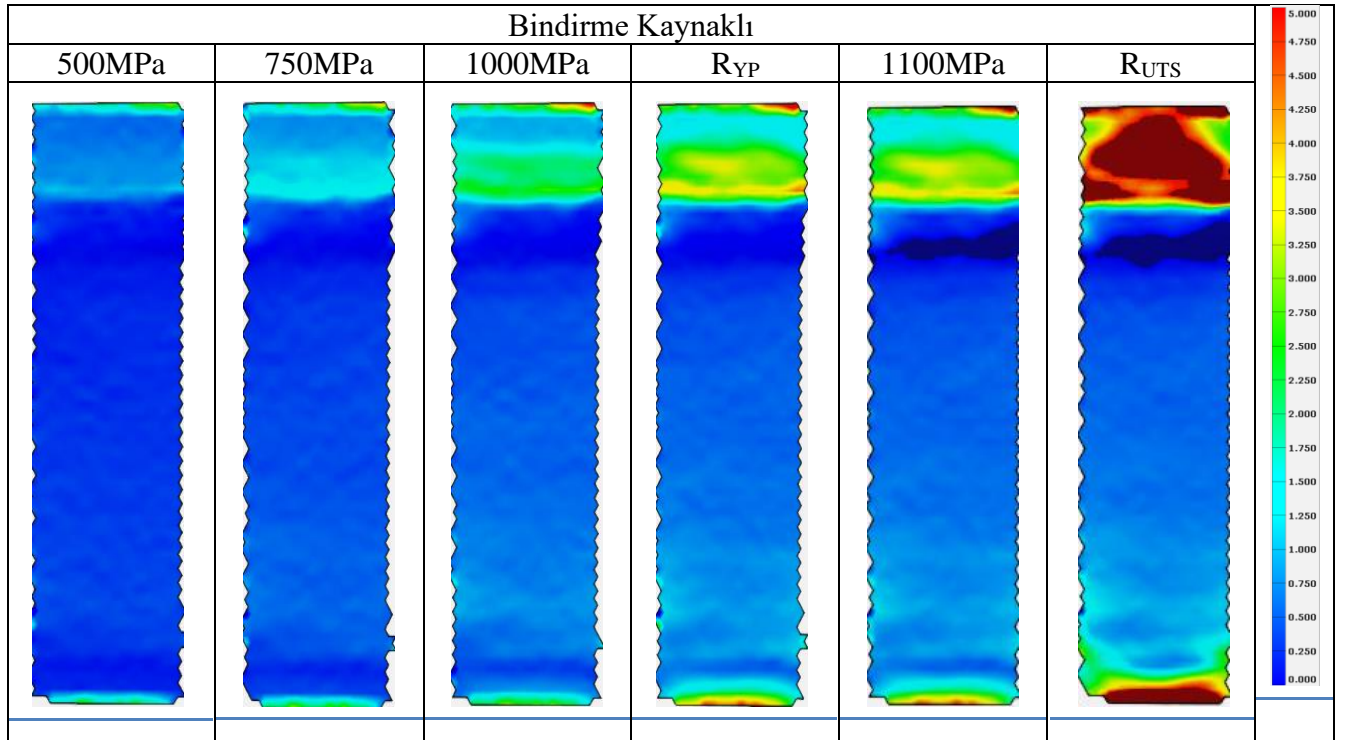
Monotonik çekme deneyleri sırasında ARAMIS 4M ile yapılan temassız uzama ölçümlerinden elde edilen resimler Şekil 4.5-4.10'da sunulmuştur. Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7 seçilen belirli gerilmelerde numunelerdeki uzama dağılımını gösterirken, Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da numunelerin kopması esnasında zamana bağlı olarak değişen uzama dağılımları verilmiştir. Bu resimler 50 mm uzunluğundaki ekstensometre ölçüm bölgesinden elde edilmiştir.



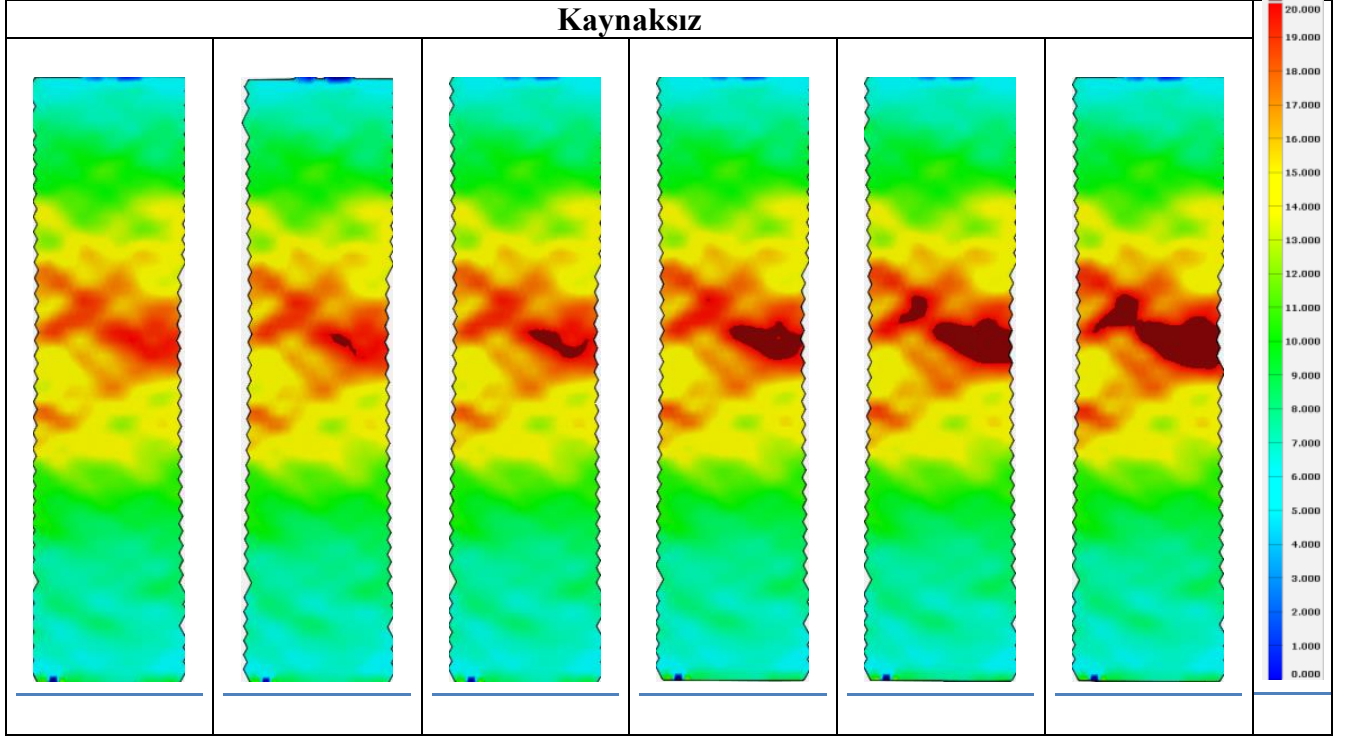
**Şekil 4.5:** Kaynaksız numunelerin toplam uzama bölgelerinin çeşitli gerilme değerlerine göre dağılımları.



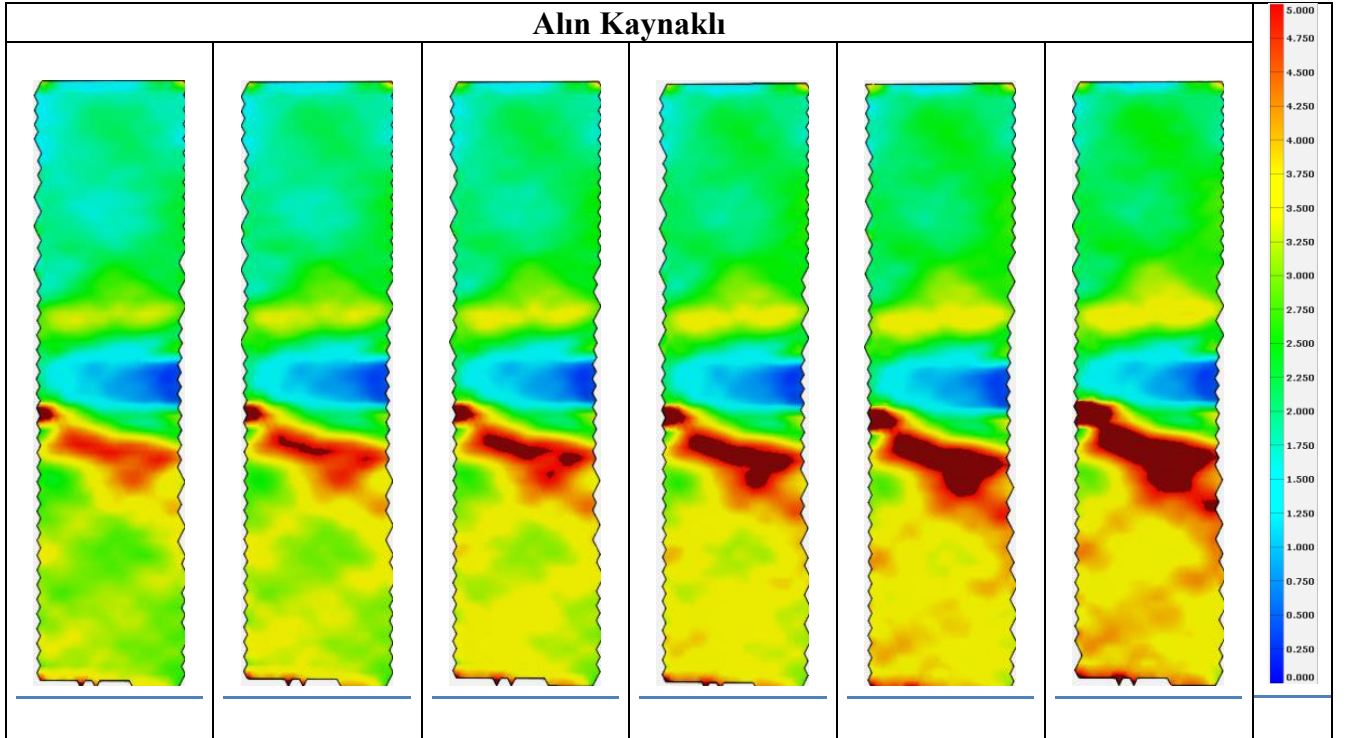
Şekil 4.6: Alın kaynaklı numunelerin toplam uzama bölgelerinin çeşitli gerilme değerlerine göre dağılımları.



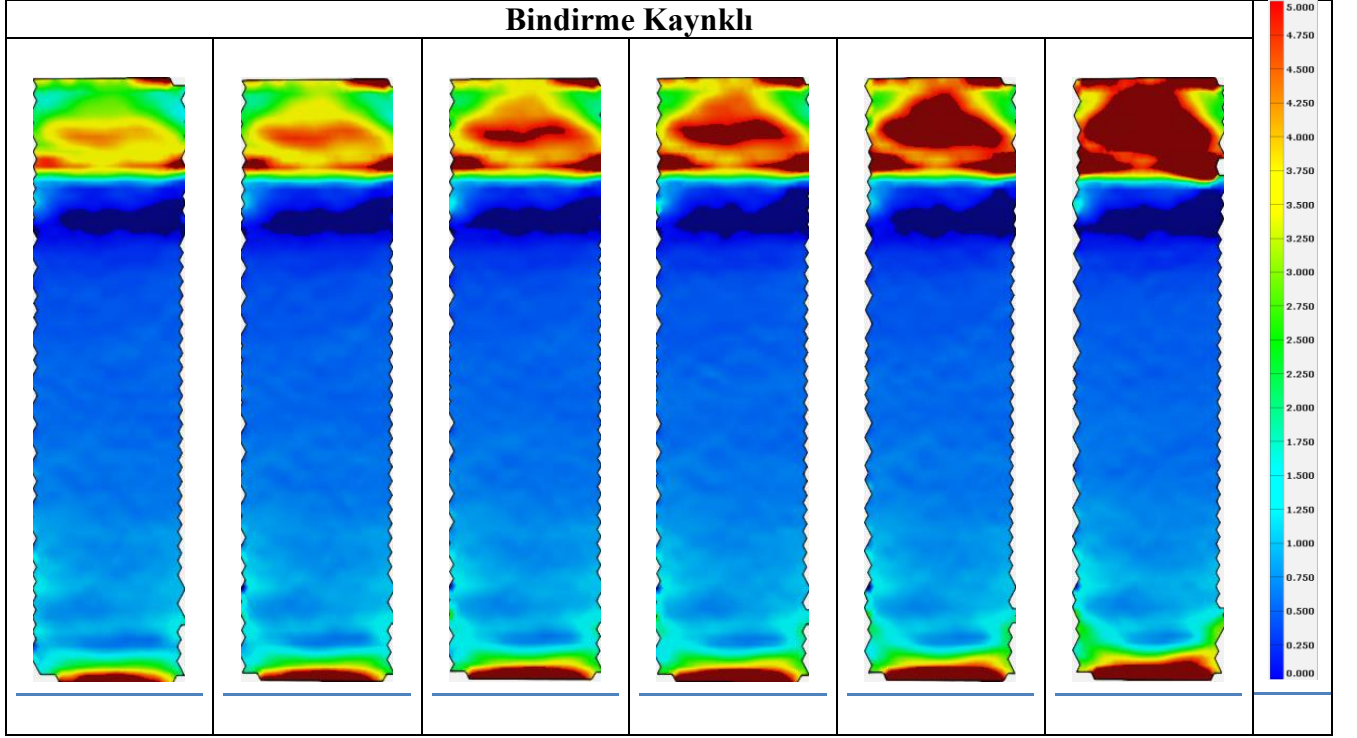
Şekil 4.7: Bindirme kaynaklı numunelerin toplam uzama bölgelerinin çeşitli gerilme değerlerine göre dağılımları.



**Şekil 4.8:** Kaynaksız numunelerin kopması sırasında toplam uzama dağılımlarının zamana göre değişimleri.



**Şekil 4.9:** Alın kaynaklı numunelerin kopması sırasında toplam uzama dağılımlarının zamana göre değişimleri.



**Şekil 4.10:** Bindirme kaynaklı numunelerin kopması sırasında toplam uzama dağılımlarının zamana göre değişimleri.

Çekme testleri sırasında elde edilen toplam uzama alanlarının dağılımlarına dayanarak kaynak işleminin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilebilir. Kaynaksız numuneler incelendiğinde (bkz. Şekil 4.5) esas metalin çekme dayanımına kadar homojen bir uzama dağılımı gösterdiği, çekme dayanımına ulaşıldıktan sonra ise ilk kayma bantlarının tüm numune boyunca eşit olarak dağıldıkları gözlemlenmiştir. Alın kaynaklı numunelerde ise (bkz. Şekil 4.6) yükleme işleminin başından itibaren birleştirmedeki ITAB bölgesinin uzama dağılımları üzerindeki etkisi gözlemlenebilir. Bu bölgedeki gerilme konsantrasyonlarının yerel uzamalar üzerindeki etkisi düzensiz kayma bantlarından da anlaşılabilir. Malzeme özelliklerindeki yerel değişimler numune için adeta çentik etkisi göstermekte ve kopmanın ITAB bölgesinden gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Kaynak işleminin bu etkisi bindirme kaynaklı numunelerin uzama dağılımlarında (bkz. Şekil 4.7) daha açık bir şekilde görülebilir. Bu numunelerin sahip olduğu iki kaynak dikişinden sadece birinin çevresinde büyük oranda deformasyon görülmektedir.

