



Effects of different laser welding parameters on the microstructural and mechanical properties of an advanced dual phase steel grade

Almila Gülfem Özgültekin^{1*}, Tanya Başer², Orkun Tekelioğlu², Emin Tamer¹, Beyzanur Aydın¹, Büşra Alpay¹

¹Borçelik Çelik San. Tic. A.Ş., Gemlik- Bursa, 16601, Türkiye

²Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş., Nilüfer- Bursa, 16140, Türkiye

Highlights:

- Estimation of optimum parameters in laser welding process of dual phase steels
- Mechanical performance evaluation of laser welded dual phase steel sheets
- Microstructural examination of weld zone, heat affected zone and base metal in an advanced dual phase steel grade

Keywords:

- Laser welding
- Dual phase steels
- Mechanical properties
- Microstructural properties

Graphical Abstract

In this study, different laser welding parameters were employed on an advanced dual phase steel grade, which is mainly used by the automotive industry and a customized version of DP800 steel grade.

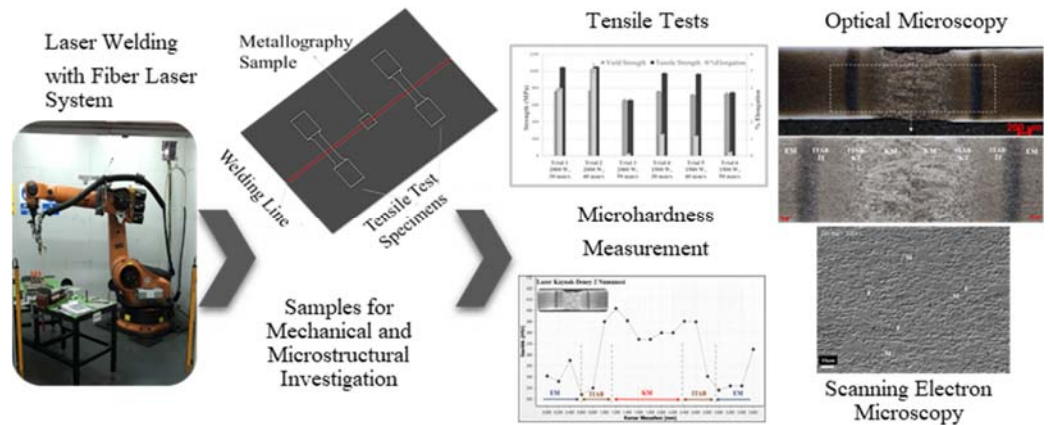


Figure A. Summary of the workflow carried out in this study

Article Info:

Research Article
Received: 25.12.2020
Accepted: 20.06.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.846628

Acknowledgement:

Special thanks to Okan Poyraz, Refiye Ardali, Ali Suluköy, Tayyar Aydın, Sıtkı Oral (Borçelik R&D) and R. Özlütürk (Coşkunöz R&D) for their support.

Correspondence:

Author: Almila Gülfem Özgültekin
e-mail: gozgultekin@borusan.com
phone: +90 224 280 4000

Purpose: Effects of different laser welding parameters on microstructure and mechanical properties were investigated in order to observe the suitable welding parameter ranges for an advanced dual phase steel grade.

Theory and Methods:

Sheets of dual phase steel were welded with butt-joint using a 3kW fiber laser welding system. Tensile tests, microhardness measurements and microstructural investigation via optical and scanning electron microscopy were performed to examine the weld metal, heat affected zone and base metal.

Results:

Two laser welding trials resulted in weldments with full weld penetration and higher mechanical performance than the base metal. In other trials, in strong correlation with mechanical test results and microstructural examination findings, it is observed that the amount and fine grain structure of hard phases trigger the brittle fracture.

Conclusion:

All results are correlated with laser welding process parameters and parameter range towards optimum process is observed. It is also confirmed that laser power and laser weld speed are critical parameters which directly affect welded sheet product performance and should be determined correctly to obtain good quality welding. Laser welding in narrower process parameter ranges and investigation of the material performance under dynamic loading conditions might be suggested as future extensions of this study.



Farklı lazer kaynak parametrelerinin ileri nesil dual fazlı bir çeliğin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri

Almila Gülfem Özgültekin^{1*}, Tanya Başer², Orkun Tekelioğlu², Emin Tamer¹, Beyzanur Aydın¹, Büşra Alpay¹

¹Borçelik Çelik San. Tic. A.Ş., Ata Mah., 125 Sokak, No:1, 16601, Gemlik- Bursa, Türkiye

²Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş., Fethiye OSB Mah., Sarı Cad., No:1, 16140, Nilüfer, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çift fazlı çeliklerin lazer kaynak prosesinde uygun parametrelerin öngörülmesi
- Lazer kaynak uygulanmış çift fazlı çelik saclarda mekanik performansın değerlendirilmesi
- İleri nesil çift fazlı çelikte kaynak bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge ve esas metal mikroyapısının incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 25.12.2020
Kabul: 20.06.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.846628

Anahtar Kelimeler:

Lazer kaynak,
çift fazlı çelikler,
mekanik özellikler,
mikroyapısal özellikler

ÖZ

Lazer kaynak prosesinde uygulanan parametrelerin kaynaklanmış yassı çelik ürün performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi önemlidir. Bu çalışmada, ağırlıklı olarak otomotiv sektörü tarafından kullanılan ve ülkemizde talebi ithalat ile karşılanmakta olan ileri nesil çift fazlı bir çelik kalitesine farklı lazer kaynak parametreleri uygulanmıştır. 3 kW'lık bir fiber lazer sistemi kullanılarak yassı çelik levhalar alın kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Bu çelik kalitesi için uygun olabilecek kaynak parametre aralıklarının gözlemlenmesi amacıyla, farklı lazer kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çekme testleri, mikrosertlik ölçümleri ve metalografik çalışmalar gerçekleştirilerek kaynak bölgeleri, ısı tesiri altındaki bölgeler ve esas metal incelenmiştir. Lazer kaynak denemelerinin ikisinde tam kaynak nüfuziyetinin ve esas metalden yüksek akma ve çekme mukavemetinin sağlandığı levha çiftleri üretilebilmiştir. Diğer deneylerde, mikroyapısal inceleme bulguları mekanik performans sonuçlarını güçlü destekler biçimde, sert faz miktarı ve iç yapıda tane inceliğinin gevrek kırılma olgusunu tetiklediği görülmüştür. Sonuçlar lazer kaynak proses parametreleri ile ilişkilendirilmiş, optimum prosese yönelik parametre aralığı izlenmiştir. Bununla birlikte, lazer gücü ve lazer ilerleme hızının ve böylece toplam ısı girdisinin iyi kalite kaynak eldesi için optimize edilmesi gereken kritik parametreler olduğu doğrulanmıştır.

Effects of different laser welding parameters on the microstructural and mechanical properties of an advanced dual phase steel grade

H I G H L I G H T S

- Estimation of optimum parameters in laser welding process of dual phase steels
- Mechanical performance evaluation of laser welded dual phase steel sheets
- Microstructural examination of weld zone, heat affected zone and base metal in an advanced dual phase steel grade

Article Info

Research Article
Received: 25.12.2020
Accepted: 20.06.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.846628

Keywords:

Laser welding,
dual phase steels,
mechanical properties,
microstructural properties

ABSTRACT

It is crucial to determine the effects of laser welding process parameters on welded flat steel product performance. In this study, different laser welding parameters were employed on an advanced dual phase steel grade, which is mainly used by automotive industry and of which the demand is covered by import in Turkey. Sheets of this steel grade were welded with butt-joint using a 3kW fiber laser welding system. To observe the suitable welding parameter ranges for this steel grade, effects of different laser welding parameters on microstructure and mechanical properties were investigated. Tensile tests, microhardness measurements and metallographic studies were conducted to examine the weld joint, heat affected zone and base metal. Two laser welding trials resulted in weldments with full weld penetration and higher yield strength and tensile strength values compared to base metal. In other trials, in strong correlation with mechanical performance findings, it is observed that amount of hard phases and fine grain structure trigger the brittle fracture. All results are correlated with laser welding process parameters and ranges towards optimum process parameters are observed. In addition to that, it is confirmed that laser power and welding speed and thus the total heat input are critical parameters which should be optimized to obtain good quality welding.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, karbondioksit emisyonunu azaltmak için çevre politikalarının değiştirilmesi hakkında pek çok çalışma yapılmaktadır. Ulaşım ve otomotiv endüstrilerinin yüksek orandaki fosil yakıt tüketimleri düşünüldüğünde, bu endüstrilerin yeni düzenlemelerden büyük ölçüde etkileneceği öngörülmektedir. Araç ağırlıkları ile fosil yakıt tüketimi doğru orantılı olduğundan, son dönemlerde daha az fosil yakıt tüketimiyle benzer veya daha iyi bir performans sağlanarak araç ağırlıklarının düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla, modern araç gövdelerinde düşük kalınlıklarda kullanımı mümkün olan gelişmiş yüksek mukavemetli çelik saclar kullanılmakta ve araç ağırlığı önemli ölçüde azaltılmaktadır [1]. Gelişmiş yüksek mukavemetli çelik sınıfında olan çift fazlı çelikler; yüksek mukavemet-süneklik kombinasyonları ve dolayısı ile kolay şekillenebilirlik özellikleriyle, otomotiv endüstrisindeki yapısal tasarıma mükemmel şekilde uyum sağlamaktadırlar [2]. Bu çeliklerin otomotiv parça birleştirme süreçlerine entegrasyonunun başarılı biçimde gerçekleşmesi için kaynak etkenlerinin ve davranışının anlaşılması gerekmektedir [3].

