

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN
BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AISI 4340 VE AISI 316 L ÇELİK ÇİFTİNİN DİFÜZYON
KAYNAĞI**

**Tezi Hazırlayan
Selman KİTAPCI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bülent KURT**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Aralık, 2020
NEVŞEHİR**

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN
BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AISI 4340 VE AISI 316 L ÇELİK ÇİFTİNİN DİFÜZYON
KAYNAĞI**

**Tezi Hazırlayan
Selman KİTAPCI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bülent KURT**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Aralık, 2020
NEVŞEHİR**

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleőtirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaőan, bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düőündüęüm kıymetli danıőman hocam Prof. Dr. Bülent KURT'a, teőekkürü bir borç biliyor ve őükranlarımı sunuyorum.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgilerini benden esirgemeyen ve her zaman desteklerini hissettiğim çok kıymetli, Doç. Dr. Cemal ARBOğA'ya teőekkürü ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca, her koőulda manevi destekleri ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli EŐİME ve çok kıymetli AİLEME teőekkürü borç bilirim.

AISI 4340 VE AISI 316 L ÇELİK ÇİFTİNİN DİFÜZYON KAYNAĞI

(Yüksek Lisans Tezi)

Selman KİTAPCI

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık, 2020

ÖZET

Bu tez çalışmasında, 316 L tipi paslanmaz ve 4340 tipi ıslah çeliği çifti difüzyon kaynağı tekniği kullanılarak birleştirilmiş ve birleşme bölgesi mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine araştırma yapılmıştır. Bu amaçla birleştirilecek yüzeyler zımparalama ve alkol kullanılarak temizleme işlemi sonrasında 10 MPa basınç altında 900-1000-1100 °C'lik sıcaklıklar ve 60-120 dakika süre parametreleri kullanılarak difüzyon kaynağı yapılmıştır. Kaynak yapılan numunelerin birleşme bölgesi kesiti numune hazırlama aşaması sonrasında dağlama işleminden geçirilerek mikroyapı ve mikrosertlik analizleri için hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı ve birleşme bölgesi ara yüzey incelemeleri amacıyla optik mikroskopi, görüntü analiz sistemi, SEM ve EDX analizi yapılmıştır. Aynı zamanda, difüzyon çifti ara bölge mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Böylece 316 L tipi paslanmaz ve 4340 tipi ıslah çeliği çiftinin optimum difüzyon kaynak parametresi ve difüzyon ara yüzey mikroyapı özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Yapılan bir dizi deneyler neticesinde 900 °C'lik sıcaklık ve 60 dakika sürede birleştirilen numunenin ara yüzeyinde yoğun mikro boşluk ve oksit oluşumu meydana gelmiştir. Diğer parametrelerde difüzyon ara yüzey fazıyla birlikte paslanmaz çelik ve 4340 çeliği tarafında karşılıklı C, Cr ve Ni elementi difüzyonuyla birlikte mikroyapı farklılıkları ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Difüzyon Kaynağı, 316 L Paslanmaz Çelik, 4340 Islah Çeliği,*
Tez Danışmanı: *Prof. Dr. Bülent KURT*
Sayfa Adedi: 53

DIFFUSION BONDING OF AISI 4340 AND A ISI 316 L STEEL COUPLE

(M. Sc. Thesis)

Selman KİTAPCI

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

December, 2020

ABSTRACT

In this thesis study, 316 L type stainless and 4340 type treatment steel pairs were combined using diffusion welding technique and research was done on the microstructure and mechanical properties of the junction zone. For this purpose, the surfaces to be joined were sanded and after cleaning using alcohol, diffusion welding was performed under 10 MPa pressure using 900-1000-1100 oC temperatures and 60-120 minutes time parameters. The cross section of the junction of the welded samples was etched after the sample preparation stage and made ready for microstructure and microhardness analysis. Optical microscopy, image analysis system, SEM and EDX analysis were performed for microstructure and junctional interface examinations. At the same time, diffusion pair intermediate region microhardness measurements were performed. Thus, it is aimed to determine the optimum diffusion source parameter and diffusion interface microstructure properties of 316 L type stainless steel and 4340 type tempering steel pair. As a result of a series of experiments, dense micro-voids and oxide formation occurred at the interface of the sample combined at a temperature of 900 oC and in 60 minutes. In other parameters, microstructural differences arose with the diffusion of C, Cr and Ni elements on the sides of non-corrosive steel and 4340 steel with diffusion interface phase.

***Keywords: Diffusion Bonding, 316 L Stainless Steel, 4340 Treatment Steel,
Thesis Advisor: Prof. Dr. Bulent KURT
Number of Pages: 53***

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	1
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	3
BÖLÜM 1	4
GİRİŞ	4
BÖLÜM 2	6
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1. Difüzyon Kaynağı	6
2.2. Difüzyon Mekanizmaları	7
2.2.1. İkame Difüzyon.....	7
2.2.2. Arayer Difüzyonu.....	8
2.2.3. Halka Mekanizmaları	9
2.3. Difüzyon Kanunları.....	9
2.3.1. I. Fick Kanunu.....	9
2.3.2. II. Fick Kanunu	9
2.4. Difüzyona Etki Eden Faktörler	10
2.4.1. Sıcaklık.....	10
2.4.2. Kristal Yapı	10
2.4.3. Yoğunluk.....	11
2.4.4. Tane Boyutu	11
2.4.5. Saflikları Bozan Maddeler	11
2.5. Difüzyon Kaynağı Uygulamaları	11
2.6. Difüzyon Kaynak Mekanizmaları	12
2.7. Difüzyon Kaynaklarını Etkileyen Faktörler.....	15
2.7.1. Basınç Etkisi	15
2.7.2. Metalurjik Etki	16

2.7.3. Sıcaklığın Etkisi	16
2.7.4. Zaman Etkileri.....	16
2.7.5. Ara Tabaka Etkisi.....	17
2.8. Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmiş Malzemeler	17
2.9. Difüzyon Kaynağının Uygulama Alanları	18
2.10. Difüzyon Kaynağının Diğer Metodlar İle Kıyaslanması	19
2.10.1. Difüzyon Kaynak Avantajları	19
2.10.2. Difüzyon Kaynak Dezavantajları	21
2.11. Difüzyon Kaynak Malzemelerin Mikro Yapıları ve Tane Boyutları	21
2.12. Difüzyon Kaynak Birleştirmelerinin Analiz Yöntemleri.....	23
2.12.1. Tahribatsız Muayane Tekniği	23
2.12.2. Tahribatlı Muayene Teknikleri	24
2.13. 316 L Paslanmaz Çelik.....	25
2.13.1. 316 L Paslanmaz Çelikler İle İlgili Çalışmalar	26
2.14. AISI 4340 Çeliği	28
BÖLÜM 3	31
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
3.1. Giriş.....	31
3.2. Difüzyon Kaynağı İçin Kullanılan Malzemeler.....	31
3.3. Difüzyon Kaynağı Cihazı.....	32
3.3.1. Numune Hazırlık Aşaması	33
3.3.2. Difüzyon Kaynağı İşlemi	33
3.4. Metalografik Analizler	33
3.4.1. Difüzyon İle Birleştirilmiş Numunelerin Optik Mikroyapı İçin hazırlanması	33
3.4.2. Difüzyon İle Birleşmesi Yapılan Malzemelerin SEM ile incelenmesi	34
3.4.3. EDX Analizi.....	35
3.5. Mikrosertlik Testi.....	35
BÖLÜM 4	36
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	36
4.1. Optik Mikroyapı Sonuçları	36
4.2. SEM Analizi Sonuçları	39
4.3. EDX Analiz Sonuçları.....	43
4.4. Mikrosertlik Analiz Sonuçları.....	47

KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	53



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1. Difüze kaynağının yöntemine en uygun metal çifti ve ara tabaka malzeme	18
Tablo 2. AISI 316 ve AISI 316L paslanmaz çeliğinin kimyasal içerikleri (% Ağırlık) .	26
Tablo 3.4340 çeliklerinin ısıtılma işlem özelliği [34].	28
Tablo 4. 4340 çeliklerinin % kimyasal kompozisyonu [34].	28
Tablo 5. 4340 çeliklerinin kritik sıcaklık değerleri [35].	29
Tablo 6. 316 L paslanmaz ve 4340 çeliklerinin kimyasal bileşimleri (% Ağ.)	31
Tablo 7. Mikrosertlik analiz sonuçları	47



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Difüzyonun gerçekleşebilmesi için ihtiyaç duyulan aktivasyon enerjisinin (θ) şematik görünümü.....	6
Şekil 2. Yer alan ve boşluk atom difüzeleri [8].	8
Şekil 3. Ara yer difüzyon mekanizması [9].	8
Şekil 4.Halka difüzyonunda atomların yer değişikli yapma modeli [2].	9
Şekil 5. (a) oda sıcaklıklarında ilk birleşme (b) I. Aşama: plastik akma ve sürünmeyle yüzey pürüzlülüklerinin deformasyonu, (c) II. Aşama: Tane sınırı göçü ve boşluklara atomun tane sınırı difüze ve (d) III. Aşama: Boşluklardaki atomların hacimsel difüzeleri	14
Şekil 6. 4340 çeliklerinin mekanik özelliği [35]......	29
Şekil 7. 4340 çeliklerinin TTT diyagramları [36]......	29
Şekil 8. 4340 Çeliğinde sürekli soğuma CTT diyagramı [36].	30
Şekil 9. 4340 çeliklerinin sertlik değişimlerinin karşılaştırılması [35]......	30
Şekil 10. Difüzyon kaynak makinasının fotoğrafı	32
Şekil 11. Optik Mikroskop.....	34
Şekil 12. SEM analiz cihazı	34
Şekil 13. Numunelerin Mikrosertlik Analizi Şematik Görünümü	35
Şekil 14. Vickers sertlik cihazı	35
Şekil 15. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı ($T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $t = 60$ dakika).....	36
Şekil 16. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı ($T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $t = 120$ dakika).....	36
Şekil 17. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı ($T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $t = 60$ dakika).....	37
Şekil 18. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı ($T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $t = 120$ dakika).....	37
Şekil 19. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı ($T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $t = 60$ dakika).....	38
Şekil 20. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı ($T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $t = 120$ dakika).....	38
Şekil 21. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları ($T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $t = 60$ dakika) 39	39

Şekil 22. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 900 °C ve t = 120 dakika)	40
Şekil 23. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 1000 °C ve t = 60 dakika)	41
Şekil 24. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 1000 °C ve t = 120 dakika)	41
Şekil 25. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 1100 °C ve t = 60 dakika)	42
Şekil 26. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 1100 °C ve t = 120 dakika)	43
Şekil 27. 316 L / 4340 çelik çiftinin 316 L tarafı EDX analizi	44
Şekil 28. 316 L / 4340 çelik çiftinin ara bölge EDX analizi	45
Şekil 29. 316 L / 4340 çelik çiftinin 4340 çeliği tarafı EDX analizi	46
Şekil 30. 900 °C' deki mikrosertlik izleri a) 1 saatte gerçekleştirilen difüzyon b) 2 saatte gerçekleştirilen difüzyon	47
Şekil 31. 1000 °C' deki mikrosertlik izleri a) 1 saatte gerçekleştirilen difüzyon b) 2 saatte gerçekleştirilen difüzyon	48
Şekil 32. 1100 °C' deki mikrosertlik izleri a) 1 saatte gerçekleştirilen difüzyon b) 2 saatte gerçekleştirilen difüzyon	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

R	Gaz sabiti
J	Joule
°C	Santigrat derece
K	Kelvin
Q	Aktivasyon Enerjisi
T	Sıcaklık
Ni	Nikel
C	Karbon
Cr	Krom
MPa	Megapascal
µm	Mikrometre
gr	Gram
σ	Sigma

Kısaltmalar

YMK	Yüzey Merkezli Kübik
AISI	Amerikan demir ve çelik Enstitüsü
HMK	Hacim merkezli kübik
XRD	X-ışını Difraksiyonu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	Enerji Dağılımlı Spektroskopi
dk	dakika

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Difüzyon kaynağı, farklı ya da aynı cins iki veya daha fazla malzemenin akma dayanım değerlerinin altında basınç ve rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde ergime meydana gelmeden yapılan bir katı hal kaynak tekniğidir.

Difüzyon kaynağının kullanımı, son zamanlarda nükleer santralde, uzay biliminde ve elektrik-elektronik endüstrisinde meydana gelen hızlı gelişmelerden dolayı artmıştır. Uzay araçları ve uzay bileşimlerinin parça kısımlarında, nükleer santrallerin yakıt çubuğu koruyucu bağlantılarında da bu teknik uygulanmaktadır. Askeri uçaklar ve yolcu tipi uçaklarda, dayanımı yüksek ve uzun olan kanat parçaları difüzyon kaynağı ile birleştirilmektedir [1].

Genel olarak difüzyon kaynağı katı hal kaynak tekniğidir. Malzeme ergitilme sıcaklıklarından düşük bir sıcaklıkta uygulaması yapılan, katı hal difüzyon dayanan tekniktir. Difüzyon ile gerçekleştirilen işlemlerde, ana metal malzeme ergitilmeden birleştirme yapıldığı, ön ve son ısıl işleme gerek duymadan, seramik ve kompozit malzemelerin diğer malzemeler ile birleştirilmesini yapabildiği için, diğer kaynak yöntemlerine kıyas ile daha üstünlük sağlayan bir birleştirme tekniğidir [2].

Difüzyon çiftinin bir tarafını oluşturan ostenitik paslanmaz çelikler yüksek Cr ve Ni içerikleriyle bilinir. Bu çelikler, üstün mekanik ve korozyon dayanımlarından dolayı başta gıda sektörü olmak üzere, uzay-havacılık, askeri, otomotiv, denizcilik alanlarında ve medikal ürünlerde kullanılmaktadır [3-4]. 304 ve daha düşük C içereğine sahip 304L tipi ostenitik paslanmaz çelikler kaynak edilebilirliğinden dolayı paslanmaz depo imalatında tercih edilirler. 316 ve 316L tipi ostenitik paslanmaz çelikler ise 304 serisinin yetersiz kaldığı durumlarda kimyasallara ve aşınmalara karşı daha iyi direnç istenen uygulamalarda kullanılmaktadır [5]. 316 L tipi paslanmaz çelikler, tıbbi cihaz, medikal makineler ve tezgahları, laboratuvar ekipmanları, bağlantı ekipmanları, cıvata, somun, vida, yay ve savunma sanayi gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Difüzyon çiftinin diğer çeliği ise AISI 4340 çeliğidir. Orta karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler grubunda olan 4340 çeliği, hava araçları, dişliler, miller, pistonlar, bağlantı ekipmanları ve otomobil parçalarını da içeren ısıl işlem ve mekanik özelliğinin istendiği

uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, birbirinden farklı AISI 316L tipi ostenitik paslanmaz çelik ve orta karbonlu AISI 4340 çelik çifti farklı sıcaklık ve sürelerde difüzyon kaynağı tekniği kullanılarak birleştirilmiş ve birleşme bölgesi mikroyapısı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.



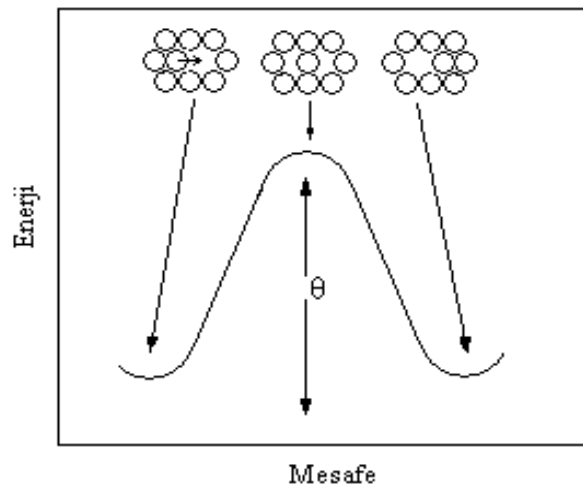
BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Difüzyon Kaynağı

Difüzyon, malzeme içerisinde bulunan atomların hareket edebilmesidir. Atomlar konsantrasyon farklılıklarını ortadan kaldırmak ve homojen bir kompozisyon meydana getirmek için düzgün bir şekilde hareket ederler. Tamamen saf, katı malzemede atomlar belirli bir kafes yapısından diğer kafes yapısına hareket ederken alaşımlarda konsantrasyon farkından ötürü benzerlik göstermeyen atomların difüzyonu söz konusudur [6]. Aynı zamanda difüzyon “yayınım” olarak ifade edilmektedir.

Difüze halinde bulunan atomlarda yeni yerine geçebilmek için çevrede bulunan atomlara baskı uygulayarak geçmek zorunda kalmaktadır. Bu olayın meydana gelebilmesi için, atomların yeni konumuna geçmesini sağlayacak enerji sağlanmalıdır. Bu olay, Şekil 1’de şematik olarak yer almaktadır. Atomlar ilk pozisyonunda nispeten kararlı durumda ve düşük enerjili olarak yer almaktadır. Yeni bir bölgeye hareket edebilmesi için, enerji engelini geçmek zorundadır. Bu enerji aktivasyon enerjisi olarak bilinir ve Q ile gösterilmektedir. Ne kadar az bir aktivasyonu enerjisi, o kadar kolay difüzyon demektir [6].



Şekil 1. Difüzyonun gerçekleşmesi için ihtiyaç duyulan aktivasyon enerjisinin (θ) şematik görünümü

Malzemenin içerisindeki atomun difüzyon hızları, birim zaman içerisinde, birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayıları olarak bilinen akı “J” ile tespit edilmektedir.

$$J = -D \cdot \Delta c / \Delta x \text{ (Birinci Fick kanunu)}$$

$$J = \text{Atom akısı (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$$

$$D = \text{Difüzyon katsayısı [m}^2\text{s}^{-1}\text{]}$$

$$\Delta c / \Delta x = \text{Konsantrasyon gradyanıdır (m}^3 \text{ m)}^{-1}$$

Gradyanlar, malzeme bileşimlerinin uzaklıkları ile nasıl bir değişim içerisinde olduğunu gösterir. Δc , Δx uzaklığında konsantrasyonda ki farktır.

