

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



FARKLI STANDARTLARDAKİ PASLANMAZ ÇELİK VE
SADE KARBONLU ÇELİK ÇİFTLERİNİN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE
BİRLEŞTİRİLMESİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE
MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ

Yeliz ALNAK

Doktora Tezi

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2020

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Doktora Tezi

FARKLI STANDARTLARDAKİ PASLANMAZ ÇELİK VE
SADE KARBONLU ÇELİK ÇİFTLERİNİN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİYLE
BİRLEŞTİRİLMESİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE
MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ

Tez Yazarı

Yeliz ALNAK

Danışman

Prof. Dr. Vedat SAVAŞ

İkinci Danışman

Doç. Dr. Ali ÖZER

ŞUBAT 2020
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Başlığı:	Farklı Standartlardaki Paslanmaz Çelik ve Sade Karbonlu Çelik Çiftlerinin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi, Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi
Yazarı:	Yeliz ALNAK
İlk Teslim Tarihi:	28.01.2020
Savunma Tarihi:	28.02.2020

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

	<i>İmza</i>	
Danışman:	Prof. Dr. Vedat SAVAŞ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
İkinci Danışman:	Doç. Dr. Ali ÖZER Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Ali İNAN Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Ahmet HAŞÇALIK Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Çetin ÖZAY Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Ahmet AKKUŞ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20.... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

Prof. Dr. Soner ÖZGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Farklı Standartlardaki Paslanmaz Çelik ve Sade Karbonlu Çelik Çiftlerinin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi, Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

28/01/2020

Yeliz ALNAK

ÖNSÖZ

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen farklı kalitede östenitik paslanmaz çelikler (AISI 304 ve AISI 316) ile sade karbonlu çeliklerin (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) kaynaklı bölgelerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiş, en iyi kaynak çifti belirlenmiştir.

Şüphesiz her doktora çalışması büyük güçlüklerle tamamlanır. Bu çalışma ise, devamı müddetince sonu asla tahmin edilemeyen heyecanlı bir macera filmine benzetilebilirdi. Bunun için öncelikle, bu önsözün satırlarını yazmama katkı sağlayan herkese teşekkür ediyorum.

Kendisiyle çalışmaya başladığımızdan beri, bana her konuda destek olan, örnek kişiliği ve son derece mütevazı tavrı ile her araştırmacının çalışmayı hayal ettiği akademik danışman kimliğine sahip olan hocam Sayın Prof. Dr. Vedat SAVAS'a derin teşekkürlerimi arz ederim.

Yapıcı ve eleştirici fikirleriyle çalışmama katkıda bulunan, SEM ve Mikroyapı incelemelerinde bilgi ve deneyimleri ile yönlendiren ikinci danışmanım Sayın Doç. Dr. Ali ÖZER'e özel teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim süresince, her türlü yardımını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan, arkadaşım Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Mekanik testleri yapma konusunda bana yardım eden Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YÜCEL'e , paslanmaz çelikleri temin eden Aras Paslanmaz şirketinden Burhan ASAN'a, deneysel çalışmalarımı yapmamda yardımlarını esirgemeyen tekniker Vahit DÖŞKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, manevi desteklerini her zaman hissettiğim annem ve babama, hayatımı anlamlandıran oğullarım Ege, Arda ve Can'a sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak çok sevgili eşim Dr. Öğr. Üyesi Doğan Engin ALNAK, bu çalışmanın her safhası ve hayatın her adımında benimle birlikte olduğun, tüm sevecenliğin ve anlayışın ile bize huzur dolu bir yuva sunduğun için gönülden teşekkür ederim.

Bu proje 118M791 nolu Tübitak 1002 desteği ile gerçekleştirilmiştir, Tübitak MAG grubuna teşekkürlerimi sunarım.

Yeliz ALNAK

ELAZIĞ, 2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLOLAR LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	2
1.2. Çalışmanın Literatürdeki Yeri ve Önemi	13
2. GENEL BİLGİLER	17
2.1. Çelikler	17
2.1.1. Çeliklerin Sınıflandırılması	18
2.2. Kaynak İşlemi	20
2.2.1. Kaynak Yönteminin Sınıflandırılması	22
2.3. Çeliklerin Kaynak Kabiliyetleri	23
2.3.1. Karbonlu Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti	23
2.3.2. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti	24
2.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı	27
2.4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulanma Prensibi	28
2.4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar	29
2.4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Omuz ve Pim Şekilleri	30
2.5. Kaynağın Metalurjik Yapısı	32
2.5.1. Kaynak Bölgesi	32
2.5.2. Termo-mekanik Olarak Etkilenen Bölge (TEB)	33
2.5.3. Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB)	34
3. MATERYAL VE METOT	35
3.1. Malzemelerin Kaynağa Hazırlanması	36
3.2. Karıştırıcı Uç Malzemesi	37
3.3. Karıştırıcı Uçların Hazırlanması	38
3.4. Takım Boyutları	39
3.5. Deneyler İçin Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi	40
3.6. Deneylerin Yapılması	40
3.7. Numunelerin İncelenmesi	44
3.7.1. Mekanik Testler	44
3.7.2. Mikroyapı İncelemeleri	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	52
4.1. Mekanik Deney Sonuçları	54
4.1.1. Çekme Deney Sonuçları	54
4.1.2. Çentik Darbe Deney Sonuçları	61
4.1.3. Mikrosertlik Deney Sonuçları	62
4.2. Mikroyapı Deney Sonuçları	63
4.2.1. Optik Mikroskop Deney Sonuçları	63

4.2.2. SEM Analizi Sonuçları	69
4.2.3. XRD ile Faz Analizi Sonuçları	93
5. SONUÇLAR	95
ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	101



ÖZET

Farklı Standartlardaki Paslanmaz Çelik ve Sade Karbonlu Çelik Çiftlerinin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi, Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi

Yeliz ALNAK

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Şubat 2020, Sayfa: xiii + 100

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen farklı kalitede östenitik paslanmaz çelikler (AISI 304 ve AISI 316) ile sade karbonlu çeliklerin (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) kaynaklı bölgelerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiş, en iyi kaynak çifti belirlenmiştir.