Kopma anındaki uzama dağılımlarının zamana bağlı kıyaslamaları çatlak başlangıcı, ilerleyişi ve kopma sürecini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Kaynaksız numuneler için (bkz. Şekil 4.8) kayma bantlarının oluşturduğu kopma



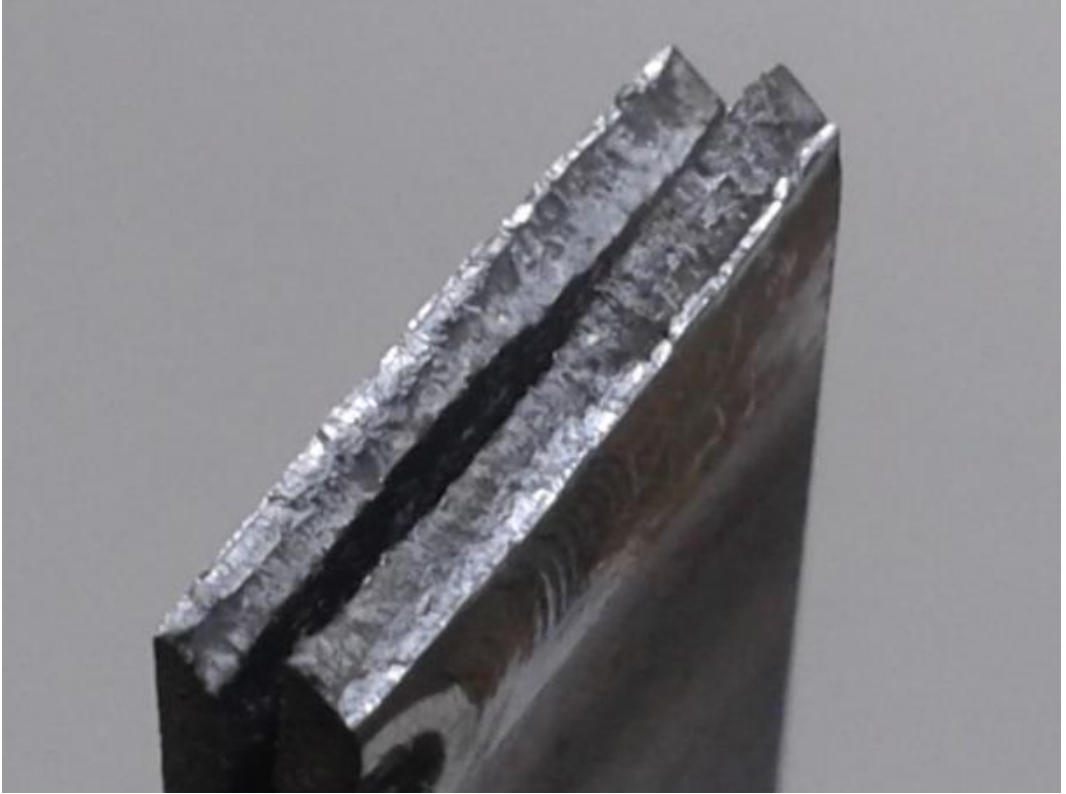
bölgesinin genişliği ve malzeme çatlağının konumu görülebilmektedir. Alın kaynaklı numunelerde de (bkz. Şekil 4.9) kayma bantlarının etkisi ve hasarlı bölgenin genişlemesi gözlemlenebilir. Bindirme kaynaklı numunelerde (bkz. Şekil 4.10) ise çatlak oluşumu diğer numune tiplerine kıyasla bazı farklar göstermektedir. En büyük uzamalar sadece tek bir kaynak dikişi etrafında toplanmakta ve kopma bu kaynak dikişinin ITAB bölgesinde gerçekleşmektedir. Bunun kaynak dikişlerindeki ufak düzensizlikler sebebiyle gerçekleştiği düşünülmektedir. Her iki kaynaklı numunede de hasar bölgesinin kaynak dikişine paralel ilerlediği dikkate değerdir. Ayrıca kopmaların kaynak dikişinden olmayışı sağlıklı bir birleştirme gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Kırılma bölgelerinin daha iyi anlaşılabilmesi için kopmuş kaynaklı numunelerin ve kırılma yüzeylerinin fotoğrafları Şekil 4.11 ve 4.12’de verilmiştir. Temassız ölçüm sisteminden elde edilen uzama dağılımlarıyla örtüşür şekilde uzamalar kaynaklı numunelerde ITAB’da yoğunlaşmaktadır. Kaynaklı numuneler çok büyük uzamalar göstermeden kaynak dikişine en yakın bölgelerden çatlayarak kopmaktadırlar. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi kaynak dikişinde çatlak ve kopma gözlemlenmemiştir.

a)



b)



**Şekil 4.11:** Çekme deneyi sonucunda a) kopmuş alın kaynaklı numune ve b) numunenin kırılma yüzeyi.

a)



b)



**Şekil 4.12:** Çekme deneyi sonucunda a) kopmuş bindirme kaynaklı numune ve b) numunenin kırılma yüzeyi.

Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinde esas malzeme (EM), kaynak dikişi (KD) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olmak üzere üç ayrı bölgede Vickers sertlik değerleri üçer defa ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerin her bölge için aritmetik ortalaması alındıktan sonra elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te sunulmuştur. Ayrıca yapılan ölçümlerde ITAB bölgesinin kaynak dikişinden itibaren yaklaşık 3 mm genişliğinde olduğu gözlemlenmiştir.

**Tablo 4.4:** TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numunelerin Vickers sertlik değerleri.

Numune	EM	ITAB	KD
Alın Kaynaklı	358 HV	438 HV	368 HV
Bindirme Kaynaklı	358 HV	415 HV	344 HV

## 4.2 Yük kontrollü Yorulma Deney Sonuçları

Daha önce de belirtildiği gibi kaynaklı, alın kaynaklı ve bindirme kaynaklı numuneler yük kontrollü yorulma testlerine tabii tutulmuşlardır.  $R_\sigma = 0$  gerilme oranı ve maksimum gerilme genlikleri maksimum çekme gerilmelerinin  $0,92 R_{UTS}$ ,  $0,82 R_{UTS}$ ,  $0,72 R_{UTS}$  ve  $0,5 R_{UTS}$  katları olarak belirlenen yorulma testlerinin sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir.

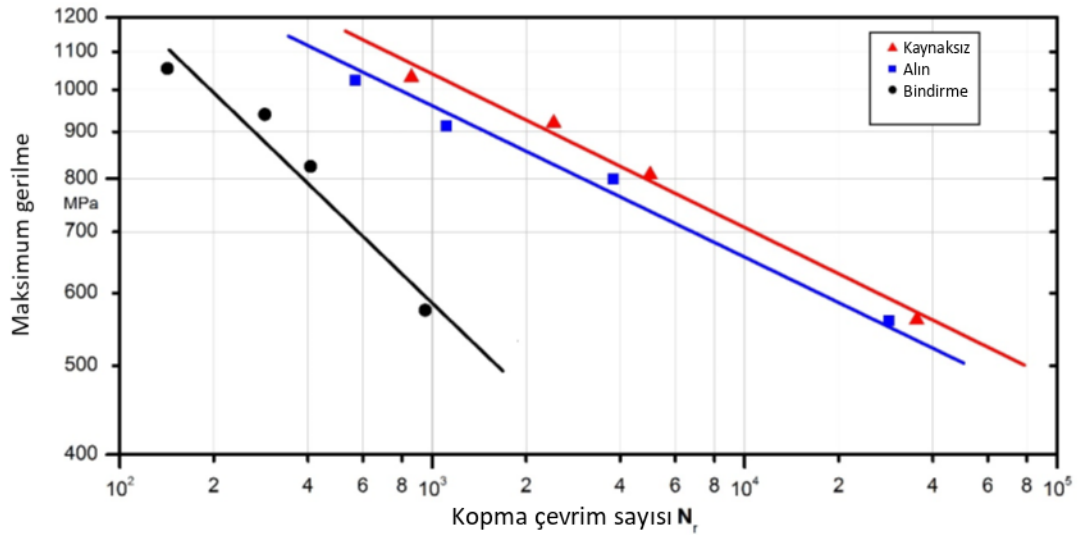
**Tablo 4.5:** Yorulma deney parametreleri ve elde edilen sonuçlar.

Yükleme seviyesi	$f$ [Hz]	$F_{maks}$ [N]	$F_{min}$ [N]	$\sigma_{maks}$ [MPa]	$\sigma_{min}$ [MPa]	$\epsilon_{maks}$	$\epsilon_{min}$	$N_f$
						yarım yorulma ömründe		
<b>Kaynaklı</b>								
0,92 $R_{UTS}$	0,5	13488	0	1032	0	0,009209	0,00113	858
0,82 $R_{UTS}$	0,5	12024	0	920	0	0,008044	0,00022	2449
0,72 $R_{UTS}$	0,5	10560	0	808	0	0,007039	0,00019	4983
0,5 $R_{UTS}$	1	7332	0	561	0	0,004893	0,00014	35529
<b>Alın kaynaklı</b>								
0,92 $R_{UTS}$	0,5	13440	0	1025	0	0,011387	0,00233	566
0,82 $R_{UTS}$	0,5	11980	0	913	0	0,005053	-0,00276	1111
0,72 $R_{UTS}$	0,5	10520	0	800	0	0,00661	-0,00017	3798
0,5 $R_{UTS}$	1	7300	0	560	0	0,000694	-0,00392	28930
<b>Bindirme kaynaklı</b>								
0,92 $R_{UTS}$	0,5	13910	0	1055	0	0,008114	0,001439	142
0,82 $R_{UTS}$	0,5	12400	0	940	0	0,005985	0,000464	291
0,72 $R_{UTS}$	0,5	10890	0	825	0	0,005724	0,000735	408
0,5 $R_{UTS}$	0,5	7560	0	575	0	0,003411	-0,00023	950

Her numune tipinin yorulma deney sonuçları kıyaslandığında kaynaklı numunelerin yorulma ömürlerindeki düşüş açık hale gelmektedir. Daha düşük yüklemelerdeki numuneler arası yorulma ömürleri farkı daha büyük hale gelmektedir. Kaynaklı numunelerin yorulma ömürleri aynı yüklemeler için en yüksek iken, bindirme kaynaklı numunelerin yorulma ömürleri en düşüktür.

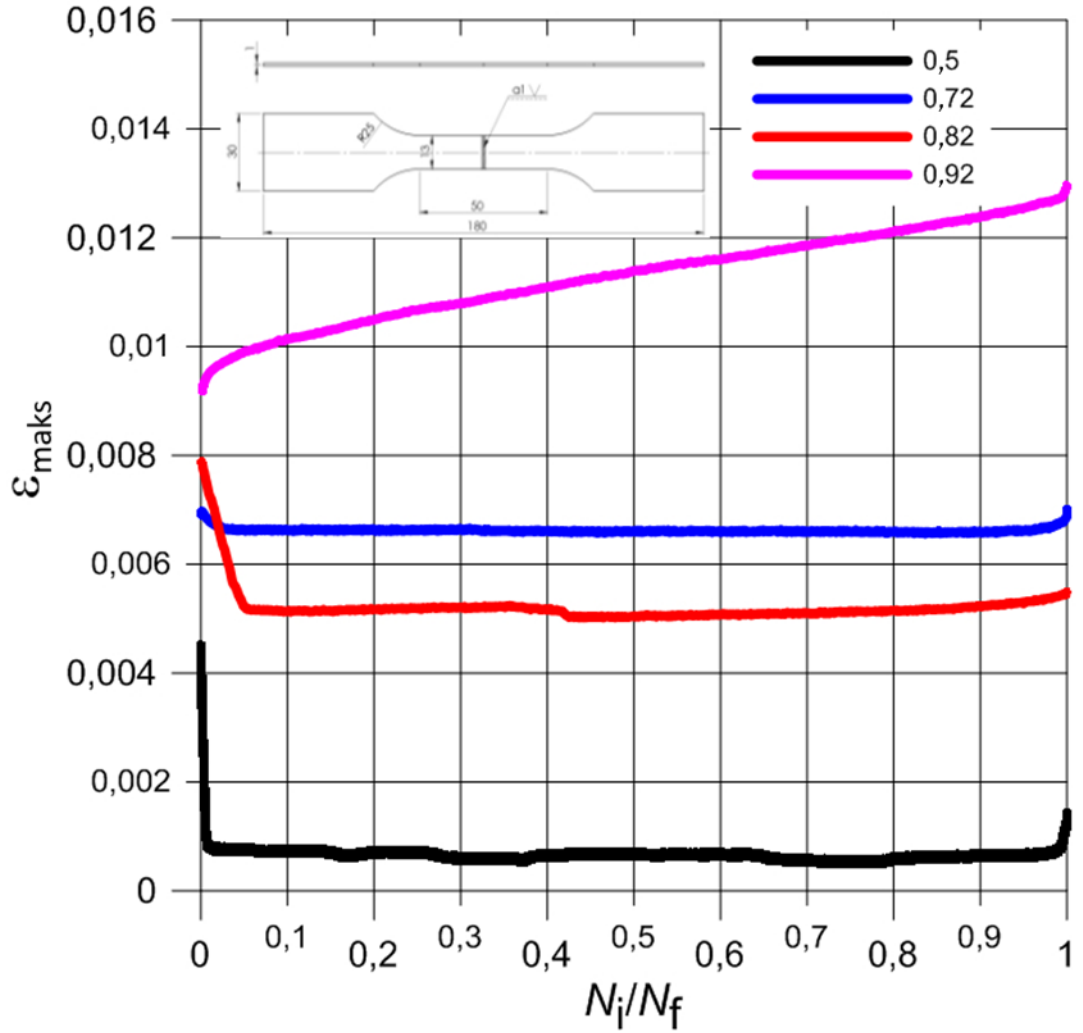
Bindirme kaynaklı numunelerin yorulma ömürlerinin diğer numunelerin yorulma ömürlerine kıyasla büyük bir fark gösterdiği de yapılan gözlemler arasındadır.

Numunelerin yorulma davranışlarının değerlendirilmesi için yorulma deney sonuçlarına dayanan Wöhler eğrileri çizilmiş ve Şekil 4.13'te sunulmuştur. Numunelerin Wöhler eğrileri kıyaslandığında bindirme kaynaklı numunelerin eğiminin diğer numunelere kıyasla çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bindirme kaynaklı numunelerin yorulma dayanımları artan çevrim sayısı ile hızla azalmaktadır. Bu duruma kıyasla, alın kaynaklı numuneler kaynaklı numuneler ile karşılaştırıldıklarında daha düşük yorulma ömürleri göstermelerine rağmen Wöhler eğrilerinin eğimi kaynaklı numunelerin Wöhler eğrisi ile benzerdir. Daha önce de belirtildiği üzere kaynaklı birleştirmelerde kaynak ısı etkisi altında değişen malzeme özellikleri ve kaynak geometrisi bir çentik gibi değerlendirilebilir. Dolayısıyla Wöhler eğrilerindeki yüksek eğim daha keskin bir çentiğe benzetilebilir. Ancak, eğimlerin kendi başına bu varsayılan çentik keskinliğini nümerik olarak belirlemesi mümkün değildir. Böyle bir değerlendirme için daha detaylı nümerik araştırmalara ve sonlu eleman analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışması kapsamı dahilinde bu araştırmalar yapılmamış ve gelecekte yapılması planlanan araştırma çalışmalarının konusu olması planlanmıştır.

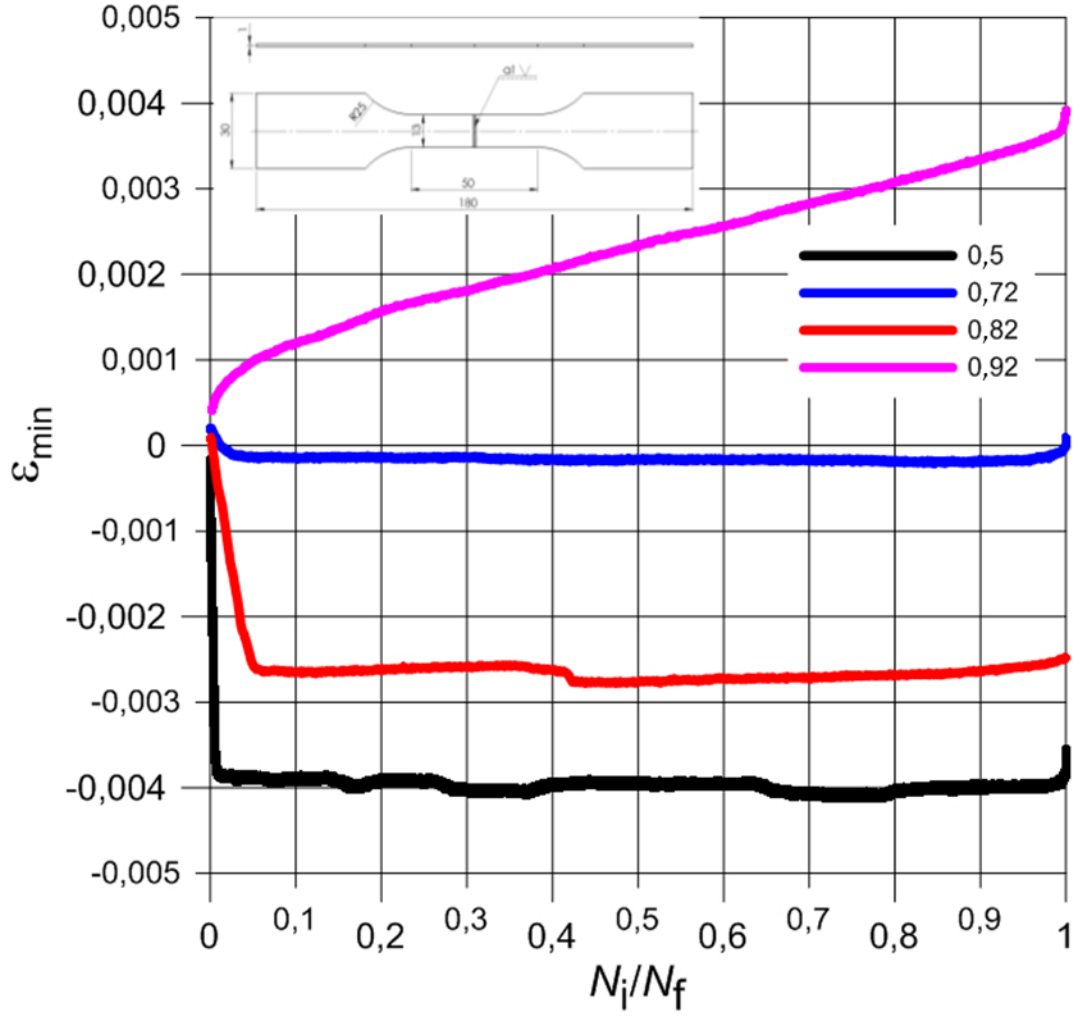


Şekil 4.13: Yük kontrollü yorulma deneylerinin Wöhler eğrileri.