Difüzyon katsayıları, aşağıda yer alan formül ile çözümlenmektedir.

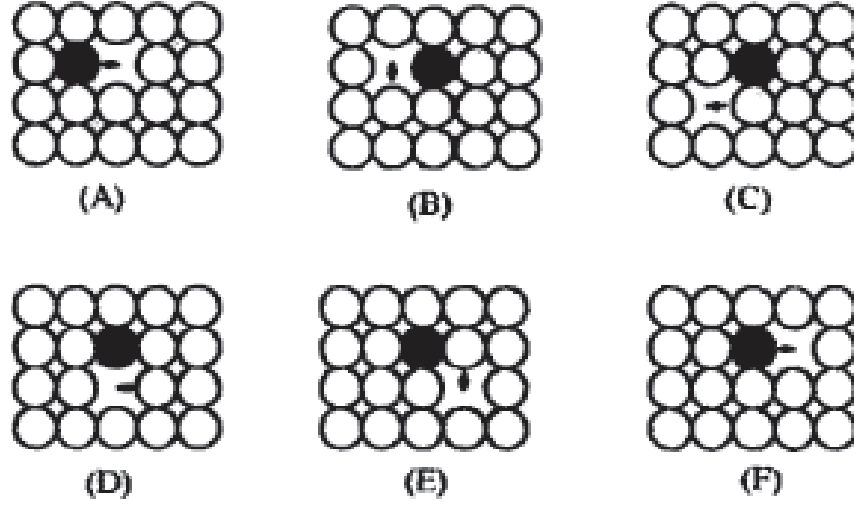
$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

Burada yer alan Q aktivasyon enerjisi olarak görülürken, R gaz sabitidir. T mutlak sıcaklık, D_0 ise belirli bir difüzyon sistemleri içinde yer alan bir sabittir. Malzeme içerisindeki sıcaklık artış gösterdiği zaman, difüzyon kat sayıları arttığı gibi atom akısında artış göstermektedir.

2.2. Difüzyon Mekanizmaları

2.2.1. İkame Difüzyon

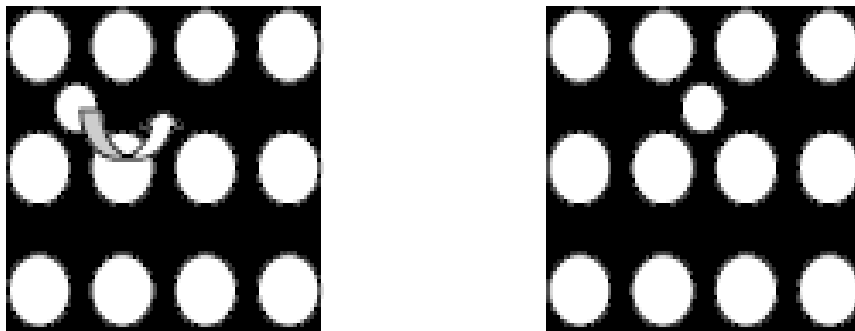
İkame difüzyonlarında atomlar, sadece komşu kafes noktalarından birinin boşluk oluşturması durumunda sıçrama hareketi gösterebilir. Saf metalde bulunan atomların tabi difüzyonları, ikame difüzyonunun en basit şeklidir. İkame difüzyonundaki atomlar, genellikle boşluk mekanizması ile difüze gerçekleştirirken, çapları daha küçük olan ara yer atomları, daha büyük çaptaki atomların arasında ilerlerken çok zorlanacaktır. Normal şekilde, yer alan atomların hareketleri, kafes komşuları tarafından sınırlandırılmakta olup, atomlar başka kafeslere kesinlikle hareket edemezler. Beraberinde komşudaki nokta boş ise, Şekil 2’de gösterildiği üzere, atomlar boşluklara geçecektir [7].



Şekil 2. Yer alan ve boşluk atom difüzeleri [8].

2.2.2. Arayer Difüzyonu

Mekanizma içerisinde çözünmekte olan atomun, içerisinde çözüldürdüğü diğer malzemelerin atomlarından maksimum küçüklükte ise çözünebildiği atomlar arasındaki ara yer alanlarından birini doldurabilmektedir. Mekanizmaların gerçekleşebilmesi için kesinlikle boşluk bölgelere gerek yoktur. Ayrıca mekanizma içerisinde matris atom hiçbir şekilde yer değişikliği yapmazlar. Şekil 3.'de arayer mekanizmaları ile ilgili görsel verilmiştir.



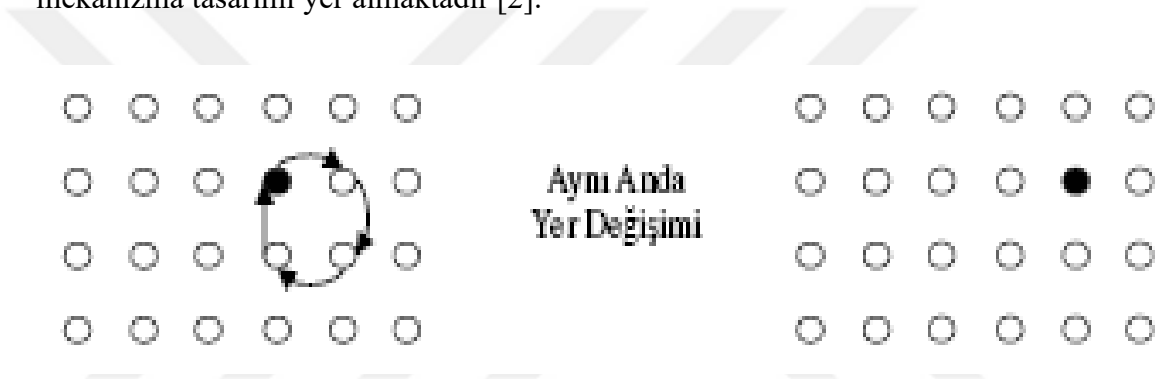
Şekil 3. Ara yer difüzyon mekanizması [9].

Fe, Cr, Ni, Mn, W, Ti gibi geçiş elementleri B, C, H, N gibi atom yarıçapları küçük elementler ile ara yer katı çözeltileri meydana getirmektedir. Malzeme içerisindeki ara

yer noktaları, kübik kafeslerin köşe bölgelerinin orta noktasındadır. Bu noktalar genel anlamda oktahedral nokta olarakta yer alırlar [9].

2.2.3. Halka Mekanizmaları

Metal malzemelerde genellikle ara yer ve boşluk difüzyon mekanizmaları görünsede az da olsa karşılaşılmış diğer mekanizma ise, halka difüzyon mekanizmasıdır. Kristal yapılar içerisinde birbirleri ile temas ederek halkaların meydana getirdiği atomların, aynı zamanda ve aynı yön doğrultusunda hareket etmeleri ile her birinin yerlerini almaları ve oluşturabildiği yeni konumlarına geçebilmeleridir. Şekil 4.'de halka mekanizma tasarımı yer almaktadır [2].



Şekil 4.Halka difüzyonunda atomların yer değişikli yapma modeli [2].

2.3. Difüzyon Kanunları

2.3.1. I. Fick Kanunu

Heterojen olarak bulunan malzeme de yer alan konsantrasyon değerlerinin farklılıkları buradaki parçaların belirli bir yöne doğru hareket edebilmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı heterojen malzemedeki difüzyonlar tekniksel yönden daha önemlidir [10]. Bu durum matematik hesaplamaları olarak I. Fick kanunları ile söylenmektedir.

2.3.2. II. Fick Kanunu

II. Fick kanunu, I. Fick kanununa kıyas ile daha kararlı bir davranış göstermektedir. Lakin gerçek anlamda bu şekilde olmamaktadır. Metallerin difüze katsayılarının deneysel tespitlerinde I. Fick kanunları oldukça yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı; bu katsayılarının tespit edilebilmesi için II. Fick kanunlarından daha fazla faydalanılmaktadır. I. Fick kanunlarının, II. Fick kanuna geçebilmesi için dx kadar olan mesefa içerisinde 2 paralel yüzey ile sınıflandırılmış hacim elemanları tercih

edilmektedir [11].

II. Fick kanunlarının sahip olduğu uygulama alanları aşağıda yer almaktadır ;

- Galvanizleme işlemleri,
- Lehim
- Kaynak
- Çeliklerin dekarbürizasyonları,
- Sementasyon işlemleri [10].

2.4. Difüzyona Etki Eden Faktörler

Difüzyona etki eden faktörler; Sıcaklık, yoğunluk, kristal doku, tane boyutu ve saflığı dağıtan maddeler olarak bilinmektedir.

2.4.1. Sıcaklık

Difüzyon için sıcaklık, dikkat edilmesi gereken bir husustur. Sıcaklık derecesinin 20⁰C'lik artışı ile difüzyon sabit olarak her zaman iki katına yükselecektir. Denklem 1.'de sıcaklık ve difüzyon sabiti ile aralarındaki bağlantı gösterilmektedir.

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (\text{Denklem 1})$$

T : Mutlak Sıcaklık (K)

R : Gaz sabiti (Yaklaşık 1,987 cal/mol)

Q : Aktivasyon enerjisi (kcal/mol)

D₀ : Yayınan atomların titreşim frekansına bağlı yayınma katsayısı (cm²/s)

Gaz sabiti, aktivasyon enerjisi, yayınma kat sayıları bağımsız olarak bilinirler. Malzemelerin sıcaklıkları arttırıldığında, difüzyon kat sayıları ve atom akıları (J) artmaktadır [10-12].

2.4.2. Kristal Yapı

Kristal yapılarda en önemli etken sıcaklık değişimleridir. Ergitilmiş bir demirin yüksek sıcaklık derecelerinde hacim merkezli kübik (HMK) yapılardan yüzey merkezli kübik (YMK) yapılara dönüşümü allotropik olarak gerçekleştirilir ve bunun sonucu olarak

kristal dokularda karbon (C) ergitilerek değişmektedir [13-14].

2.4.3. Yoğunluk

Kimyasal bileşimin mesafeye bağlı olarak değişimi aslında yoğunluk değişimidir. Bu yoğunluk değişimleri difüzyon çitlerinde görülmektedir. Etkileri, arayer katı eriyiklerde daha net bir şekilde görülmektedir. Yoğunlukların konsantrasyonlara bağlı olduğu zamanlarda bile, difüzyonun hafif ergimiş içerisinde ya da küçük konsantre alanları içerisinde bulunmasından dolayı, yoğunluğu sabit kabul görmenin faydalı olacağı kabul edilmiştir [10].

2.4.4. Tane Boyutu

Tane sınır difüzyonları, yapı içerisindekinden hızlı olduklarından dolayı difüze derecelerinin ince boyutlu metal malzemelerde daha çok yüksek olması beklenmektedir. Bunun sonucunda alışlagelmiş, tane boyutları ölçümünde difüzyon analizleri yapılırken tane boyutları hesaplarına gerek kalmaz [10].

2.4.5. Saflikları Bozan Maddeler

Difüzyonlarda tercih edilen alaşım elementlerinden birkaçı veya saflığı bozan maddeler difüze üzerinde çok az bir etki yapmaktadır. Fakat, demir alaşımını diğer alaşım elementlerine kıyas ile biraz daha fazla etkisi olmaktadır. Demir elementinin yer değiştirme özelliklerine, alaşım elementlerinin etkileri oldukça mühimdir [10-12].

2.5. Difüzyon Kaynağı Uygulamaları

Difüzyon kaynağı, bilimsel çalışmalarda ve endüstride çok geçmişe sahip katı hal kaynak teknikleri olarak bilinmektedir. Oldukça çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Difüzyon kaynağı; birleştirilmeleri üzerine eşleşmeleri yapılmış olunan iki farklı yüzeyin, ergime sıcaklıkları altındaki sıcaklıkta, plastik akmalara sebep olmayacak basınç değerinde, difüze yolu ile beraber malzeme aralarında metalurjik bir bağ meydana gelinceye kadar, malzemenin özelliğini önemli bir ölçüde etkilemeyecek sürede beraber tutulması ile uygulanabilen bir kaynak yöntemidir [15].

Bu olayda oluşan birleşme temas yüzeyine uygulanmış yüksek sıcaklıkta uygulanan basınç sayesinde gerçekleşir. Bu olaylar ideal olarak makro seviyede ki deformasyona, ergimeye ya da parçaların karşılıklı hareketini engelleyecektir. Malzemenin ara tabakası kullanılmış ise, sıvı difüzyon kaynağı meydana gelecektir [16].

Birbirlerinden değişik iki malzemenin yüzey kıyaslamasında meydana gelen çekim kuvvetlerine adhezyon kuvvetleri denmektedir. Aynı zamanda birbirinden farklı iki malzemenin bir araya getirilmesi, yüzey aralarında bağın oluşmasını sağlarken aynı cinsteki farklı malzemelerde kohezyon, farklı türdeki yüzey aralarında adhezyon birleşmelerini sağlamaktadır. Kohezyon ve adhezyon işi serbest yüzeylerin enerjilerinin fonksiyonlarıdır. Ayrı olarak iki gevrek malzemenin ya da bir gevrek bir sünek malzemenin oluşan bir bağlantı için adhezyon işi, bağlantı kuvvetlerinin bir ölçüsü olarak bilinmektedir. Bu kuvvetlerin oluşabilmesi için, malzemelerin kesinlikle birbirlerine yakınlaştırılması gerekmektedir [17].

Malzeme yüzeylerinin aralarında birleşimin sağlanabilmesi için, malzeme yüzeyinin atom arası bağların oluşabilmesi yakınlığında birbirlerine yakınlaştırılması gerekmektedir. İki malzemenin, difüzyon ile birleştirilmesinde, kimyasal bağlarına bakmadan en önemli etken Van der Waals kuvveti olduğu bilinmektedir. Metalin yüzeyindeki yabancı etmenlerin engellenmesinde tercih edilmektedir. Birleşimi meydana getirecek en önemli etkidir. İlk oluşum bağından sonra sıcaklık yardımı ile difüzyon işlemi başlar ve yüzeydeki ara kesitlerin boşlukları doldurulur [7].

Genel olarak bu durum şu şekilde ifade edilebilir; kontrollü bir şekilde difüzyon adımlarını başlatabilmek için, yüzeylerin artıklardan ve makro pürüzlülüklerden arındırılacak bir şekilde temas haline getirilmeleri gerekmektedir. Bu temastan dolayı, atomlar arasında bağ oluşumlarına imkan verebilmek için aralarında bir yakınlığın meydana gelmesi gerekmektedir. İlk bağ meydana geldikten sonra, sıcaklık yardımı ile difüzyon başlamaktadır. Yüzeydeki ara kesitlerinde boşluk tamamen dolduracaktır [18].

2.6. Difüzyon Kaynak Mekanizmaları

Günümüz zamanında difüzyon kaynak mekanizmaları ile alakalı birbirinden farklı ve çok sayıda tasarımlar yer almaktadır. Bu konulardaki ilk bilimsel çalışma 1944 yılında Kinzel tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonraları Garken ve Owczarski tarafından üç

adımlı bir sistem 1965 yılında bilim dünyasına sunulmuştur. Sonra ki süreçlerde ise Shwartz, King ve Owczarski tasarımları birbirleri ile yakın benzerlikli olduğundan, kendi tasarımlarının son durumlarını, Garken ve Owczarski tasarımlarının ilk adımları ile birleştirmişlerdir. Bu tasarımlara göre ilk adımları, birleştirilecek olunan yüzeyin basınç altında temasları ve sürünmeler meydana getirmektedir. İkinci adımda, birinci adımda yok edilememiş ara kesitteki boşluklar difüze yolu ile ortadan kaldırılmakta ve arakesit tane sınırları daha düşük bir enerji ile yani ara kesitteki düzlemi dışına atmaktadır [19].

Kawakatsu ve Kitayama, üç metalurjik faktör olan katı eriyik, çift faz ve intermetalik malzeme grupları arasında oluşmaktadır. Gerçekleştirmiş oldukları çalışmalar, Cu-Ni, Cu-Ag ve Fe-Al çiftlerini birleştirme şartlarının fonksiyonları olarak sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemelerini yapmıştır. Rekristalizasyon sıcaklıklarının üstünde bir süre bekleme yaptıktan sonra ara yüzeylerin ortadan kalkacağı fakat çift fazlı intermetalik malzemelerde bu durumların meydana gelmeyeceği sonuçlarına ulaşmışlardır [20].

Derby ve Wallach, basınç altında uygulanan sinterleme ile ilgili inceleme gerçekleştirmişlerdir. Buna bağlı kalınarak aşağıdaki mekanizmaları sıralamışlardır [19];

- Yüzey alandan kaynaklı mekanizma: arakesit bölgesindeki boşluklardan, boşluk uzunlukları devamınca hacimsel ve yüzeysel difüzeler
- Arakesit bölgelerindeki mekanizmalar: birleşim yapabilmesi boyunca kimyasal potansiyelinin değişimin belirlediği hacimsel ve tane sınır difüzeleri.
- Sıvı fazların kütleli değişimi: Thomson-Gibbs etkileri, yani yüzeysel eğrilikteki bölgesel farkdan meydana gelen basınçsal farkı.