İlk önce AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelik farklı devir sayıları ve ilerleme hızları ile birleştirilmiş, mekanik ve mikroyapı özelliklerine bakılarak optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra, elde edilen optimum değerler ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelik, sade karbonlu çelikler olan AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070 kalite çeliklerle sürtünme karıştırma kaynağı yapılarak birleştirilmiştir. Aynı şekilde farklı devir sayıları ve ilerleme hızları kullanılarak AISI 316-AISI 316 östenitik paslanmaz çelikleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş, AISI 304'te olduğu gibi mekanik ve mikroyapı özelliklerine bakılarak optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Optimum parametreler ile kaynaklanan AISI 304-AISI 10X0 ve AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Uygun kaynaklama koşullarında birleştirilen bu malzemelerin ara yüzey uyumlulukları incelenerek en iyi kaynak çiftleri elde edilmiştir. Sade karbonlu çelik ve paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynakları, universal freze tezgâhında, freze pensine bağlanan, ucuna özel form verilmiş sert metal tungsten karbür uç ile gerçekleştirilmiştir. Kaynaklama işleminden sonra birleştirilen parçaların mekanik özelliklerine çekme, çentik darbe, mikrosertlik, kayma deneyleri yapılarak bakılmıştır. Kaynaklı bölgenin mikroyapıları ise; faz kaymalarını ve iç gerilmeleri belirlemek için XRD (X-ışını difraktometresi), dağlamalı kaba inceleme için OM (optik mikroskop) ve morfolojik yüzey incelemeleri için SEM (taramalı elektron mikroskobu) kullanılarak incelenmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası yapılan mekanik özellik ve mikroyapı incelemeleri sonucunda AISI 304-AISI 10X0 çelik çiftlerinde en iyi mukavemet ve mikroyapı değerlerine AISI 304-AISI 1050'nin, AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerinde ise en iyi mukavemet ve mikroyapı değerlerine AISI 316-AISI 1010 'nın sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Paslanmaz Çelik, Sade Karbonlu Çelik, Mikroyapı

ABSTRACT

Combination of Different Standard Stainless Steel and Plain Carbon Steel Pairs by Friction Stir Welding Method, Examination of Mechanical Properties and Microstructures

Yeliz ALNAK

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine Training
February 2020, Page: xiii + 100

In this study, microstructure and mechanical properties of welded regions of different quality austenitic stainless steels (AISI 304 and AISI 316) and plain carbon steels (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 and AISI 1070) combined with friction stir welding were investigated and the best welding pair was determined.

Firstly, AISI 304 austenitic stainless steel and AISI 304 austenitic stainless steel were combined with different rotation speeds and travel speeds and the optimum welding parameters were determined by considering the mechanical and microstructure properties. Then, using the obtained optimum values, austenitic stainless steel and plain carbon steels were welded together with the friction stir welding. Likewise, AISI 316-AISI 316 austenitic stainless steels were combined with friction stir welding using different rotation speeds and travel speeds. As in AISI 304, optimum welding parameters were determined by looking at the mechanical and microstructure properties. The microstructure and mechanical properties of AISI 304-AISI 10X0 and AISI 316-AISI 10X0 pairs of steels, which are welded by optimum parameters, were investigated. Interfacial compatibility of these materials, which are combined under suitable welding conditions, was examined, and the best welding pairs were obtained. Friction stir welding of plain carbon steel and stainless steel were performed by shaping into a special form of hard metal tungsten carbide pin connected with collette. After the welding process, in order to examine the mechanical properties of joint parts, tensile test, notch impact test, micro hardness, shear test were performed. The microstructures of the welded region were analyzed by using XRD (X-ray diffractometry) to determine phase shifts and internal stresses, OM (optical microscope) for etch coarse microscopy, SEM (scanning electron microscopy) for morphological surface investigations

As a result of mechanical properties and microstructure investigations after friction mixing welding, within AISI 304-AISI 10X0 steel pairs were found to have the best strength and microstructure values of AISI 304-AISI 1050 steel pair. Likewise within AISI 316-AISI 10X0 steel pairs were found to have the best strength and microstructure values of AISI 316-AISI 1010 steel pair.

Keywords: Friction Stir Welding, Stainless Steel, Plain Carbon Steel, Microstructure

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1.	ITAB bölgesinin kaynak bölgesinden içyapıya doğru oluşması muhtemel tane mikro yapısı	15
Şekil 2.1.	Çelik malzemelerin sınıflandırılması	18
Şekil 2.2.	Kaynak yöntemleri	23
Şekil 2.3.	Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökmesi	26
Şekil 2.4.	Sürtünme Karıştırma Kaynak işlemi	28
Şekil 2.5.	Sürtünme Karıştırma Kaynağı şematik gösterimi	28
Şekil 2.6.	Karıştırıcı takım tipleri a) sabit pim, b) ayarlanabilir pim, c) makara tipi pim .	30
Şekil 2.7.	Omuz şekilleri ve özellikleri	31
Şekil 2.8.	Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan karıştırıcı takım pimleri	32
Şekil 2.9.	7075 Al-T651'deki (standart dişli pim, 400 dev/dak ve 51 mm/dak) makro yapısal bölgeler	32
Şekil 2.10.	Çelik plakanın kaynağının enine makro yapısı (Pikrik asit çözeltisi ile dağlanmış)	33
Şekil 2.11.	Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgenin mikro yapısı	33
Şekil 3.1.	Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan freze tezgâhı	35
Şekil 3.2.	Numunenin kenarlarının freze tezgahında kesilmesi	37
Şekil 3.3.	Deney numunesi boyutları	37
Şekil 3.4.	Tungsten karbür karıştırıcı uç	38
Şekil 3.5.	Karıştırıcı uç teknik resmi	39
Şekil 3.6.	Sürtünme karıştırma kaynağı takım boyutları	39
Şekil 3.7.	Plakaların pabuçlarla bağlanması	41
Şekil 3.8.	AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik plakanın sürtünme karıştırma kaynağı	42
Şekil 3.9.	Kaynaklanmış AISI 304 – AISI 1010 çelik çifti	43
Şekil 3.10.	Deney numunelerinin birleştirilmiş levhalardan çıkarım planı	44
Şekil 3.11.	Çekme deneylerinin yapıldığı Shimadzu marka çekme deney seti	45
Şekil 3.12.	Çekme numuneleri	46
Şekil 3.13.	Kayma deney numunesi boyutu	46
Şekil 3.14.	Çentik darbe deney numunesi	47
Şekil 3.15.	Brooks marka çentik darbe deney cihazı	47
Şekil 3.16.	Shimadzu HMV M3 marka mikro sertlik ölçüm cihazı	48
Şekil 3.17.	Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskop	49
Şekil 3.18.	TESCAN MIRA3 XMU marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)	50
Şekil 3.19.	Rigaku miniflex 600 marka XRD cihazı	51
Şekil 4.1.	Devir sayısı 450 dev/dak, ilerleme hızı 63 mm/dak ile kaynaklanan malzeme . .	52
Şekil 4.2.	Devir sayısı 560 dev/dak, ilerleme hızı 80 mm/dak ile kaynaklanan malzeme . .	53
Şekil 4.3.	Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik	54
Şekil 4.4.	Kaynaklı çekme numuneleri	55
Şekil 4.5.	Kaynaksız çekme numuneleri	55
Şekil 4.6.	a) AISI 304 kaynaklı numune, b) AISI 304 kaynaklı numune	56
Şekil 4.7.	a) AISI 316 kaynaklı numune, b) AISI 316 kaynaklı numune	56