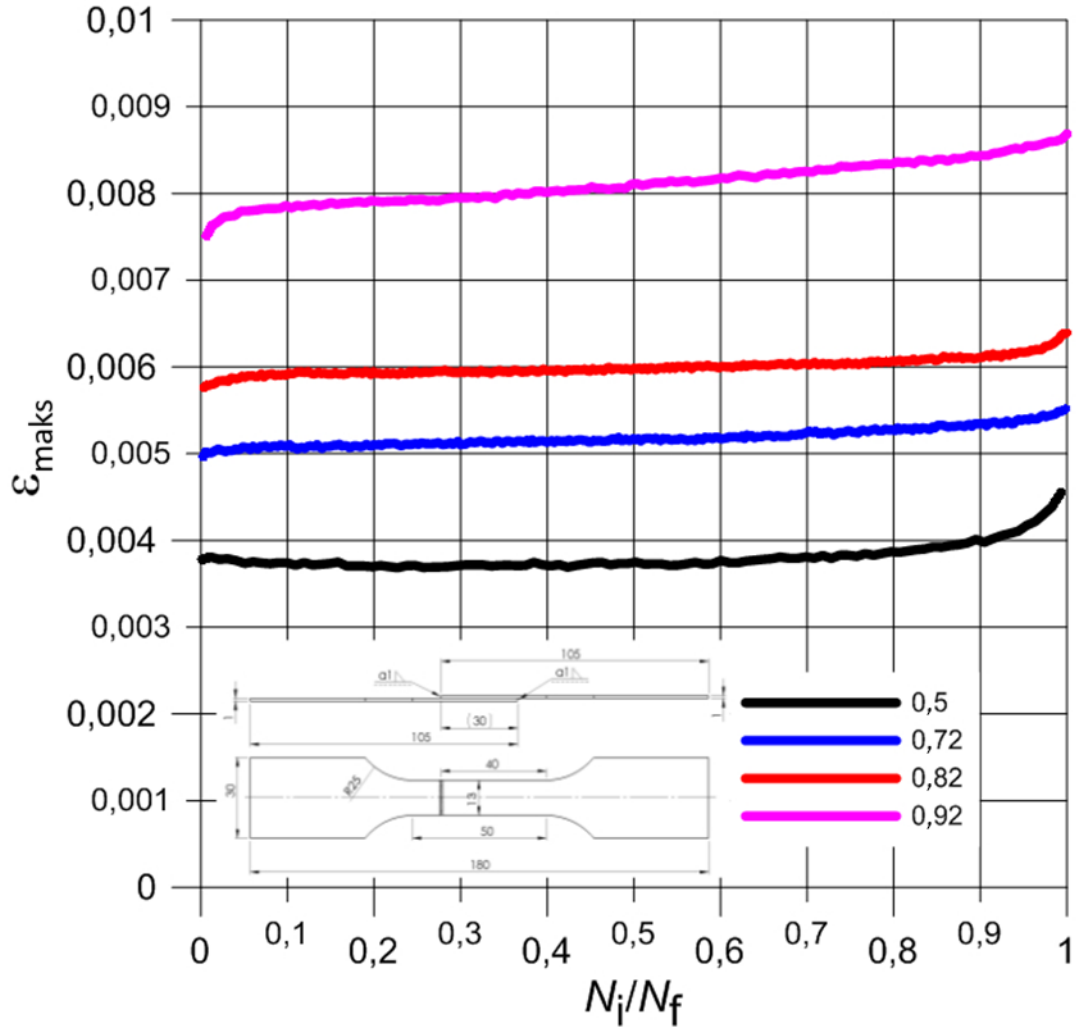
Tekrarlı yorulma yüklemeleri boyunca minimum ve maksimum uzamalar kaydedilerek ilgili çevrim sayıları ilişkilendirilmiştir. Elde edilen dalga biçimleri normalize edilerek Şekil 4.14-4.17’de her bir kaynaklı numune için sunulmuştur.



Şekil 4.14: Alın kaynaklı numunenin yük kontrollü yorulma yüklemeleri sırasındaki maksimum uzama değişimleri.

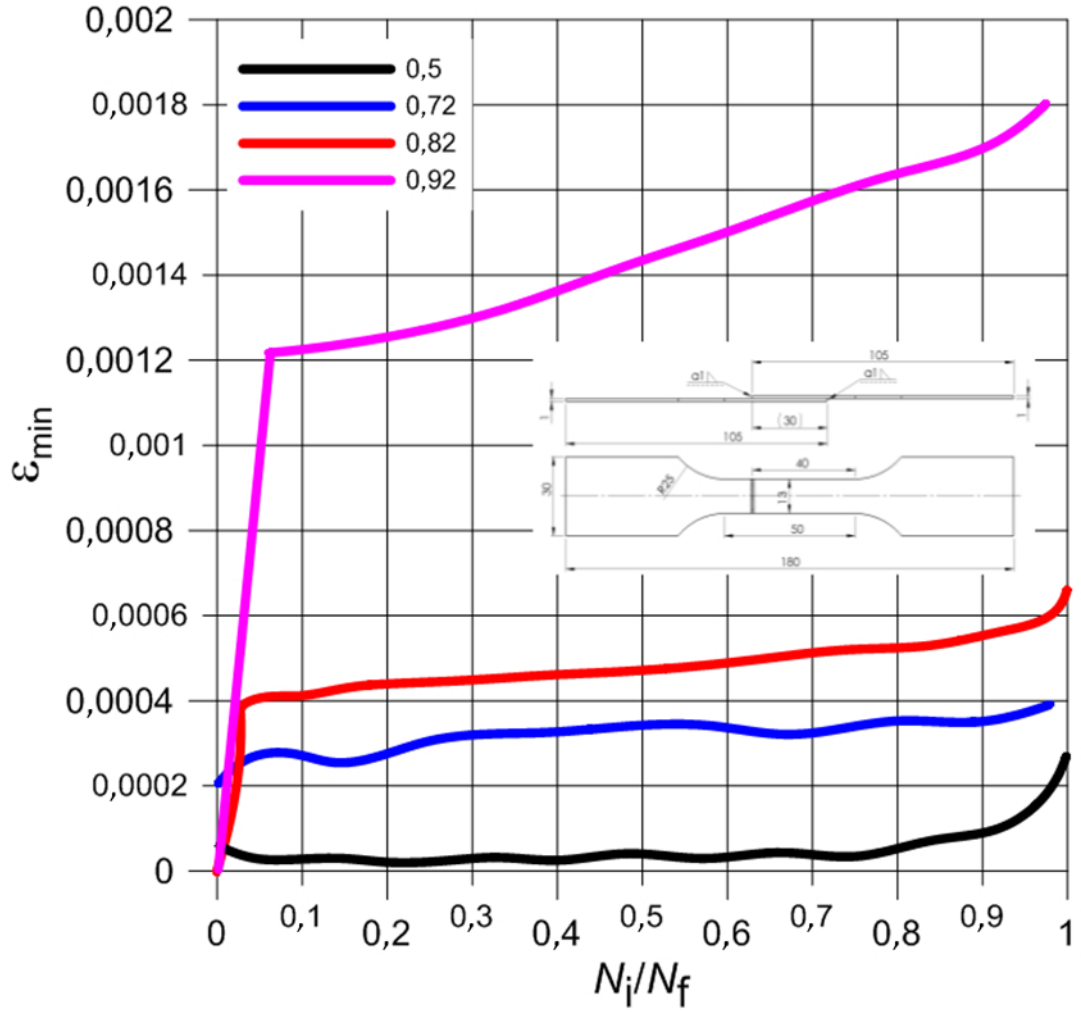


Şekil 4.15: Alın kaynaklı numunenin yük kontrollü yorulma yüklemeleri sırasındaki minimum uzama değişimleri.



**Şekil 4.16:** Bindirme kaynaklı numunenin yük kontrollü yorulma yüklemeleri sırasındaki maksimum uzama değişimleri.





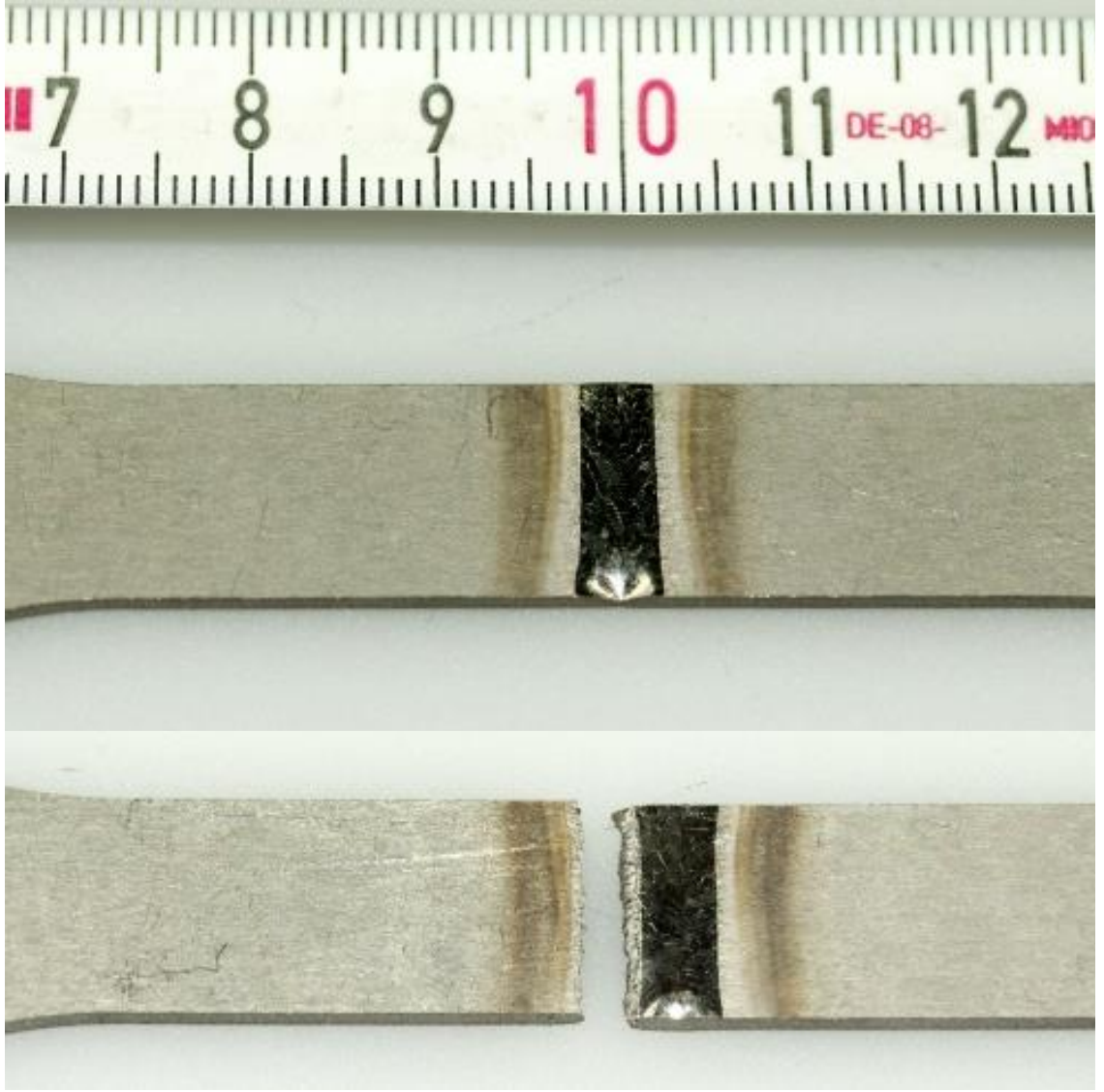
Şekil 4.17: Bindirme kaynaklı numunenin yük kontrollü yorulma yüklemeleri sırasındaki minimum uzama değişimleri.

Özellikle Şekil 4.15 ve 4.17’de gözlemlenebileceği gibi numunelerin minimum uzama değerleri yüksek yüklerde ( $0,92 R_{UTS}$ ) ani bir artış göstermektedir. Bunun aksine diğer yüklemeye değerlerinde iki tip numunede de minimum ve maksimum uzama değerleri neredeyse doğrusal bir seyir izlemektedir. Bu malzemenin daha önceden de belirlenen gevrek davranışı ile örtüşmektedir. Ayrıca, özellikle aln kaynaklı numunelere ait değerlerde bası yönünde (eksi, -) uzama değerleri gözlemlenmiştir. Yapılan incelemelerde bu sonuçların elde edilmesine ekstensometre ile yapılan ölçümlerdeki küçük hataların sebep olabileceği düşünülmüştür. Malzeme yüzeyi çok sert olduğundan ekstensometrenin keskin ayaklarının tekrarlı yüklemeler sırasında kayması ihtimaline karşı bantlar ile ekstensometre ayaklarının kayması engellenmiştir. Ancak alınan bu önlemler bası yönündeki uzamaları etkilememiştir. Bu değerlerin çok küçük olduğu ve sonuçlar

üzerinde bir etki yaratmadığı ayrıca göz önünde bulundurulmalıdır. Bu farkların zaten çok küçük olan uzama değerlerinin ölçümü sırasında ekstensometre ile yapılan ölçümlerdeki ufak hatalar olduğuna karar verilmiştir.

Deneylerde ölçülen uzama değerleri çok küçük değerlerdir. En yüksek yükleme seviyesinde bile minimum ve maksimum uzama değerleri arasındaki fark çok azdır. Yorulma deneyleri sonucundaki böyle küçük uzama değerleri çekme deneylerinin bulguları, özellikle de düşük *A* yüzde uzama değerleri ile örtüşmektedir. Titanyumdan kaynaklı birleştirmelerin gevrek davranışı barizdir ve yorulma deneylerini doğrudan etkilemektedir. Bu tez çalışması düşük çevrim sayısı yorulması bölgesini incelemeyi amaçladığından seçilen yüksek yükleme seviyeleri, beklendiği üzere düşük çevrim sayıları ile sonuçlanmıştır. Çekme deneylerinde kaynaklı numunelere yakın mekanik dayanım değerleri veren kaynaklı numunelerin yorulma performansları değerlendirildiğinde özellikle bindirme kaynaklı numunelerin yorulma deney verileri beklenen yorulma parametrelerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Maksimum ve minimum uzama değerleri göz önünde bulundurulduğunda malzemenin gevrek olmasının yorulma davranışı üzerindeki bariz etkisi gözlemlenebilmektedir. Kaynak metodu olarak kullanılan mikrop plazma ark kaynağı her ne kadar küçük çaplı bir ark ile yüksek ısı konsantrasyonu elde etse de ITAB bölgesinin yorulma davranışı üzerindeki etkisini ortadan kaldıramamıştır. Örnek olarak sunulan Şekil 4.18 ve 4.19’da da görüldüğü gibi iki tip kaynaklı numunede de yorulma kırılmalarının ITAB bölgesinde oluşmuş olması bunu doğrulamaktadır. Ayrıca, kullanılan numunelerin ince oluşu kaynak işleminin zorlaşmasına ve kaynak hataları oluşması ihtimalinin artmasına sebep olmaktadır.



**Şekil 4.18:** Alın kaynaklı numunenin yorulma deneyleri sonrası kırılma konumu.

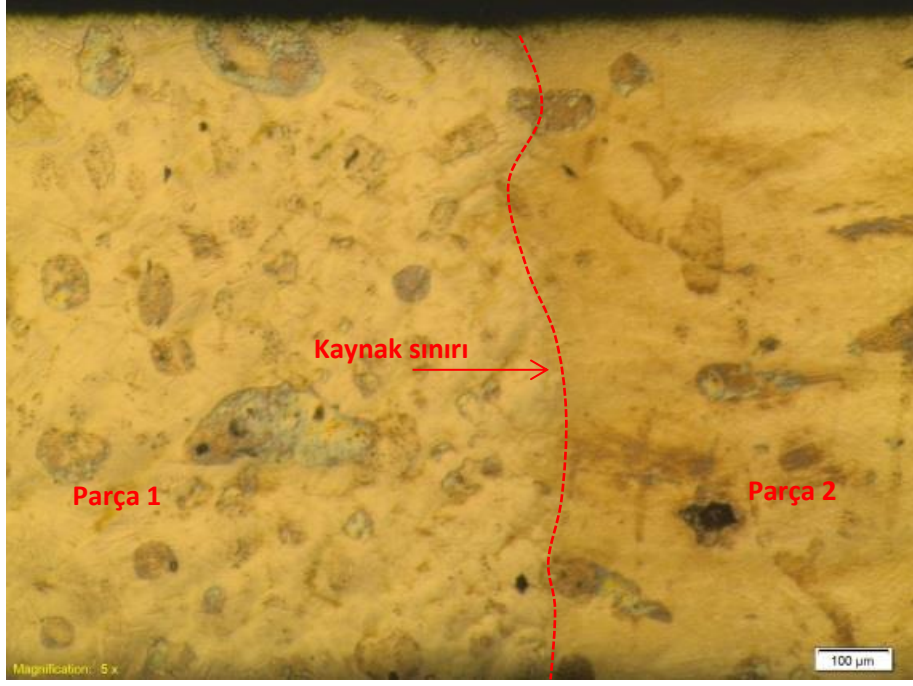


Şekil 4.19: Bindirme kaynaklı numunenin yorulma deneyleri sonrası kırılma konumu.