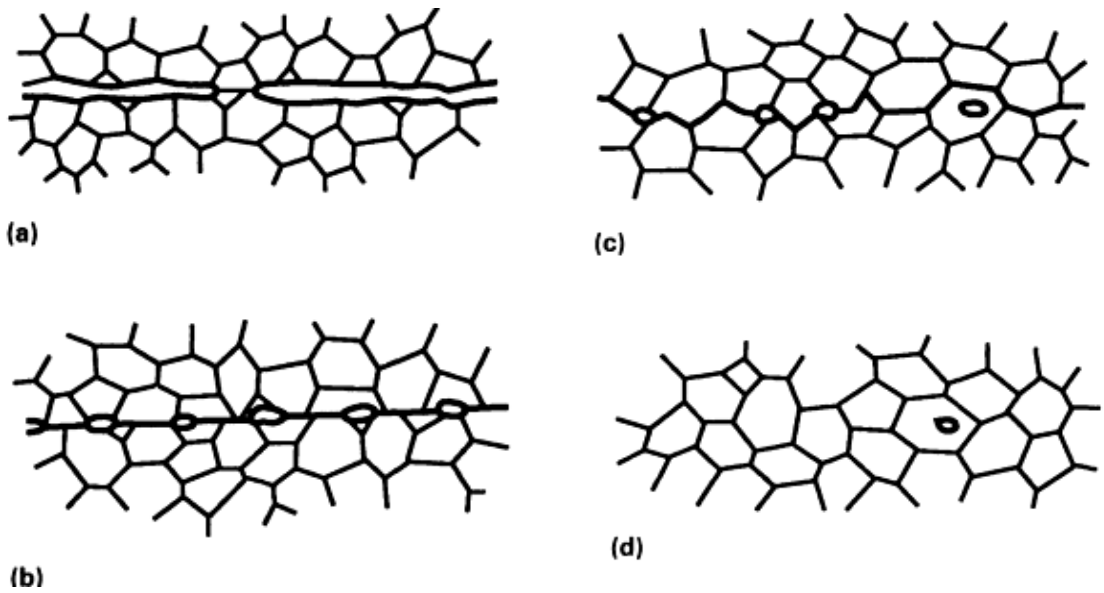
Günümüze kadar, difüzyon kaynakları üzerine bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

Washborn ve Mohamed'in, yüzey oksitinin kırılması üzerine iki adımlı mekanizma sistemleri önermiştir. Çalışmaları, Al' un difüzyon kaynağından oksit kırma üzere, geliştirilen tasarım ile desteklediği anlaşılmıştır. Yüzeyin ya da ara kesitin bileşenlerin göçü ya da segregasyonu detaylı şekilde analiz edilmiştir. Cahn, ara yüzey enerjilerini termodinamikten yola çıkarmıştır. Kafes parametresinin yüzey gerilimleri, elastik

enerjileri ve serbest enerji ile nasıl değişebildiğini düşünmüşlerdir. Cline, deformasyon ve difüzyon birleştirme esnasında ki farkları ortaya çıkarmıştır. Difüzyon birleştirmelerde kayda değer bir deformasyonun olmasının gerekmediği görülmektedir. Birleşimin olabilmesi için mikroskobik deforme ve difüzyon olmak üzere 2 aşama belirtilmektedir. Bartle, Hrivnak ve Hauser, ilk adımda birleştirmeye yardımcı olan etkenin, deformasyon mekanizmaları olduğunu ileri süren bir tasarım planlamışlardır. Guo ve Ridley, yüzey pürüzlülüğüne en optimum olan, ara yüzeydeki boşluğun yer değiştirmelerine dayanmış bir tasarım geliştirmesi yapmışlardır. Bu tasarımın daha önceleri verilen tasarımdan farklı olarak boşluk geometrileri olduğu kanısına varmıştır [20].

Yukarıda anlatılan mekanizma tasarımları saf metal ve tek faz ile ilgilidir, çift faz malzemede difüzyon kaynağının mekanizması üzerine bu güne kadar tek bir çalışma gerçekleşmiştir. Yeni bir yüzeyel profili tercih edilerek difüzyon kaynakları esnasında etkili olan bütün muhtemel mekanizmayı yansıtan yeni bir difüzyon kaynağı Orhan N. tarafından tasarımı gösterilmiştir [19]. Açıklanan hususlar düşünülerek difüzyon kaynağının mekanizma sistemleri aşağıdaki gibi güncelleme yapılmıştır.

Difüzyon birleştirmelerinde, esas itibari ile atomik olarak birden fazla yüzeyin birleşmesidir. Tam birleşim, 3 adımlı olarak metalurjik bir düzenin içeriğinde meydana gelmektedir. Bunun ile ilgili tasarım Şekil 5.'de gösterilmektedir [21].



Şekil 5. (a) oda sıcaklıklarında ilk birleşme (b) I. Aşama: plastik akma ve sürünmeyle yüzey pürüzlülüklerinin deformasyonu, (c) II. Aşama: Tane sınırı göçü ve boşluklara

atomun tane sınırı difüze ve (d) III. Aşama: Boşluklardaki atomların hacimsel difüzeleri

Her bir adım, Şekil 5' de gösterildiği üzere birleşme yöntemlerine uygun metalurjik bir sistem ile benzer şekillerde oluşum sağlamaktadır. İlk adımda ara yüzeylerdeki pürüzlülüklerinin öncelikli olarak akma ve sürünme deformasyonu mekanizması ile görülmektedir. Oda sıcaklıklarında deforme genişlikleri sınırlı olarak görülmüştür. Difüzyon sıcaklık dereceleri arttırıldığında, malzemelerin akma dayanımları düşmektedir. Pürüzlülük deformeleri plastik akma ile oluşum sağlamaktadır. Uygulaması yapılan sıcaklığın yanında zaman ve sürünme pürüzlülük deformelerinin oranları kontrol edilmektedir. Bundan dolayı da temas alanları büyümeyi devamlılık gösterecektir. Bu alanların büyümelerinden dolayıda pürüzlülük değeri düşecektir. İşlemler tamamlandıktan sonra pürüzlük boyutları düzlemsel bir bölgeye dönüşecektir. Bu birleştirmenin ilk adımlarının sonuçlanması ile yaklaşma alanlarının genişlikleri oldukça önemlidir.

İkinci adımda, deformelerden difüzyon oluşması meydana gelmektedir. Ara yüzeyde oluşacakları yarım fazlası tane sınır noktalarındaki atom difüzeleri sayesinde kaybolacaktır.

Üçüncü adımda ise, hacim difüzyonu sayesinde kalan boşluklar kaybolacaktır. Bu aşamalarda boşluk kısımları çok küçülecektir. Bu şekilde birden çok etken yok olacaktır. Bundan dolayı tane sınırlarında tutunabilme etkisi azalacaktır. Bu yüzden aradaki yüzeysel sınırlar, mikroyapılardaki diğer tane sınırlarından ayırt edilmeksizin bir denge meydana gelmesi için oluşuma başlayacaktır. Difüze işlemleri, meydana gelen boşlukların yok olmasına kadar devam edecektir. Gözenek hacimlerinin kayıp edilmesine rağmen, bağlantı sertlikleri açılarından daha fazla zamana ihtiyaç duyulacaktır [21].

2.7. Difüzyon Kaynaklarını Etkileyen Faktörler

Difüzyon kaynakları öncelikli olarak basınç, sıcaklık, zaman, metalurjik faktör ve ara tabakalar gibi parametrelerin etkisi altında kalmaktadır.

2.7.1. Basınç Etkisi

Difüzyon kaynağı birleştirmelerinde basıncın etkisi, işlemlerin birkaç adımında etkili

olup, oldukça değişkenlik göstermektedir. Bağlantılardan olumlu sonuç alabilmek için, uygulanan basınçla birlikte ara yüzey deformesi ve pürüzün yok olması ile mümkün olacaktır. Difüzenin iyi olması için gerekli olan basınç etkisi, aynı zamanda sıcaklık ve zaman ile de ilgilidir. Üretim ve ekonomik açıdan düşük kaynak basınçları tercih sebebi olmaktadır. Uygulanan basıncın işlem sıcaklığı ile birlikte malzemelerin akma dayanım değerinin üzerine çıkması kesinlikle istenmemektedir [22].

2.7.2. Metalurjik Etki

Metalik malzemelerde alaşım elementlerinin ilave edilmesi ve yapı içerisinde bulunan empüriteler, difüzyon katsayılarını etkiler. Yüksek difüzyon yeteneklerine sahip elementler, ara bölgelerdeki boşlukların doldurulmasını hızlandırarak difüzyon kaynaklarına etki etmektedir [22].

2.7.3. Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklık, birçok nedenden dolayı difüzyon kaynakları için önemli bir etkidir. Bunlar;

- Öncelikli olarak, sıcaklık dereceleri kontrol edilebilir ve ölçümü yapılan bir etkidir.
- Diğer işlem değişkenleri ile karşılaştırıldığında işlem kinetikleri üzerinden büyük bir değişim göstermektedir.
- Difüzyon kaynağındaki tüm sistemler sıcaklığa duyarlıdır.
- Yüksek sıcaklıklardaki mekanik ve fiziksel özellikleri, kritik sıcaklıkları ve faz dönüşümleri difüzyon kaynağının etkili kullanımlarında önemli bir referans olacaktır [22].

2.7.4. Zaman Etkileri

Zaman, süreye bağlı olarak değişimi ifade eden difüzyon kontrollü etkileşimlerde sıcaklık ile yakından ilişkili olmuştur.

Kaynaklanma zaman dilimi ile bağlantı mukavemetlerinin aralarındaki ilişkileri, oldukça kolay değildir. Metalik malzemeler arası birleşimlerin oluşması için, tanelerin

büyütülmesi; özellikle süper plastik şekillendirme performansları ve bağlantı mukavemetleri, zaman uzadıkça olumsuz bir şekilde etkisi olacaktır. Endüstri uygulamada difüzyon kaynaklanma süresini kısa tutma, ekonomiklik bakımından oldukça kıymetlidir [7].

2.7.5. Ara Tabaka Etkisi

İki malzemeyi birleştirmede kullanılan ara bölgede tercih edilen tabakanın, oldukça yumuşak olması tercih edilmektedir. Bu ara tabakanın ilk amacı yüzeyde yumuşak bir alan oluşturmaktadır. Bu tabakalar kaynakların birinci adımı için gerekli olan basınçtan daha az bir basınç ile plastik deformelere izin vermektedir. Ara tabakalar, kaynaklanacak yüzeylere elektrolitik şekilde kaplanacak ya da püskürtülecektir. Eş zamanda toz partikül olarak ya da folyo şeklinde de olabilmektedir. Bu ara tabakalar, kaynaklanma sıcaklıklarında eritilmemelidir. Ana malzeme ile ergitme sıcaklıkları düşük olarak ötektik bir oluşum yapmamalıdır [23].

2.8. Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmiş Malzemeler

Endüstri alanlarının değişmesi ve gelişmesi nedeni ile birçok farklı uygulama alanında kullanılarak malzemelerin özel bir birleştirme tekniklerine ihtiyaçları olmuştur. Bundan ayrıyeten malzeme bilimindeki gelişim, farklı malzemenin ortaya çıkması ve üretiminde özel bir tekniğin kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Farklı uygulamalarda, farklı amaçlar ile kullanılmakta olan malzemeler birbirleri ya da farklı malzeme ile birleştirilmesi mümkün olacaktır. Başarılı ve yaygın olarak kullanılan uygulama Titanyum alüminidleri, yüksek mukavemetli Al alaşımı, Ni esaslı alaşımlar, Cu malzemeler, çelikler, metal-matrisli kompozit ve seramik malzeme difüzyon kaynakları ile birleştirilmektedir [1-24]. Difüzyon kaynaklarında uygun olan malzemeler ve ara tabakalar Tablo 1.'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Difüze kaynağının yöntemine en uygun metal çifti ve ara tabaka malzeme

Metal 1	Ara Tabaka	Metal 2
Molibden	Titanyum	Molibden
Mo-% 0.5 Ti	Titanyum	Mo-% 0.5 Ti
Tungsten	Niobyum	Tungsten
Niobyum	Zirkonyum	Niobyum
Tantalyum	Zirkonyum	Tantalyum
Yüksek Alaşımli Çelik	Berilyum	Yüksek Alaşımli Çelik
Yüksek Alaşımli Çelik	Niobyum- Berilyum	Yüksek Alaşımli Çelik
Titanyum	Molibden	Bakır
Titanyum	Niobyum	Bakır
Molibden	Nikel	Yüksek Alaşımli Çelik
Zircaloy	Bakır	Zircaloy
Berilyum	Altın	Bakır
Berilyum	Ag-Cu	Bakır
Berilyum	Ag-Cu-In	Bakır
Alüminyum	Bakır	Kovar
(%53 Fe, %29 Ni, %17 Co)		

Difüzyon kaynaklarının en yaygın olarak uygulandığı malzemeler Titanyum ve titanyum alaşımlarıdır. Titanyum, yüksek sıcaklığında oksitlerini yüzey artığını çözebilme kabiliyetleri, ara malzemesiz olarak da kaynaklanabilmesi ile difüze uygulamalarında oldukça elverişlidir. Kaynak birleşebilme yüzeyinde yüzey temizliklerine ihtiyaç olmaması da difüzyon kaynağı uygulamalarını basitleştiren başka bir etken olarak bilinmektedir. Fakat ergitme kaynakları uygulamalarına uygun olmayışı bu malzemelerin katı hal kaynakları uygulamalarını zorunlu hale bırakmaktadır.

Alüminyum ve metalürji işlemleri ile uyumluluğu olmayan Cu arasında birleştirme tekniği olarak sıklıkla difüzyon birleştirme tercih edilmiştir [1-12].

2.9. Difüzyon Kaynağının Uygulama Alanları

Difüzyon kaynağı, birden fazla önemli özellik gösterebilen özel bir kaynak yöntemidir. Kullanım alanı olarak, mühendislik konusu, havacılık, uzay sanayisi, elektronik sanayi ve nükleer endüstri gibi bir çok alanlarda kullanılır.

Genel mühendislik uygulamalarında genel olarak; kaynakların çatlama ve gevrek olan malzemelerin arası kaynaklar sonrası istenmeyecek yapının meydana gelmesi durumlarında tercih edilmektedir. Bunlara örnek ise, yüzeylerin kaplanması, döküm ve dövme parçalarında difüzyon kaynağı uygulamalarıdır.

Havacılık sektöründe, daha ekonomik, verimli, hafif ve daha yakın olan malzeme imalatlarını sağlamak, havacılıkta gelişimlere yardımcı olabilmektir. Havacılıkta üretilen malzemeye örnek vermek gerekirse; uçak türbin kanadı, bombardıman uçakları için patlama lüleleri, füze yuvaları, uçak iniş kapıları örnek olarak gösterilebilir [8-12-25].

Nükleer endüstrisinde difüzyon teknikleri uygulama alanları çok tercih edilmektedir. Reaktörlerde tercih edilen çeşitli ekipmanın imalatı bu teknik ile üretim sağlamaktadır [26].

2.10. Difüzyon Kaynağının Diğer Metodlar İle Kıyaslanması

Avantajlı yönleri bakımında difüzyon kaynakları diğer birçok kaynak metodlarından sanayi ve mühendislik alanlarında oldukça tercih edilen özel bir birleştirme metodudur. Farklı birçok birleştirme yöntemlerinden ayrılmış bir tekniktir. Avantajlarının yanı sıra birden fazla dezavantajları da bulunmaktadır. Bunların sebepleri ise, diğer birleştirme tekniklerinin yerini doldurmasıdır. Fakat; kaynaklanma probleminin çözülmesinde oldukça etkili bir rolü bulunmaktadır.

2.10.1. Difüzyon Kaynak Avantajları

- Difüzyon kaynakları, birbirinden farklı malzeme içeriğinde homojen dağılımlar ve gerilmesiz bağlantı hazırlanabilmesini mümkün kılabilir. Farklı birleştirme tekniklerinde en büyük sorun olarak, meydana gelen gerilme probleminin fazlalıkları ve ısısından dolayı malzemede oluşan mikro seviyede ki yapı bozukluğudur. Difüzyon birleştirmelerinde bu problem büyük oranda ortadan kalkmaktadır.
- Uygulama anında, difüzyon ile birleştirmede ana malzemede istenmeyecek metalürjik yapının meydana gelmesi oldukça düşüktür. Ana malzeme içerisinde oluşmayacak metalürjik yapı malzeme yapılarını bozmakta ve iyi

olmayan bir birleştirme meydana gelmesine sebebiyet vermektedir.

- Malzeme gruplarının bazılarında ergitme kaynakları ile birleştirme mümkün olmamaktadır. Ergitme kaynaklarının, ısının etkisi altında oluşan alanda malzeme ergimesi nedeni ile malzemede mikroyapısal olarak değişkenlik gösterecektir. Bundan dolayı da homojenlik yavaş yavaş yok olacaktır. Nedeni difüzelerin, malzemeler aralarındaki potansiyel farkları gerçekleştirilen katı hal birleştirmelerdir.
- Malzemeler katı halde birleşme sağlarlar. Metalürjik şart, genel anlamda kolay ve uygun etki altındadır. Çünkü çekmeler az, gerilmeler oldukça küçük boyuttadır. Tam bu zamanda, difüzyon kaynakları diğer birleştirmelerden farklılaşır.
- Difüze kaynaklar, yer çekimsiz bir alanda iyi bir birleştirmeye hakimdir. Fakat bunun ile beraberinde koruyucu bir gaz atmosferi tercih edilmesi kaynaklanma kalitelerinin daha iyi olmalarını sağlamaktadır.
- Parçada oluşan deformeler, birleştirmede sınırları küçük olabilir, dolayısı ile birden fazla uygulama alanlarında ikinci bir işleme ihtiyaç duyulmamaktadır. Ergitme kaynaklarında öngörülen deformelere hiçbir şekilde tavlama ihtiva edilmez.
- Difüzyon birleştirmelerinde, kaynaklanma uygulaması tam otomatik olarak gerçekleştirilir. Dolayısı ile profesyonel elemana ihtiyaç diğer tekniklere göre oldukça düşüktür.
- Metalürjik bakımından birbirinden farklı ve birbiri ile uyumsuz iki farklı metal veya bir metal ile metal olmayan bir birleştirme olarak görülmektedir.
- Diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında tamamen kontrollü bir birleştirme yöntemidir.
- Diğer malzeme grubu olan kompozit ve seramikler, metal ve diğer malzeme ile

birleştirilmelerinde, günümüzde en verimli ve en etkisi çok yöntemdir. Seramik malzemelerin birleştirmelerinde en değerli etken malzemenin gevrek olmasıdır. Bundan dolayı, kaynakta deformeler kullanmanın mümkün olmadığı görülmektedir. Dolayısı ile seramik malzemelerin birleştirmelerinde kendi birleştirme grupları içerisinde en optimum metod olarak bilinmektedir [10,12,27]

- Birleştirmede geçen zamanlar, bağlantı ekipman ve ortamında bağımsızdır. Dolayısı ile bir kerede geniş alanlı veya karmaşık desenli bağlantılar birleştirilmektedir.