Geleneksel süreçlere kıyasla lazer kaynak sistemleri avantajlı olduğundan, otomotiv endüstrisinde lazer kaynak kullanımı yaygınlaşmaktadır. Örneğin, yassı çelikten imal edilen otomotiv parçalarında yaygın kullanımı olan punta kaynağa [4] kıyasla lazer kaynakta ısı tesiri altındaki bölge daha küçüktür. Enerji verimliliği daha yüksektir, proses daha hızlıdır ve otomasyona daha elverişlidir [5-7]. Lazer kaynak birçok parametreye bağlı olduğundan kaynağın parametrelerden nasıl etkilendiğinin ve lazer kaynak parametrelerinin nihai ürün performansını nasıl etkilediğinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Lazer tipi, lazer gücü ve lazer hızı öncelikli olmakla birlikte; atış süresi, atış sıklığı, bindirme, lazer ışın çapı, odak mesafesi ve ısı girdisi lazer kaynak uygulama metodolojisi oluşturmak üzere belirlenen parametreler arasındadır [8].

2. DENEY PROSEDÜRÜ (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Bu çalışmada, lazer kaynak prosesinde farklı güç ve hız parametreleri uygulanarak mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerin incelenmesi ve uygun kaynak parametre aralıklarının gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Kaynaklanmış levhalardan alınan numuneler çekme test ve mikrosertlik ölçüm sonuçları ile değerlendirilmiştir. Ek olarak, kaynak metali (KM), ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve esas metal (EM) mikroyapı incelemeleri için optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

2.1. Malzeme (Material)

Lazer kaynak uygulamalarında kullanılan ileri nesil çift fazlı çelik sac kalitesine ait kimyasal bileşim aralığı Tablo 1'de sunulmuştur. Bu çelik DP800 kalite kimyasal bileşim sınırları içerisinde olmakla beraber, bu malzemenin kullanılacağı otomotiv parça üretim sürecine ve uygulama alanı koşullarına özgü tasarlanmış bir alaşım içeriğine ve mekanik özelliklere sahiptir.

Bu özel çift fazlı çelik kalitesi için referans alınabilecek akma mukavemeti 520-680 MPa aralığında, çekme mukavemeti 720-950 MPa ve uzama % 5-14 aralığındadır.

Haddelenmiş rulo saclardan alınan yassı çelik saclardan giyotin kesim yolu ile 200 mm genişlik, 300 mm uzunluk ve 1,2 mm olan sac kalınlığında dik açılı levhalar çıkarılmıştır. Hadde yönü (boyuna yön) dikkate alınmış ve levhalar üzerinde işaretlenmiştir.

2.2. Lazer Kaynak (Laser Welding)

Lazer kaynak denemelerinde, her deney için 2 adet yassı çelik sac levha (200*300 mm) kaynak dikişi hadde yönüne paralel olacak biçimde kaynaklanmıştır. Farklı parametreler uygulanarak toplam 6 farklı deney yapılmış; her deney içerisinde levha kaynak süreci 3 kez tekrarlanmıştır.

Şekil 1'de görülen, IPG marka YLS 3000 fiber lazer kaynak rezonatörü kullanılmıştır. Bu rezonatör maksimum 3 kW güç kapasitesine sahiptir. Günümüzde, fiber lazerler yüksek verimliliklerinden ve kullanım kolaylığından dolayı endüstriyel uygulamalarda oldukça tercih edilmektedir. Otomatize edilebilirlik ve lazer ışınının fiber optik kablolar ile taşınması bu lazer tipinin diğer avantajıdır.

Kaynak yapılacak numunelerin yüzeyleri arasında tam teması sağlama amacıyla manuel bir fikstürleme yapılmıştır. Kaynak alın kaynağı şeklinde uygulanmış ve herhangi bir ilave malzeme kullanılmamıştır. Tablo 2'de uygulanan lazer gücü, lazer ilerleme hızı, odak mesafesi, ısı girdisi parametreleri belirtilmiştir.

2.3. Numune Hazırlığı (Sample Preparation)

Lazer kaynak sonrası, levha çiftlerinden Şekil 2c'de gösterilen kaynak hattı tam ortada olacak şekilde çekme testi, mikrosertlik ölçümü ve metalografi çalışmalarına yönelik numuneler çıkarılmıştır. Şekil 2a çekme testi çubukları hidrolik pres kesim yöntemi ile ISO 6892-1:2009

Tablo 1. Çalışma kapsamına alınan çift fazlı çelik kalitesi- Kimyasal Bileşim Sınırları
(Dual phase steel grade of this study - Chemical Composition Limits)

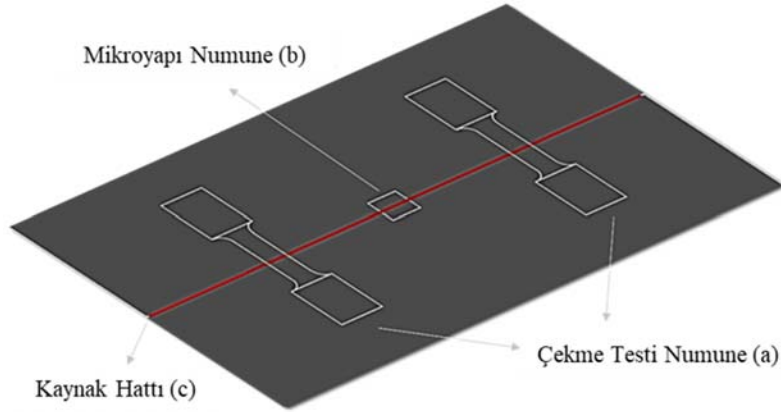
Çift Fazlı Çelik BOR DP800-Mod % Kütle									
C	Si	Mn	P	S	Cr +Mo	Nb + Ti	V	B	
0,14-0,20	0,25-1,00	2,00-2,90	maks. 0,08	maks. 0,02	maks. 1,40	maks. 0,15	maks. 0,20	maks. 0,005	



Şekil 1. Lazer Kaynak Hücresi (Laser welding cell)

Tablo 2. Çalışma kapsamında uygulanan lazer kaynak denemeleri ve parametreleri
(Laser welding trials and applied parameters within the scope of this study)

Deney No	Lazer Gücü (Watt)	Lazer ilerleme hızı (mm/s)	Odak Mesafe (mm)	Isı Girdisi (kJ/mm)
1	2000	30	0	240
2	2000	40	0	180
3	2000	50	0	144
4	1500	30	0	180
5	1500	40	0	135
6	1500	50	0	108



Şekil 2. Levha çiftleri üzerinde hazırlanan numuneler (Samples from laser welded sheet pairs)

standardına uygun boyutlarda, Şekil 2b mikrosertlik ve metalografi numuneleri ise Metkon-Micracut 150 kesim cihazı ile alınmıştır. Ek olarak, mikrosertlik ölçümleri öncesi numunelere parlatma işlemi uygulanmış ve yine metalografik çalışmalar için numunelere metalografik numune hazırlık adımları uygulanmıştır.

2.4. Mekanik Testler (Mechanical Tests)

Çekme testleri ISO 6892-1:2009 ve ASTM E8 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Testler tek eksenli çekme testi cihazı olan Zwick/Roell Z250'de gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri haddeleme yönüne paralel olarak hazırlanmıştır.

Çekme testleri ile kaynaklı malzemelerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % kopma uzama değerleri elde edilmiştir. Test verilerinin doğru bir şekilde elde edilmesi için Class 0.5 uzama ekstansometresi ve alan daralması ekstansometresi kullanılmıştır. Test hızı 32 mm/dk olarak numuneler test edilmiştir.