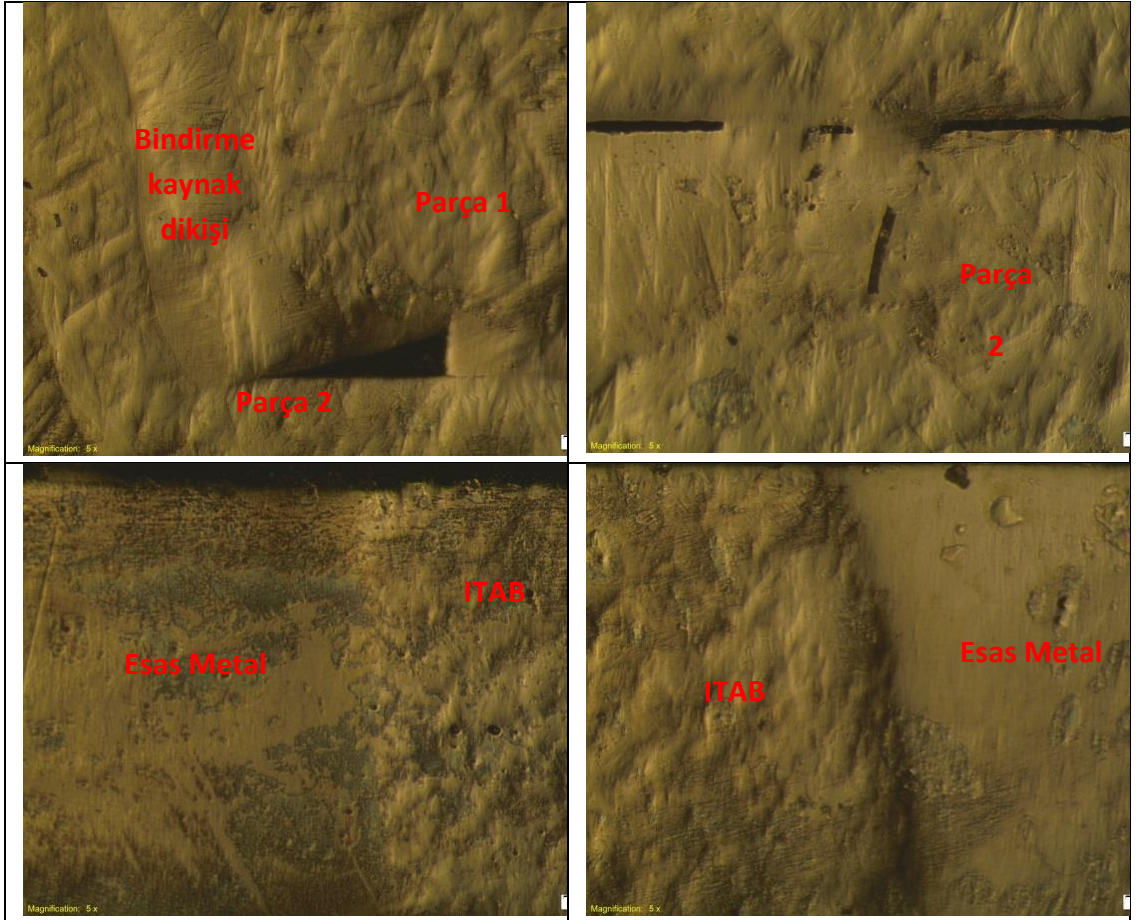
### 4.3 Metalografik İnceleme Sonuçları

Titanyumdan kaynaklı birleştirmelerin yapısal dayanımını etkileyen faktörlerin tam olarak değerlendirilebilmesi için makro ve mikro düzeyde incelemeler yapılmış ve elde edilen bulgular bu bölümde sunulmuştur.

Optik mikroskop altında 5x yakınlaştırma ile incelenen kaynaklı numune kesitlerinden elde edilen resimler Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilmiştir. Yapılan gözlemlerde numunenin ısı tesiri altında kalan bölgesinde oluşan renk değişimi gözlemlenebilmektedir. ITAB bindirme kaynaklı numunelerde çok daha belirgin olup, daha gözenekli bir yapıya sahiptir.

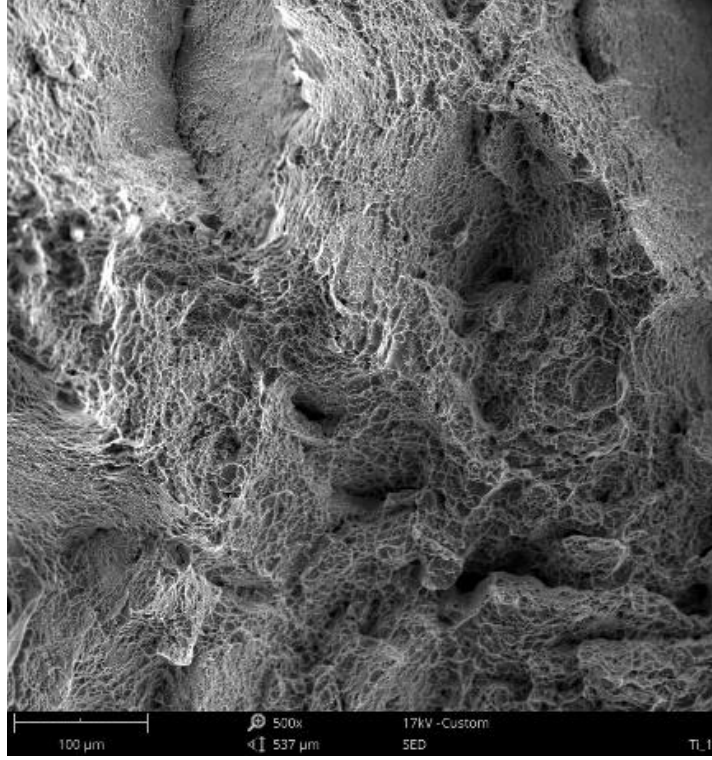


Şekil 4.20: Alın kaynaklı numunenin kaynak dikişinin kesit görünümü (5x yakınlaştırma).



Şekil 4.21: Bindirme kaynaklı numunenin kaynak dikişlerinin kesit görünümleri (5x yakınlaştırma).

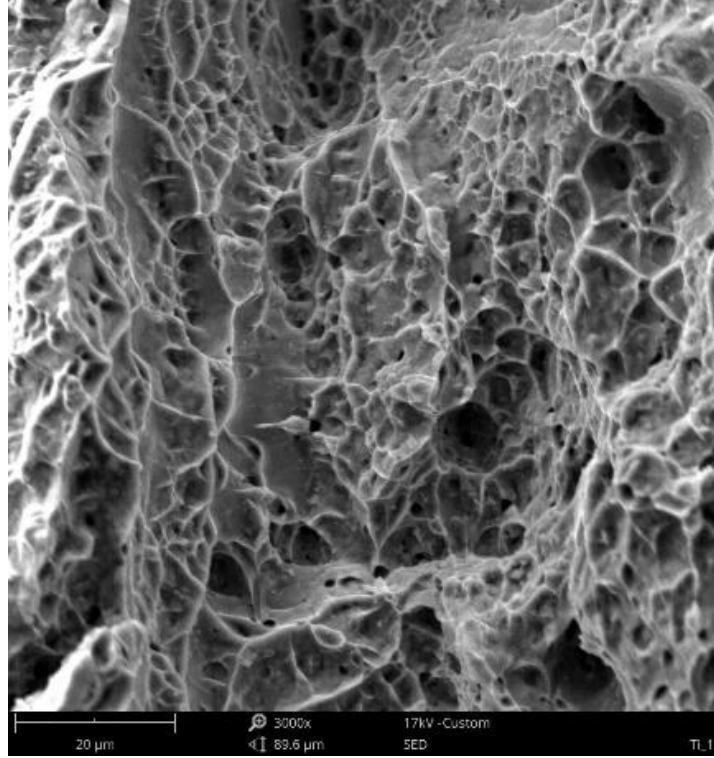
Çekme deneylerinde kopan numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM taramalı elektron mikroskobu ile 500x yakınlaştırarak elde edilen fraktograflar Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'te, 1000x yakınlaştırarak elde edilen fraktograflar Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27'de, 3000x yakınlaştırarak elde edilen fraktograflar ise Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da, sunulmuştur. Numuneler arasındaki farklılıklar kıyaslandığında, kaynak ısısından doğan malzeme yapısındaki değişimler burada da gözlemlenebilmektedir. Özellikle kaynaklı numuneler ile kaynaklı numuneler arasındaki farklar dikkat çekerken kaynaklı numunelerin birbirleri arasındaki farklar daha azdır. Kırılma yüzeylerinde gözlemlenen keskin tepeler ve mikro-çukurlar tüm numunelerin kırılma yüzeylerinde mevcutken, kaynaklı numunelerde çok daha belirgindir ve üniforma yakın bir dağılım göstermektedir. Özellikle bindirme kaynaklı numunelerde daha belirgin olan bu çukur ve tepe yapıları, daha önceden de gözlemlenen gevrek davranışa işaret etmektedir. Numunelerin kırılma yüzeylerindeki bu farklar kaynak ısısı ile malzeme mikroyapısındaki ve bağlantılı olarak mekanik davranışındaki değişimi göstermektedir. TiAl6V4 alaşımının yüksek enerji girdili kaynak yöntemleri sırasında ITAB ve çevresinde daha büyük taneler oluşturduğu bilinmektedir (Donachie 2000; Karimzadeh et al. 2005). Değişen tane yapıları mekanik özelliklerde de düşüşe sebep olmaktadır. Mikroplazma ark kaynağı enerji girişini sınırlayarak ince numunelerde ısı sebebiyle oluşabilecek çarpılmaları ve gözlemlenebilir kusurları engelleyerek başarıyla birleştirmeyi gerçekleştirebilmektedir. Ancak yüksek odaklı plazma arkına rağmen tane boyutlarındaki büyüme gibi mikroyapısal değişimlerin kaynak sonrası işlemler yapılmadan önüne geçilemeyeceği düşünülmektedir.



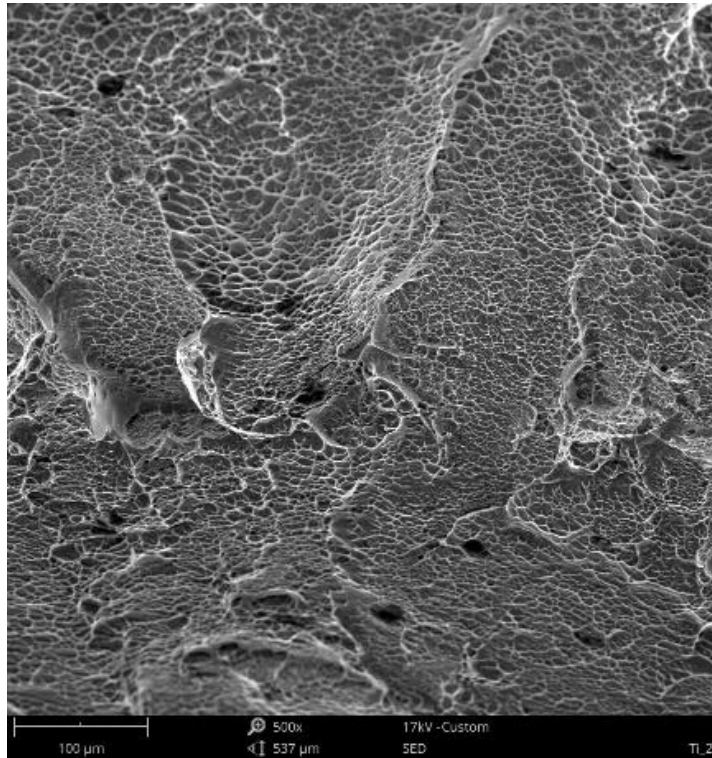
Şekil 4.22: Kaynaksız numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (500x yakınlaştırma).



Şekil 4.23: Kaynaksız numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (1000x yakınlaştırma).

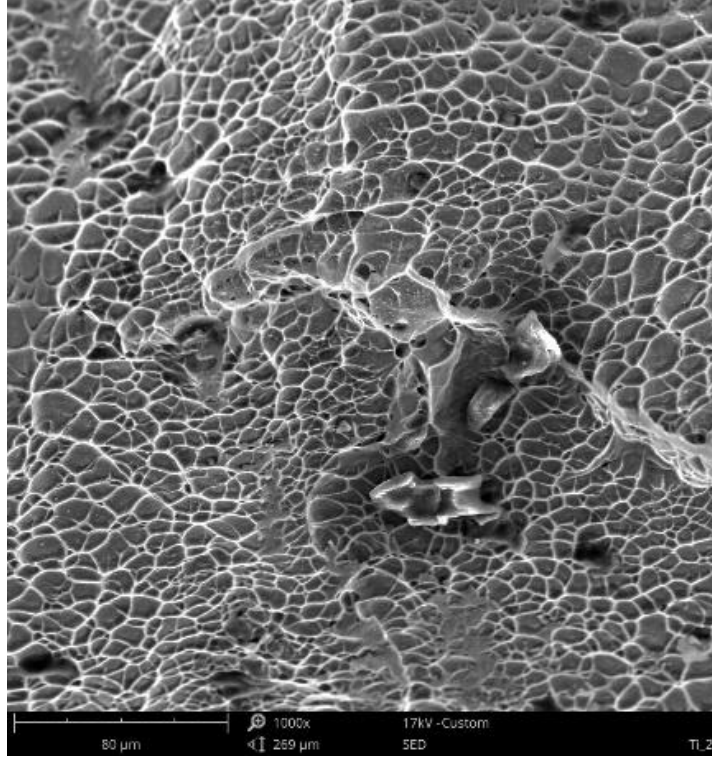


**Şekil 4.24:** Kaynaksız numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (3000x yakınlaştırma).

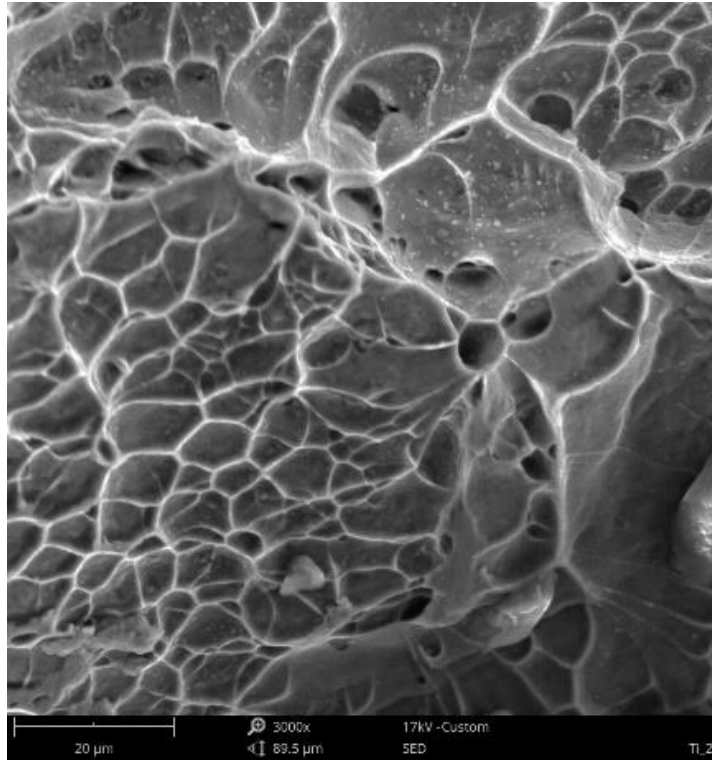


**Şekil 4.25:** Alın kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (500x yakınlaştırma).

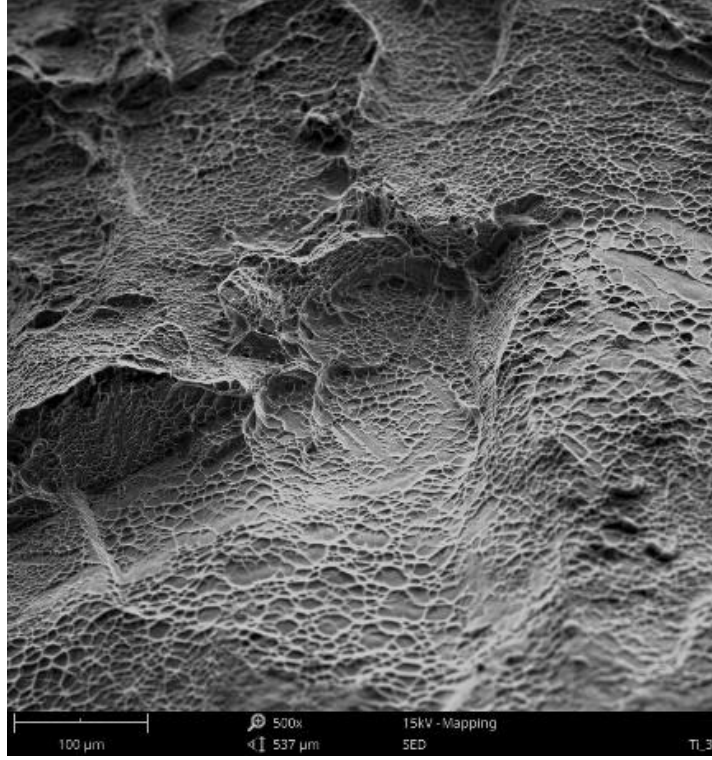




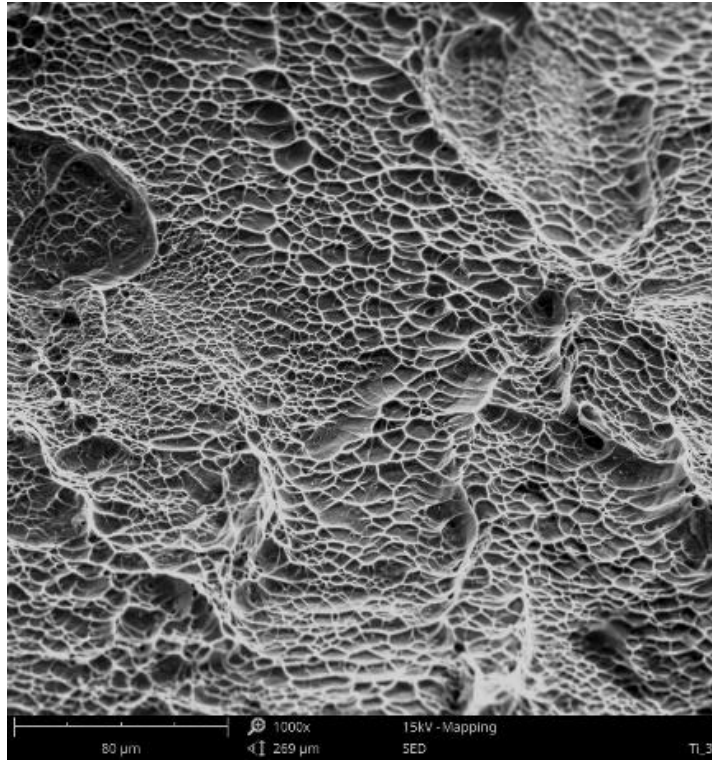
**Şekil 4.26:** Alın kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (1000x yakınlaştırma).