Şekil 4.8.	AISI 304 paslanmaz çeliklerine ait mühendislik gerilme (σ)-genleme (ϵ) grafikleri	57
Şekil 4.9.	AISI 316 paslanmaz çeliklerine ait mühendislik gerilme (σ)-genleme (ϵ) grafikleri	58
Şekil 4.10.	Kaynaklanmış paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin deney numuneleri	59
Şekil 4.11.	AISI 304-AISI 10X0 serisi 710 dev/dak devir sayısı, 80 mm/dak ilerleme hızındaki çekme değerleri	59
Şekil 4.12.	AISI 316-AISI 10X0 serisi 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızındaki çekme değerleri	60
Şekil 4.13.	AISI 304-AISI 10X0 serisi 710 dev/dak devir sayısı, 80 mm/dak ilerleme hızındaki kayma değerleri	60
Şekil 4.14.	AISI 316-AISI 10X0 serisi 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızındaki kayma değerleri	61
Şekil 4.15.	Çentik darbe deney sonuçları grafikleri	62
Şekil 4.16.	Mikrosertlik deney sonuçları	63
Şekil 4.17.	Kaynaklı numunenin optik mikroskopta incelenen bölgeleri	64
Şekil 4.18.	AISI 316-AISI 1010 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri	65
Şekil 4.19.	AISI 316-AISI 1030 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri	65
Şekil 4.20.	AISI 316-AISI 1050 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri	66
Şekil 4.21.	AISI 316-AISI 1070 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri	67
Şekil 4.22.	AISI 304-AISI 1010 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri	67
Şekil 4.23.	AISI 304-AISI 1030 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri	68
Şekil 4.24.	AISI 304-AISI 1050 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri	68
Şekil 4.25.	AISI 304-AISI 1070 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri	69
Şekil 4.26.	Kırık yüzeylerin numune platformuna yerleştirilmesi	69
Şekil 4.27.	AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 710 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri .	71
Şekil 4.28.	AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 900 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri .	72
Şekil 4.29.	AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 1120 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri .	74
Şekil 4.30.	AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 710 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri .	75
Şekil 4.31.	AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 900 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri .	77
Şekil 4.32.	AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 1120 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri .	78
Şekil 4.33.	AISI 304-AISI 1010 kaynak çiftinin SEM görüntüleri	80
Şekil 4.34.	AISI 304-AISI 1030 kaynak çiftinin SEM görüntüleri	81
Şekil 4.35.	AISI 304-AISI 1050 kaynak çiftinin SEM görüntüleri	82
Şekil 4.36.	AISI 304-AISI 1070 kaynak çiftinin SEM görüntüleri	83
Şekil 4.37.	Yapraklanma şeklinde tabakalanma	84
Şekil 4.38.	AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinin SEM görüntüleri	85
Şekil 4.39.	AISI 316-AISI 1030 kaynak çiftinin SEM görüntüleri	86
Şekil 4.40.	AISI 316-AISI 1050 kaynak çiftinin SEM görüntüleri	87
Şekil 4.41.	AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftinin SEM görüntüleri	89

Şekil 4.42.	AISI 304-AISI 1010, AISI 304-AISI 1030, AISI 304-AISI 1050, AISI 304-AISI 1070 çelik çiftlerinin kayma yüzeylerinin SEM görüntüleri	90
Şekil 4.43.	AISI 316-AISI 1010, AISI 316-AISI 1030, AISI 316-AISI 1050, AISI 316-AISI 1070 çelik çiftlerinin kayma yüzeylerinin SEM görüntüleri	91
Şekil 4.44.	AISI 304-AISI 1010, AISI 304-AISI 1030, AISI 304-AISI 1050, AISI 304-AISI 1070 çelik çiftlerinin çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri	92
Şekil 4.45.	AISI 316-AISI 1010, AISI 316-AISI 1030, AISI 316-AISI 1050, AISI 316-AISI 1070 çelik çiftlerinin çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri	93
Şekil 4.46.	AISI 304-AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050, AISI 1070 çelik çiftlerinin 710 dev/dak ve 80 mm/dk ilerleme hızındaki kaynak bölgelerinden alınmış XRD desenleri	93
Şekil 4.47.	AISI 316-AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050, AISI 1070 çelik çiftlerinin 710 dev/dak ve 63 mm/dak ilerleme hızındaki kaynak bölgelerinden alınmış XRD desenleri	94