Mikrosertlik ölçümleri Emcotest /Durascan 50 G5 cihazı kullanılarak EN ISO 6507 ve ASTM E92 standartlarına uygun olarak Vickers metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Simetrik ve düzenli aralıklarda esas metal, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak ve tekrar esas metal üzerinde giden doğrusal bir hatta çentikler açılmıştır. 0.20 mm ile ayrılmış noktalar ile bir matris oluşturularak toplam 19 nokta ölçülmüş ve

numune sertlik değerleri belirlenmiştir. Basma ucunun numuneye yaklaşma hızı 0.2 mm/sn'dir.

2.5. Metalografik İncelemeler (Metallographic Examination)

Kaynak birleşim bölgesi ortada olacak şekilde metalografik numune alım ve hazırlama süreçleri (bakalite alma, zımparalama, parlatma, dağlama) tamamlanmıştır. Tüm numunelerde, kaynak bölgesi, ısıdan tesiri altındaki bölge ve esas metal mikroyapısı, Leica DM RX HC optik mikroskop (OM) ve Zeiss Evo 50 tarama elektron mikroskobu (SEM) ile çeşitli büyütmelerde gözlenmiş ve iç yapı detaylı incelenmiştir.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Mekanik Test Bulguları (Mechanical Test Results)

3.1.1. Çekme testi bulguları (Tensile test results)

Deney bazında çekme test sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.

Deney 1 (2000 W lazer gücü ve 30 mm/s lazer ilerleme hızı) ve 2 (2000 W lazer gücü, 40 mm/s lazer ilerleme hızı) çekme test numunelerinde kopma esas metal kısmında gerçekleşmiştir. Diğer deney sonuçları ile ve esas metal referans mekanik değerleri ile kıyaslandığında; en yüksek akma, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri bu deneylerin numunelerinde görülmüştür. Mekanik performans açısından ele alındığında, tüm deneyler arasında esas metal performansından (akma, çekme mukavemeti) daha yüksek en iyi iki performans bu iki deneyde uygulanan parametreler ile sağlanmıştır. Bu kaynak parametrelerine bağlı olarak, mekanik performans sonuçları lazer kaynak gücü, hızı ve kaynak işlemi esnasında malzemeye sağlanan ısı girdisi seviyesi ile de ilişkili görünmektedir. Aynı lazer gücü (2000 W) uygulanan Deney 1 ve 2 numuneleri kıyaslandığında; çekme ve akma mukavemetlerinin

birbirlerine çok yakın olduğu; buna karşın, 40 mm/s lazer ilerleme hızında yapılan Deney 2 numunelerinde ortalama % kopma uzamanın 30 mm/s lazer ilerleme hızında yapılan Deney 1'e kıyasla az farkla yüksektir.

Deney 3 numuneleri kaynak bölgesinden ve gevrek kırılma şeklinde kopmuştur. Bu nedenle % kopma uzama değeri çok düşüktür. Deney 4 (1500 W lazer gücü ve 30 mm/s lazer ilerleme hızı) ve Deney 5 (1500 W lazer gücü, 40 mm/s lazer ilerleme hızı) numunelerinde kopma ITAB-kaynak metali arasında gerçekleşmiştir. Deney 4 ve 5 numunelerinde akma ve çekme mukavemeti Deney 1 ve 2 değerlerine görece yakın olsa da % kopma uzama değerleri belirgin biçimde düşüktür. Deney 6 numunelerinde ITAB-kaynak metali arasında kaynağa çok yakın bölgeden kopma görülmüştür. Bu bulgular 50 mm/s hızın uygulama için yüksek olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, yine 50 mm/s hızda fakat daha yüksek güç (2000 W) ile çalışılan Deney 3'te benzer kırılma görülmesi bu görüşü desteklemektedir.

Kıyas kolaylığı için Şekil 3'te grafik halinde sunulan çekme test sonuçlarına genel bakış ile; bu çelik kalitesi ve sac kalınlığındaki uygulamalar için ısı girdi seviyesinin işlem öncesi doğru belirlenmesi gereken bir unsur olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, lazer ilerleme hızının sonuçlar üzerinde (özellikle % kopma uzama) doğrudan etkisi olduğu iddia edilebilir. Kaynak işlemi esnasında yüksek hızda ısıma-soğutma ve çelik kimyasal bileşimi içerisindeki yüksek alaşım elementi içeriğine de bağlı olarak, ITAB ve kaynak bölgesinde daha fazla sert faz oluşumu gerçekleşmekte ve ani sertlik değişimleri sonucunda gevrek kırılma eğilimi artmaktadır.

3.1.2. Mikrosertlik ölçüm bulguları (Microhardness measurement results)

Mekanik performansın daha iyi değerlendirilmesi; esas metal, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak ve tekrar esas metal

Tablo 3. Lazer kaynak levha çiftlerinden alınan numunelerde akma-çekme mukavemeti ve % kopma uzama değerleri (Yield-tensile strength and % elongation results of laser welding trial specimens)

Çekme Test Numuneleri Menşe	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	%Uzama	Kopma Bölgesi
Esas Metal BOR_DP800-Mod	640,8 ± 8,4	941,2 ± 11,5	8,6 ± 0,43	-(Kaynaksız numune)
Deney 1 Levha Çiftleri (2000 W, 30 mm/s)	761,5 ± 9,2	1045,0 ± 13,1	4,0 ± 0,30	Esas Metal
Deney 2 Levha Çiftleri (2000 W, 40 mm/s)	770,5 ± 10,1	1054,1 ± 14,4	5,2 ± 0,25	Esas Metal
Deney 3 Levha Çiftleri (2000 W, 50 mm/s)	659,2 ± 7,5	659,4 ± 7,3	0,2 ± 0,02	Kaynak
Deney 4 Levha Çiftleri (1500 W, 30 mm/s)	757,5 ± 11,0	977,4 ± 10,7	1,3 ± 0,07	Kaynak
Deney 5 Levha Çiftleri (1500 W, 40 mm/s)	721,0 ± 9,8	966,3 ± 12,0	1,2 ± 0,06	Kaynak
Deney 6 Levha Çiftleri (1500 W, 50 mm/s)	735,5 ± 8,8	750,8 ± 11,1	0,3 ± 0,01	Kaynak

üzerinde giden doğrusal bir hatta sertlik geçişlerinin izlenmesi ve mikroyapısal bulgular ile ilişkisinin incelenmesi amacıyla mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki grafiklerde (Şekil 4-Şekil 9) deney bazında sunulmuştur.

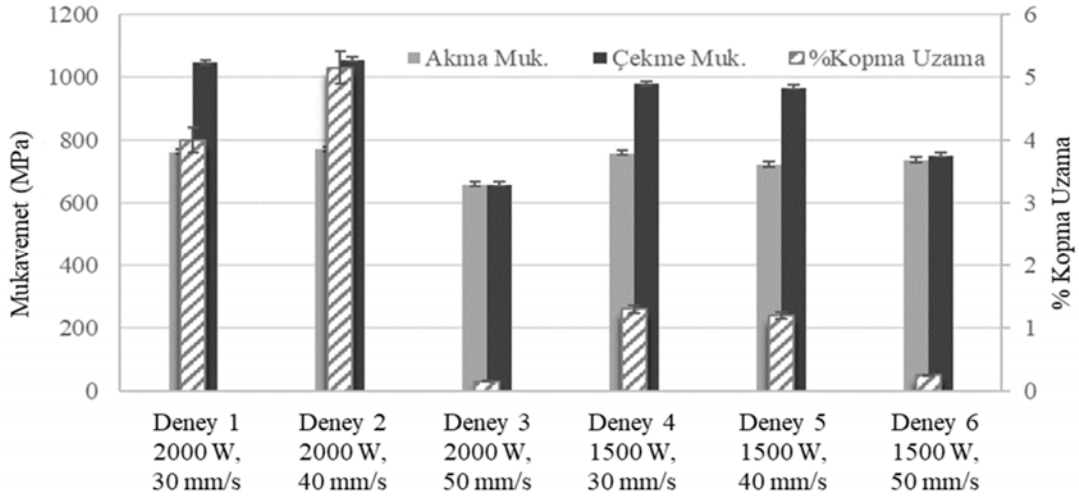
Deney 1 numunesinde (Şekil 4) esas metalde mikrosertlik 300-320 HV bandında seyretmiştir. Alaşım içeriğine bağlı olarak yüksek hızda ısınan ve soğuyan bir çift fazlı çelikte beklenene üzere, sert fazlardaki artış nedeniyle esas metalden ısı tesiri altındaki bölgeye geçişte ölçülen sertlik değerleri kademeli biçimde 400 HV değerine kadar yükselmiştir. Kaynak dikişi boyunca yakın (350-390 HV) değerler izlenmiştir.