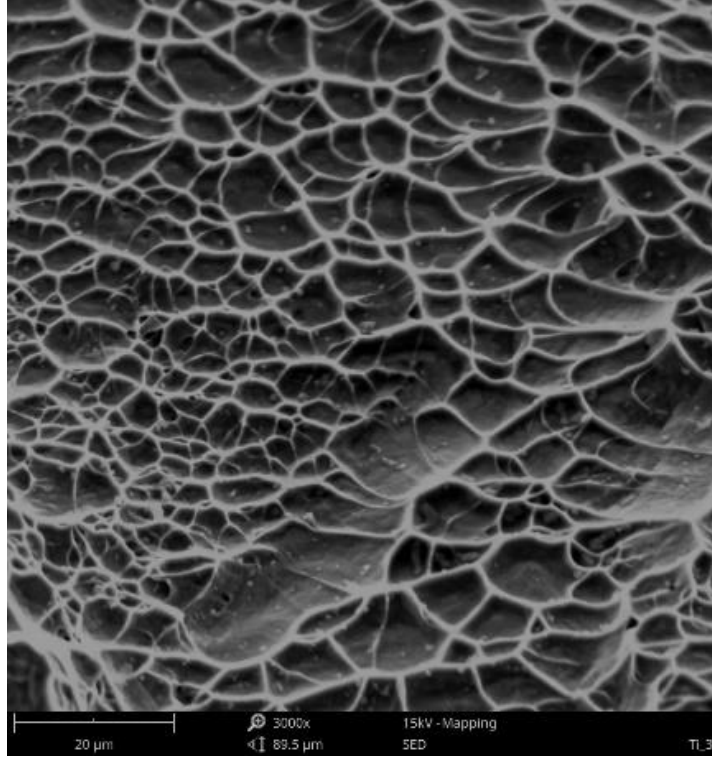
**Şekil 4.27:** Alın kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (3000x yakınlaştırma).



**Şekil 4.28:** Bindirme kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (500x yakınlaştırma).



**Şekil 4.29:** Bindirme kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (1000x yakınlaştırma).



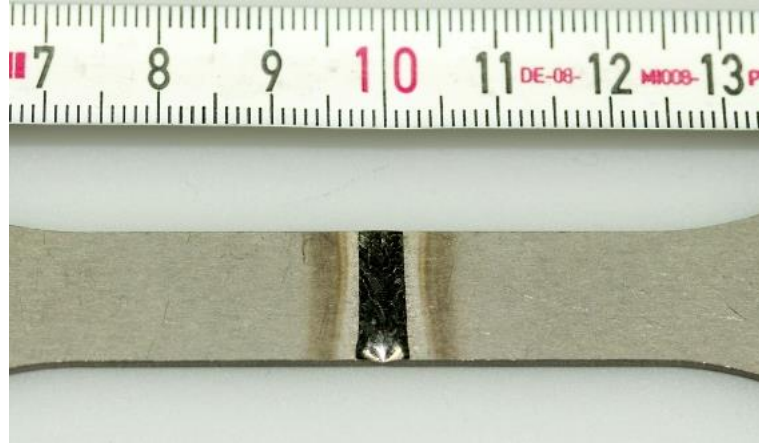
**Şekil 4.30:** Bindirme kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu görüntüleri (3000x yakınlaştırma).

Bindirme kaynaklı numunelerin geometrileri ve yükleme koşulları düşünüldüğünde kayma gerilmesi kaynaklı deformasyonlar beklenmiştir. Ancak alın kaynaklı ve bindirme kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyleri kıyaslandığında büyük farklar olmayışı bindirme kaynaklı numunelerin de çekme gerilmeleri etkisiyle koptuğuna işaret etmektedir. Kopmaların konumları ve fraktografik incelemeler değerlendirildiğinde bu durumun sebebinin kaynaklı numunelerdeki kayma hasarı dikkate değer seviyeye gelmeden önce sadece çekme hasarı etkisiyle kopmaları olduğu düşünülmektedir. Gevrek davranış gösteren kaynaklı numunelerdeki ITAB bölgesi çekme hasarının yarattığı çatlaklarla hızla zayıflamakta ve kayma hasarı etkisini göstermeden numune kopmaktadır.

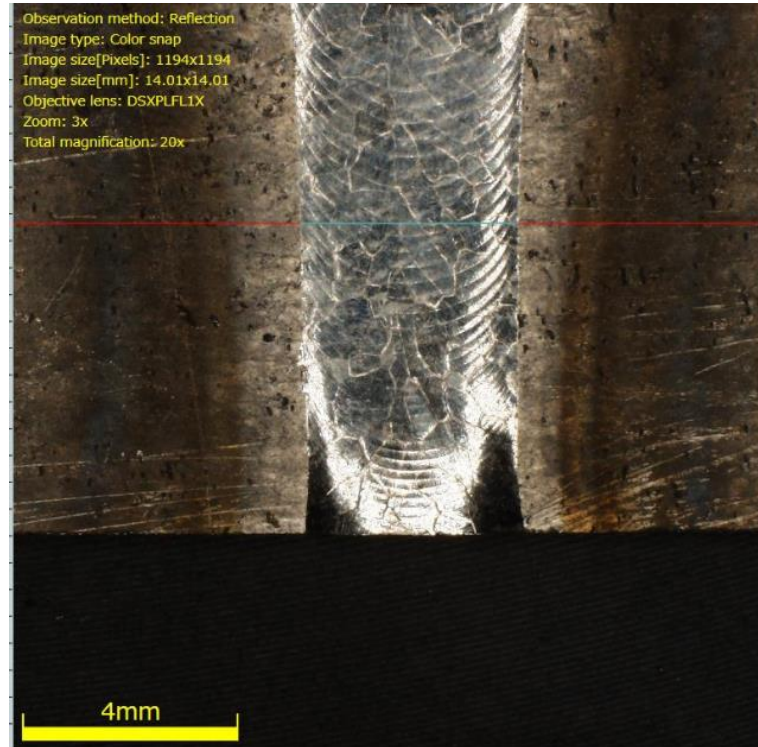
Mercek altında incelenerek fotoğraflanan yorulma deney numunelerinin kaynak dikişlerinin resimleri Şekil 4.31 ve 4.32’de sunulmuştur. Görüntülerde kaynak dikişleri çevresindeki renk değişimi gözlemlenebilir. Bu renk değişimi yaklaşık olarak ITAB ve çevresine karşılık gelmektedir. Ayrıca yapılan incelemelerde kaynak dikişlerinin yüzeylerinde çok sayıda ince çatlak bulunduğu gözlemlenmiştir. Kaynak sırasında ve soğuma sırasında kaynak dikişleri iki yönden

helyum gazı ile korunmuştur. Dolayısıyla bu çatlakların atmosferik bir etkiden değil, çok ince olan titanyum levhaların kaynaktan sonra hızla soğuması sırasında oluştuğu düşünülmektedir.

a)



b)

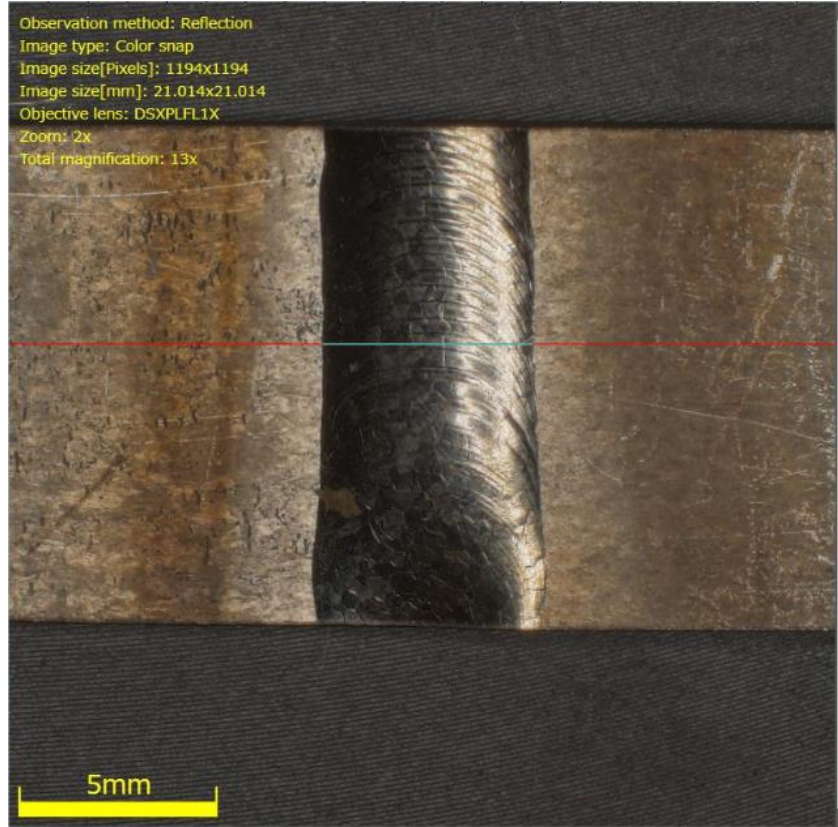


Şekil 4.31: Yorulma deneylerinden önce a) alın kaynaklı deney numunesi ve b) kaynak bölgesinin detaylı resmi.

a)



b)



Şekil 4.32: Yorulma deneylerinden önce a) bindirme kaynaklı deney numunesi ve b) kaynak bölgesinin detaylı resmi.

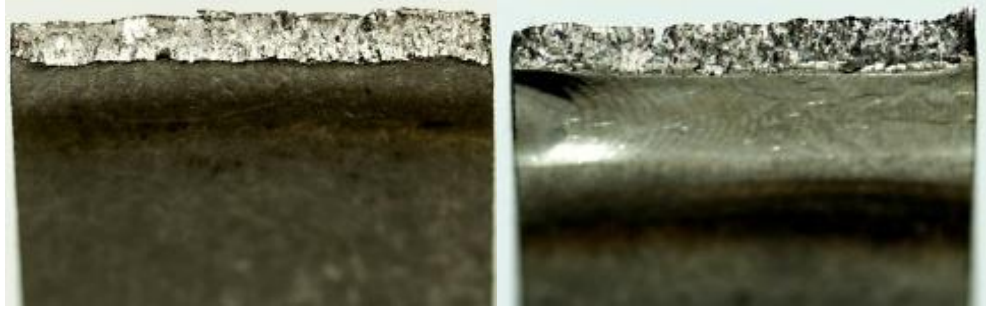
Bunun yanı sıra, Şekil 4.33 ve 4.34'te yük kontrollü yorulma deneyleri sonucunda kopan kaynaklı numunelerin resimleri verilmiştir.  $0,82R_{UTS}$  yükleme seviyesinde tekrarlı yüklemelere maruz bırakılan numuneler bu incelemelerde örnek olarak kullanılmışlardır. Kaynaklı bağlantıların yorulma kırılmalarının yüzeyleri,

yükün yönüne makroskopik olarak diktir. Analiz edilen bağlantılar için yorulma çatlakları kaynak dikişi ile esas metalin bulunduğu geçiş bölgesinde ortaya çıkmış ve ilerlemiştir.

a)



b)



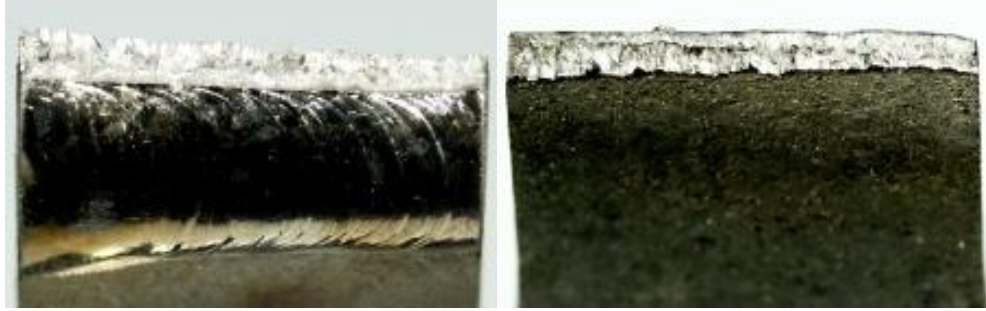
Şekil 4.33: Yorulma deneylerinden sonra alın kaynaklı deney numunesinin a) kaynak bölgesinin detaylı resmi ve b) kırılma yüzeyleri.

Yorulma kırıkları, görünür odak noktaları olan çok yüzeyli bir yapıya sahiptir. Çevrim sayıları arttıkça çatlaklar yayılır ve kümeler halinde birleşerek yorulma atılım bölgeleri oluşturur. Çatlak ilerlemesi sırasında ortaya çıkan iki kırılma yüzeyi kopma gerçekleşmeden önce numunenin maruz kaldığı yük sebebiyle hareket halindedir. Bazı malzemelerde birbirlerine sürtünen bu kırılma yüzeylerinin bir kısmının aşınarak pürüzsüzleşmesine sebep olur. Çatlağın aşamalı gelişimi, numunenin enine kesitinin zayıflamasına ve bu da hızlı bir şekilde kopmasına neden olur. Numunenin kırılma yüzeyleri değerlendirildiğinde ani kopmanın gerçekleştiği bölge ile çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği bölgeler yüzeyin pürüzlülüğünün değerlendirilmesi ile tespit edilebilir.

a)



b)

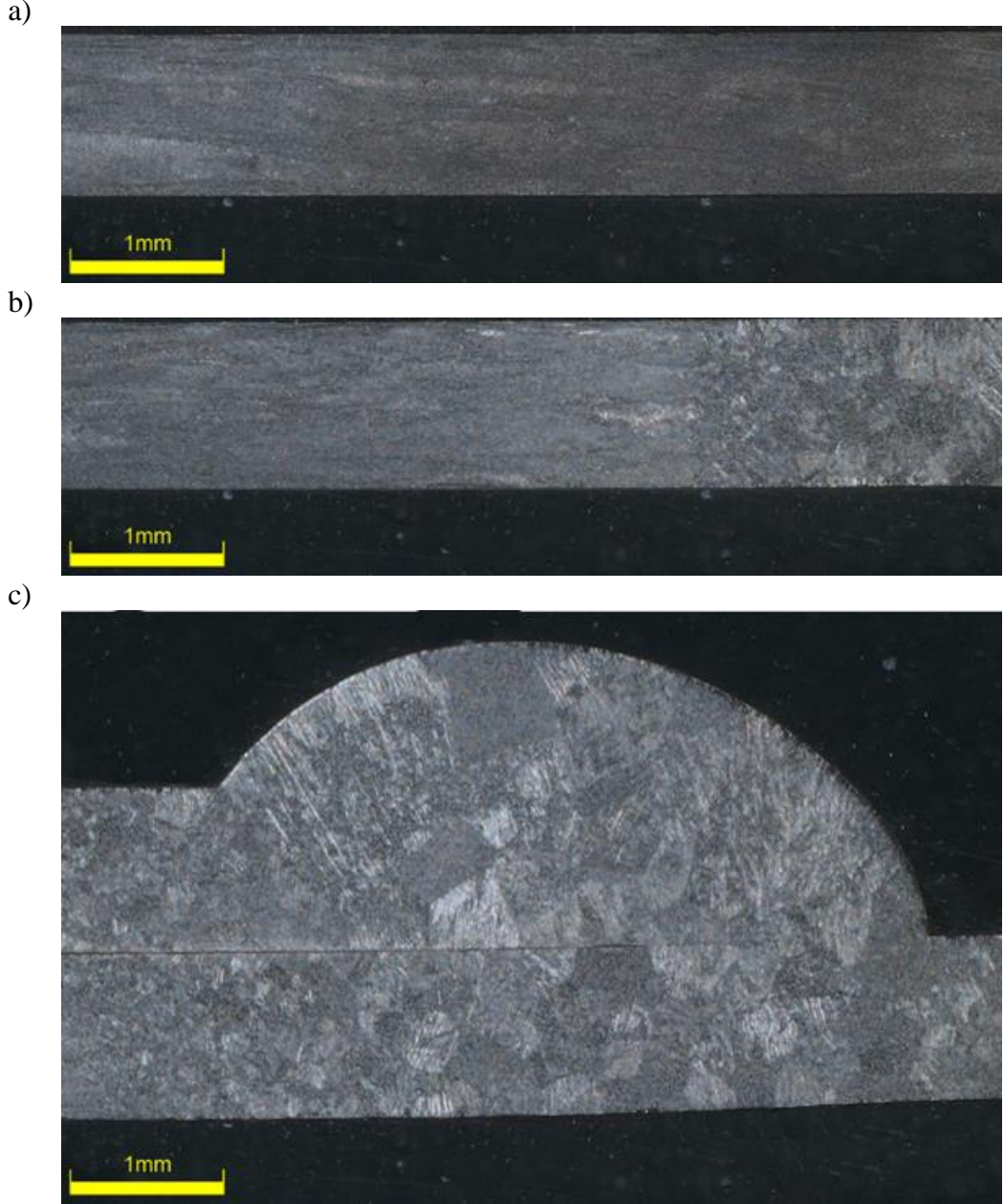


**Şekil 4.34:** Yorulma deneylerinden sonra bindirme kaynaklı deney numunesi a) kaynak bölgesinin detaylı resmi ve b) kırılma yüzeyleri.