2.10.2. Difüzyon Kaynak Dezavantajları

- Kullanılan diğer birleştirme yöntemlerine göre maliyeti oldukça fazladır.
- Yüzeyleri kesinlikle temiz olmalıdır.
- Kesinlikle gaz atmosferi gereklidir.
- Sıklıkla olmasada ara ara süre bakımından diğerlerine göre çok uzun sürmektedir.
- Metalürjik bakımından en önemli noktası ise, ara kesitlerde metaller arası bileşiklerde ara fazın meydana gelme olasılıklarının fazla oluşudur.
- Özel bir birleştirme hücreleri gerektiğinden dolayı, parça boyutu yükseldikçe mali olarakda büyüme görülür [10,12, 27]

2.11. Difüzyon Kaynak Malzemelerin Mikro Yapıları ve Tane Boyutları

Difüzyon kaynaklarına etki eden birden fazla yapı bulunmaktadır. Bu yapılar, mikro yapı, tane boyutları ve ara tabaka olarak sınıflandırılır. Çift fazlı (a/β) titanyum alaşımları üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar farklı mikro yapının, farklı sürünme hızına sahip olduğunu göstermektedir. Bunlar:

- İnce taneli küre,
- Lamelli
- Ara tabaka tipi şeklinde 3'e ayrılmaktadır.

Difüzyonlu birleştirmelerde en uygun yapı olarak ince taneli yapı bilinmektedir. Bu yapılar süperplastik alaşımlarda bulunmaktadır. Tabakaların tipleri yapı içerisinde tane

sayıları arttıkça sürünme hızları azalmakta ve sonuç olarak ara kesit boşluğunda yer almaktadır. Lamelli yapılar, farklı 2 yapı ile denk geldiğinde, sürünme hızları daha düşük olduğu görülmektedir. 2 fazlı alaşıma sahip yapılar için, 2 fazın oranları difüze olabilme ve sertlik değerinin üzerinde değerli bir etkileşime sahiptir. Yüksek difüzyon hızlarına sahip fazların, düşük bir sürünme hızlarına sahip fazlara oranı, sıcaklıkların etkisiyle etkileşim yükseldikçe bağın oluşumları pozitif yönde etki göstermektedir.

Al ve Cu malzemelerinin difüzyon birleştirmelerini Colva, 1988 yılında çalışmıştır. Katı halde birbiri içerisinde tam anlamında çözünemeyen bu metalik malzemeler, intermetalik bileşiğin ve ara fazların oluşmalarından başlangıç düzeydeki mikro yapıların, bu şekilde istenmemiş yapının oluşmasında etkili olduğu görülmektedir [8].

Tane boyutlarının kaynaklanma esnasında ve kaynaklanma sonrasında bağlantı elemanlarının mekanik özelliklerinin gelişimi açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Kaynaklanmanın birincil adımında boşluk kısımları daha çok tane sınırları ile kesişmektedir. Dolayısı ile oluşan boşluklar difüze edilerek küçülmeye gitmektedirler.

Tane boyutlarının küçülmesi sonrası tane sınırlarında artış, boşluk kısımlarının difüze edilerek doldurulması ve ara kesit kısımlarında kalması olasılığı düşmektedir. Birleştirme adım basamaklarının hızlanması için, bağlantı elemanlarının mekaniksel özelliğini iyileştirmek ya da birbirleri ile farklı metal, metalik olmayan malzemenin kaynaklarında karşılıklı olarak difüzyon meydana getirmek için ara malzeme tercih edilmektedir. Genel anlamda ara tabakanın birleştirme esnasındaki yararları aşağıdaki gibi bilinmektedir [9] ;

- Mekaniksel bir yakınlık kurabilmek için ana malzemedeki metalik bağ meydana getirme,
- Birbirlerinden farklı malzemenin birleşmesinden dolayı meydana gelebilecek intermetalik fazın oluşmasını engellemek,
- Başta yapılan ısıtma anında, yüksek sıcaklık değerinde yapılacak olunan birleştirilen malzemenin yüzeylerini oksitlenmelere karşı dirençli kılabilme,
- Elektro ve iyon kaplama teknikleri ile parçaların difüze olabilme özelliklerini iyileştirmek,

- Sıvıların olduğu alanlar meydana getirmek, oksit filmlerinde bozulmalar meydana getirmek,
- Ara alan boşluğunda, geçici sıvı faz meydana getirerek yüzeydeki pürüzlerinin olumsuz etkisini minimize edebilmektedir.

2.12. Difüzyon Kaynak Birleştirmelerinin Analiz Yöntemleri

Difüzyon yolu ile birleştirilmesi gerçekleştirilen kaynak malzemelerinin bağlanma özelliklerini ve kalitelerini analiz edebilmesi için iki farklı tespit tipi vardır. Bunlar; tahribatlı muayene ve tahribatsız muayenelerdir.

2.12.1. Tahribatsız Muayane Tekniğı

Tahribatsız muayenelerde difüzyon ile birleştirilmiş malzeme hiçbir şekilde zarar görmemektedir. Bunlar başlıca şunlardır.

- Elektron mikroskop,
- Elektrik direnç değışikliğı,
- Fotoemisyonu sahip elektron mikroskopları,
- Aküstik mikroskop,
- Optik mikroskobik inceleme

Optik ile gerçekleştirilen inceleme sonrasında difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş malzemelerin iç yapıları hakkında bilgilendirici bilgiler verilir. Fakat optik ile çok küçük şekilde oluşan boşluğun tespiti için tam olarak yapılamamasından ötürü, kaynak kaliteleri tespit edebilmek oldukça zor görülmektedir.

Elektron mikroskop yöntemi ile difüzyon kaynağı sayesinde birleştirilmiş malzemenin ara tabaka kalınlığının analizi yapılır. Ancak, kaynaklanma mukavemetleri tespit edilememektedir.

Elektrik direnç değışimi ile yorulmadan kaynaklı çatlakların büyümeleri ve boşlukların büyük olanlarının analizi yapılmasında uygulaması yapılır.

Fotoemisyona elektron mikroskoplarında, difüze edilme anında aşama aşama incelemesi yapılmaktadır.

2.12.2. Tahribatlı Muayene Teknikleri

Bu analiz teknikleri ile kaynağı gerçekleştirilmiş numunelerin tahrip edilmesi sonucunda gerçekleştirilmektedir. Tahribatlı muayene tekniklerinin başlıca aşağıdaki gibidirler;

- Kesme analizi,
- Darbe analizi,
- Eğme analizi,
- Kayma analizi,
- Çekme analizi.

Kesme analizleri, seramik ve kompozit içeriğe sahip numunelerin birleştirme işlemlerinden sonra, birleşme yüzeylerinin mukavemet özelliğini analiz etmek için uygulaması yapılmaktadır.

Darbe analizleri genel anlamda çelik malzemenin mukavemetlerinin analiz edilmelerinde tercih edilmektedir. Uygulamasında bir kısım zorluk bulunmaktadır.

Eğme analizi yapılabilmesi için malzemenin U şeklini aldırılması ve eğme anında malzeme üzerinde oluşabilen çatlakların analizi ve birleştirilmiş numunenin mukavemet analizi yapılmaktadır.

Kayma analizinde ise levha şeklinde bulunan numunelerin kaynaklanma mukavemetleri analizlerinde tercih edilmektedir.

Çekme analizinin gerçekleştirilmesinden dolayı birleştirilmiş numunenin çekme malzemesi özelliklerine sahip olması gerekmektedir [10,16].

2.13. 316 L Paslanmaz Çelik

316 L paslanmaz çeliklerin karakteristik analizlerine başlanılmadan önce bu çeliklere kadar uzanan aşama yollarını incelemek faydalı olacaktır. Bundan ötürü dünyanın genelinde çelik malzeme karakterizasyonları kıyaslama yapmadan önce merkezinde bulunan 304 kalite paslanmaz çeliklerden yola çıkılmaktadır. 304 paslanmaz çelikler dünya genelinde istenilen en uygun standartlarda bulunan özelliklere sahip çelik malzeme türü olarak bilinmektedir. Oldukça geniş bir uygulama alanlarına sahiptir. Ayrıca 316 paslanmaz çelikler, 304 paslanmaz çeliklerden geliştirilerek üretimi yapılmıştır. Korozyona karşı dayanımları oldukça yüksek bir malzemedir. 316 paslanmaz çeliğinin kimyasal kompozisyonlarında 304 çeliğine göre daha fazla nikel ve molibden bulunmaktadır. Bundan dolayı da kopma dayanımları açısından 304'e kıyas ile dayanımı daha iyidir. 304 ve 316 çelikleri "L" kodları ile tanımlandıktan sonra Low Carbon karakterizesi olduğu anlaşılmaktadır. Burada %0.03'den daha minimize C bulunduran 304 paslanmaz çeliklerde amaçlanan ilave bir özellik kaynaklanmasını güçlü kılmaktadır. Bundan dolayı korozyona karşı dayanımları iyi olan 316 ve 316L çeliklerinin kaynaklanma yetenekleride oldukça iyidir. 316 L çeliği kimyasal kompozisyonları 316 paslanmaz çelikleri ile aynı kabul edilmektedir. Hatta birbirlerine ikame olarak bulunurlar. Fakat birleştirmede tercih edilecek ise 316 çeliği yerine 316 L çelikleri tercih edilir. Nedeni ise kaynaklanma bölgesinde korozyon risklerini ortadan kaldırmak ve en iyi şekilde korozyon dayanımı göstermektedir [28].

316 L paslanmaz çelik çeşitleri, yüksek korozyon dayanımı gösteren ve 304 paslanmaz çelikler ile karşılaştırıldığında, sıcaklıkları yüksek ortamlarda çok iyi mekanik özelliklere sahip Fe içerikli östenitik bir alaşım çeşididir [29].

Östenitik paslanmaz çelik, kaynaklanma anında ısı girdisinden ötürü korozyonlara karşı oldukça olumlu sonuçlar almaktadır. Bunların sebepleri ise, sülfür, fosfor gibi safsızlıktan kaynaklanan segregasyon ve tane sınırlarına yakın alanlarda, tane sınırlarına çökelmiş krom karbürlerden kaynaklanmış kromun pasiflik için önemli sıcaklık değeri 400-850 °C aralığında bulunmaktadır. Hassaslaşma oranları C miktarına bağlıdır. Karbon da ki oran azalması numunenin hassaslaşma alanlarında ısıtılabilmesini sağlamaktadır. Bundan ötürü 316' nın düşük karbonlu halleri 316 L geliştirilmiştir [30, 31]. 316 L malzeme çeşidinin kimyasal içerikleri Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2. AISI 316 ve AISI 316L paslanmaz çeliğinin kimyasal içerikleri (% Ağırlık)

Tip	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
316	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	2,0-3,0	0,45	0,03
316 L	0,03	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	2,0-3,0	0,45	0,03

316 ve 316 L paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık değerinde dayanımı ve korozyon dirençleri oldukça yüksektir. Bu çeşitte ki paslanmaz çelikler, ısıl işlem yöntemi ile sertleşmesi olmaz ve kolaylıkla işlenmesi yapılarak şekillendirilmesi gerçekleştirilir. 316L çeliklerin kullanım alanları öncelikli olarak mimarlık, köprüler, hava aracı, araç kaportası, dişçilik ve enerji tesisidir. 316 L malzemelerin fiziksel anlamda özellikleri şu şekildedir [32] ;

- İletkenlik: 16,2 W/m-k
- Ergime: 1371-1399 °C
- Yoğunluk: 7,99 g/cm³
- Elastik Modülü: 193x10³ MPa
- Özgül Isı: 0,5 kJ/kg

2.13.1. 316 L Paslanmaz Çelikler İle İlgili Çalışmalar

Paslanmaz çeliklerin difüzyon kaynağı ile ilgili birleştirilmesinde oldukça fazl çalışmalar vardır. Bunlardan bazıları aşağıda gösterilmektedir;

- 1997 yılında B.Aleman ve arkadaşları 316 L paslanmaz çeliklerin Ti6242 ile birleştirme yaparak difüzyon katsayılarına olan etkilerini araştırmışlardır.
- 2014 yılında, ZH Liu ve arkadaşları 316 L ve C18400 bakır alaşımı arasında metalurjik karakterizeleri incelemişlerdir.
- 2019 yılında, YJ Fang ve arkadaşları, 4J29 ve 316L paslanmaz çeliklerin vakum ortamında saf kobalt ara tabakası kullanarak difüzyon kaynağı yapmışlardır. Birleştirme yaptıktan sonra mekanik ve mikroyapı incelemelerinde

bulunmuşlardır.

- 2006 yılında Zi-liang ve arkadaşları tarafından 316L paslanmaz çelikler difüzyon yöntemi ile birleştirilerek mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir.

Ülkemizde konu ile alakalı da birçok çalışma yer almaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda gösterilmektedir ;

- 1999 yılında Çelik O. Tarafından hazırlanan doktora tezinde “ Östenitik paslanmaz çelik ve bakır çiftinin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin birleşmeye etkisi” adlı çalışma gerçekleştirilmiştir.
- 2003 yılında Yıldırım Ş. tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinde “ Ni3Al metallar arası bileşiğinin AISI 304 paslanmaz çelik ve Ti-6Al-4V alaşımı ile difüzyon kaynağı” başlıklı çalışma yapılmıştır.
- 2005 yılında Kurt B. Tarafından hazırlanmış doktora tezinde “ Ti-6Al-4V alaşımı ile farklı tip paslanmaz çeliklerin difüzyon kaynağı” başlıklı çalışma ile malzemenin karakterizasyonu incelenmiştir.

Gibi çalışmalar literatürde yer almaktadır.

Günümüzde ise çalışmalar devam etmekte olup, bilim dünyasında konu ile ilgili geniş yelpaze olacağı düşünülmektedir.

2.14. AISI 4340 Çeliği

Yaklaşık olarak ihtiva eden % 1.8 Ni, % 0.5-0.8 Cr ve % 0.20 Mo içeren düşük alaşımlı çeliklerdir. Düşük alaşımlı Ni-Cr çeliği, karbonlu çelik türlerinden yorulma, darbe ve sertleşme oranları diğerlerine göre daha iyi olmuştur. Tahminen % 0.20 Molibden ilave edilmesi sertleşmeye ve temperlenme gevrekliğine olan ilgiyi en düşük düzeye indirir. 4320 ve 4340 çelikler dişli çark gibi dayanımı yüksek ağır işler de kullanılır [33].

4340 çeliğine benzer bir şekilde Cr-Mo ve Cr-Ni-Mo çelikleri çekme dayanımları yüksek ve tokluk özellikleri oldukça çok iyidir. Buna örnek olarak 25CrMo4, 32CrMo12, 30CrNiMo8, 34CrNiMo6 olan çeliklerdir.

4340 ıslah çeliklerinin sertleşme eğrileri, CTT ve TTT diyagramları Şekil 7-8, kimyasal bileşimleri mekanik özellikleri, ısıl işlem sıcaklığı, farklı temperleme sıcaklığında mekanik özellikleri ve kritik sıcaklıkları Tablo 3, 4, 5 ve 6'da yer almaktadır.

Tablo 3.4340 çeliklerinin ısıl işlem özelliği [34].

Sıcak Şekillendirme Sıcaklığı °C	850-1050
Yumuşatma Tavlama Sıcaklığı °C	650-700
Normalleştirme Tav Sıcaklığı °C	850-880
Su Verme Sıcaklığı °C	830-860
Menevişleme Sıcaklığı °C	540-680

Tablo 4. 4340 çeliklerinin % kimyasal kompozisyonu [34].

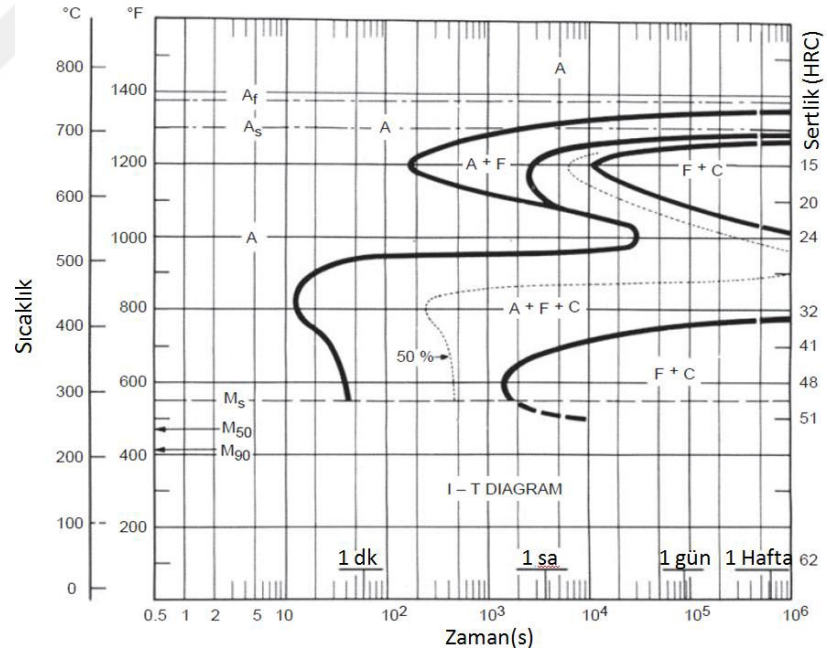
Element	% Ağırlık
C	0.38-0.43
Cr	0.70-0.90
Mo	0.20-0.30
Ni	1.65-2.0
Si	0.15-0.35
Mn	0.6-0.8
P	0.035
S	0.040

Tablo 5. 4340 çeliklerinin kritik sıcaklık değerleri [35].