Şekil 5'te gösterilen Deney 2 numunesinde; esas metalde mikrosertlik değerinin 320-360 HV bandındadır. Bu değerler, esas metal iç yapısında bulunan ferritik, martenzitik ve bey nitik fazların getirmesi beklenen ortalama sertlik ile uyumludur. Isı tesiri altındaki bölgeye geçişte ölçülen sertlik

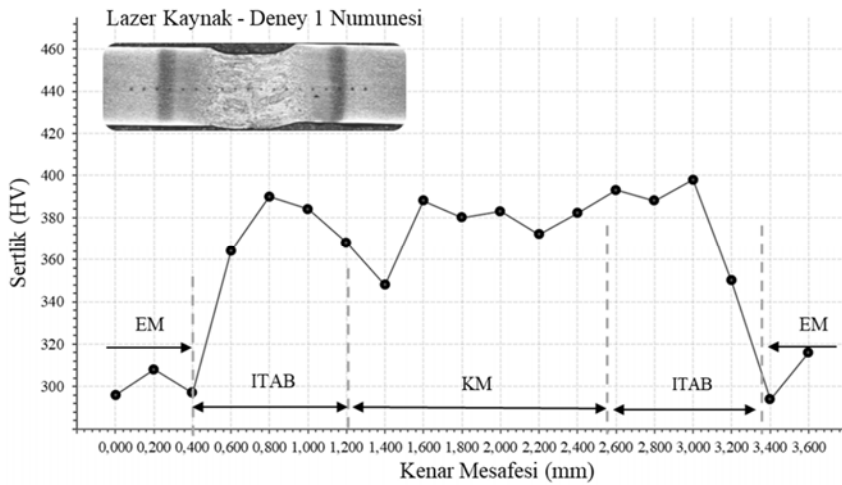
değerleri artmış ve kaynak dikişi boyunca 375-400 HV aralığında seyretmiştir.

Deney 4 numunesinde (Şekil 7), esas metalde mikrosertlik değerinin 320-380 HV bandındadır. Esas metalden ısı tesiri altındaki bölgeye geçişte sertlik değerleri artmış ve kaynak dikişi boyunca 410-420 HV aralığında ölçülmüştür. Kaynağın sağ tarafında ısı tesiri altındaki bölgede kümelenmiş sert fazlardan ölçüm alındığında sertliğin 470 HV ye kadar çıkabildiği görülmüştür. Bu durum ayrıca Kısım 3.1.1.'de Deney 4 çekme test sonuçlarında anlatılan gevrek kırılma biçimini tetikleyen mekanizma olabilir.

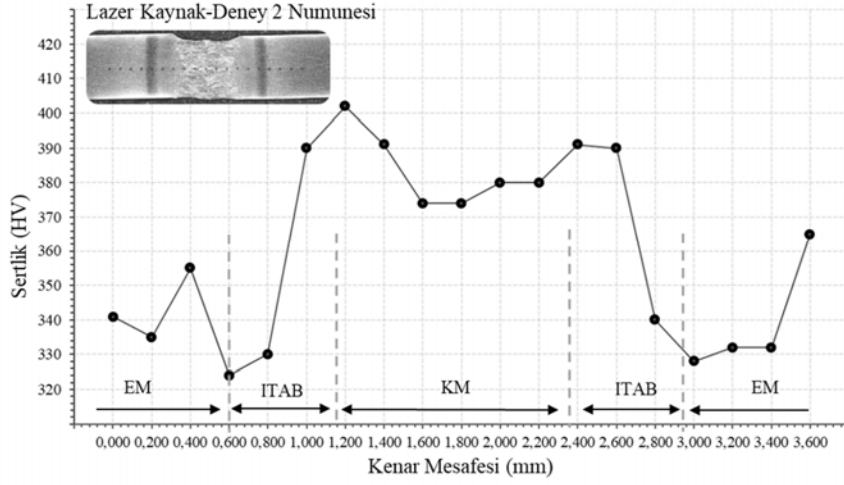
Deney 5 numunesinde (Şekil 8), esas metalde mikrosertlik değerinin 340-370 HV bandındadır. Esas metalden ısı tesiri altındaki bölgeye geçişte sertlik değerleri artmış ve kaynak dikişi boyunca 430-480 HV aralığındadır. Kaynağın sol tarafında ısı tesiri altındaki bölgede kümelenmiş sert fazlara bağlı olarak sertlik değerleri daha yüksektir ve bu durum çekme testindeki gevrek kırılma ile ilişkilendirilebilir.



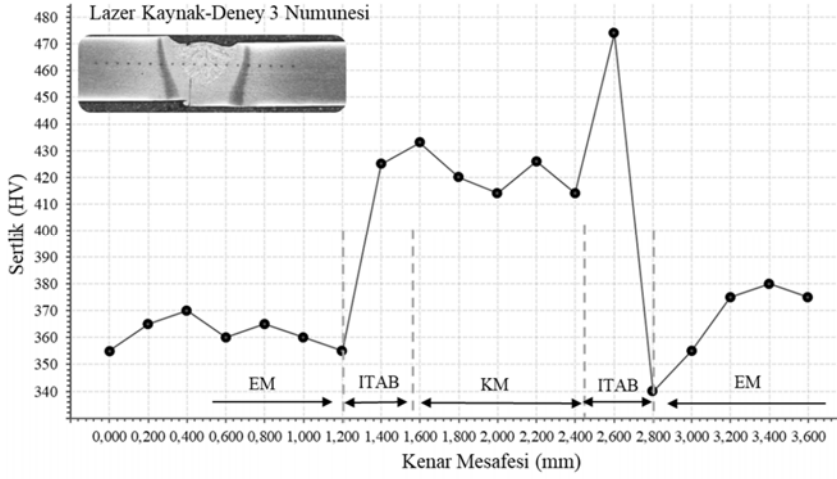
Şekil 3. Lazer kaynak deney çiftlerinde çekme testi sonuçları (Tensile test results of laser welding trial specimens)



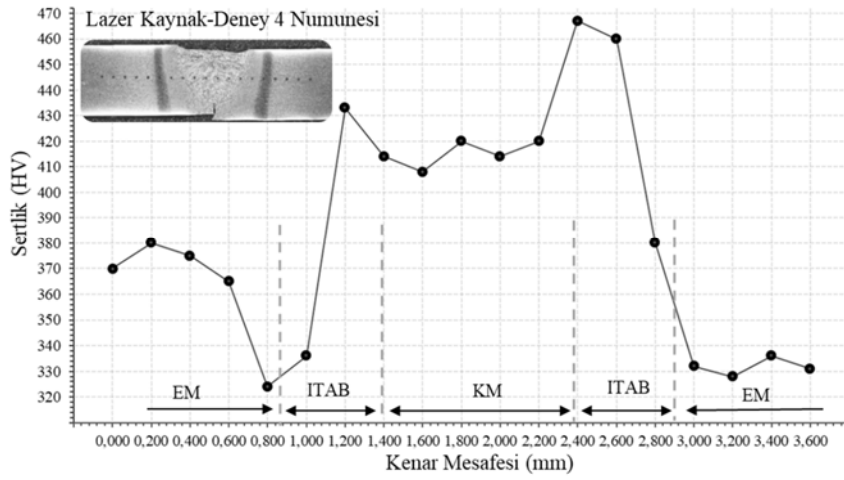
Şekil 4. Lazer Kaynak Deney 1-Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Laser Welding Trial 1-Microhardness measurement results)



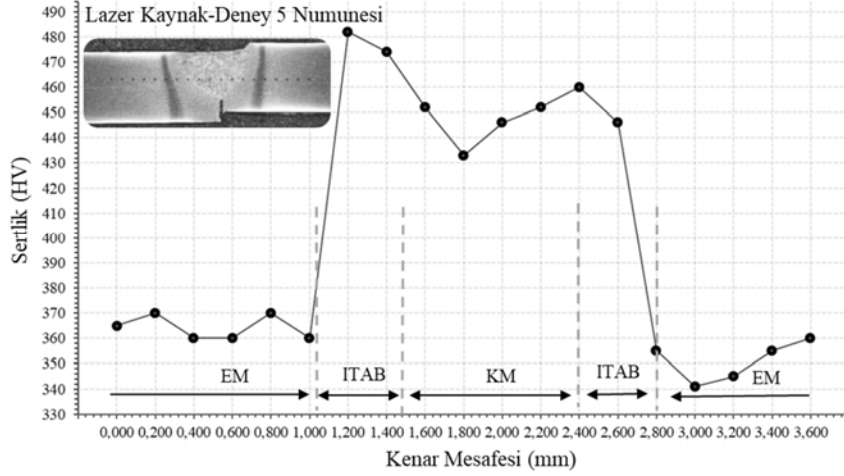
Şekil 5. Lazer Kaynak Deney 2-Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Laser Welding Trial 2-Microhardness measurement results)