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Karbon çeliklerinin kaynaklanabilirliği ve sınıflandırılması	24
Tablo 3.1. AISI 304 ve AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri	36
Tablo 3.2. AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070 çeliklerinin kimyasal bileşimleri	36
Tablo 3.3. Optimum deneylerin belirlenmesi için kullanılan değerler	40
Tablo 3.4. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek malzeme çiftleri	43
Tablo 4.1. Optimum deneylerin belirlenmesi için kullanılan değerler	53
Tablo 4.2. Paslanmaz çelik-karbonlu çelik kaynaklarından elde edilen çentik darbe deney sonuçları	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ	: Gerilme (MPa)
ε	: Genleme (Birim şekil değiştirme)
Θ	: Sapma açısı
λ	: Dalga Boyu

Kısaltmalar

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
XRD	: X-ışını Difraktometresi
OM	: Optik Mikroskop
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
TWI	: The Welding Institute
HSLA	: Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Çelik
PCBN	: Polycrystalline Cubic Boron Nitride
WC	: Tungsten Karbür
HAZ	: Heat Affect Zone
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
SZ	: Stir Zone (Karıştırma Bölgesi)
DKB	: Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge
TMAZ	: Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge
BM	: Base Metal (Ana Metal)
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
MMC	: Metal Matrisli Kompozit
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
FSW	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
HMK	: Hacim Merkezli Kübik

1. GİRİŞ

Metal malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan pek çok farklı yöntem vardır. Bir katı hal kaynak tekniği olan sürtünme karıştırma kaynağı 90'lı yılların başında İngiltere Kaynak Enstitüsü'nde (TWI – The Welding Institute) geliştirilen ve patentlenen yeni bir kaynak yöntemidir [1]. Yöntem üzerine yapılan araştırmalar, günümüzde alüminyum ve alaşımlarının yanı sıra bakır ve alaşımları, magnezyum ve alaşımları, titanyum ve alaşımları, nikel ve alaşımları, çinko alaşımları, kurşun alaşımları, metal matrisli kompozitler, bazı tür paslanmaz çeliklerin veya alüminyum gibi farklı metallerin ve bazı tür termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde de bu kaynak tipinin kullanılmaya başlandığını göstermiştir [2].

Karbonlu çelikler endüstriyel uygulamaların vazgeçilmez malzeme guruplarından. Orta düzeyde mekanik özellikler sergiledikleri ve düşük maliyetli olmaları, bu malzemeleri popüler kılar. Paslanmaz çelikler ile kıyaslandığında mekanik özellikler bakımından çok büyük farkları yoktur, bunun yanında maliyet ve korozyon dirençleri açısından oldukça düşüktür. Bu nedenle konstrüksiyonlarda malzeme maliyetini aşağıya çekebilmek için işletme koşullarının elverdiği yerlerde daha ucuz olan sade karbonlu veya az alaşımlı çelik kullanılmaya çalışılmaktadır. Bu ise farklı tür çeliklerin kaynaklarını gerektirmektedir. [3].

Paslanmaz çelik, esas olarak paslanmayan çeliklerin genel adıdır. Özellikle nikel ve molibden çeliğin paslanmazlık özelliğini iyileştirmek için alaşım yapımında kullanılsa da paslanmazlığı sağlayan ana element kromdur. Paslanmazlık için gerekli en az krom miktarı, kütle olarak, % 10,5'tir. Dünyada üretilen çeliğin çoğu sade karbon ve alaşımlı çeliktir. Karbon ve alaşımlı çeliğe göre paslanmaz çeliğin, daha küçük fakat cazip ve gelişen bir pazarı vardır. Paslanmaz çeliğin östenitik, martenzitik, ferritik ve çökelme sertleştirmeli gibi dört ana grubu vardır. Östenitik paslanmaz çelik krom, nikel ve manganez alaşımıdır. Bu grupta en çok tanınan 304 paslanmaz çeliktir [4].

Gelişmekte olan ülkemiz endüstrisinde paslanmaz çeliklerin petrokimya, kimya, gıda endüstrisinde kullanılan depolama tankları, basınçlı kaplar, ısı değiştiricileri gibi çok çeşitli kullanım alanları vardır. Bu konstrüksiyonların oluşturulmasında da alaşımlı veya modern kaynak yöntemleri kullanılmaktadır [5].

Literatür araştırması yapıldığında daha önce sade karbonlu çelik ve paslanmaz çelik çiftlerinin sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmesinin çalışılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada farklı kalitede östenitik paslanmaz çelik (AISI 304 ve AISI 316) ve sade karbonlu çelikler (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Öncelikle paslanmaz çeliğin kendisi ile kaynaklanmış, daha sonray yapılan kaynaklamalarda kaynak kalitesine etki eden parametreler değiştirilerek elde edilen kaynaklı bölgelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiş, optimum değerler belirlenmiştir. Elde edilen optimum değerler ile paslanmaz-karbonlu çelik kaynağı yapılmış, mekanik ve mikroyapıları incelenmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak en iyi kaynak çifti elde edilmeye çalışılmıştır.

1.1. Literatür Özeti

Boz ve Kurt [6], Al 1080 Alüminyum alaşımlarını sürtünme karıştırma kaynağı yöntemini kullanarak kaynak yapmışlardır. Karıştırıcı uç tasarımının kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla, kaynak işlemi biri 5x5 kare kesitli, geri kalan kısmı 0,85; 1,10; 1,40 ve 2,1 mm dış hatveli silindirik olmak üzere beş farklı karıştırıcı uç ile gerçekleştirmişlerdir. En iyi birleşme 0,85 ve 1,10 hatveli karıştırıcı uç ile elde edilmiştir. Birleştirmenin kare kesitli uç ile de yapılabileceğini fakat zayıf mekanik ve metalürjik özelliklerin olacağını gözlemlemişlerdir.

Elangovan ve Balasubramanian [7], AA6061 alüminyum alaşımının kaynağı için düz silindirik, konik silindirik, dişli silindirik, üçgen ve kare olmak üzere beş farklı takım profili üzerinde çalışmış ve bu beş takım profilinden kare profilli takımın diğer takımlara göre kusursuz kaynaklar ürettiğini belirtmişlerdir.