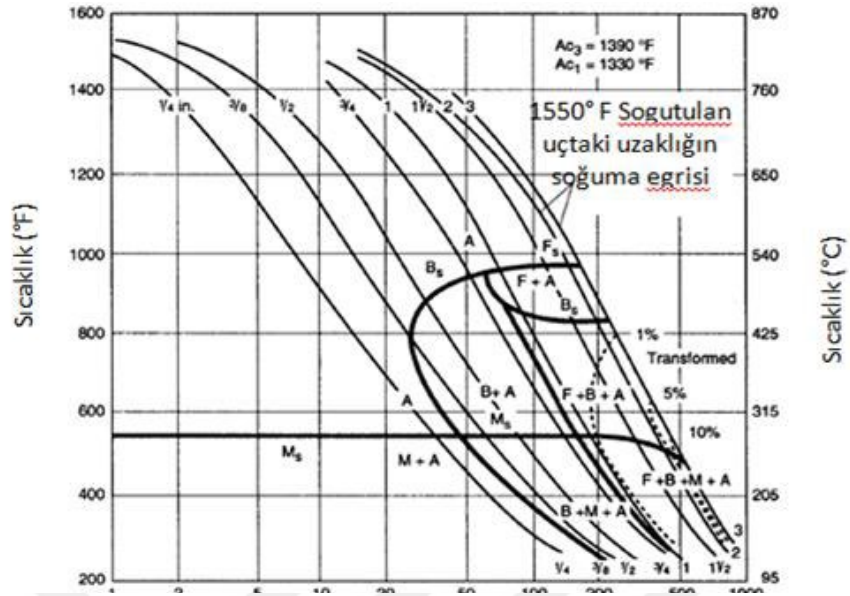
28 °C/h ısıtma kritik sıcaklık		28 °C/h soğutma kritik sıcaklık	
A_{c1}	A_{c3}	A_{r3}	A_{r1}
725	775	710	655

Akma Dayanımı, (MPa)	$\varnothing < 16$ mm	$\varnothing 17-40$ mm	$\varnothing 41-100$ mm	$\varnothing 101-160$ mm
	1000	900	800	700
Çekme Dayanımı, (MPa)	< 16 mm	17-40 mm	41-100 mm	101-160 mm
	1200-1400	1100-1300	1000-1200	900-1100
Yüzde Kesit, (%)	< 16 mm	17-40 mm	41-100 mm	101-160 mm
	1200-1400	1100-1300	1000-1200	900-1100
Çentik Değeri (J)	< 16 mm	17-40 mm	41-100 mm	101-160 mm
	40	45	50	55

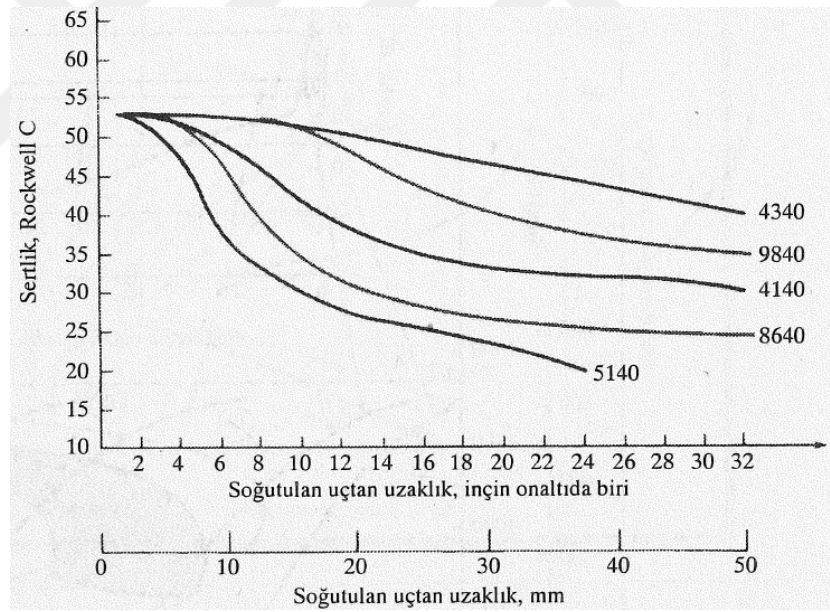
Şekil 6. 4340 çeliklerinin mekanik özelliği [35].



Şekil 7. 4340 çeliklerinin TTT diyagramları [36].



Şekil 8. 4340 Çeliğinde sürekli soğuma CTT diyagramı [36].



Şekil 9. 4340 çeliklerinin sertlik değişimlerinin karşılaştırılması [35].

4340 çelikleri ile ilgili çalışmalar olup, difüzyon kaynağı ile ilgili çok az denilecek kadar bir çalışma söz konusudur.

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, 316 L tipi paslanmaz çelik ve 4340 çeliği 900, 1000 ve 1100 °C'lik sıcaklık ve 10 MPa basınç altında 60 ve 120 dakikalık sürelerde difüzyon kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin birleşme bölgesi optik mikroyapısı, SEM mikroyapısı, EDX ve mikrosertlik analizleri yapılarak optimum birleştirme parametresinin belirlenmesine çalışılmıştır.

Birleşimi yapılan numunelerin, bağlantı kısmının mikroyapıları analiz etmek amacı ile metalografik testlere tabi tutulmuştur. Optik mikroyapı çalışmaları Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik/Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. SEM mikroyapı ve EDX analizleri Erciyes Üniversitesi TAUM'da yapılmıştır. Difüzyon kaynağı tekniği kullanılarak birleştirilen numunelerin ara kesit mikrosertlik analizi yine Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik/Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmanın amacı, birbiri ile benzer olmayan 316 L ve 4340 çelik çiftinin difüzyon kaynağı tekniği kullanılarak birleştirilebilirliği ve optimum birleştirme parametresinin tespit edilmesidir.

3.2. Difüzyon Kaynağı İçin Kullanılan Malzemeler

Deneylerde kullanılan 316 L paslanmaz çelik ve 4340 çeliğinin kimyasal bileşimleri Tablo 6'de verilmiştir.

Tablo 6. 316 L paslanmaz ve 4340 çeliklerinin kimyasal bileşimleri (% Ağ.)

Malzeme	% Ağ. Kimyasal Bileşim							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
4340	0.30	0.15	0.40	0.035	0.035	1.40	0.15	1.40
316 L	0.030	1	2	0.045	0.03	16	2	10

3.3. Difüzyon Kaynağı Cihazı

Difüzyon kaynak uygulaması için, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik/Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografik Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 10'da gösterilen Difüzyon kaynağı makinesi kullanılmıştır.

Difüzyon kaynak makinesi, vakum ve kontrollü gaz ortamının sağlanabildiği resistanslı ısıtım fırını ve aynı zamanda hidrolik yük ünitesi özelliklerine sahiptir. Numuneler üzerine uygulanan yük hareketli üst zımba ve sabit alt zımba ile gerçekleştirilmektedir.

Difüzyon kaynağı işleminde koruyucu gaz atmosferi yerine vakum tercih edilmiştir. Vakumlama işlemi sisteme entegre edilen vakum pompası sayesinde sağlanmıştır.



Şekil 10. Difüzyon kaynak makinesinin fotoğrafı

3.3.1. Numune Hazırlık Aşaması

Numuneler, difüzyon kaynak uygulaması amacıyla 10x10x15 mm'lik boyutlarda tel erezyon cihazı kullanılarak kesilmiştir. Kesilen numunelerin birleştirilecek yüzeyi en 1200 mesh' lik zımpara ile zımparalanmış ve birleşme öncesi alkol ile son temizliği gerçekleştirilmiştir. Birleştirmeler, 900-1000-1100 °C'lik sıcaklıklarda, 1 ve 2 saatlik sürelerde gerçekleştirilmiştir.

3.3.2. Difüzyon Kaynağı İşlemi

Difüzyon yöntemi kullanılarak birleştirilecek yüzeyi zımparalanmış 316L ve 4340 çeliklerinin yüzey kısımları alın altına getirilerek yük zımbaları arasına yerleştirilmiştir. Ünite içerisine yerleştirilen numunelere 10 MPa yük yük uygulanmış ve Ar gazı atmosferine alınmıştır. Isıtma yapmadan önce gazın çıkış vanaları birden fazla kapatıp açılarak içeride yer alan gazların temizlenme gerçekleştirilmiştir. Koruyucu Ar gazı belirli bir basınca ulaştıktan sonra ısıtma sistemleri devreye alınmıştır. Isıtma sistemi devreye alındıktan sonra 900, 1000 ve 1100 °C' de 1 ve 2 saatlik süre ile işlemler gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi sonrasında çıkarılan numuneler açık havada soğutulmaya bırakılmıştır.

3.4. Metalografik Analizler

3.4.1. Difüzyon İle Birleştirilmiş Numunelerin Optik Mikroyapı İçin Hazırlanması

Difüzyon kaynağı sonrasında birleşme bölgesi ara kesitinin incelenmesi amacıyla numunelerin bir yüzeyi 2 mm derinliğinde kaba zımparalama ve devamında en son 1200 meshlik zımparalama sonrasında 3 mikronluk elmas pasta ve çuhayla parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler etil alkol ile yıkanarak kurutulmuş ve dağlama işlemine hazır hale getirilmiştir.

Parlatma işlemi sonrası, dağlama uygulamasına hazır hale gelen 316 L ve 4340 çelik çifti elektrolitik ve kimyasal dağlama teknikleri kullanılarak farklı dağlayıcılar ile dağlanmıştır. 316 L çelik kısmı, %50 saf su, %50 nitrik asit ile elektrolitik dağlama yöntemi kullanılarak dağlanmıştır. Elektrolitik dağlama, 5V'da 10 saniye bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama esnasında difüzyon çiftinin 4340 çelik tarafı şeffaf bant kullanılarak kapatılmıştır. 4340 çeliği ise, % 98 alkol ve % 2 kimyasal dağlayıcı ile

gerçekleştirilmiştir. Böylece, 316 L ve 4340 çelik malzemelerin her ikisi de optik mikroskop için hazır duruma getirilmiştir.



Şekil 11. Optik Mikroskop

3.4.2. Difüzyon İle Birleşmesi Yapılan Malzemelerin SEM ile incelenmesi

Birleştirilen numunelerin SEM mikroyapı analizi amacıyla, Erciyes Üniversitesi TAUM' da bulunan ZEISS markalı, GeminiSEM 500 modeli SEM cihazı kullanılmıştır. Optik mikroskop için hazırlanan numunelerin aynısı hiçbir işlem uygulanmadan SEM analizi içinde aynı şekilde kullanılmıştır. SEM analizi için kullanılan cihaz Şekil 12.'de görülmektedir.



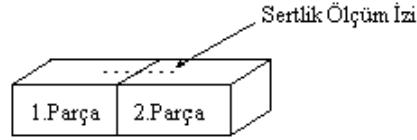
Şekil 12. SEM analiz cihazı

3.4.3. EDX Analizi

SEM görüntüleri ile birlikte birleştirilen numunelerin birleşme bölgesi ara kesitinden ara bölge element dağılımının tespit edilebilmesi amacıyla bir dizi EDX analizi gerçekleştirilmiştir. Bundan ötürü, bazı bölgelerdeki fazların elementel kompozisyonlarının incelemesi yapılmıştır.

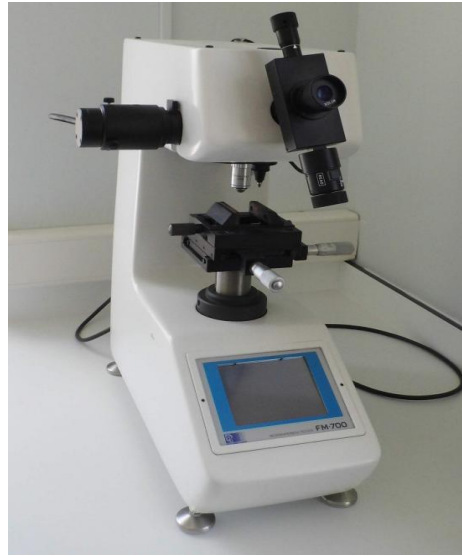
3.5. Mikrosertlik Testi

Difüzyon kaynağı yapılmış ve aynı zamanda optik mikroskop için hazırlanmış malzemelerin ara yüzeyinin her iki taraflarından şematik olarak da görüldüğü üzere belirli mikron aralıklarında mikrosertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 13. Numunelerin Mikrosertlik Analizi Şematik Görünümü

Mikrosertlik testi, Future-Tech FM-700 markalı mikrosertlik cihazında 50 gr'lık yük ve 10 saniye süreyle gerçekleştirilmiştir.



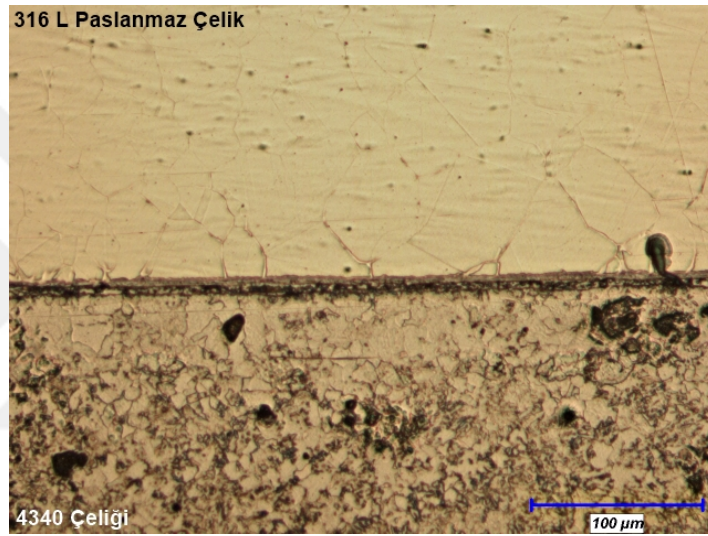
Şekil 14. Vickers sertlik cihazı

BÖLÜM 4

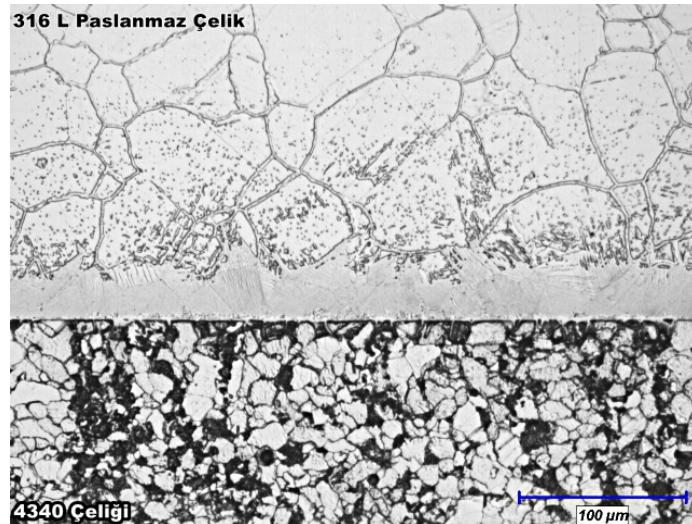
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Optik Mikroyapı Sonuçları

Tez çalışmasının konusu olan 316 L paslanmaz ve 4340 çelik çiftinin 10 MPa basınç altında 900, 1000 ve 1100 °C'lik sıcaklıklarda 1 ve 2 saat süre parametreleri kullanılarak birleştirilen numunelerin kesitinden alınan optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 15-20'de görülmektedir.

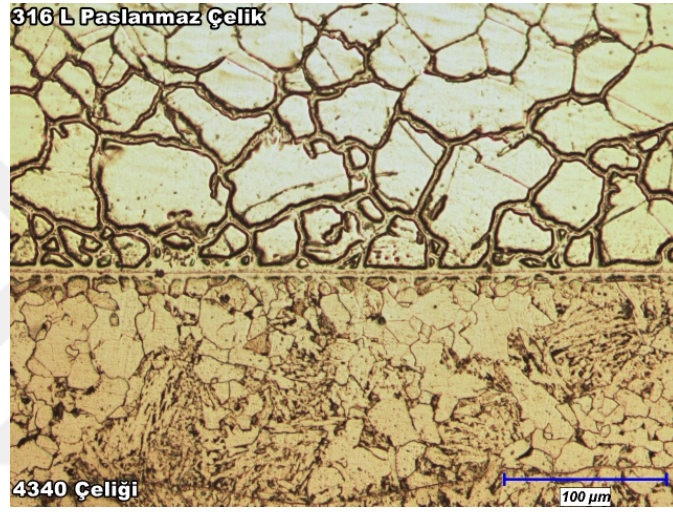


Şekil 15. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı (T = 900 °C ve t = 60 dakika)

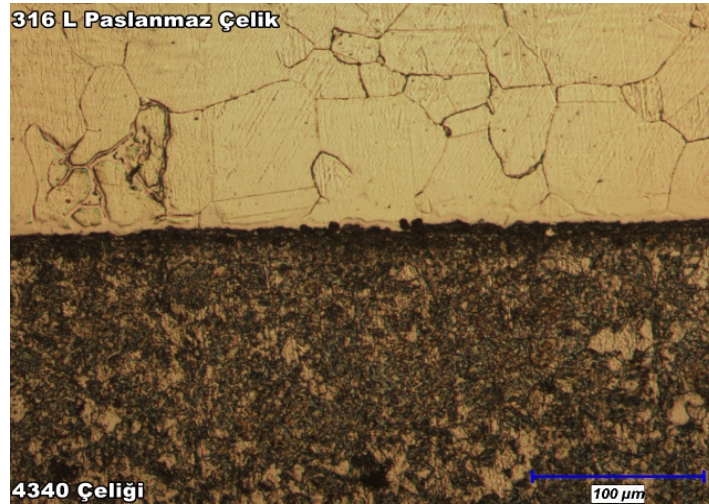


Şekil 16. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı (T = 900 °C ve t = 120 dakika)

Şekil 15 ve 16’ da görüldüğü üzere 900 °C’de 60 dakikalık süreyle birleştirilen numunenin optik mikroyapı fotoğrafından, ara bölgede yoğun bir şekilde boşlukların ve oksit oluşumunun meydana görülmektedir. Aynı zamanda malzeme çiftlerinin her iki tarafında da mikroyapısal olarak herhangi bir değişim meydana gelmemiştir. 120 dakika süreyle birleştirilen numunenin optik mikroyapı fotoğrafından ise ara bölge boşluklarının ortadan kalktığı ve meydana gelen difüzyonla paslanmaz çelik tarafından mikroyapısal değişimin meydana geldiği görülmektedir. 4340 çelik tarafında ise herhangi bir değişim meydana gelmemiştir.