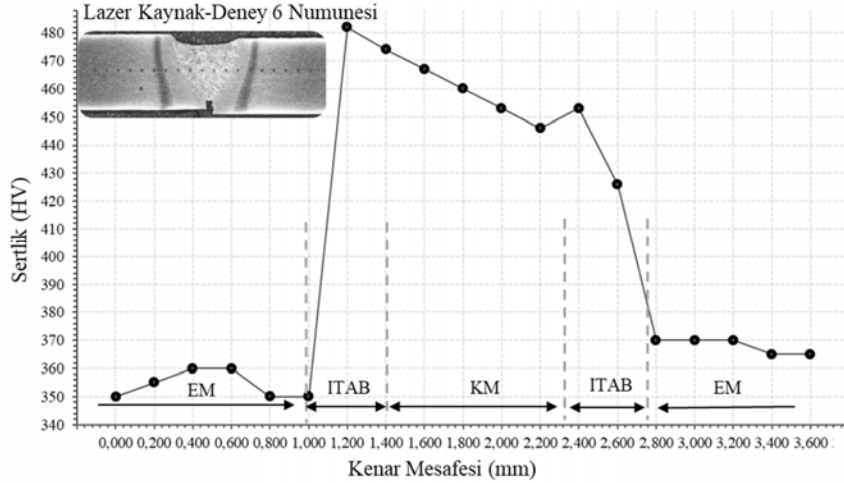
Şekil 6. Lazer Kaynak Deney 3-Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Laser Welding Trial 3-Microhardness measurement results)



Şekil 7. Lazer Kaynak Deney 4-Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Laser Welding Trial 4-Microhardness measurement results)



Şekil 8. Lazer Kaynak Deney 5-Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Laser Welding Trial 5-Microhardness measurement results)



Şekil 9. Lazer Kaynak Deney 6-Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Laser Welding Trial 6-Microhardness measurement results)

Deney 6 numunesinde (Şekil 9), esas metalde mikrosertlik değerinin 350-370 HV bandında seyrettiği görülmüştür. Esas metalden ısı tesiri altındaki bölgeye geçişte sertlik değerleri artmış ve kaynak dikişi boyunca 450-470 HV aralığındadır. Deney 3,4 ve 5'e benzer biçimde yüksek sertlik artışı görülen ısı tesiri altındaki bölge, gevrek kırılmanın nedeni olabilir.

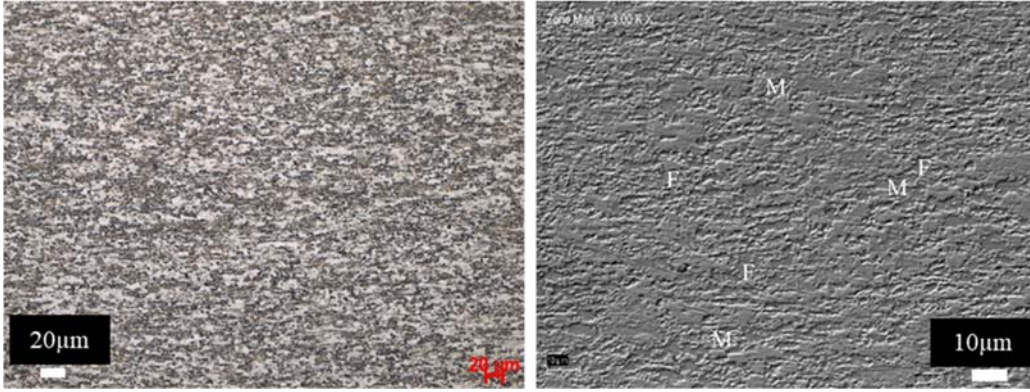
3.2. Mikroyapı İnceleme Bulguları (Microstructural Examination Results)

Esas metal mikroyapısı, kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölge optik mikroskop (OM) ve tarama elektron mikroskobu (SEM) ile çeşitli büyütmelerde detaylı incelenmiştir.

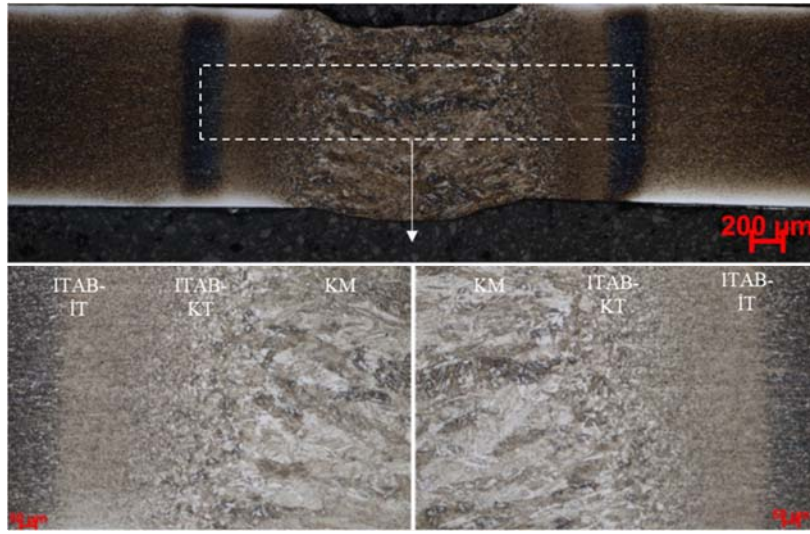
Şekil 10'da bu çalışmada kullanılan BOR_DP800-Mod çeliğine ait OM ve SEM mikroyapı görüntüleri sunulmuştur. İnce tane yapısına sahip bu çelikte; açık tonlu bölgelerde eş taneli ferrit yapılar, koyu bölgelerde ise martenzitik ve beynitik yapılar görülmektedir. Aşağıda lazer kaynak deneyleri bazında, Şekil 11-Şekil 21 boyunca sunulan genel kaynak ve bölge bazlı mikroyapı görüntülerinde gösterildiği

üzere; tüm numunelerde kaynak metal, ITAB ve esas metalde benzer fazlar ve morfoloji gözlenmiştir. Tüm deney numunelerinde, esas metal bölgesinden ısı tesiri altındaki bölgeye geçişlerde martenzit, beynit gibi sert fazların miktarında artış gözlenmiştir. Bu artış, lazer kaynak prosesinde uygulanan hızlı ısıtma ve soğutma ve bu bölgelerdeki alaşım elementleri açısından zenginleşme nedeni ile beklenen bir durumdur.

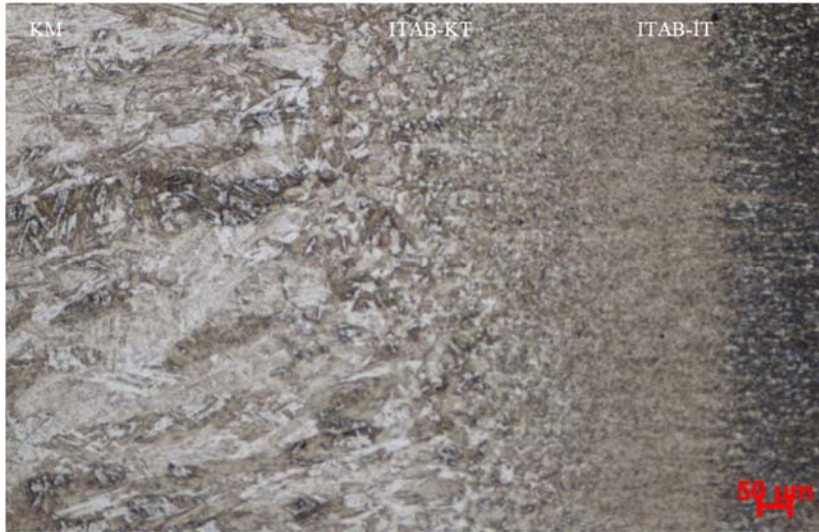
Kaynak metalinde, tane boyutu esas metal tane boyutunun belirgin derecede üzerindedir. Kaynak işlemi esnasında ergime ve sonrasında lazer kaynağının karakteristik özelliği olan hızlı soğuma sonucu kaba dendritik yapılar oluşmuştur. Bu yapılar içinde görülen iğnemsiz martenzitik yapılar yüksek ısı girdisi ile ergime ardından çok hızlı soğuma ile katılaşma ile oluşmaktadır. ITAB, kaynak metalinden esas metale doğru yönde incelendiğinde önce kaba taneli (ITAB-KT) ve sonra ince taneli (ITAB-İT) olmak üzere martenzitik ve beynitik yapılar gözlenmektedir. Esas metal üzerinde ITAB bölgesine komşu bölgelerde ise çift fazlı çelikte hali hazırda var olan ferritik-martenzitik yapıdaki martenzitin ulaşılan en