Şık vd. [8], 4 mm kalınlığındaki AA2024 alaşımını sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilerek, oluşan bağlantıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyleri gerçekleştirmek için 2344 sıcak iş takım çeliğinden yapılmış, 20 mm omuz genişliğinde, pim uzunluğu 3,8 mm olan helisel diş açılmış karıştırıcı uç kullanmışlardır. Deneylerini 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2500 dev/dak olmak üzere üç farklı devir sayısı, 120 mm/dak ve 200 mm/dak olmak üzere iki farklı ilerleme hızlarında gerçekleştirmişlerdir. En yüksek sertlik, en yüksek çekme dayanımı ve en yüksek eğme yorulma dayanımı değerlerinin 1500 dev/dak – 200 mm/dak parametresi ile yapılan sürtünme karıştırma kaynağı numunelerinde gerçekleştiğini görmüşlerdir.

Hasçalık vd. [9], çalışmalarında AA5251 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğine uç geometrisinin etkisini incelemişlerdir. Kaynak işlemi için kare piramit, kare, üçgen, üçgen piramit ve koni olmak üzere beş farklı takım profili üzerinde çalışmış ve en mukavemetli birleştirmenin kare piramit geometrisine sahip karıştırıcıda olduğunu belirtmişlerdir.

Abdulwadood [10], çalışmasında 2024 – T3 ile 6061 – T6 alüminyum alaşımlarını dört farklı dönüş hızı (600, 800, 1000 ve 1200 dev/dak) ve üç farklı takım ilerleme hızı (25, 75 ve 100 mm/dak) kullanarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmiştir. Karıştırıcı uç olarak 18 mm omuz çapına, 6 mm çapında silindir şeklinde pime sahip, yüksek hız çeliği (HSS) kullanmıştır. İlk deneylerde ilerleme hızını 50 mm/dak olarak sabit tutmuş ve 600, 800, 1000 ve 1200 dev/dak dönüş hızlarında gerçekleştirmiştir. Daha sonra dönüş hızını 1000 dev/dak olarak sabit tutmuş ve 25, 75 ve 100 mm/dak'lık ilerleme hızlarında deneyleri gerçekleştirmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kaynak dolgu bölgesinde ince ve eş eksenli tane yapısı gözlemlemiştir. 1000 dev/dak 'lık dönüş hızı ve 50 mm/dak ilerleme hızında daha iyi çekme özellikleri elde etmiştir.

Aktarer vd. [11], IF çeliği ile 6061 – T6 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğini, ideal takım konumunu ve takım dönme hızının birleşmenin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisini sistematik olarak araştırmışlardır. Deneylerde kullanılan takımın tungsten karbürden imal edildiğini, omuz çapının 16 mm,

pim çapının 5 mm ve pim uzunluğunun 1,8 mm boyutlarında düz silindirik geometriye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kaynak işlemini üç farklı (1000, 1250 ve 1600 dev/dak) takım dönme hızında ve 115 mm/dak sabit ilerleme hızında gerçekleştirmişlerdir. Takım eğim açısını 3 derece ve takım baskı kuvvetini 6 kN olarak belirlemiş ve bu değerleri deney süresince sabit tutmuşlardır. Üç farklı dönme hızında gerçekleştirilen birleşmelerden elde edilen çekme deneyi sonuçlarında, en yüksek mukavemet değerinin ve en fazla uzamanın 1250 dev/dak dönme hızında gerçekleştiğini görmüşlerdir.

Kimapogon ve Watanabe [12], 2 mm kalınlığında alüminyum alaşımı ile düşük karbonlu çelik plakaya sürtünme karıştırma kaynağı uygulayarak takım pim ucu çapı ve uzunluğunun etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında en iyi dayanıma sahip kaynak dikişleri, tabandan 0,2 mm mesafede olduğu pim uzunluğunda elde etmişlerdir. Pim çapının minimum seçilmesi gerektiğini ve en iyi sonuçların pimin çapının 2 – 4 mm olduğu denemelerde elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Fujii vd. [13], IF steel, S12C, S35C olmak üzere 3 farklı karbon çelikleri ile yaptığı sürtünme karıştırma kaynaklarında kaynak parametreleri olarak ilerleme hızını 100 – 400 mm/dak, dönme hızını ise 400 dev/dak olarak almışlardır. IF çeliğiyle karşılaştırıldığında, karbon çeliği birleşme yerlerinin mikroyapıları ve mekanik özelliklerinin, kaynak koşullarından önemli ölçüde etkilendiğini görmüşlerdir. S35C çelik birleşme yeri mukavemetlerinin 200 mm/dak civarında zirve yaptığını, artan ilerleme hızı ile S12C çelik birleşme yerinin mukavemetlerinin arttığını belirtmişlerdir.

Meran ve Canyurt [14], çalışmalarında 3 mm kalınlığında AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik plakaları sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Takım dönüş hızları, ilerleme hızları, takım baskı kuvvetleri ve takım açılarının birleştirmeye etkilerini araştırmışlardır. Pim çapı 5 mm, pim uzunluğu ise 2,8 mm olan karıştırıcı takımın ile paslanmaz çelik plakaları birleştirmek için beş farklı devir sayısı, üç farklı ilerleme hızı, üç farklı takım baskı kuvveti ve üç farklı takım açısı kullanmışlardır. Kaynak bölgesinin maksimum mukavemetini 950 dev/dak'lık devir sayısı ve 60 mm/dak'lık ilerleme hızı, 9 kN'luk takım baskı kuvveti ve 1,5 derece'lik takım eğim açısı parametreleri ile kaynakladıklarında elde etmişlerdir. Ayrıca çalışmada parametre olarak çeşitli takım ucu profillerini incelemişler, üçgen takım ucu profillerine sahip karıştırıcı ucun AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Lakshminarayanan [15], 3 mm kalınlığındaki AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin sürtünme karıştırma kaynağını, karıştırıcı takımın pim çapı omuz kısmında 9 mm uç kısmında 6 mm olan ve 2,7 mm pim uzunluğuna sahip konik bir karıştırıcı uç vasıtasıyla gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında farklı ilerleme hızı, devir sayısı ve omuz çapı kullanarak optimum değerleri elde etmeyi amaçlamışlardır. En iyi sonuçları 441 dev/dak devir sayısı, 118 mm/dak ilerleme hızı ve 17,5 mm omuz çapında elde etmişlerdir.