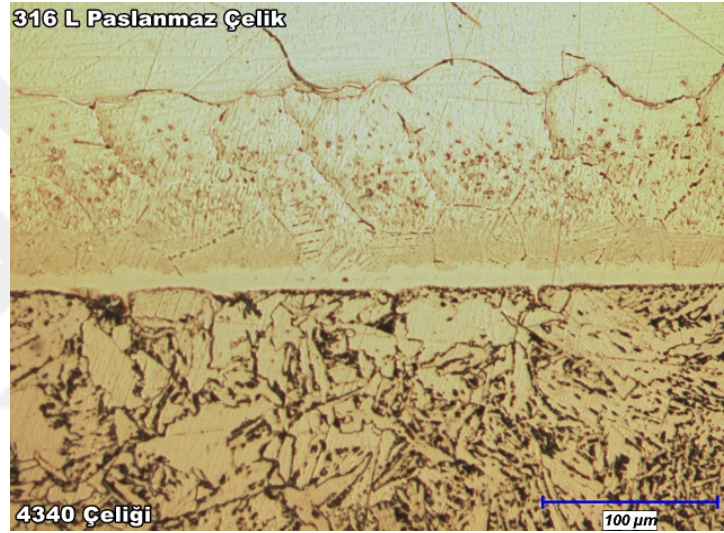


Şekil 17. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı (T = 1000 °C ve t = 60 dakika)

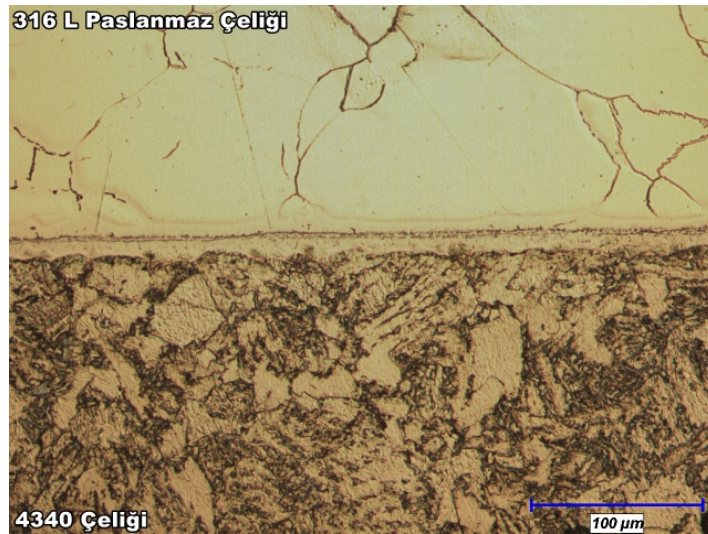


Şekil 18. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı (T = 1000 °C ve t = 120 dakika)

Şekil 17 ve 18’ de görüldüğü üzere 1000 °C’de 60 dakikalık süreyle birleştirilen numunenin optik mikroyapı fotoğrafından, ara bölgede iki malzeme çiftinin de birbiriyle bütünleştiği herhangi bir boşluk oluşumunun meydana gelmediği bir ara yüzey görülmektedir. Aynı zamanda malzeme çiftlerinin her iki tarafında da mikroyapısal olarak değişimler meydana gelmiştir. Özellikle paslanmaz çelik tane sınırlarında yaklaşık 80-100 mikron’luk farklı bir faz oluşumunun meydana geldiği görülmektedir. 120 dakika süreyle birleştirilen numunenin optik mikroyapı fotoğrafından ise difüzyon ara fazı ve paslanmaz çelik tarafında taneler arası difüzyonun meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 19. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı (T = 1100 °C ve t = 60 dakika)

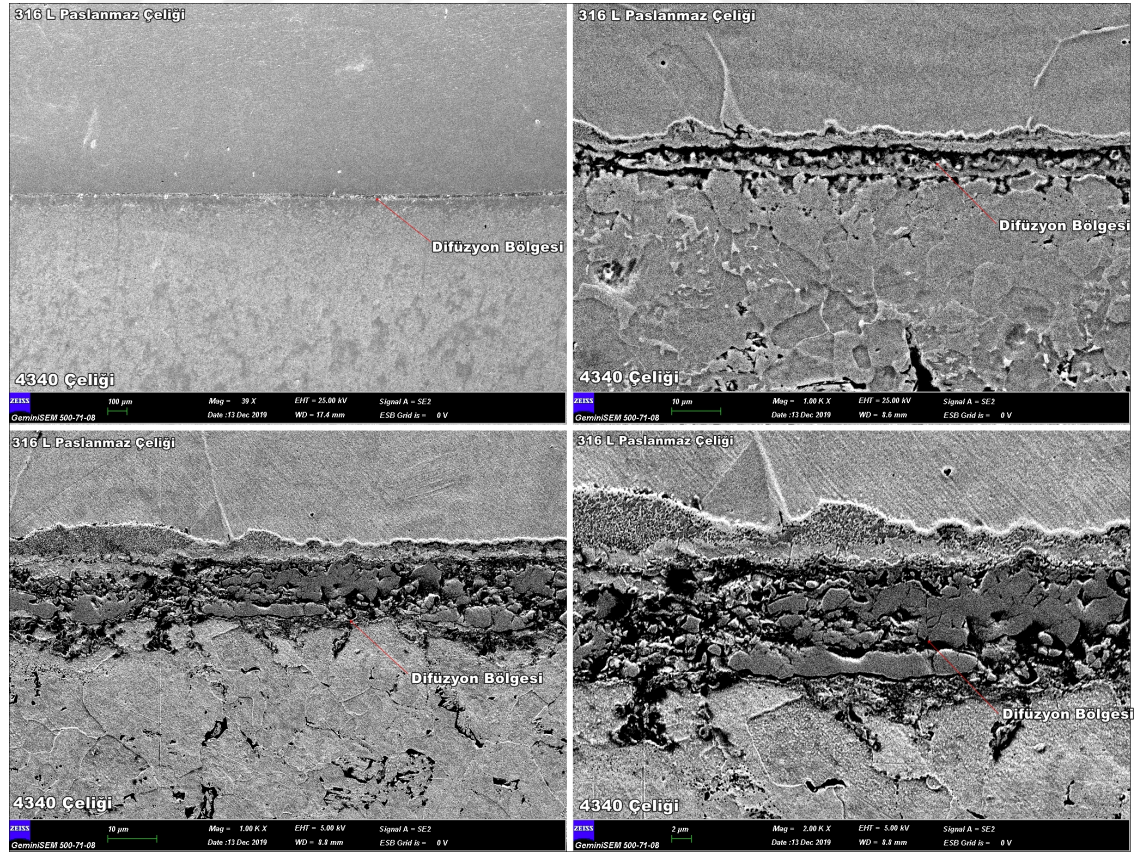


Şekil 20. 316 L / 4340 çelik çiftinin optik mikroyapı fotoğrafı (T = 1100 °C ve t = 120 dakika)

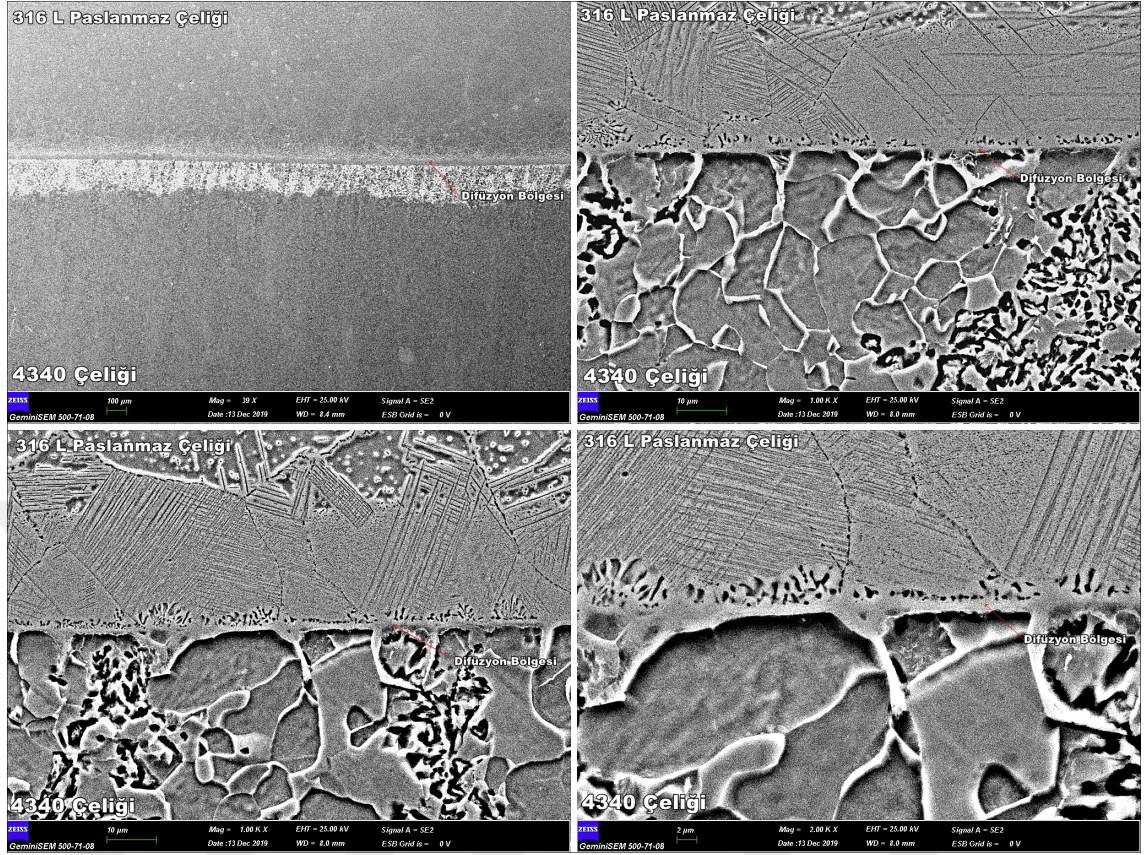
Şelil 19 ve 20’ de görüldüğü üzere 1100 °C’de 60 dakikalık süreyle birleştirilen numunenin optik mikroyapı fotoğrafından, ara bölgede iki malzeme çiftinin de birbiriyle bütünleştiği herhangi bir boşluk oluşumunun meydana gelmediği bir ara yüzey görülmektedir. Aynı zamanda malzeme çiftlerinin her iki tarafında da mikroyapısal olarak değişimler meydana gelmiştir. Özellikle paslanmaz çelik tarafında yaklaşık 120 mikron’luk etkilenmiş bir ara yüzeyin olduğu ve yine ara bölgeye bitişik 10 mikronluk farklı bir faz yapısının meydana geldiği gözlemlenmiştir. 120 dakika süreyle birleştirilen numunenin optik mikroyapı fotoğrafından ise ara bölgede tam bir bütünleşmenin meydana geldiği ve her iki malzeme tarafında da mikroyapısal değişimin olduğu açıkça görülmektedir.

4.2. SEM Analizi Sonuçları

316 L paslanmaz ve 4340 çelik çiftinin 10 MPa basınç altında 900, 1000 ve 1100 °C’lik sıcaklıklarda 1 ve 2 saat süre parametreleri kullanılarak birleştirilen numunelerin kesitinden alınan SEM mikroyapı fotoğrafları Şekil 21-26’de görülmektedir.

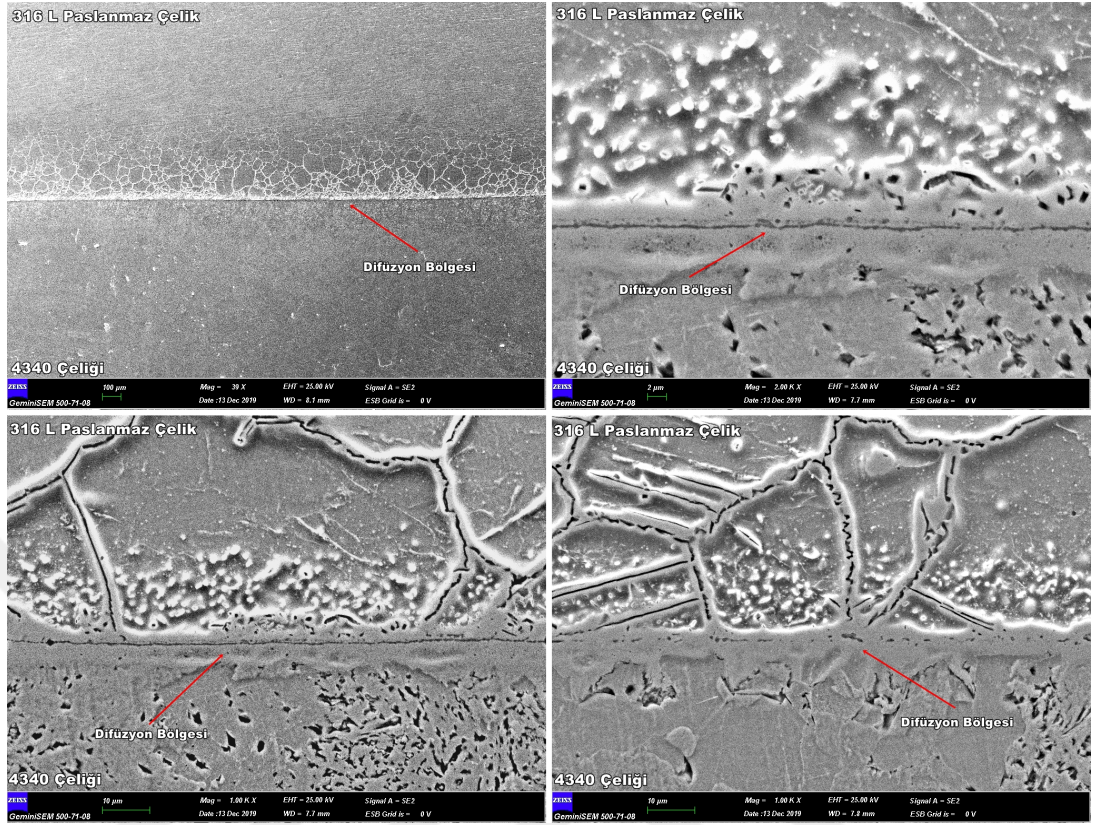


Şekil 21. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 900 °C ve t = 60 dakika)

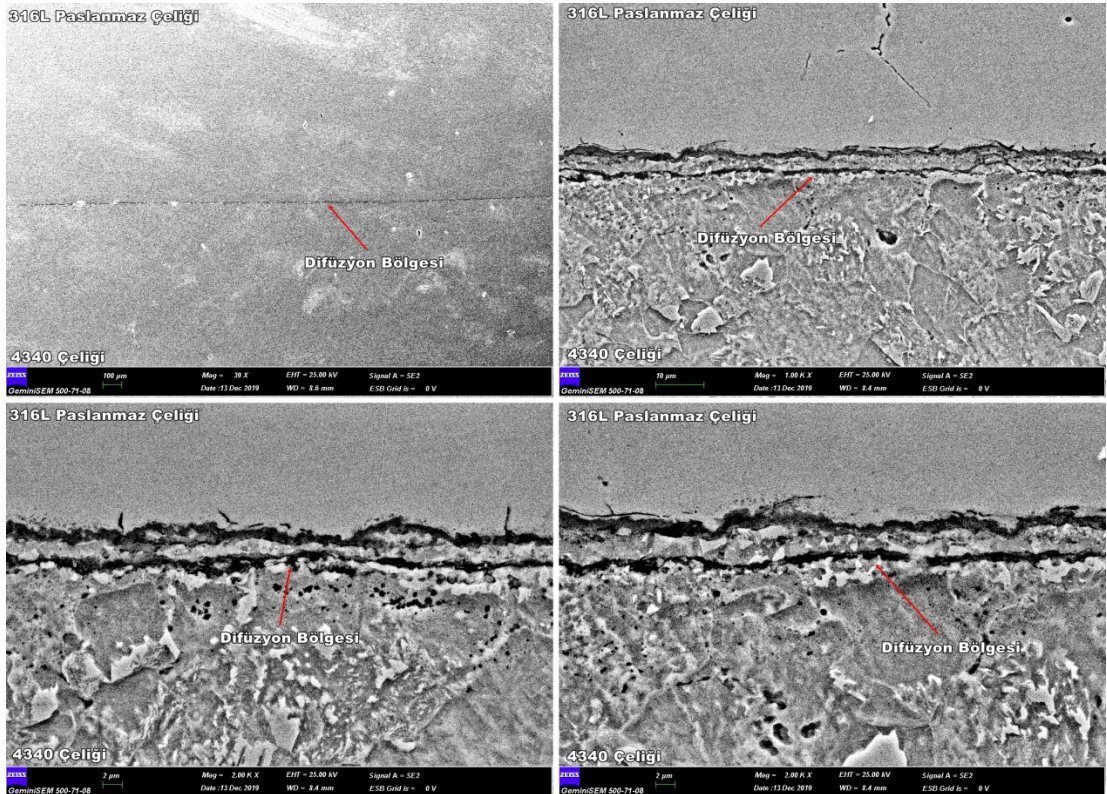


Şekil 22. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 900 °C ve t = 120 dakika)

Şekil 21 ve 22' de görüldüğü üzere 900 °C'de 60 dakikalık süreyle birleştirilen numunenin SEM mikroyapı fotoğrafından, ara bölgede yer yer difüzyon bölgeleri oluşsa da yoğun bir şekilde oksit oluşumunun (siyah renkli kısım) meydana geldiği açıkça görülmektedir. 120 dakika süreyle birleştirilen numunenin SEM mikroyapı fotoğrafından ise ara bölge boşlukların tamamen ortadan kalktığı ve yaklaşık 2 mikronluk ara yüzey fazının oluştuğu görülmektedir. Aynı zamanda karbonlu çelik tarafında yaklaşık 200 mikronluk bir difüzyon bölgesine karşılık paslanmaz çelik tarafında yaklaşık 50 mikronluk bir difüzyon bölgesi meydana gelmiştir.