Yorulma kırıkları, görünür odak noktaları olan çok yüzeyli bir yapıya sahiptir. Çevrim sayıları arttıkça çatlaklar yayılır ve kümeler halinde birleşerek yorulma atılım bölgeleri oluşturur. Çatlak ilerlemesi sırasında ortaya çıkan iki kırılma yüzeyi kopma gerçekleşmeden önce numunenin maruz kaldığı yük sebebiyle hareket halindedir. Bazı malzemelerde birbirlerine sürtünen bu kırılma yüzeylerinin bir kısmının aşınarak pürüzsüzleşmesine sebep olur. Çatlağın aşamalı gelişimi, numunenin enine kesitinin zayıflamasına ve bu da hızlı bir şekilde kopmasına neden olur. Numunenin kırılma yüzeyleri değerlendirildiğinde ani kopmanın gerçekleştiği bölge ile çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği bölgeler yüzeyin pürüzlülüğünün değerlendirilmesi ile tespit edilebilir.

Buna göre Şekil 4.33b ve 4.34b’de verilen kırılma yüzeylerinde yapılan ön incelemeler, kırılmanın sünek metallerin yorulmasında sık görülen, “parlak” bir yüzeye sahip olmadığını göstermiştir. Kaynak sonrası daha da gevrekleşen numune çatlak oluşumundan sonra hızla kırılarak, kırılma yüzeylerinin birbirine sürtünmesine

ve sonucu oluşan düzgün kırılma yüzeylerini oluşturmaya fırsat bulamamıştır. Ancak numune kalınlığının 1 mm olduğu ve bu sebeple oluşan mikro-çatlakların kopma ile sonuçlanan kesit düşüşünde daha etkili olabileceği göz ardı edilmemelidir.

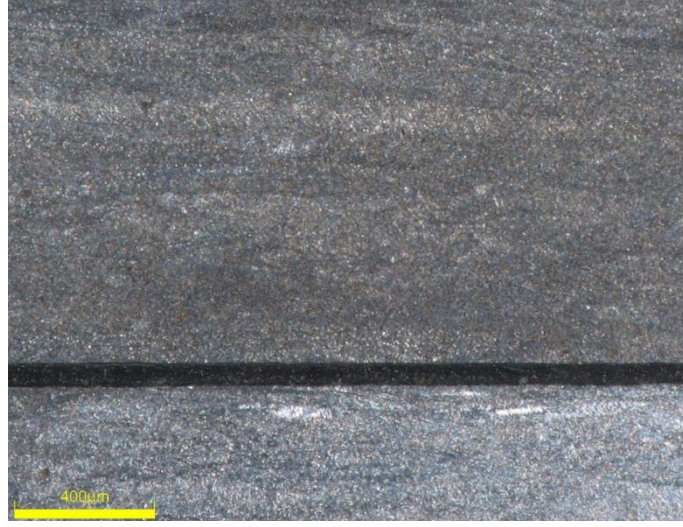


Şekil 4.35: a) Kaynaksız, b) alın kaynaklı ve c) bindirme kaynaklı deney numunelerinin 30x yakınlaştırmada mikro-yapıları.

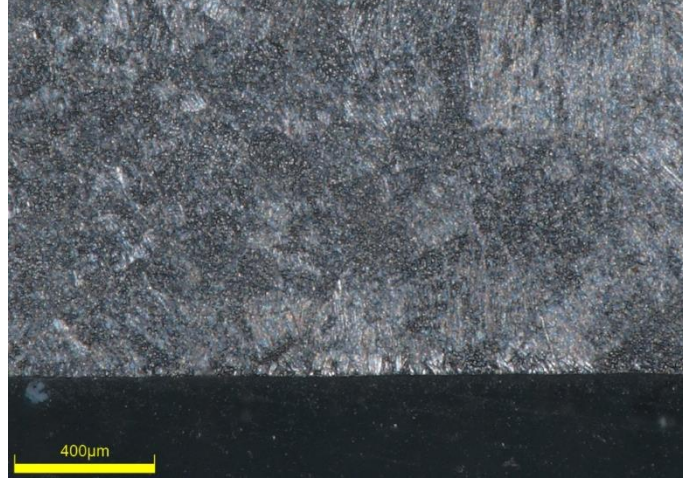
Deney numuneleri boyuna kesitleri 30x ve 145x yakınlaştırma altında optik mikroskop ile incelenmiş, numunelerin elde edilen karakteristik mikroyapılarının görüntüleri Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da sunulmuştur. Kaynaksız numune ile kaynaklı numuneler kıyaslandığında, kaynak sebebiyle oluşan tane değişimleri açıkça gözlemlenebilmektedir.



a)



b)



c)

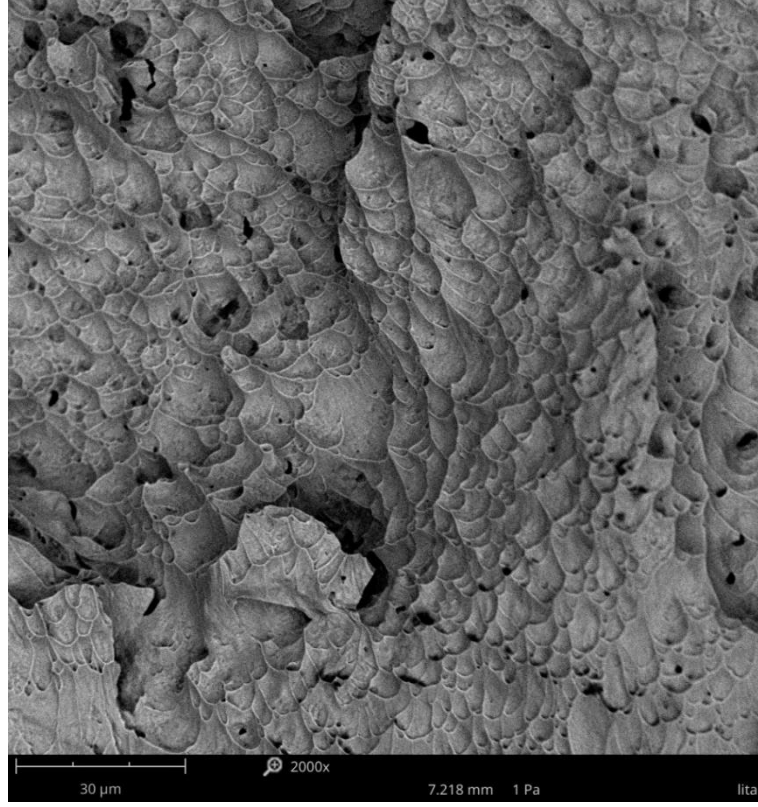


**Şekil 4.36:** a) Kaynaksız, b) alın kaynaklı ve c) bindirme kaynaklı deney numunelerinin 145x yakınlaştırmada mikro-yapıları.

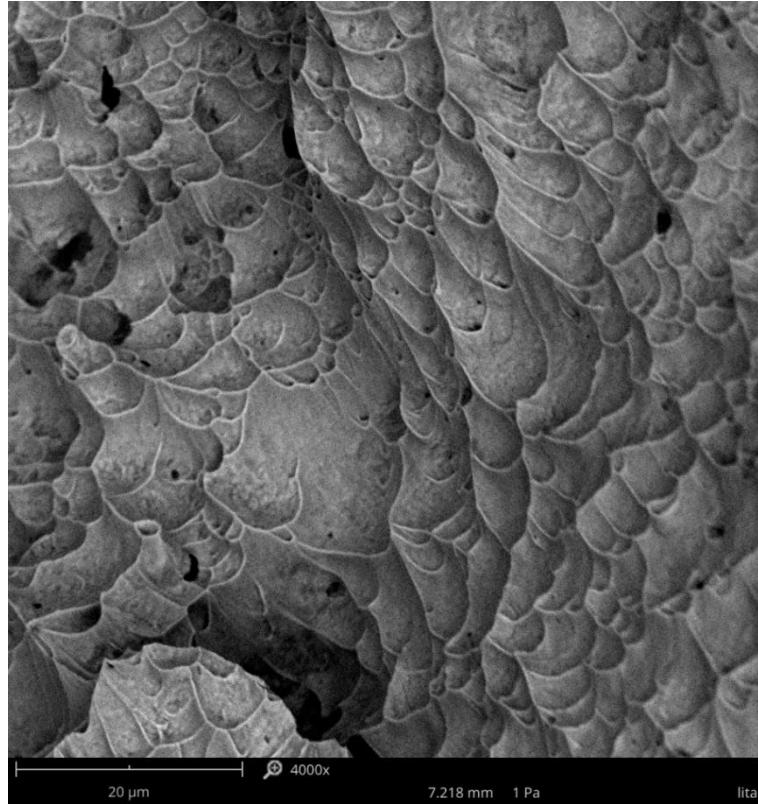
İki kaynaklı numunede de tane boyutları kaynak dikişinde gözlemlenebilir bir şekilde büyüktür. Bu tane boyutları kaynak dikişinden ITAB'a ilerledikçe küçülmektedir. Bu malzemenin mekanik davranışındaki belirgin değişimi açıklamaktadır. Özellikle bindirme kaynaklı numunelerde bu değişim barizdir. Bunun sebebi iki levhanın üst üste kaynaklandığı bindirme kaynaklı numunelerin iyi bir birleşme için daha yüksek ısıya ihtiyaç duymalarıdır. Ayrıca mikroyapısal incelemelerde ITAB ve ITAB yakınındaki bölgelerdeki tanelerdeki ve tane boyutlarındaki düzensizlikler fark edilmiştir. Özellikle kaynaklı numunelerdeki düzenli tane yapısı ile kıyaslandıklarında bu durum daha bariz hale gelmektedir.

Yük kontrollü deney numunelerinden seçilen  $0,82 R_{UTS}$  yük seviyesinde test edilmiş numunelerin kırılma yüzeyleri SEM taramalı elektron mikroskopu kullanılarak 2000x ve 4000x yakınlaştırmada incelenmiş, elde edilen resimler Şekil 4.37, 4.38 ve 4.39'da sunulmuştur. Yapılan incelemelerde çok aşamalı olan yorulma çatlaklarına dair izler tespit edilmiştir. İlk aşamada yapısal bozukluklar mikro-çatlaklar şeklinde kaynak yüzeyinden kaynak köküne doğru ilerlemiştir. Kırılma yüzeyinin ilk aşamalarını gösteren alanlardaki basit morfoloji plastik çatlamanın bir göstergesidir. Bir sonraki aşamada mikro-çatlaklar birleşerek bir çatlak ağından oluşan makro-boşluklar meydana getirmekte ve yorulma sabit bir hızda ilerlemeye devam etmektedir. Yorulmanın izlerinin gözle görülür hale geldiği bir sonraki aşamada çatlaklar ITAB'da hızla ve gözlemlenebilir bir şekilde ilerleyerek numunenin kopmasına sebep olmaktadır. Bu durum kırılma yüzeyinde gevrek kırılmaya işaret eden belirgin çukur ve keskin tümseklere sebep olmuştur. Bu şekiller arasında yapılan kıyaslamalarda sünek kopmanın izlerinin kaynaklı numunelerde bariz bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak kaynaklı numunelerin birbirleri arasındaki farklar oldukça azdır. Şekil 4.38 ve 4.39 kıyaslandığında, alın kaynaklı numunelerde nadiren de olsa sünek kopmaya dair izler olduğu görülmektedir. Ancak genel olarak keskin kenarlı tepecik ve çukurların oluşması gevrek kırılmaya işaret etmektedir. Elde edilen yorulma verilerine destekler nitelikteki bu analizler daha öncede belirtilen tespitleri doğrulamaktadır. Mikroplazma ark kaynağı kullanılarak sağlanan minimal ısı girişine rağmen ITAB halen TiAl6V4 alaşımının yorulma davranışındaki en etken öğelerden biridir.

a)

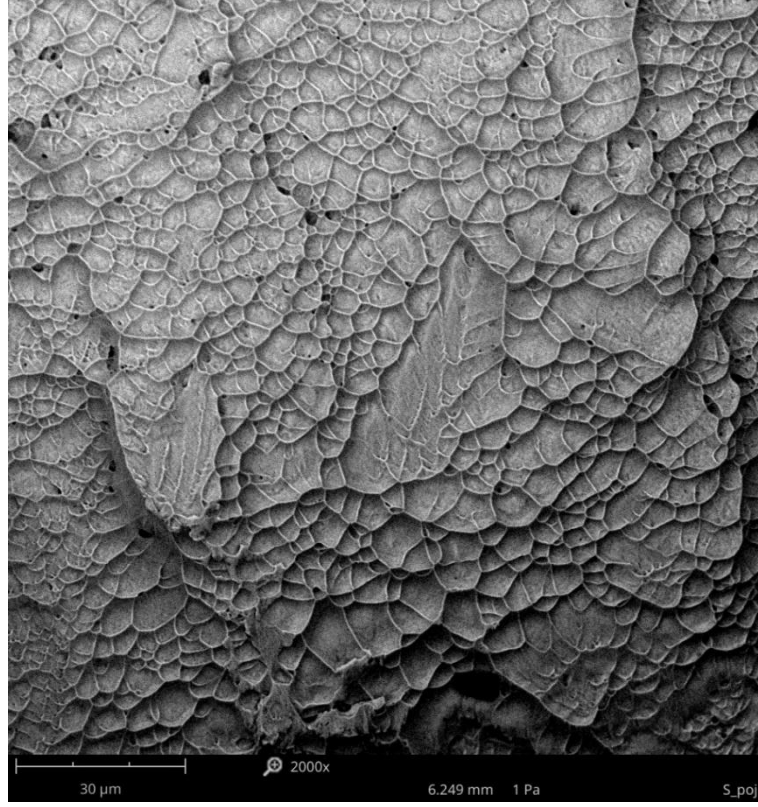


b)

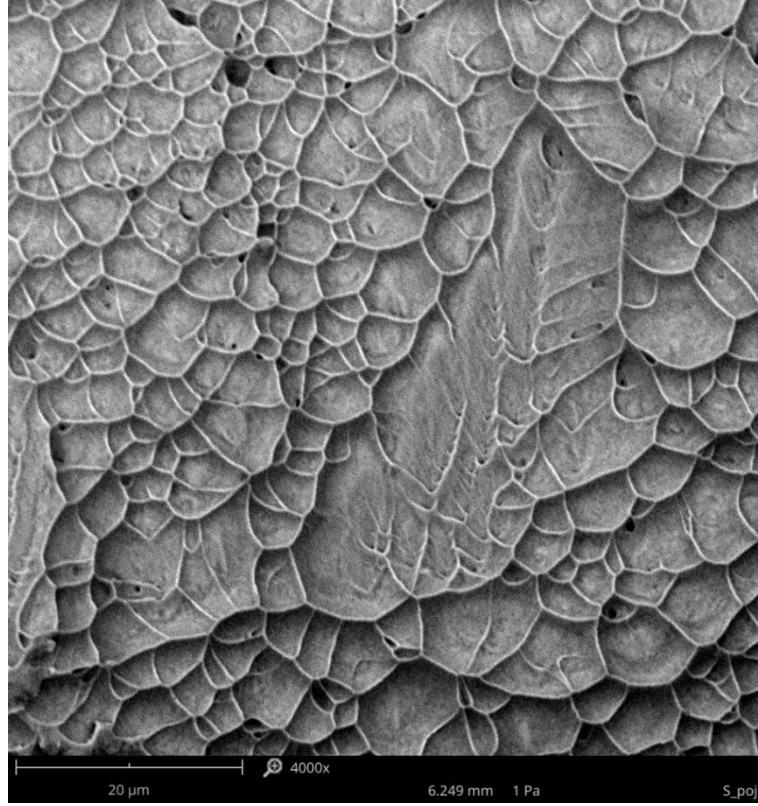


Şekil 4.37: Kaynaksız deney numunelerinin a) 2000x ve b) 4000x yakınlaştırmada kırılma yüzeyleri.

a)