Bilgin ve Meran [16], çalışmalarında AISI 430 Ferritik paslanmaz çeliğin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde takım dönme ve ilerleme hızlarının etkilerini

incelemişlerdir. Takım malzemesi olarak omuz çapı 20 mm, pim çapı 5,7 mm olan eşkenar üçgen profilli tungsten karbür uç kullanmışlardır. Pim uzunluğunu ve birleştirme işlemini başarı ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sırasında, takım basınç kuvvetini 3,5 kN ve takım açısını ise 0 derecede de sabit tutmuşlardır. İlk olarak 125 mm/dak sabit ilerleme hızında iken takım devir sayısını 560, 710, 900, 1120, 1400 dev/dak olarak değiştirmişler en iyi mekanik direnç değerlerinin 1120 dev/dak dönme hızında elde edildiğini belirtmişlerdir. Daha sonra ise takım devir sayısını 1120 dev/dak'da sabit tutarak ilerleme hızını 80, 100, 125, 160, 200 mm/dk olarak değiştirmişler, bunda ise en iyi mekanik direnç değerlerinin 125 mm/dak ilerleme hızında meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Lienert vd. [17], 6,35 mm kalınlığındaki AISI 1018 çeliğinin 0,42 – 1,68 mm/s ilerleme hızları, devir sayıları ise 450 – 650 dev/dak olduğu durumda kaynak edilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada wolfram ve molibden alaşımlı takımlar kullanmışlardır. Deneylerde kaynak metalinin ve takımın ulaştığı sıcaklık değerini 990 °C, kaynak merkezinin ulaştığı sıcaklık değerini de yaklaşık 1100 °C.-1200 °C. olarak ölçmüşlerdir. Kaynak sırasında takımın kızıl turuncu renge ulaştığını belirlemişlerdir. Takım üzerindeki aşınmayı gözlemleyerek en büyük aşınmanın ilk dalış esnasında yük altında, tam ısınmamış soğuk metalin hareketi esnasında oluştuğunu belirtmişlerdir. Takım aşınmasının önüne, ön ısıtma, düşük dalış değeri, ön delik uygulamaları ile geçilebileceğini belirtmişlerdir. Takım sıcaklığının 180 saniyelik dalma periyodunun sonunda sabit bir sıcaklıkta kaldığını, ilerleme ile birlikte sıcaklığının arttığını tespit etmişlerdir.

Park vd. [18], PBCN takımı ile 6 mm kalınlığında AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirmişlerdir. Deneylerini 550 dev/dak devir sayısı ve 1,3 mm/s ilerleme hızı, 3,5 derece dalma açısı ile gerçekleştirmişlerdir. Kaynak dikişinin mikroyapısı ve sigma fazı oluşumunu incelemişler, paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesindeki içyapısının alüminyumda elde edilen yapıya benzediğini gözlemlemişlerdir. Kaynak merkezinden pimin ayrılış kısmında sigma fazı oluşumuna rastlanmadığını tespit etmişlerdir.

Meran vd. [19], AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağını incelemişlerdir. Başlangıçta takım malzemesi olarak soğuk iş takım çeliği X155CrVMo12-1 'i kullanmış, bu çeliğin paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı için uygun olmadığını görmüşler, daha sonra tungsten karbürü takım kullanmışlar ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Devir sayısını 1000 dev/dak'da sabit tutarak 40 ile 100 mm/dak arasında değişen farklı ilerleme hızlarında yaptıkları kaynaklı ara yüzünün çekme mukavemetlerini, sertlik değerlerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. En iyi görünüm ve penetrasyona sahip kaynak, 63 mm/dak'lık ilerleme hızında elde etmişlerdir. Ayrıca çalışmalar sırasında takım daldırma açısının kaynak dikişinde önemli bir etkisinin olduğu gözlemlemişlerdir. Bu amaçla yapılan deneylerde ise takım daldırma açısının 1.45 derece olduğu durumda en iyi kaynağı elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Nathan vd. [20], sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 5 mm kalınlığında yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliğin çekme dayanımı ve darbe dayanım

özellikleri üzerinde takım omuz çapının levha kalınlığı oranına etkisi araştırmışlardır. (HSLA) çeliğini 20 mm'den 30 mm'ye değişen omuz çapına sahip beş tungsten esaslı alaşımlı karıştırıcı uçlar kullanarak, 600 dev/dak takım dönme hızı ve 30 mm/dak ilerleme hızı ile kaynaklamışlardır. Karıştırıcı ucun omuz çapı değişirken, takım ucu sabit ölçülerde olup, omuzda 12 mm'den pim ucunda 8 mm'ye doğru daralan konik uç olarak imal etmişlerdir. Bu beş farklı takım omuz çapının kaynaklı bölgede mikroyapısal karakteristikleri ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 25 mm'lik bir takım omuz çapı (levha kalınlığının 5 katı) kullanılarak yapılan kaynaklı bölgenin diğerlerine kıyasla üstün mekanik özellikler sergilediğini bulmuşlardır.

Cho vd. [21], 2 mm kalınlığında 409 ferritik paslanmaz çeliği çok taneli kübik bor nitrür (PCBN) malzemeden yapılmış, dışbükey karıştırıcı uç kullanarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları PCBN karıştırıcı ucun dışbükey, omuz kökünde 36,8 mm'lik bir omuz çapına, 5,7 mm'lik bir pim çapına sahip olduğunu belirtmişler, 1,57 ve 1,65 mm'lik iki farklı dalma derinliği ile sürtünme karıştırma kaynağını gerçekleştirmişlerdir. Karıştırma bölgesinde oldukça ince taneli bir mikroyapı elde edilmişlerdir. Elde ettikleri küçük tanelerin karıştırma bölgesinin sertliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak yüksek kalitede kusursuz kaynaklar elde etmişlerdir.