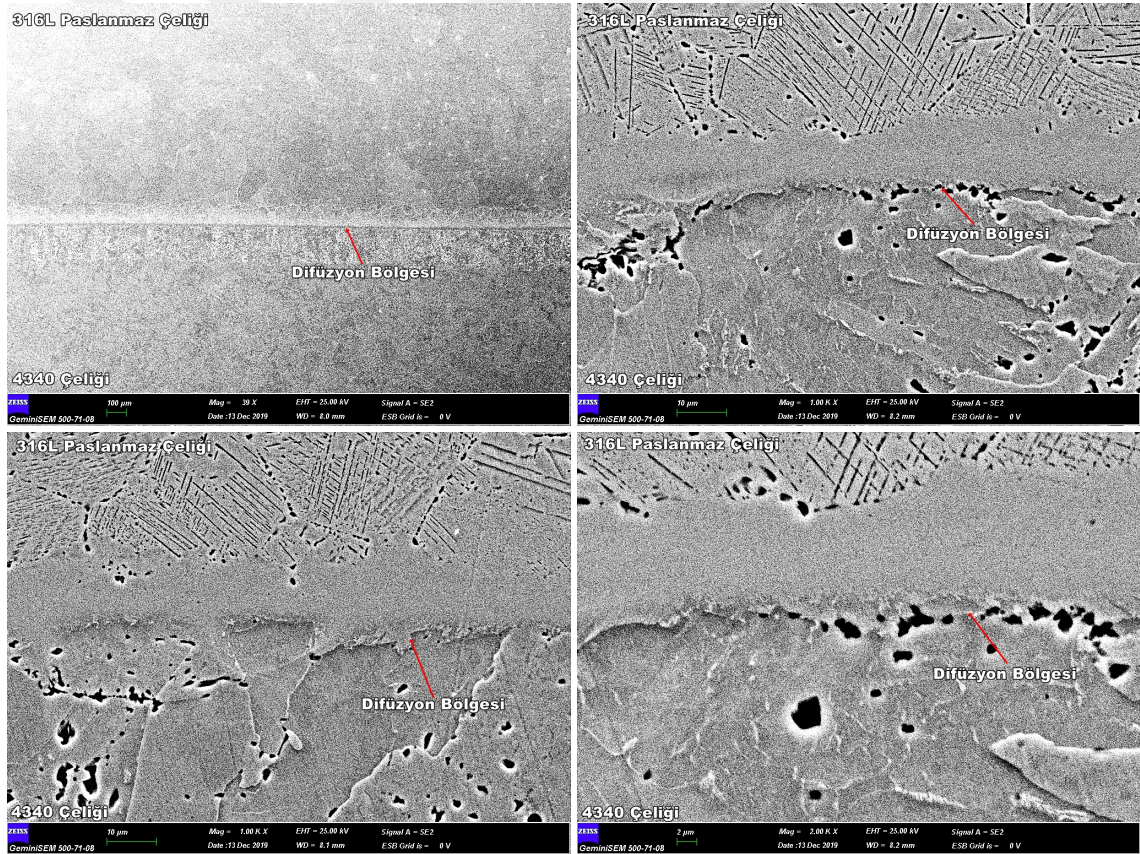


Şekil 23. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 1000 °C ve t = 60 dakika)

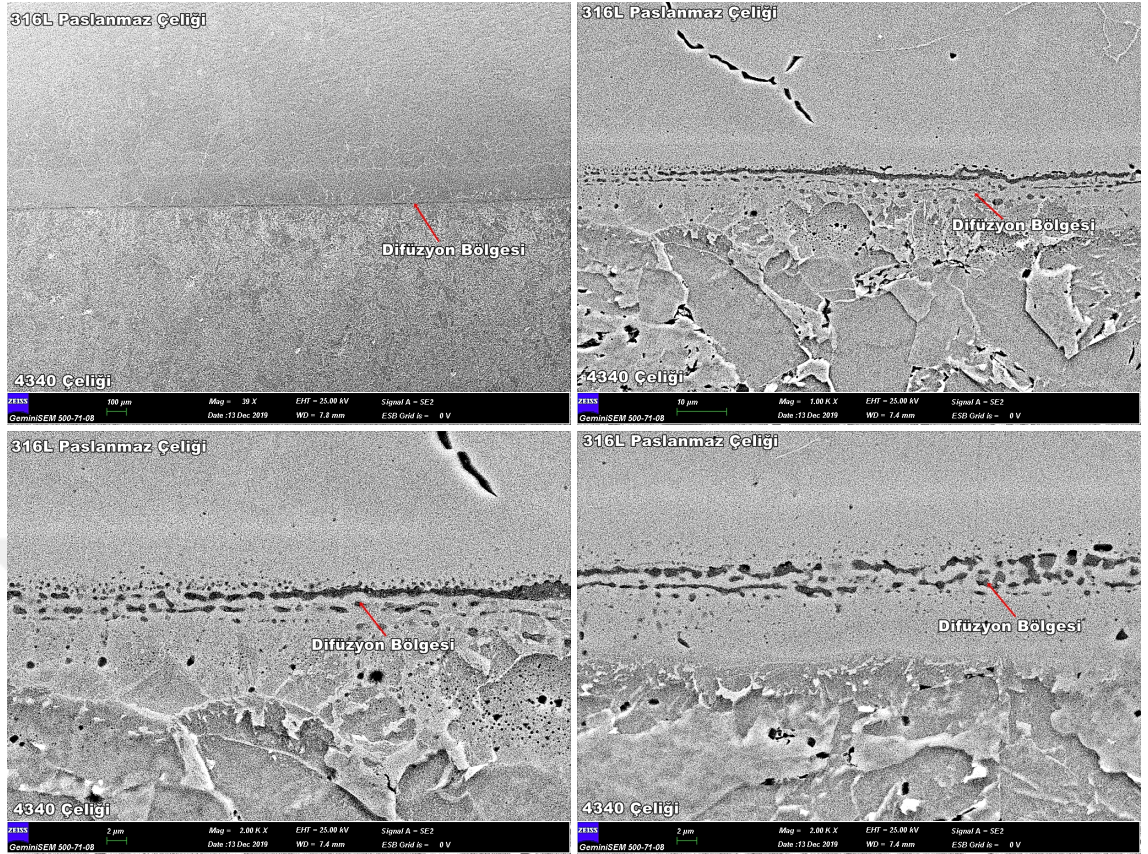


Şekil 24. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 1000 °C ve t = 120 dakika)

Şekil 23 ve 24' de görüldüğü üzere 1000 °C'de 60 dakikalık süreyle birleştirilen numunenin SEM mikroyapı fotoğrafından, ara bölgede yaklaşık 5 mikronluk ara yüzey fazının ve yer yer karbür fazların oluştuğu görülmektedir. Yine paslanmaz çelik tarafında yaklaşık 300 mikronluk tane sınırı difüzyon bölgesinin meydana geldiği de açıkça görülmektedir. Özellikle ara gölgeden alınan SEM detay fotoğraflarından tane sınırı difüzyonuyla birlikte karbür partiküllerinin de (siyah renkli) oluştuğu görülmüştür. Bu karbür oluşumunun karbonlu çelikten paslanmaz çelik tarafına gerçekleşen C atomu difüzyonuyla gerçekleştiği düşünülmektedir. 120 dakika süreyle birleştirilen numunenin SEM mikroyapı fotoğrafindan ise 1 saatlik parametrede meydana gelen değişimlere yakın oluşumlar tespit edilmiştir.



Şekil 25. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 1100 °C ve t = 60 dakika)

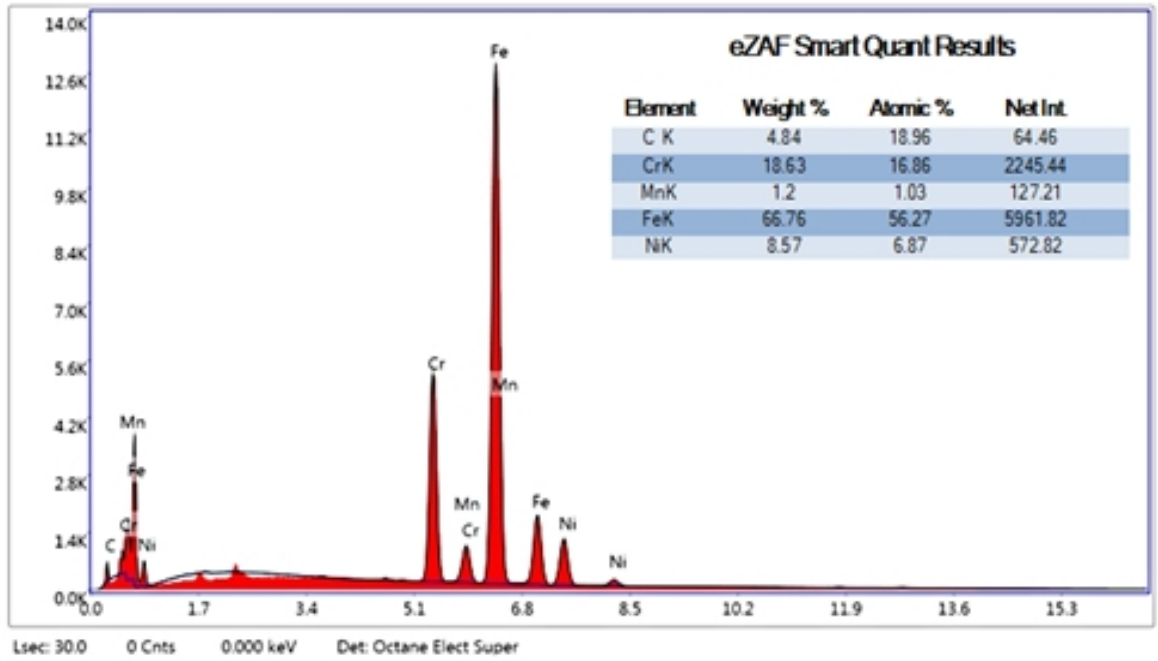
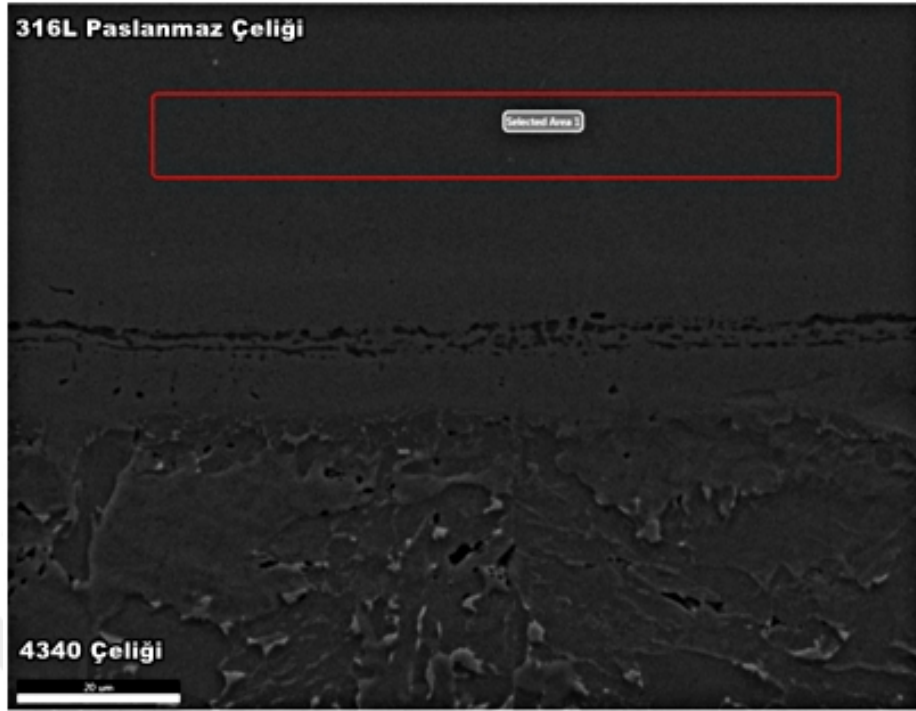


Şekil 26. 316 L / 4340 çelik çiftinin SEM fotoğrafları (T = 1100 °C ve t = 120 dakika)

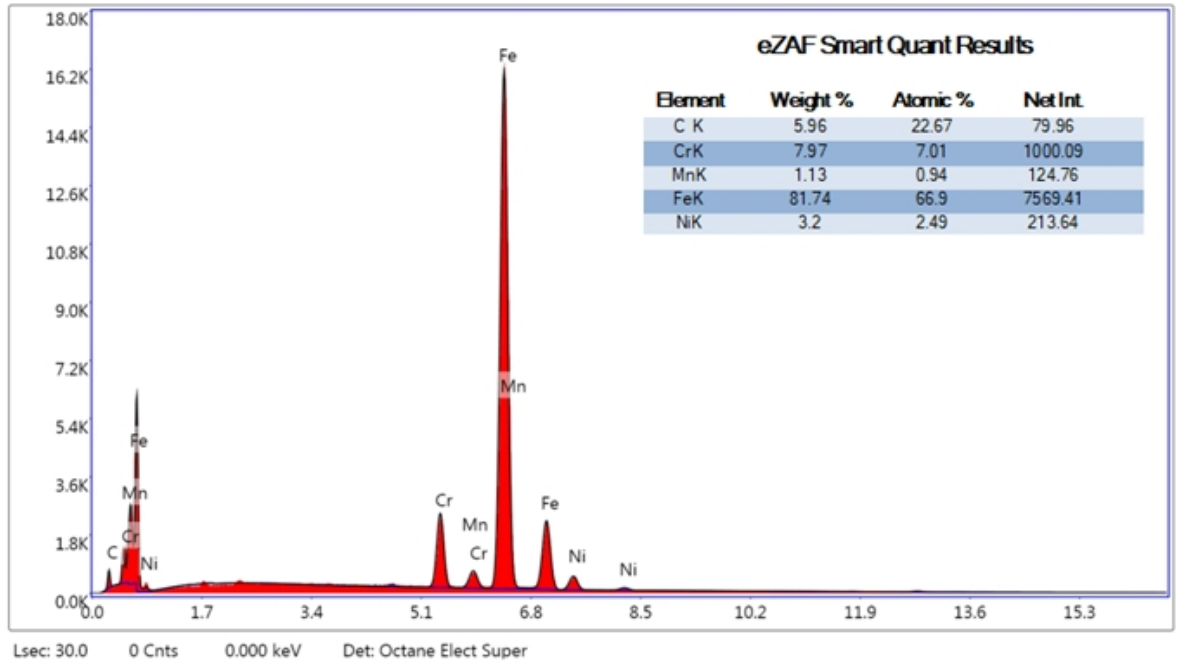
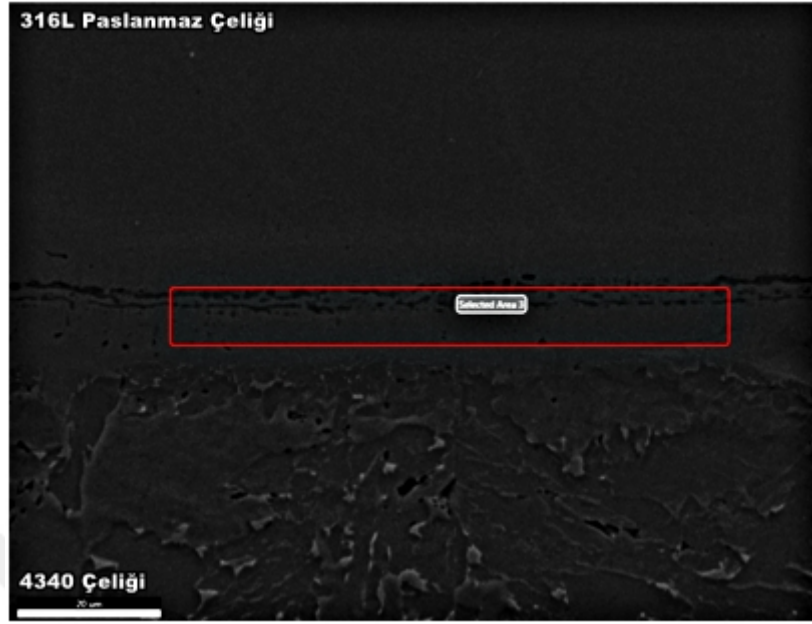
Şelil 25 ve 26' da görüldüğü üzere 1100 °C'de 60 dakikalık süreyle birleştirilen numunenin SEM mikroyapı fotoğrafından, ara bölgede yaklaşık 10 mikronluk ara yüzey fazının ve özellikle karbonlu çelik tarafında yer yer karbür faz oluştuğu gözlenmiştir. Yine paslanmaz çelik ve karbonlu çelik tarafında difüzyon bölgelerinin oluştuğu açıkça görülmektedir. Bu duruma paslanmaz çelik tarafından karbonlu çelik tarafına Cr ve Mo elementlerinin karbonlu çelik tarafından ise C elementi difüzyonunun sebep olduğu düşünülmektedir. 120 dakika süreyle birleştirilen numunenin SEM mikroyapı fotoğrafindan ise yine ara bölgede geniş bir ara yüzey faz oluşumuyla birlikte yine yoğun karbür faz oluşumunun ara yüzey boyunca meydana geldiği görülmektedir.