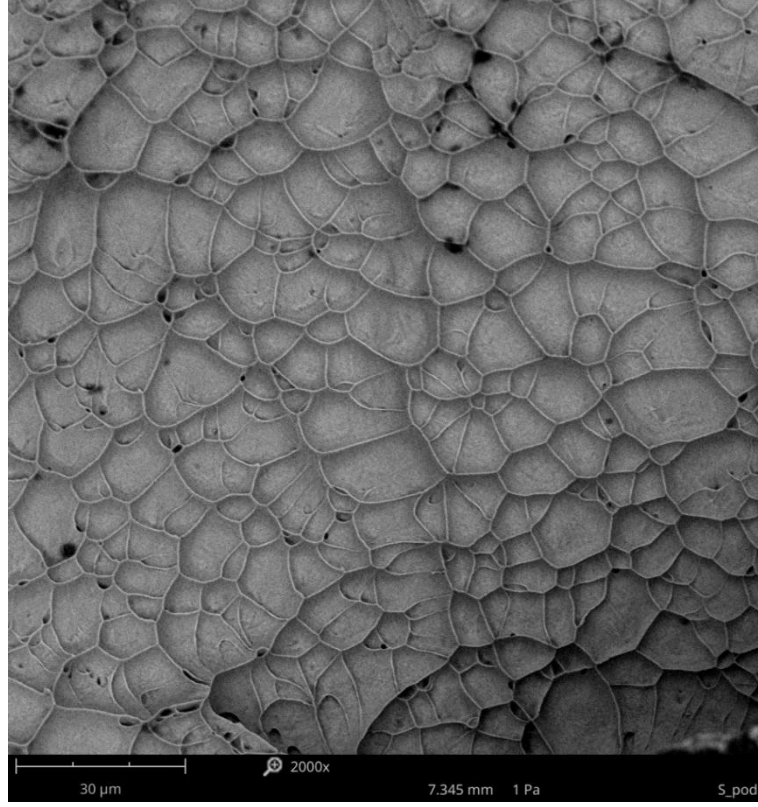


b)

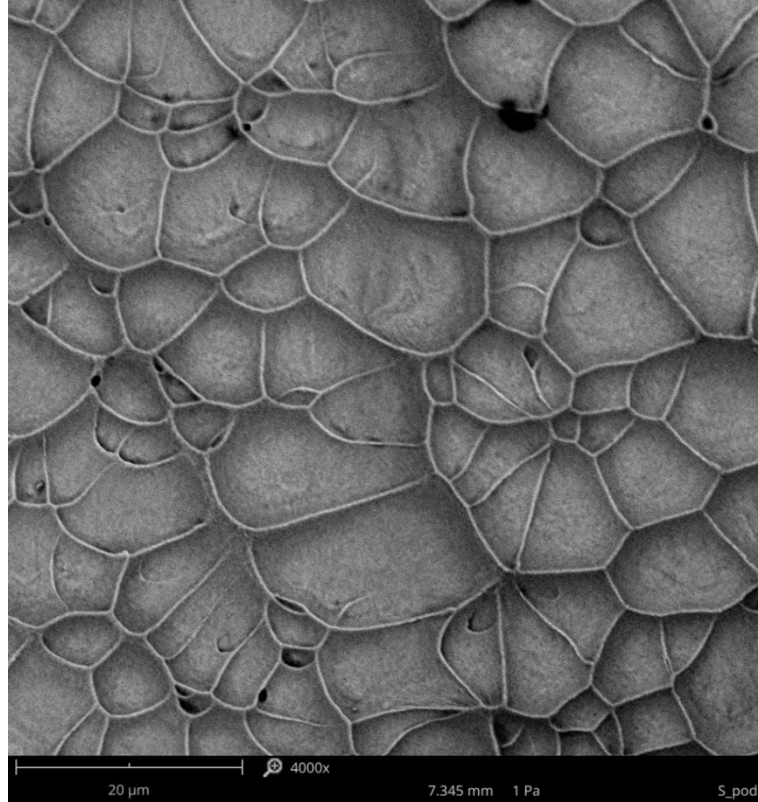


Şekil 4.38: Alın kaynaklı deney numunelerinin a) 2000x ve b) 4000x yakınlıştırmada kırılma yüzeyleri.

a)



b)



**Şekil 4.39:** Bindirme kaynaklı deney numunelerinin a) 2000x ve b) 4000x yakınlaştırmada kırılma yüzeyleri.

Bu değerlendirmeler ışığında TiAl6V4'ten kaynaklı birleştirmelerin ısı etkisiyle değişen mekanik özelliklerinin kaynak sonrası uygulanacak ısı işlemler ile iyileştirilebileceği düşünölmektedir. Mevcut literatür incelendiğinde bu düşünceyi destekleyen çalışmalar gözlemlenmiştir (Edwards et al. 2010; Lancea et al. 2021; Rahul et al. 2018). Ancak, kaynak sonrası ısı işleme maruz bırakılan TiAl6V4 birleştirmelerin incelendiği çalışmaların sayısının oldukça sınırlı olduğu dikkat çekicidir. Bunun yanı sıra eklemeli üretim ile üretilen TiAl6V4 parçalar üzerinde yapılan çalışmalara göre yaşlandırma ısı işleme malzemenin çekme ve yorulma dayanımını iyileştirirken, malzemenin sünekliği üzerinde dikkate değer bir değişime sebep olmamıştır (Seyda et al. 2012; Wang et al. 2020). Dolayısıyla bu tez çalışmasında kullanılan TiAl6V4'ten mikrop plazma ark kaynaklı ince levhaların yorulma performanslarının iyileştirilmesi için yapılabilecek kaynak sonrası ısı işlemlerin tespiti ancak deneysel çalışmalar ile mümkündür. Yapılabilecek ısı işlemlerin yöntemleri, ilgili yöntemlerin parametreleri ve numunelerin yorulma performansı üzerindeki etkileri belirlenmelidir. Bu sebeple gelecekte bu konu üzerinde yapılacak bilimsel çalışmaların mikrop plazma ark kaynağının parametrelerinin optimizasyonu ve kaynak sonrası ısı işlemlerin belirlenmesi olarak planlanmaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında mühendislik tasarımlarında en yaygın kullanılan titanyum alaşımı olan TiAl6V4 alaşımından ince levhaların mikroplazma ark kaynaklı birleştirmelerinin yorulma davranışları incelenmiştir. Bu incelemelerde, çekme, sertlik ve yorulma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen verilerin yanı sıra, temassız uzama sistemleri, makro incelemeler, optik mikroskopi ve SEM analizleri kullanılarak numunelerin davranışları yorumlanmıştır. Yapılan tüm bu incelemeler hem TiAl6V4 alaşımından ince levhaların hem de mikroplazma ark kaynağının tekrarlı yüklemeler altındaki yorulma davranışının değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Elde edilen deney verileri ve yapılan değerlendirmeler ağırlıklı olarak TiAl6V4 alaşımından kaynaklı numunelerin gevrek davranışına işaret etmektedir. Kaynak dikişinin iki yönden gaz ile atmosferik etkilerden korunması sebebiyle, bu malzeme davranışının büyük oranda kaynak ısısı ve ince levhaların soğuma hızı sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Her ne kadar mikroplazma ark kaynağı dar plazma arkı çapı ile yüksek ısı yoğunluğu sayesinde ITAB'ın sınırlarını göreceli olarak daraltsa da ısının kaynak malzemesinin iç yapısı üzerindeki etkisini tamamen ortadan kaldıramamaktadır. Ancak dikkat çekici olan bir detay, elde edilen çekme deney verilerindeki kaynaksız ve kaynaklı numuneler arasındaki benzerliktir. Bu benzerliğe dayanılarak, mikroplazma ark kaynağının ince TiAl6V4 levhaların kaynağında kullanılabileceği gösterilmiştir. Yine de malzemenin kaynak sonrası daha gevrek bir şekilde kopması dikkate değer bir gözlemdir. Bununla birlikte malzemelerin yorulma testleri sırasında gösterdiği ölçüm zorlukları ve ani kopmalar da önemli bir tespittir. Sert bir alaşım olan TiAl6V4 levhaların ince oluşu kaynak işlemini zorlaştırmakta ve oluşabilecek kaynak hatalarının gözle tespiti her zaman mümkün olmamaktadır. Kaynak sonrası daha da gevrekleşen malzemenin yorulma davranışı da çekme deneylerinde yapılan çıkarımları destekler niteliktedir.

Bir diğer önemli detay ise, bindirme kaynaklı numunelerin diğer numunelere kıyasla yorulma performansındaki bariz düşüştür. Çekme deney verilerine göre az bir farkla da olsa en yüksek çekme dayanımını gösteren bindirme kaynaklı numunelerin

yorulma ömürlerindeki büyük düşüş mikrop plazma ark kaynağının bu kaynak geometrisindeki kullanımının tekrarlı yüklemelerin olduğu çalışma koşulları için uygun olmadığını göstermiştir. Ancak alın kaynaklı numuneler kaynaklı numunelere benzer yorulma davranışı gösterdiğinden, bu kaynak yönteminin yorulmaya karşı efektif tasarımlarda kullanımı halen mümkündür. Yapılan mikroyapısal incelemelerden gözlemlenebileceği gibi kaynak işleminin sebep olduğu malzeme iç yapısındaki köklü değişim numunelerin yorulma performanslarındaki düşüş üzerindeki en büyük etkidir.

Bu ince levhaların yorulma davranışlarını olumsuz etkilediği düşünülen bir diğer etken ise levhaların kalınlığıdır. Kalınlıkları zaten az olan numuneler ilerleyen yorulma çatlakları ile hızla kesit alanı kaybettiklerinden daha kalın numunelere kıyasla daha düşük yorulma performansı sergileyecekleri düşünülmektedir. Bu durumu daha detaylı açıklamak için yorulma üzerinde “boyut etkisi” konusunun araştırılması gerekmektedir. Dolayısıyla bu çıkarımın bir tahmin olduğu ve boyut etkisinin bu numuneler üzerindeki etkisinin gelecek araştırmalarda kesin olarak ortaya konabileceği belirtilmelidir.

Tüm bu çıkarımlara dayanarak TiAl6V4 alaşımından ince levhaların kaynaklı birleştirmelerinin kaynak kalitesinin iyileştirilmesinde uygun kaynak yöntemi seçiminin tek başına yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Düşük çevrim sayılı yorulmaya maruz kalan çalışma koşullarında kaynaklı mühendislik uygulamalarında TiAl6V4 alaşımının ince levhalarının bindirme kaynağından kaçınılması önerilmektedir. Ayrıca TiAl6V4 alaşımından kaynaklı ince levhaların yorulma performanslarının ısı işlemleri ile mikroyapılarının düzenlenmesi sayesinde artırılabilirliği düşünülmektedir.



## 6. KAYNAKLAR

“AERO - Boeing 787 from the Ground Up.” 2018. Accessed May 30, 2022. [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/article\\_04\\_2.html](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html).

Ahola, A., A. Muikku, M. Braun, and T. Björk. 2021. “Fatigue strength assessment of ground fillet-welded joints using 4R method.” *International journal of fatigue*, 142: 105916. Elsevier.

Alencar, G., A. de Jesus, J. G. S. da Silva, and R. Calcada. 2019. “Fatigue cracking of welded railway bridges: A review.” *Engineering Failure Analysis*, 104: 154–176. Elsevier.

Alioua, A., B. Bouchouicha, M. Zemri, and A. Imad. 2018. “Effect of Filler Metal Mechanical Properties on Fatigue Behaviour Welded Joints.” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71 (4): 977–984. Springer.

Amiri, N., G. H. Farrahi, K. R. Kashyzadeh, and M. Chizari. 2020. “Applications of ultrasonic testing and machine learning methods to predict the static & fatigue behavior of spot-welded joints.” *Journal of Manufacturing Processes*, 52: 26–34. Elsevier.

Auwal, S. T., S. Ramesh, F. Yusof, and S. M. Manladan. 2018. “A review on laser beam welding of titanium alloys.” *The international Journal of advanced manufacturing technology*, 97 (1): 1071–1098. Springer.

Balasubramanian, T. S., V. Balasubramanian, and M. M. Manickam. 2011. “Fatigue crack growth behaviour of gas tungsten arc, electron beam and laser beam welded Ti–6Al–4V alloy.” *Materials & Design*, 32 (8–9): 4509–4520. Elsevier.

Baruah, M., and S. Bag. 2016. “Influence of heat input in microwelding of titanium alloy by micro plasma arc.” *Journal of Materials Processing Technology*, 231: 100–112. Elsevier.

Baumgartner, J. 2017. “Review and considerations on the fatigue assessment of welded joints using reference radii.” *International Journal of Fatigue*, 101: 459–468. Elsevier.

Braun, M., A.-S. Milaković, F. Renken, W. Fricke, and S. Ehlers. 2020. “Application of local approaches to the assessment of fatigue test results obtained for welded joints at sub-zero temperatures.” *International Journal of Fatigue*, 138: 105672. Elsevier.

- Brunette, D. M., P. Tengvall, M. Textor, and P. Thomsen. 2001. *Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications*. Springer.
- Carrion, P. E., N. Shamsaei, S. R. Daniewicz, and R. D. Moser. 2017. "Fatigue behavior of Ti-6Al-4V ELI including mean stress effects." *International Journal of Fatigue*, 99: 87–100. Elsevier.
- Carvalho, S. M., C. A. R. P. Baptista, and M. S. F. Lima. 2016. "Fatigue in laser welded titanium tubes intended for use in aircraft pneumatic systems." *International Journal of Fatigue*, 90: 47–56. Elsevier.
- Casavola, C., C. Pappalettere, and G. Pluvinage. 2011. "Fatigue resistance of titanium laser and hybrid welded joints." *Materials & Design*, 32 (5): 3127–3135. Elsevier.
- Casavola, C., C. Pappalettere, and F. Tattoli. 2009. "Experimental and numerical study of static and fatigue properties of titanium alloy welded joints." *Mechanics of Materials*, 41 (3): 231–243. Elsevier.
- Chattopadhyay, A., G. Glinka, M. El-Zein, J. Qian, and R. Formas. 2011. "Stress analysis and fatigue of welded structures." *Welding in the World*, 55 (7): 2–21. Springer.
- Coffin Jr, L. F. 1954. "A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal." *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, New York, 76: 931–950.
- Da Silva, A. L., J. A. Correia, A. M. De Jesus, G. Lesiuk, A. A. Fernandes, R. Calçada, and F. Berto. 2019. "Influence of fillet end geometry on fatigue behaviour of welded joints." *International Journal of Fatigue*, 123: 196–212. Elsevier.
- Donachie, M. J. 2000. *Titanium: a technical guide*. ASM international.
- Dong, P. 2001. "A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints." *International Journal of Fatigue*, 23 (10): 865–876. Elsevier.
- Dutta, B., and F. H. Froes. 2016. "Additive Manufacturing of Titanium Alloys: State of the Art." *Challenges and Opportunities*.
- Edwards, P., M. Petersen, M. Ramulu, and R. Boyer. 2010. "Mechanical Performance of Heat Treated Ti6Al4V Friction Stir Welds." *Key Engineering Materials - KEY ENG MAT*, 436: 213–221. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.436.213>.

- Eibl, M., and C. M. Sonsino. 2001. "Stand der Technik zur Schwingfestigkeitsberechnung von laserstrahl-geschweißten Dünnscheiben aus Stahl." U: DVM-Bericht br, 668.
- Eibl, M., C. M. Sonsino, H. Kaufmann, and G. Zhang. 2003. "Fatigue assessment of laser welded thin sheet aluminium." *International Journal of Fatigue*, 25 (8): 719–731. Elsevier.
- Ezugwu, E. O., and Z. M. Wang. 1997. "Titanium alloys and their machinability—a review." *Journal of materials processing technology*, 68 (3): 262–274. Elsevier.
- Fischer, C., W. Fricke, and C. M. Rizzo. 2016. "Review of the fatigue strength of welded joints based on the notch stress intensity factor and SED approaches." *International Journal of Fatigue*, 84: 59–66. Elsevier.
- Foti, P., and F. Berto. 2020. "Fatigue assessment of high strength welded joints through the strain energy density method." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43 (11): 2694–2702. Wiley Online Library.
- Fricke, W. 2003. "Fatigue analysis of welded joints: state of development." *Marine structures*, 16 (3): 185–200. Elsevier.
- Fricke, W. 2006. "Weld root fatigue assessment of fillet-welded structures based on structural stresses." *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 505–512.
- Fricke, W., and O. Doerk. 2006. "Simplified approach to fatigue strength assessment of fillet-welded attachment ends." *International Journal of Fatigue*, 28 (2): 141–150. Elsevier.
- Froes, Fh. 2015. *Titanium: physical metallurgy, processing, and applications*. ASM international.
- Gallo, P., F. Berto, and P. Lazzarin. 2015. "High temperature fatigue tests of notched specimens made of titanium Grade 2." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 76: 27–34. Elsevier.
- Gangwar, K., and M. Ramulu. 2018. "Friction stir welding of titanium alloys: A review." *Materials & Design*, 141: 230–255. Elsevier.
- Gorman, E. F. 1969. "New developments and applications in manual plasma arc welding." *Welding Journal*, 48 (7): 547. AMER WELDING SOC PO BOX 351040, MIAMI, FL 33135.

Greitemeier, D., F. Palm, F. Syassen, and T. Melz. 2017. "Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting." *International Journal of Fatigue*, 94: 211–217. Elsevier.

Haagensen, P. J., and S. J. Maddox. 2013. "IIW recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints: IIW-2142-110." Woodhead publishing.

Hobbacher, A. 2016. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. Springer.

Hosford, W. F., and R. M. Caddell. 2011. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge university press.

Inagaki, I., T. Takechi, Y. Shirai, and N. Ariyasu. 2014. "Application and features of titanium for the aerospace industry." *Nippon steel & sumitomo metal technical report*, 106 (106): 22–27.

Iwata, T., and K. Matsuoka. 2004. "Fatigue strength of CP grade 2 titanium fillet welded joint for ship structure." *Welding in the World*, 48 (7): 40–47. Springer.

Kang, G., and H. Luo. 2020. "Review on fatigue life prediction models of welded joint." *Acta Mechanica Sinica*, 36 (3): 701–726. Springer.

Karakaş, Ö. 2006. "Biçimlenebilen magnezyum alaşımlarından kaynaklı yapı elemanlarının yorulma dayanımı değerlendirmelerinde çentik gerilmesi yönteminin uygulanması." Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karakaş, Ö. 2013. "Consideration of mean-stress effects on fatigue life of welded magnesium joints by the application of the Smith–Watson–Topper and reference radius concepts." *International journal of fatigue*, 49: 1–17. Elsevier.