Aghaei ve Dehghani [22], çalışmalarında, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen Monel400 ve AISI 316 paslanmaz çeliğin mikroyapı ve mekanik özelliklerine dönme ve ilerleme hızlarının etkilerini araştırmışlardır. Karıştırıcı uç olarak, 16 mm çapında bir omuza sahip WC (tungsten karbür) malzeme kullanmışlardır. Kullanılan dönme hızını 400 ila 600 dev/dak arasında değiştirirken, ilerleme hızını 50 ila 200 mm/dak arasında değiştirmişlerdir. Kaynakların mikroyapı evrimlerini, optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak karakterize etmişlerdir. Daha sonra kaynak dolgusunun mekanik özelliklerini oda sıcaklığında mikro sertlik ve çekme testlerini kullanarak değerlendirmişlerdir. Kusursuz kaynakları, ilerleme hızı 50 ila 100 mm/dak olan 400 dev/dak hızında elde ederken, ilerleme hızının 150 mm/dak'ı aştığında yiv (yarık) benzeri bir hata oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Jafarzadegan vd. [23], AISI 304 ile St37 çeliğini 50 mm/dak ilerleme hızında, 400 ve 800 dev/dak'lık takım dönme hızlarında ve takıma 3 derece'lik açı vererek sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak mikroyapısı optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanarak incelemişlerdir. Kaynak alanında ana metaller dışında dört farklı bölge bulmuşlardır. Bunlar: I – St37 çeliğinde ısıdan etkilenen bölge (HAZ), II – St37 çeliğinde karıştırma bölgesi (SZ), III – 304 çeliğinde karıştırma bölgesi (SZ) ve IV – 304 çeliğinde termomekanik olarak etkilenen bölge (TMAZ) dir.

Jafarzadegan vd. [24], AISI 304 ile St37 çeliğini 50 mm/dak ilerleme hızında, 600 dev/dak'lık takım dönme hızında ve takıma 30'lık açı vererek sürtünme karıştırma kaynağı ile iyi bir birleşme elde etmişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında oluşan

yüksek sıcaklık ve deformasyonun St37 karbon çeliğindeki östenitin yeniden kristalleşmesine sebep olduğunu, bu taneciklerin sürtünme karıştırma kaynağından sonra soğuyarak ince ferrit ve perlitte dönüştüğünü belirtmişlerdir. 304 paslanmaz çeliğin karıştırma bölgesinde metadinamik yeniden kristalleşmenin bazı özellikleri ile ince tane yapısını görmüşlerdir. Metadinamik yeniden kristalleşmenin 304 paslanmaz çelik östenit tanelerinde oluştuğunu ve karıştırma bölgesinde tane küçülmesine neden olduğunu ileri sürmüşlerdir. Karıştırma bölgesinin sertliğinin, her iki çeliğin karıştırma bölgesinde tane küçülmesine bağlı St37 temel metalinden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Kaynağın, St37 çeliğine göre daha yüksek mukavemet ve sünekliğe sahip olduğunu ve enine çekme örneklerinin kırılmasının St37 çeliğinde gerçekleştiğini görmüşlerdir.

Sharma ve Diwivedi [25], çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirdikleri 3 mm kalınlığındaki yapı çeliği ve ferritik paslanmaz çeliğin benzer olmayan (*dissimilar*) kaynaklarının mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapı çeliğini ve ferritik paslanmaz çeliği kaynaklamadan önce tavlama işlemine tabi tutmuşlardır. Karıştırıcı takım olarak pim uzunluğu 2,75 mm olan, omuzda 10 mm'den pim ucunda 8 mm'ye doğru daralan konik tungsten karbür uç kullanmışlardır. İşlem parametrelerini optimize etmek için çok fazla deney yapmışlar ve en uygun değerler olarak takım açısını 1,5 derece, ilerleme hızını 20 mm/dak ve devir sayısını 508 dev/dak olarak belirlemişlerdir. Kaynak metalinde kendisi de dahil olmak üzere altı farklı bölge bulmuşlardır. Kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerini belirlemek için mikro sertlik ve çekme deneyleri yapmışlar, mikrosertliğin her girintinin üzerinde bulunan madde ve faza bağlı olarak 186 ila 572 HV arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Çekme deneyi sonrasında enine kaynak numunesinin gerilme mukavemetinin, yapı çeliği ana metalinden daha yüksek, ferritik paslanmaz çelik ana metalinden daha düşük olduğunu, boyuna kaynak numunesinin çekme mukavemetinin ise her iki ana metalden çok daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Kaynak numunesindeki kırılmanın, yapısal çelik ana metalinden gerçekleştiğini bildirmişlerdir.

Reynolds vd. [26], 3,2 mm kalınlığındaki 304L kalite paslanmaz çeliği tungsten alaşımlı 19 mm omuz çapına sahip takımla sabit bir ilerleme hızında, 300 ve 500 dev/dak devir sayılarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişler, oluşan kaynak yapısını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Düşük devir sayısı ile yapılan kaynağın mm başına ısı girdisinin daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Isı girdisinin düşüklüğü, beraberinde düşük sıcaklıkta kaynak, kaynak merkezinde daha küçük tanecikli yapı elde edilmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Uygulamalarda tanelerin daha küçük, çekme dayanımının daha yüksek olduğunu ayrıca kaynaklı parçanın artık gerilmesinin ergitme kaynağında ulaşılan gerilmelere eşdeğer olduğunu tespit etmişlerdir.

Çakır ve Çelik [27], çalışmalarında 4 mm kalınlığında, Al 5754 – Cu malzeme çiftini 780 dev/dak ve 1330 dev/dak takım dönme hızında, 20 ve 50 mm/dak ilerleme hızında, 0 ve 1 mm takım konumlandırmasında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak parametrelerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisini incelemişlerdir.