4.3. EDX Analiz Sonuçları

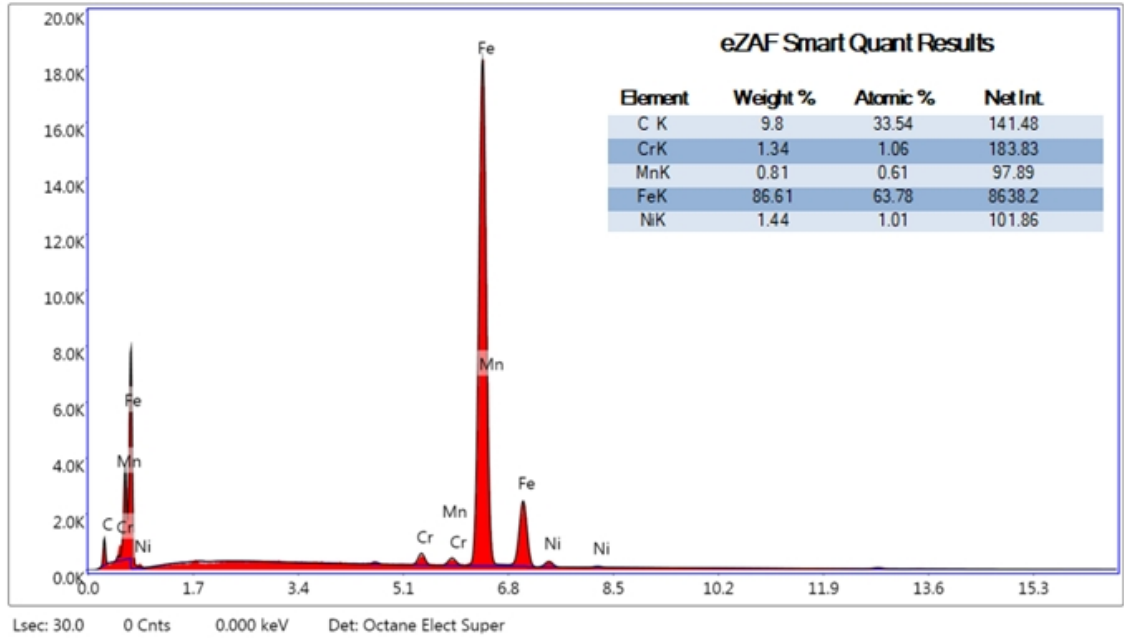
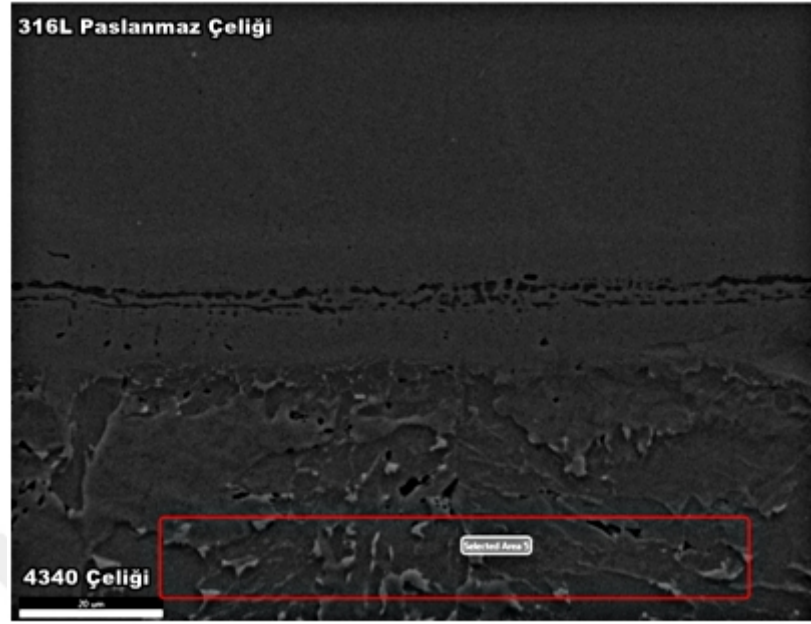
Difüzyon kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilen 316L paslanmaz çelik ve 4340 çeliklerinin SEM görüntüleri ile birlikte 1100 °C'de 2 saat süreyle birleştirilen numuneden alınan EDX analiz sonuçları Şekil 27-29' da gösterilmektedir.



Şekil 27. 316 L / 4340 çelik çiftinin 316 L tarafı EDX analizi



Şekil 28. 316 L / 4340 çelik çiftinin ara bölge EDX analizi



Şekil 29. 316 L / 4340 çelik çiftinin 4340 çeliği tarafı EDX analizi

Difüzyon çiftinin paslanmaz çelik tarafından alınan EDX analiz sonucundan özellikle yüksek C oranı dikkat çekmektedir. EDX analiziyle net C oranının tam tespiti mümkün olmamakla birlikte C elementinin belirli bir değerin üzerinde olduğu açıkça görülmektedir. EDX alınan bölgenin difüzyon ara bölgeye yakın olması karbonlu çelik tarafında C elementinin difüzyonunu desteklemektedir. Difüzyon ara bölgeden alınan EDX analizinde ise artan C oranıyla birlikte % 7.9 Cr ve % 3.2 Ni elementinin elde edilmesi paslanmaz çelik tarafından Cr ve Ni elementinin difüzyonuna işaret etmektedir.

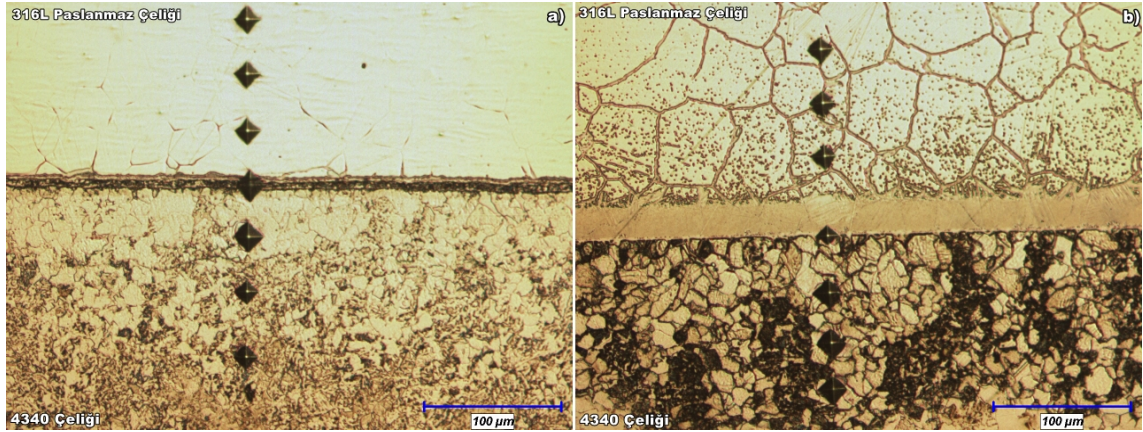
Difüzyon çiftinin 4340 çeliği tarafından alınan EDX analizi sonucunda ise 1.3 Cr ve 1.4 Ni içeriklerinin elde edilmesi 4340 çeliği tarafında meydana gelen mikroyapısal değişimin Cr ve Ni elementleriyle gerçekleştiğini göstermiştir.

4.4. Mikrosertlik Analiz Sonuçları

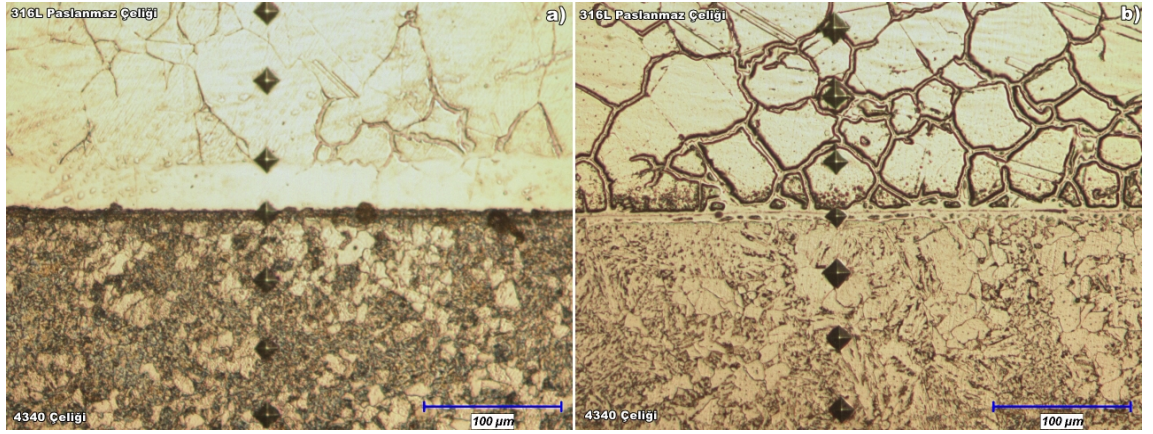
Difüzyon kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilen 316 L ve 4340 çelik çiftinin mikroyapı çalışmaları amacıyla hazırlanan numunelerin birleşme bölgesi kesitinden belirli mikron aralıklarında sıralı bir şekilde alınan mikrosertlik iz fotoğrafları ve mikrosertlik değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 7. Mikrosertlik analiz sonuçları

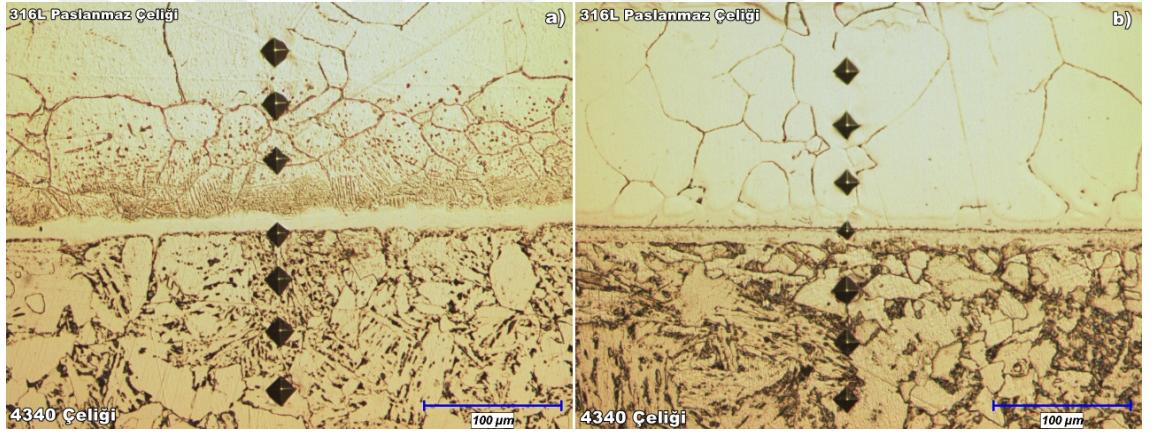
Sıcaklık °C	900		1000		1100	
Zaman (dakika)	60	120	60	120	60	120
4340	299	207,4	260,7	236	187	278,7
4340	278,5	213,2	260,3	273,1	199,8	265,4
4340	190,7	195,5	195,3	262,1	218,7	213,8
Ara Bölge	193,6	400,5	381,7	265	285,4	487,2
316 L	237,9	240	273,7	273	234,8	233,3
316L	227,5	251	297,1	239,9	219,7	235,8
316L	203,2	224,4	185	232,1	210,4	233,9



Şekil 30. 900 °C' deki mikrosertlik izleri a) 1 saatte gerçekleştirilen difüzyon b) 2 saatte gerçekleştirilen difüzyon



Şekil 31. 1000 °C’ deki mikrosertlik izleri a) 1 saatte gerçekleştirilen difüzyon b) 2 saatte gerçekleştirilen difüzyon



Şekil 32. 1100 °C’ deki mikrosertlik izleri a) 1 saatte gerçekleştirilen difüzyon b) 2 saatte gerçekleştirilen difüzyon

Difüzyon çiftinin 4340 çelik tarafından alınan mikrosertlik değerleri ara bölgeden ana malzemeye doğru 190 HV ile 299 HV aralığında değişim göstermiştir. 4340 çeliği tarafında numuneler arası gerçekleşen küçük değişimler nispeten soğuma hızı farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda 4340 çeliği tarafına paslanmaz çelik tarafından gerçekleşen Özellikle Cr elementi difüzyonuyla ortaya çıkan mikroyapısal değişim sertlik değerlerine de etki etmiştir. Paslanmaz çelik tarafında meydana gelen ve nispeten daha düşük seviyede gerçekleşen sertlik değerlerindeki değişim yine 4340 çeliği tarafından paslanmaz çelik tarafına gerçekleşen C difüzyonu neticesinde ortaya çıktığı düşünülmektedir. Özellikle 900 C’de 60 dakika süreyle birleştirilen numunenin ara bölgeden alınan sertlik değerinin düşük çıkması yeterli derecede difüzyonun gerçekleşmediğinin bir işaretidir. Mikroyapı fotoğrafları da bu

durumu desteklemektedir. Diğer parametrelerde ise nispeten difüzyon çiftinin her ikisinden de yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesi ara yüzey faz oluşumunun bir sonucudur. Bu durumu mikroyapı fotoğrafları da desteklemektedir.



KAYNAKLAR

1. Çelik, S. ve Ay, İ., ‘‘Koruyucu Gaz Altında Difüzyon Kaynağı ve Uygulması’’, *J. Of Engineering and Enviromental Science Dergisi*, 23, 63-70, (1999).
2. Atasoy, E., ‘‘Titanyum ve düşük karbonlu çelik çiftinin arabağlayıcı kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması’’, Bilim Uzmanlığı Tezi, *Zonguldak Kara Elmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-46 (2007).
3. Madan D., and German, R.A., Enhanced Sintering For Ferrous Components. Modern Developments in Powder Metallurgy, Vol. 15, p. 441-454., (1989).
4. Madan, D.S., Role of Some Ferroalloy Powders in Enhancing Sintering and Improving Properties of Ferrous P/M Compacts. Advances in Powder Metallurgy, Vol.4, p.103-113, (1991).
5. Sedriks, A.J., Corrosion of Stainless Steels. 2nd ed., New York: Willey, (1996).
6. Erdoğan, M., Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, Cil. 1, Nobel yayın dağıtım, Ankara, (1998).
7. Bilgin, B., ‘‘ Ti-6Al-4V/304l malzeme çiftinin bakır ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 28-39 (2007).
8. Taşkın, M., ‘‘Yüksek karbonlu çeliklerin süperplastik halde difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması’’, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 36-48 (2000).
9. Erden, İ.O., ‘‘Alüminyum silisyumnitrür kompozit malzemenin difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması’’, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 33-37 (2005).
- 10.Çelik, S., ‘‘ Koruyucu Gaz Altında Saf Alüminyum ve Bakırın difüzyon Kaynağı Şartlarının Belirlenmesi’’, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir (1996).
- 11.Topbaş, M.A., *Isıl İşlemler*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 34-40, (1993).

12. Fidan, L., ‘‘Saf Alüminyum ve Saf Bakırın difüzyon Kaynağında Arafazların Oluşumu ve Etkisi’’, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2006).
13. Oğuz, B., *Sertlehimleme*, Oerlikon Yayınları, İstanbul, (1998).
14. Güleç, Ş. ve Aran, A. *Malzeme Bilgisi I*. İTÜ, İstanbul, 34-40, (1993).
15. Ravisankar, B., Krishnamoorthi, J., Ramakrishnan, S.S. and Angelo, P.C., ‘‘Diffusion Bonding of SU 263’’, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2135-2144, (2009).
16. Kurt, A., ‘‘ Toz metalden üretilmiş bronz yatağın düşük karbonlu çeliğe difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi’’, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 34-56 (1996).
17. Babayev, Y., ‘‘Bir kompresör gövdesi imalatının toz metalurjisi ve difüzyon kaynağı yöntemleri uygulanarak optimizasyonu’’, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 33-52 (2007).
18. Dikbaş, H., ‘‘Toz metalurjisi (TM) ile üretilmiş Ni-Ti alaşımlarının difüzyon kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması’’, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 30-44 (2005).
19. Orhan, N., Difüzyon kaynağı için yeni bir model ve duplex alaşımlara uygulanması, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, (1996).
20. Dixon, R., Selection of Wrought Martensitic Stainless Steels, *ASM Metals Handbook*., V.6, 432-441, (1993).
21. Murray W. M., Cliff C.B., ‘‘Fundamentals of Diffusion Bonding’’, 156-159, (1993).
22. Kurt B., ‘‘Ti-6Al-4V alaşımı ile farklı tip paslanmaz çeliklerin difüzyon kaynağı’’, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, (2005).
23. Schwartz, M. M. and Paulonis, D.f., ‘‘Diffusion Welding and Brazing, *Welding Handbook*, V.3, p. 311-336 (1980).

24. Ushakova, S.E. and Kotelnikov, A.A., ‘‘The Vacuum Diffusion Welding of Grade 15 Steel to Amts Alloy or ADI Aluminium Using An Interlayer of Nickel’’, *Automatic Welding*, 10, 52-53, (1970)
25. WILLAMSON, J.R., ‘’ Superplastic Forming Diffusion Bonding of Titanium’’, *Proc. The Ist. Int. Cant. Materials in Areospace*. 10817, 373-394, (1986).
26. Tolun F., ‘‘Bakır ve Porselen Malzemelerin Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi ve Analizi’’, *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, (2013)
27. SALEHİ, M.T., ‘‘Isostatic Diffusion Bonding of Some Superplastic Alloys’’, Doktora Tezi, *UMIST. Manchaster*, (1990).
28. <https://www.karacapaslanmaz.com/paslanmaz-316li> , *Erişim Tarihi: 22/07/2020*.
29. Evans, J. A. (2017). Anisotropic Response Of Laser Additively Manufactured Nuclear Alloys To Radiation Damage. Doctoral Thesis, Texas A&M University, Texas, 455.
30. Evans, J.A., Anisotropic Response Of Laser Additively Manufactured Nuclear Alloys to Radiation Damage. *Doctoral Thesis, Texas A&M University, Texas,455.*, (2017)
31. Trigwell, S., Effects Of Welding On The Metallurgy Of Electropolished 316L Stainless Steel. *Master Thesis, San Jose State University, California*, 164., (2017).
32. Alnan, M. G., Dynamic Strain Ageing Behaviour Of 316l Austenitic Stainless Steel. Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük*, 1-50, (2018).
33. Smith, W. F., Structure and Properties of Engineering Alloys. McGraw-Hill, 630 s. , (1993).
34. ASM Metals Handbook, Heat Treating, Materials Selection And Design, (1997).
35. ASM Metals Handbook, Heat Treating, (1991).
36. Campbell, F.C., Elements of Metallurgy And Engineering Alloys. ASM International, 672 s., (2008).