Karakaş, Ö. 2017. "Application of Neuber's effective stress method for the evaluation of the fatigue behaviour of magnesium welds." *International Journal of Fatigue*, 101: 115–126. Elsevier.

Karakaş, Ö., and A. Gülsöz. 2007. "Kaynaklı Birleştirmelerin Statik ve Yorulma Dayanımına Etki Eden Faktörler." *Makine ve Mühendis*, 48 (573).

Karakaş, Ö., A. Gülsöz, and C. M. Sonsino. 2009. "KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN YORULMA DAYANIMI DEĞERLENDİRMELERİNDE YAPISAL ZORLAMA YÖNTEMİ." *Engineer & the Machinery Magazine*, (597).

Karakaş, Ö., C. Morgenstern, and C. M. Sonsino. 2008. "Fatigue design of welded joints from the wrought magnesium alloy AZ31 by the local stress

concept with the fictitious notch radii of  $r_f = 1.0$  and  $0.05$  mm.” *International Journal of Fatigue*, 30 (12): 2210–2219. Elsevier.

Karakas, Ö., C. Morgenstern, C. M. Sonsino, H. Hanselka, M. Vogt, and K. Dilger. 2007. “Grundlagen für die praktische Anwendung des Kerbspannungskonzeptes zur Schwingfestigkeitsbewertung von geschweißten Bauteilen aus Magnesiumknetlegierungen, Fraunhofer-Institute for Structural Durability and System Reliability (LBF), Darmstadt, Report No. FB-232; 2007.” Institute for Welding (ifs), Braunschweig, Report, (17).

Karakaş, Ö., C. Morgenstern, C. M. Sonsino, M. Vogt, K. Dilger, and A. Gülsöz. 2007. “Biçimlenebilen Magnezyum Alaşımlardan Kaynaklı Birleştirmelerin Yorulma Dayanımı Değerlendirmelerinde Mikro-destek Etkisi Konseptinin Uygulanması.” 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı.

Karakaş, Ö., G. Zhang, and C. M. Sonsino. 2018. “Critical distance approach for the fatigue strength assessment of magnesium welded joints in contrast to Neuber’s effective stress method.” *International Journal of Fatigue*, 112: 21–35. Elsevier.

Karimzadeh, F., M. Salehi, A. Saatchi, and M. Meratian. 2005. “Effect of microplasma arc welding process parameters on grain growth and porosity distribution of thin sheet Ti6Al4V alloy weldment.” *Materials and Manufacturing Processes*, 20 (2): 205–219. Taylor & Francis.

Kikuchi, S., H. Kubozono, Y. Nukui, Y. Nakai, A. Ueno, M. O. Kawabata, and K. Ameyama. 2018. “Statistical fatigue properties and small fatigue crack propagation in bimodal harmonic structured Ti-6Al-4V alloy under four-point bending.” *Materials Science and Engineering: A*, 711: 29–36. Elsevier.

Kim, K. T., M. Y. Eo, T. T. H. Nguyen, and S. M. Kim. 2019. “General review of titanium toxicity.” *International journal of implant dentistry*, 5 (1): 1–12. SpringerOpen.

Lancea, C., S. M. Zaharia, M. A. Pop, and G. R. Buican. 2021. “The heat treatment influence on microstructure and mechanical properties of TiAl6V4 parts manufactured by SLM.” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 1009 (1): 012029. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1009/1/012029>.

Lautenschlager, E. P., and P. Monaghan. 1993. “Titanium and titanium alloys as dental materials.” *International dental journal*, 43 (3): 245–253.

Lazzarin, P., F. Berto, M. Zappalorto, and G. Meneghetti. 2009. “Practical application of the N-SIF approach in fatigue strength assessment of welded joints.” *Welding in the World*, 53 (3): R76–R89. Springer.

- Lazzarin, P., T. Lassen, and P. Livieri. 2003. "A notch stress intensity approach applied to fatigue life predictions of welded joints with different local toe geometry." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26 (1): 49–58. Wiley Online Library.
- Leyens, C., and M. Peters. 2003. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Li, F., J. Li, T. Huang, H. Kou, and L. Zhou. 2017. "Compression fatigue behavior and failure mechanism of porous titanium for biomedical applications." *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 65: 814–823. Elsevier.
- Li, Y., C. Yang, H. Zhao, S. Qu, X. Li, and Y. Li. 2014. "New developments of Ti-based alloys for biomedical applications." *Materials*, 7 (3): 1709–1800. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Liu, H. J., L. Zhou, and Q. W. Liu. 2010. "Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti–6Al–4V titanium alloy." *Materials & Design*, 31 (3): 1650–1655. Elsevier.
- Liu, X., P. K. Chu, and C. Ding. 2004. "Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications." *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 47 (3–4): 49–121. Elsevier.
- Livieri, P., and P. Lazzarin. 2005. "Fatigue strength of steel and aluminium welded joints based on generalised stress intensity factors and local strain energy values." *International Journal of Fracture*, 133 (3): 247–276. Springer.
- Louks, R., and L. Susmel. 2015. "The linear-elastic theory of critical distances to estimate high-cycle fatigue strength of notched metallic materials at elevated temperatures." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38 (6): 629–640. Wiley Online Library.
- Lucas, W. 1990. *TIG and plasma welding: process techniques, recommended practices and applications*. Woodhead Publishing.
- Luo, P., Q. Zhang, Y. Bao, and A. Zhou. 2018. "Fatigue evaluation of rib-to-deck welded joint using averaged strain energy density method." *Engineering Structures*, 177: 682–694. Elsevier.
- Ma, M., R. Lai, J. Qin, B. Wang, H. Liu, and D. Yi. 2021. "Effect of weld reinforcement on tensile and fatigue properties of 5083 aluminum metal inert gas (MIG) welded joint: Experiments and numerical simulations." *International Journal of Fatigue*, 144: 106046. Elsevier.
- Macdonald, K. 2011. *Fracture and fatigue of welded joints and structures*. Elsevier.

- Maddox, S. J. 2003. "Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures." *International Journal of Fatigue*, 25 (12): 1359–1378. Elsevier.
- Manson, S. S. 1953. Behavior of materials under conditions of thermal stress. National Advisory Committee for Aeronautics.
- Markowska-Szczupak, A., M. Endo-Kimura, O. Paszkiewicz, and E. Kowalska. 2020. "Are titania photocatalysts and titanium implants safe? Review on the toxicity of titanium compounds." *Nanomaterials*, 10 (10): 2065. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Mathisen, M. B., L. Eriksen, Y. U. Yingda, O. Jensrud, and J. Hjelen. 2014. "Characterization of microstructure and strain response in Ti–6Al–4V plasma welding deposited material by combined EBSD and in-situ tensile test." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24 (12): 3929–3943. Elsevier.
- Meneghetti, G., and A. Campagnolo. 2020. "State-of-the-art review of peak stress method for fatigue strength assessment of welded joints." *International Journal of Fatigue*, 139: 105705. Elsevier.
- Mohandas, T., V. K. Varma, D. Banerjee, and V. V. Kutumbarao. 1996. "Low cycle fatigue behavior of electron beam and friction welded joints of an  $\alpha$ - $\beta$  titanium alloy." *Scripta materialia*, 35 (2).
- Morgenstern, C., C. M. Sonsino, A. Hobbacher, and F. Sorbo. 2006. "Fatigue design of aluminium welded joints by the local stress concept with the fictitious notch radius of  $r_f = 1$  mm." *International journal of fatigue*, 28 (8): 881–890. Elsevier.
- Neuber, H. 1946. Theory of notch stresses: Principles for exact stress calculation. JW Edwards.
- Neuber, H. 1968. "Über die Berücksichtigung der spannungskonzentration bei festigkeitsberechnungen." *Konstruktion*, 20 (7): 245–251.
- Neuber, H. 2013. Kerbspannungslehre Grundlagen Für Genaue Festigkeitsberechnung Mit Berücksichtigung Von Konstruktionsform und Werkstoff. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg.
- Niemi, E., W. Fricke, and S. J. Maddox. 2006. Fatigue analysis of welded components: Designer's guide to the structural hot-spot stress approach. Woodhead Publishing.
- Ordoñez, J. H., R. R. Ambriz, C. García, G. Plascencia, and D. Jaramillo. 2019. "Overloading effect on the fatigue strength in resistance spot welding

- joints of a DP980 steel.” *International Journal of Fatigue*, 121: 163–171. Elsevier.
- Paris, P. C., and F. Erdogan. 1963. “A critical analysis of crack propagation laws.”
- Pedersen, M. M. 2019. “Thickness effect in fatigue of welded butt joints: a review of experimental works.” *International Journal of Steel Structures*, 19 (6): 1930–1938. Springer.
- Peterson, R. E. 1950. “Relation between stress analysis and fatigue of metals.” *Proc. SESA*, 11 (2): 199–206.
- Peterson, R. E. 1953. “Stress Concentration Design Factors, Johy Willy & Sons.” Inc., New York.
- Peterson, R. E. 1959. “Notch sensitivity.” *Metal fatigue*, 293–306. McGraw Hill.
- Prasad, K. S., C. S. Rao, and D. N. Rao. 2011. “A study on weld quality characteristics of pulsed current micro plasma arc welding of SS304L sheets.” *International Transaction Journal of Engineering, Management & Applied Sciences & Technologies*, 2 (4): 437–446.
- Radaj, D. 1990. *Design and analysis of fatigue resistant welded structures*. Woodhead Publishing.
- Radaj, D., and P. Lazzarin. 2005. “Notch stress intensity approach—fundamentals and application to welded joints.” Univ of Padua, Faculty of Engineering (plazzarin@ gest. unipd. it). Report, 1.
- Radaj, D., C. M. Sonsino, and W. Fricke. 2006. *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Woodhead publishing.
- Radaj, D., C. M. Sonsino, and W. Fricke. 2009. “Recent developments in local concepts of fatigue assessment of welded joints.” *International Journal of Fatigue*, 31 (1): 2–11. Elsevier.
- Radaj, D., and M. Vormwald. 2013. *Advanced methods of fatigue assessment*. Springer.
- Rahul, R., K. V. Rajulapati, G. M. Reddy, T. Mohandas, and K. B. S. Rao. 2018. “Effect of Post Weld Heat Treatments on the Elevated Temperature Mechanical Properties of Ti6Al4V Friction Welds.” <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03363>.
- Ramberg, W., and W. R. Osgood. 1943. *Description of stress-strain curves by three parameters*.



- Roggensack, M., M. H. Walter, and K. W. Böning. 1993. "Studies on laser- and plasma-welded titanium." *Dental Materials*, 9 (2): 104–107. Elsevier.
- Rozumek, D., J. Lewandowski, G. Lesiuk, and J. A. Correia. 2020. "The influence of heat treatment on the behavior of fatigue crack growth in welded joints made of S355 under bending loading." *International Journal of Fatigue*, 131: 105328. Elsevier.
- Sága, M., M. Blatnická, M. Blatnický, J. Dižo, and J. Gerlici. 2020. "Research of the fatigue life of welded joints of high strength steel S960 QL created using laser and electron beams." *Materials*, 13 (11): 2539. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Sai, M. S., V. Dhinakaran, K. M. Kumar, V. Rajkumar, B. Stalin, and T. Sathish. 2020. "A systematic review of effect of different welding process on mechanical properties of grade 5 titanium alloy." *Materials Today: Proceedings*, 21: 948–953. Elsevier.
- Savaidis, G., and M. Vormwald. 2000. "Hot-spot stress evaluation of fatigue in welded structural connections supported by finite element analysis." *International journal of fatigue*, 22 (2): 85–91. Elsevier.
- Schijve, J. 2009. "Fatigue damage in aircraft structures, not wanted, but tolerated?" *International Journal of Fatigue*, 31 (6): 998–1011. Elsevier.
- Schlemmer, J., M. Bacher-Höchst, and C. M. Sonsino. 2003. "Schwingfeste Auslegung von dünnwandigen Laserstrahlschweißverbindungen für Einspritzsysteme." *DVM-Bericht*, 802: 25–36.
- Seyda, V., N. Kaufmann, and C. Emmelmann. 2012. "Investigation of Aging Processes of Ti-6Al-4 V Powder Material in Laser Melting." *Physics Procedia, Laser Assisted Net shape Engineering 7 (LANE 2012)*, 39: 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.057>.
- Sonsino, C. M. 1993. "Zur Bewertung des Schwingfestigkeitsverhaltens von Bauteilen mit Hilfe örtlicher Beanspruchungen." *Konstruktion* (1981), 45 (1): 25–33.
- Sonsino, C. M. 1994. "Über den Einfluss von Eigenspannungen, Nahtgeometrie und mehrachsigen Spannungszuständen auf die Betriebsfestigkeit geschweißter Konstruktionen aus Baustählen." *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 25 (3): 97–109. Wiley Online Library.
- Sonsino, C. M., W. Fricke, F. De Bruyne, A. Hoppe, A. Ahmadi, and G. Zhang. 2012. "Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded

joints–Background and applications.” *International Journal of Fatigue*, 34 (1): 2–16. Elsevier.

Srivatsan, T. S., U. Bathini, A. Patnaik, and T. Quick. 2010. “A study of cyclic fatigue, damage initiation, damage propagation, and fracture of welded titanium alloy plate.” *Materials Science and Engineering: A*, 527 (24–25): 6649–6659. Elsevier.

Taylor, D. 2008. “The theory of critical distances.” *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (7): 1696–1705. Elsevier.

Taylor, D., TotalBoox, and TBX. 2010. *The Theory of Critical Distances*. Elsevier Science.

Tsay, L. W., and C. Y. Tsay. 1997. “The effect of microstructures on the fatigue crack growth in Ti–6Al–4V laser welds.” *International Journal of Fatigue*, 19 (10): 713–720. Elsevier.

Tseng, K. H., S. T. Hsieh, and C. C. Tseng. 2003. “Effect of process parameters of micro-plasma arc welding on morphology and quality in stainless steel edge joint welds.” *Science and technology of welding and joining*, 8 (6): 423–430. Taylor & Francis.

Tsutsumi, S., R. Fincato, P. Luo, M. Sano, T. Umeda, T. Kinoshita, and T. Tagawa. 2022. “Effects of weld geometry and HAZ property on low-cycle fatigue behavior of welded joint.” *International Journal of Fatigue*, 156: 106683. Elsevier.

Vaidya, W. V., M. Horstmann, V. Ventzke, B. Petrovski, M. Koçak, R. Kocik, and G. Tempus. 2009a. “Structure-property investigations on a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications Part I: Local gradients in microstructure, hardness and strength.” *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe*, 40 (8): 623–633. Wiley Online Library.

Vaidya, W. V., M. Horstmann, V. Ventzke, B. Petrovski, M. Koçak, R. Kocik, and G. Tempus. 2009b. “Structure-property investigations on a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications. Part II: Resistance to fatigue crack propagation and fracture.” *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 40 (10): 769–779. Wiley Online Library.

Veiga, C., J. P. Davim, and A. J. R. Loureiro. 2012. “Properties and applications of titanium alloys: a brief review.” *Rev. Adv. Mater. Sci*, 32 (2): 133–148.

- Walker, K. F., Q. Liu, and M. Brandt. 2017. "Evaluation of fatigue crack propagation behaviour in Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting." *International Journal of Fatigue*, 104: 302–308. Elsevier.
- Wang, F. X., J. P. He, J. Q. Fang, F. Xiang, and L. L. Ren. 2012. "Study of titanium foil welding using micro-plasma arc welding." *Advanced Materials Research*, 1469–1472. Trans Tech Publ.
- Wang, S.-H., and M. D. Wei. 2004. "Tensile properties of gas tungsten arc weldments in commercially pure titanium, Ti-6Al-4V and Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr alloys at different strain rates." *Science and technology of welding and joining*, 9 (5): 415–422. Taylor & Francis.
- Wang, W., D. Wang, C. Li, G. Yang, Y. Ren, and L. Qin. 2020. "Effect of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V jointing parts proceeded by laser additive manufacturing." *Materials Science and Engineering: A*, 788: 139544. Elsevier.
- Wang, Y., J. Liu, J. Hu, Y. Garbatov, and C. G. Soares. 2021. "Fatigue strength of EH36 steel welded joints and base material at low-temperature." *International Journal of Fatigue*, 142: 105896. Elsevier.
- Wild, G., L. Pollock, A. K. Abdelwahab, and J. Murray. 2021. "The Need for Aerospace Structural Health Monitoring: A review of aircraft fatigue accidents." *International Journal of Prognostics and Health Management*, 12 (3).
- Wiskott, H. A., T. Doumas, S. S. Scherrer, C. Susz, and U. C. Belser. 2001. "Microstructures of brazings and welds using grade 2 commercially pure titanium." *International Journal of Prosthodontics*, 14 (1): 40–47. QUINTESSENCE PUBLISHING CO LTD.
- Zang, G., M. Eibl, S. Singh, O. Hahn, and J. R. Kurzok. 2002. "Methods of predicting the fatigue lives of laser beam welded lap welds subjected to shear stresses." *Welding Research Abroad*, 48 (10): 11–18.
- Zhang, G., and C. M. Sonsino. 2005. "Ein Kerbspannungskonzept für die schwingfeste Bemessung von rissähnlichen Schweißnähten aus Aluminiumlegierungen [A notch stress concept for the fatigue design of aluminium welds with high stress concentration]." *DVM-Report No. 132*, 90: 61–72.