Şekil 10. Esas metalin OM (sol) ve SEM (sağ) mikroyapı görüntüleri (OM image (left) and SEM image (right) of base metal)



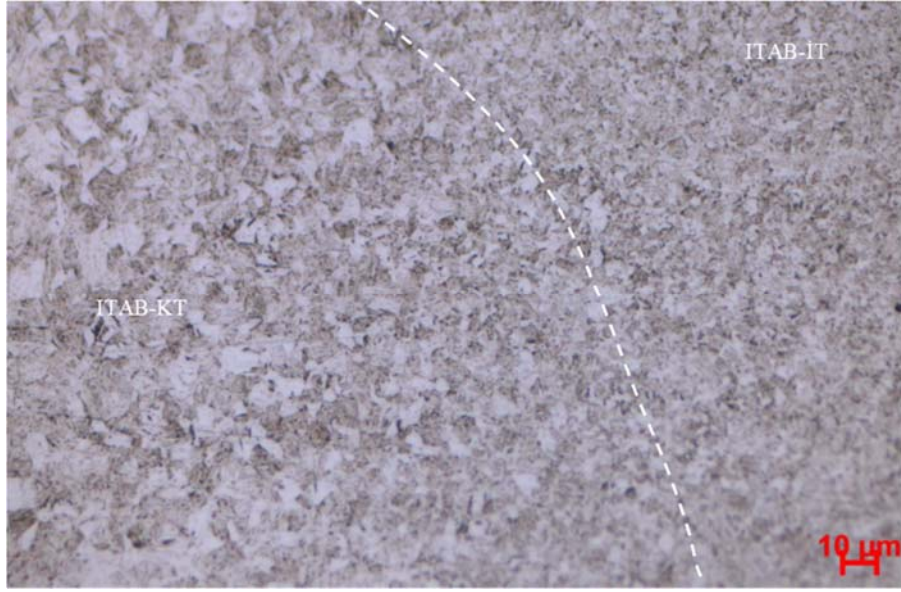
Şekil 11. Lazer Kaynak Deney 1- Esas metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinde OM görüntüleri (Laser Welding Trial 1 – Optical microscopy images of base metal, heat affected zone and weld metal)



Şekil 12. Lazer Kaynak Deney 1- Isı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinde mikroyapı (Laser Welding Trial 1 – Microstructure of heat affected zone and weld metal)

yüksek sıcaklığın kritik sıcaklık altında kalması nedeni ile menevişli martenzit yapılar da oluşmuştur. Ayrıca, menevişli

martenzitik yapılar az miktarda sertlik düşüşü görülmesi beklendiğinden, Kısım 3.1.2.'de Şekil 4-Şekil 9



Şekil 13. Lazer Kaynak Deney 1- ITAB-KT ve ITAB-İT mikroyapı görüntüleri (Laser Welding Trial 1 – Fine and coarse grained microstructural images of heat affected zone)



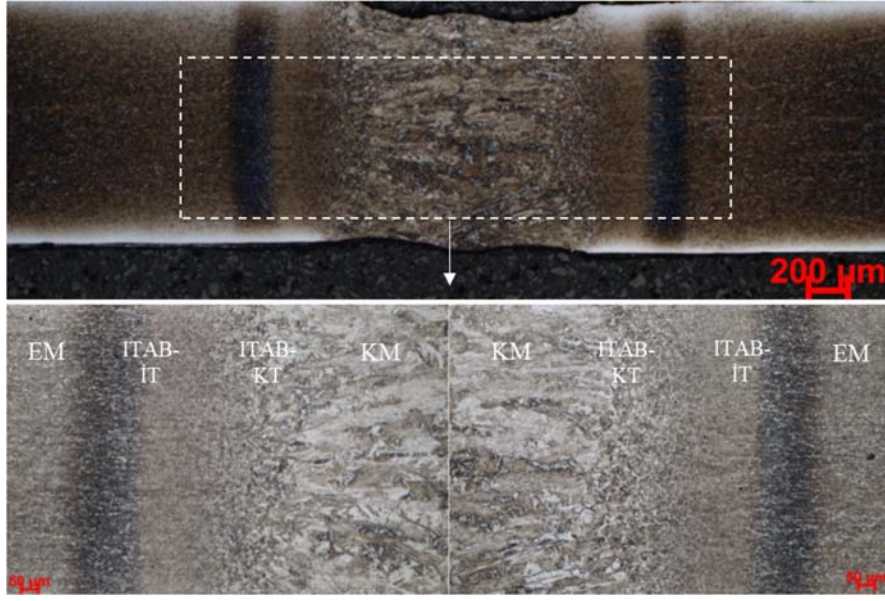
Şekil 14. Lazer Kaynak Deney 1- Kaynak metal mikroyapı görüntüsü (Laser Welding Trial 1 – Microstructure of weld metal)

grafiklerinde esas metal ile ITAB başlangıcı arasında görülen yumuşama şeklindeki sertlik değişimleri bu yapılardan kaynaklanmış olabilir.

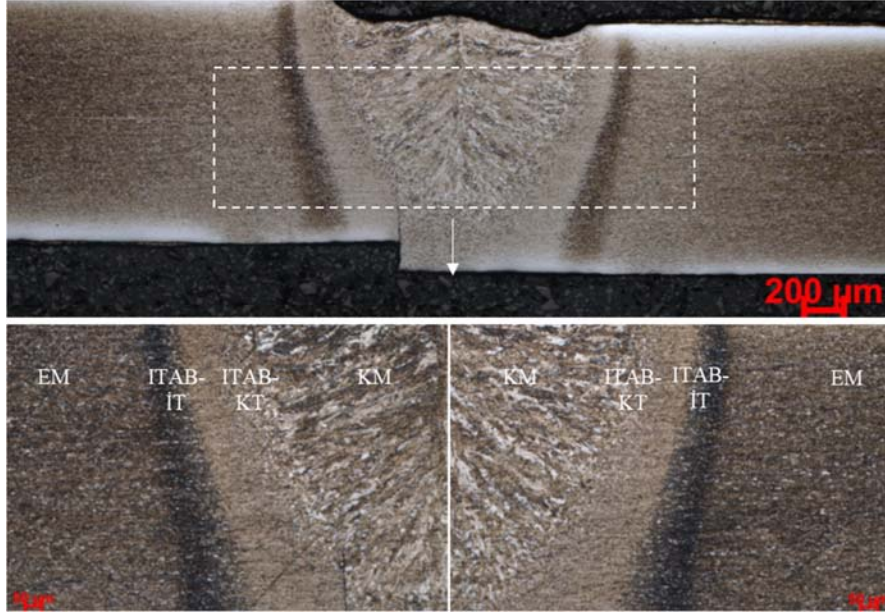
Deney 1 ve 2 numunelerinde, tam kaynak nüfuziyetinin gerçekleştiği, esas metalden ITAB'e ve bu bölgeden kaynak metaline mikroyapı değişiminin kademeli ve düzenli gerçekleştiği görülmüştür. Kaynak metalinde iğnemsli yapıların (ferrit, beynit, martenzit) yöneliminde katılaşma esnasında oluşan kolon biçimli taneler belirleyici olmuştur. Diğer deney numunelerine göre daha geniş kaynak dikişi bölgesi bulunan Deney 1 ve 2 numunelerinde, yüksek ısı girdi ve diğer deney numunelerine göre geniş alanda nispeten daha yavaş soğuma gerçekleşmesi ile beynitik yapıların da oluştuğu düşünülmektedir. Kaynak metalinde

görülen morfoloji, maruz kalınan soğutma hızı ve mikrosertlik bulguları da iğnemsli martenzitik yapılar beraberinde beynit mevcut olduğu görüşünü desteklemektedir.

ITAB ile esas metal arasında, martenzit, beynit ve temperlenmiş martenzit yapıları ile ferrit yapısı göze çarpmaktadır. Kaynak metaline ile ITAB geçişinde sıcaklığın yüksek, soğumanın ise kaynak metaline kıyasla daha yavaş gerçekleşmesi ve kaynak metalinde katılaşma esnasında açığa çıkan ısının en çok bu bölgeye transfer olması nedeniyle kaba taneli iç yapı görülmektedir. Esas metale daha yakın, interkritik sıcaklık aralığında (Ac1-Ac3) kalan ve hızlı soğuyan ITAB bölgelerinde ise ince taneli yapı görülmektedir.



Şekil 15. Lazer Kaynak Denei 2- Esas metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinde OM görüntüleri
(Laser Welding Trial 2 – Optical microscopy images of base metal, heat affected zone and weld metal)



Şekil 16. Lazer Kaynak Denei 3- Esas metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinde OM görüntüleri
(Laser Welding Trial 3 – Optical microscopy images of base metal, heat affected zone and weld metal)

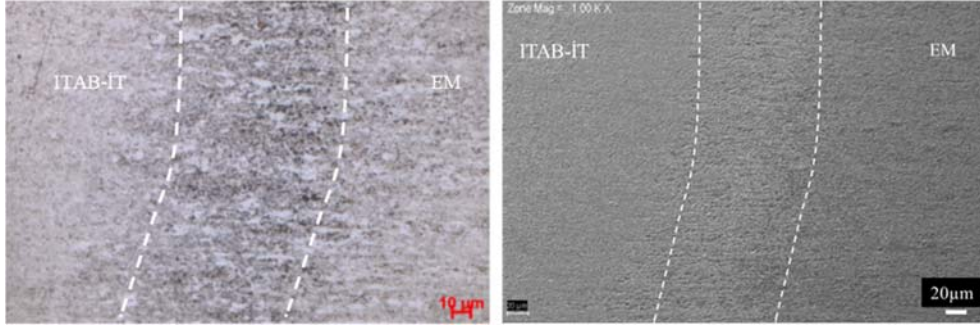
Denei 3, 4, 5, 6 numunelerinde, tam kaynak nüfuziyeti sağlanamamıştır. Ayrıca, kaynak bölgesi ve ITAB genişliği Denei 1, 2 numunelerine kıyasla düşüktür. Esas metalden ITAB'a ve bu bölgeden kaynak metaline mikroyapıda Denei 1, 2 numunelerine göre ani geçiş ve değişimler görülmüştür. Bu deneylerdeki lazer kaynak ısı girdi değerleri nüfuziyet derinliği ve kaynak dikişi genişliği ile ilişkilendirilebilir. Isı girdisi (Tablo 2) azaldıkça derinlik ve genişlikte azalma gözlenmiştir.

Kaynak metalinde iğnemi yapıların (ferrit, beynit, martenzit) yöneliminde katılma esnasında oluşan kolon

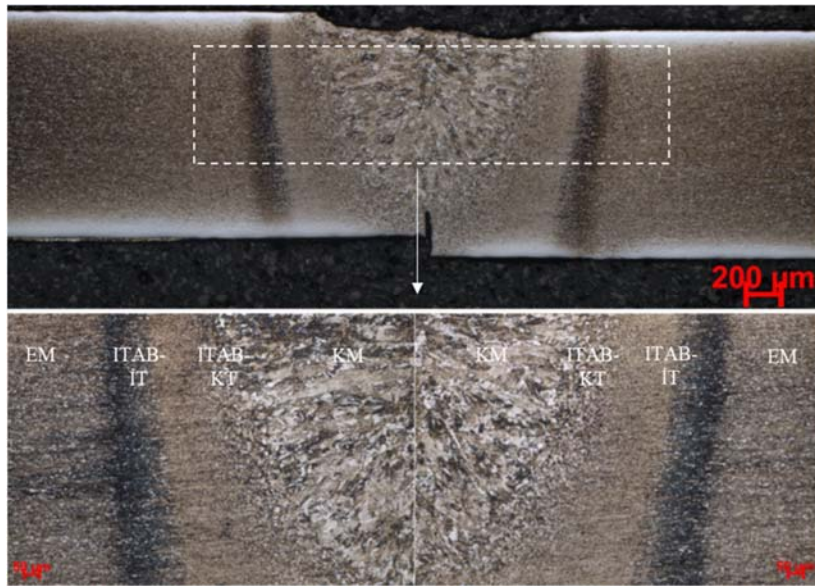
biçimli taneler belirleyici olmuştur. ITAB ile esas metal arasında, martenzit, beynit ve temperlenmiş martenzit yapıları görülmüştür. Kaynak metalini ile ITAB geçişinde sıcaklığın yüksek, soğumanın ise kaynak metaline kıyasla daha yavaş gerçekleşmesi ve kaynak metalinde katılma esnasında açığa çıkan ısının en çok bu bölgeye transfer olması nedeniyle kaba taneli iç yapı görülmektedir. Denei 1, 2 numunelerine kıyasla Denei 3, 4, 5, 6 numunelerinde kaba taneli ITAB yapısı daha dar bir alanda görülmüştür. Esas metale daha yakın, interkritik sıcaklık aralığında (Ac1-Ac3) kalan ve hızlı soğuyan ITAB bölgelerinde ise ince taneli yapı görülmektedir. Ayrıca, ince taneli ITAB'da ise Denei 1, 2



Şekil 17. Lazer Kaynak Denei 3- Kaynak metali, ITAB-KT ve ITAB-İT mikroyapı görüntüleri
(Laser Welding Trial 3 – Microstructural images of weld zone, fine and coarse grained heat affected zone)



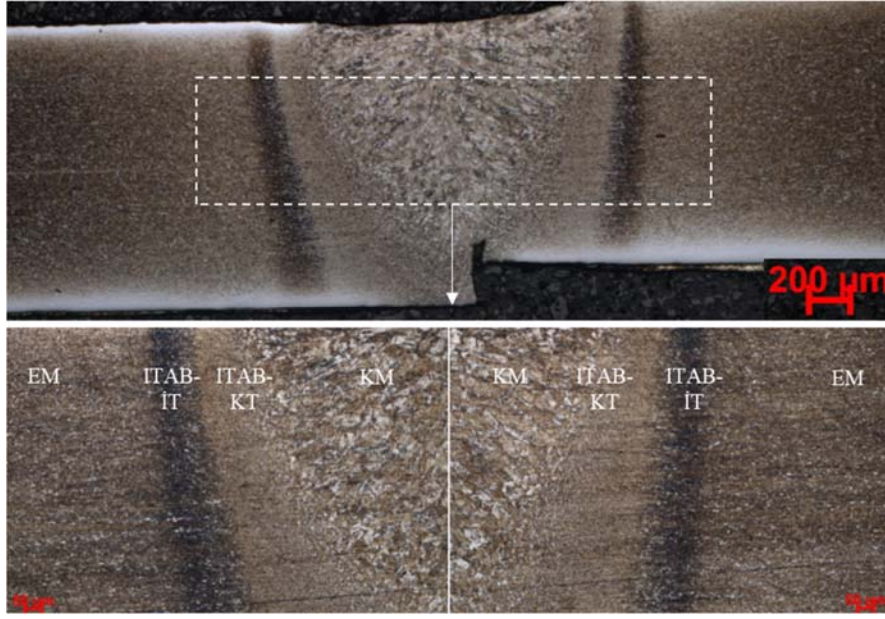
Şekil 18. Lazer Kaynak Denei 3- ITAB ve esas metal geçişinde OM (sol) ve SEM (sağ) görüntüleri
(Laser Welding Trial 3 – OM(left) and SEM (right) image of transition from heat affected zone to base metal)



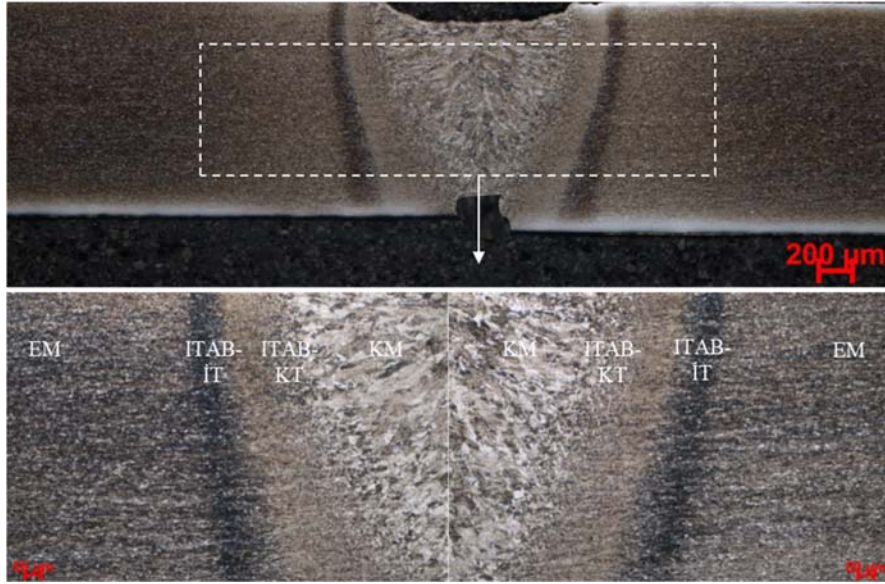
Şekil 19. Lazer Kaynak Denei 4- Esas metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinde OM görüntüleri
(Laser Welding Trial 4 – Optical microscopy images of base metal, heat affected zone and weld metal)

numunelerine kıyasla daha ince tane yapısı gözlenmiştir. Bu bulgular hem kaynak bölgesindeki alan darlığı hem de

soğuma süresi ile ilişkilendirilebilir. Kaynak işleminde yüksek hızda soğuma esnasında alaşım elementi içeriğince



Şekil 20. Lazer Kaynak Deneş 5- Esas metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinde OM görüntüleri
(Laser Welding Trial 5 – Optical microscopy images of base metal, heat affected zone and weld metal)



Şekil 21. Lazer Kaynak Deneş 6- Esas metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinde OM görüntüleri
(Laser Welding Trial 6 – Optical microscopy images of base metal, heat affected zone and weld metal)

zenginleşme ve daha fazla martenzitik, menevişlenmiş martenzitik ve beynitik faz oluşumuna bağlı olarak, geçiş bölgelerinde mikroyapıdaki değişimi Şekil 18’de belirgindir. Bu sert fazların daha fazla oluşması ve dar bölgelere kümelenmesi sonucunda malzemede gevrek kırılma eğilimi artmaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, ülkemizde ihtiyacı çoğunlukla ithalat yolu ile karşılanan ve otomotiv sektöründe yaygın olarak tercih edilen çift fazlı bir çelik kalitesindeki (BOR_DP800-Mod) sac levha çiftlerine 3 kW lazer rezonatör altyapısı ile farklı

lazer proses parametreleri uygulanmıştır. Kaynaklanmış levhalardan alınan numunelerde kaynak performansı mekanik ve mikroyapısal bulgular üzerinden değerlendirilmiştir.

Literatürde de yer verildiği üzere lazer gücü [9] ve lazer ilerleme hızının [10] kaynak performansını doğrudan etkileyen, iyi kalite kaynak eldesine yönelik kritik parametreler olduğu ve bu parametrelere bağlı olan ısı girişi miktarının kaynak derinliği ve genişliğini etkilediği [11] bilinmektedir. Ayrıca, kaynaklanmış parçalarda kaynak bölgeleri ve civarında oluşan heterojen mikroyapı ve farklılaşmış mekanik özellikler parçadaki nihai malzeme

özelliklerini önemli derecede etkileyebileceği için lazer kaynak proses parametrelerinin hedef parça performansına yönelik optimizasyonu gerekmektedir. Lazer kaynak levha çiftlerindeki genel kaynak görüntüleri, kaynak dikişindeki derinlik ve genişliğin uygulanan parametreler ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Uygun lazer gücü ve hızında malzemeye sağlanan ısı girdi ile tam kaynak nüfuziyeti sağlanabilmektedir. Yapılan tüm lazer kaynak denemeleri içerisinde Deney 1 ve 2’de tam kaynak nüfuziyeti sağlanmıştır. Deney 1 ve 2 çekme test numunelerinde esas metal mekanik performansından daha yüksek akma mukavemeti ve çekme mukavemeti değerleri görülmüş, beklendiği üzere kopma esas metalde gerçekleşmiş ve tüm deney çiftleri arasında en yüksek % uzama değerleri sağlanmıştır. Ayrıca, uygulanan lazer gücü sabit iken, lazer hızının malzemedeki ısıtma ve soğutma hızını etkileyerek %kopma uzama değerlerini, diğer bir deyişle plastik deformasyonun gerçekleşme miktarını etkilediği gözlenmiştir. Deney 3, 4, 5, 6 numuneleri kaynak bölgesinden kopmuş ve gevrek kırılma biçimi göstermiştir. Bu deneylerde gözlenen kısmi kaynak nüfuziyeti ve kaynak kaçıklığı gibi bulgular da mekanik test performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

Tüm deneylerde kaynak metalinde elde edilen mikrosertlik ölçüm sonuçları esas metalden yüksek ve mikroyapı incelemelerinde görülen iğnemi martenzitik ve beynitik fazlardan beklenebilecek değerler ile uyumludur. Deney 1, 2 mikrosertlik ölçüm sonuçları ve mikroyapı incelemeleri; esas metal, ITAB ve kaynak metalinde düzenli ve kademeli bir sertlik değişimi göstermiştir. Deney 3, 4, 5, 6 numunelerinde esas metalden ısı tesiri altındaki bölgeye ve bu bölgeden kaynağa geçişlerde Deney 1, 2 numunelerine kıyasla düzensiz sertlik değişimi ve daha heterojen iç yapı dağılımı gözlenmiştir. Tüm deney numunelerinin mikroyapı inceleme bulguları kendi aralarında değerlendirildiğinde, kaynak metali ve ITAB’de temelde aynı fazlar (ferrit, martenzit, beynit) görülse de faz miktarları ve tane boyutlarındaki göreceli farklılıkların farklı lazer kaynak parametreleri uygulanmasına bağlı olarak farklı ısı çevrimlere maruz kalmalarından kaynaklanmaktadır.

Çalışma kapsamında tüm bulgular sonucu Deney 2 (2000 W, 40 mm/s) lazer kaynak parametrelerinin bu dual fazlı çelik kalitesi ve kalınlığı için optimum proses parametrelerine en yakın parametreler olduğu çıkarımı yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda, daha dar parametre aralıklarında çalışılarak ve daha fazla deney yapılarak optimum proses parametreleri belirlenebilir. Ayrıca, dinamik yükleme altında yorulma davranışı incelenerek kaynak performansı daha kapsamlı değerlendirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmada yer alan test süreçlerindeki desteklerinden dolayı Borçelik ArGe çalışanları Okan Poyraz, Refiye

Ardalı, Ali Suluköy, Tayyar Aydın, Sıtkı Oral ve lazer kaynak uygulama sürecindeki desteğinden dolayı Coşkunöz ArGe çalışanı Ramazan Özlütürk’e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Grajcar A., Morawiec, M., Rózański, M., Stano, S., Twin-spot laser welding of advanced high-strength multiphase microstructure steel, *Optics & Laser Technology*, 92, 52-61, 2017.
2. Fonstein, N., *Dual-phase steels*, Automotive Steels, Woodhead Publishing, Sawston, United Kingdom, 1, 169–216, 2017.
3. Shome, M., Tumulu M., *Introduction to welding and joining of advanced high-strength steels (AHSS)*, Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS), Woodhead Publishing, Sawston, United Kingdom, 1, 1-8, 2015.
4. Aydın H., Tutar M., Davut K., Bayram A., Effect of welding current on microstructure and mechanical properties of 15% deformed TWIP steel joined with electrical resistance spot welding, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 803-817, 2021.
5. Tuncel, O., Aydın H., Çetin, Ş., Nd:YAG Lazer Kaynağı ile Birleştirilen DP600 Çeliğinde Darbe Süresinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, 9. Uluslararası Otomotiv Teknoloji Kongresi-OTEKON 2018 Bildirileri, Bursa-Türkiye, 1503-1511, 2018.
6. Farabia N., Chena D.L., Zhou, Y., Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints, *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 982–989, 2011.
7. Turhan, B., Araç Aydınlatma Ürünlerinde Geleneksel Plastik Parça Birleştirme Yöntemlerinin Lazer Kaynak Yöntemi ile Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2018.
8. Ertem, R.U., Paslanmaz Çeliklerde Lazer Kaynak Parametre Değişimlerinin Dikiş Geometrisine Etkisinin İncelenmesi, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sigma 31, 583-593, 2013.
9. Uzun R.O., Keleş Ö., Investigation of effect on welding quality of laser welding parameters, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (3), 509-517, 2012.
10. Çevik, B., Gülenç., B., The effect of welding speed on mechanical and microstructural properties of 5754 Al (AlMg3) alloy joined by laser welding, *Materials Research Express* 5 (8), 086520, 2018.
11. Oyyaravelu, R., Kuppan, P., Arivazhagan, N., Metallurgical and mechanical properties of laser welded high strength low alloy steel, *Journal of Advanced Research*, 7 (3), 463-472, 2016.