Mekanik özelliklerin tespitinde çekme testleri ve mikrosertlik ölçümleri yapmışlar, mikroyapıları ise optik mikroskop ile incelemişlerdir. 0 mm konumlandırmada karıştırıcı ucu alüminyum ve bakır levhaya 0 (sıfır) olarak konumlandırmışlardır. Bu şekilde yaptıkları birleştirmelerde kaynak kesitinde gözle görülür boşluklar ve düşük çekme mukavemetleri elde etmişlerdir. Daha sonra ucun pozisyonunu değiştirip karıştırıcı ucu bakıra nazaran daha yumuşak olan alüminyum tarafına 1 mm kaydırarak deneylerini gerçekleştirdiklerinde daha iyi mekanik değerler elde ettiklerini ifade etmişlerdir. En yüksek çekme dayanımını 1330 dev/dak takım dönme hızında, 20 mm/dak ilerleme hızında ve 1 mm takım konumlandırmasında elde etmişlerdir. İlerleme kenarına daha sert metalin, yığma kenarına daha yumuşak metalin yerleştirilmesinin daha iyi kaynak özellikleri verdiğini, yumuşak metalin ilerleme kenarına taşınmasının daha kolay olduğunu belirtmişlerdir. Dayanım değeri düşük malzemelerde sertlik değişimlerinin daha fazla, yüksek mukavemetli malzemelerde ise ana malzemeye yakın sertlik değerlerinin olduğunu tespit etmişlerdir. 1330 dev/dak takım dönme hızında, 780 dev/dak takım dönme hızına göre sürtünme karıştırma kaynağı için uygun ısı girdisinin sağlandığını ve optik incelemelerinde de iyi bir kaynaklanmanın meydana geldiğini görmüşlerdir.

Lakshminarayanan ve Balasubramanian [28], çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 4 mm kalınlığındaki 409M ferritik paslanmaz çelik bağlantıların mikroyapısı ve mekanik karakterizasyonunu incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağını 20 mm omuz çapına, 3,7 mm pim uzunluğuna sahip konik silindirik uç ile 1000 dev/dak takım dönme hızı ve 50 mm/dak ilerleme hızı ile gerçekleştirmişlerdir. Optik mikroskop, mikrosertlik testi, enine çekme, darbe ve eğme testi yapmışlardır. Birleştirilen 409M ferritik paslanmaz çeliği optik mikroskopta incelediklerinde ana malzemedeki iri ferrit taneciklerinin, hızlı soğuma oranı ve sürtünme ile oluşan şiddetli plastik deformasyonun neden olduğu yüksek gerilime bağlı olarak ferrit ve martenzitin çok ince dubleks yapısına dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. Kaynak metalinin enine çekme mukavemetini ana malzemeye kıyasla %57 daha yüksek bulmuşlardır. Bunun nedeninin ise sürtünme karıştırmanın neden olduğu kaynak metalinin çok ince dubleks ferritik martenzitik yapısından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ana metalin sertliğini yaklaşık 170 HV olarak ölçmüşler, karıştırma bölgesinin sertliğinin ana malzemeden daha yüksek olan 320 ila 382 HV arasında değiştiğini görmüşlerdir. Kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) darbeye dayanıklılığını değerlendirmek için çentik darbe numunelerindeki çentikleri kaynak metalinin yanı sıra ısıdan etkilenen bölgeye (HAZ) yerleştirmişlerdir. Ana metalin darbe dayanımını 34 J olarak ölçmüşler, çentiğin kaynak metalinde olduğu durumdaki darbe dayanımını 28 J bulurken, HAZ (ısıdan etkilenen bölge)'da olduğu durumdaki darbe dayanımı ise 30 J olarak bulmuşlardır. Eğme testi sonuçlarında ise sürtünme karıştırma kaynağı bağlantılarının kabul edilebilir bir süneklik sergilediğini görmüşlerdir.

Kumar vd. [29], çalışmalarında 3 mm kalınlığında, haddelenmiş AISI 316L ostenitik paslanmaz çelik levhaları sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirmişler, mikroyapı ve

mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak parametrelerinden ilerleme hızını 45 mm/dak, eksenel yükü 12 kN ve takım eğim açısını 1,5 °'de sabitlemişler, 400 dev/dak ile 800 dev/dak arasında farklı takım dönme hızlarında kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Birleştirme işlemi için omuz çapı 18 mm, omuzda 8 mm'den pim ucunda 6 mm'ye daralan konik, %99 tungsten-%1 lantanum oksit içeren karıştırıcı uç kullanmışlardır. Kaynak bağlantılarının esas olarak karıştırma bölgesi *SZ*, termomekanik olarak etkilenen bölge *TMAZ* ve ana metal *BM* olmak üzere üç ayrı bölgeden oluştuğunu görmüşlerdir. Isıdan etkilenen bölge (*HAZ*) görülmemesinin sebebini sürtünme karıştırma kaynağı sırasında meydana gelen düşük pik sıcaklıklarından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Karıştırma bölgesinin tane boyutunun hem ısı üretimi hem de malzeme gerilme oranı tarafından büyük ölçüde etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Kaynak bölgesinde kayma bantlarının meydana geldiğini ve bu kayma bantlarının yoğunluğunun deformasyon sıcaklığından etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kayma bantlarının dar bölgesi içindeki çok noktalı enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) analizinin sonuçlarında kaynak bağlantılarında tungsten kalıntılarına rastlamışlardır. Kaynak bağlantılarının gerilme mukavemetinin takım dönme hızına duyarlı olduğunu ve maksimum çekme dayanımının 600 dev/dak takım dönme hızında meydana geldiğini bulmuşlardır.

Bozkurt ve Boumerzough [30], çalışmalarında AA2124-T4 alaşımlı metal matrisli kompozitin (MMC) sürtünme karıştırma kaynağı üzerinde takım etkisini incelemişlerdir. Kullandıkları takımın omuz çapı 18 mm, pim çapı 6 mm olup takım malzemesini yüksek hız çeliği (HSS) seçmişlerdir. Kaynak işlemini gerçekleştirmek için ilk olarak ana takım malzemesi olan yüksek hız çeliğini kaplamadan yalın halde, ikinci olarak HSS malzemesi CrN ile kaplayarak ve son olarak ana malzemeyi AlTiN ile kaplayarak üç ayrı takım malzemesi kullanmışlardır. Sürtünme karıştırma kaynak işlemini 900 dev/dak takım dönme hızında, 45 mm/dak ve 115 mm/dak ilerleme hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen kaynakların makro yapılarını, mikroyapılarını ve maksimum çekme mukavemetlerini incelediklerinde en iyi kaynak bağlantılarının AlTiN ile kaplanmış takım ile gerçekleştiğini görmüşlerdir. Ayrıca ilerleme hızının pimin radyal aşınma üzerinde etkili olduğunu, ilerleme hızının yükselmesi ile aşınma oranının doğru orantılı olduğunu ve maksimum aşınma oranının 900/115 kaynak parametresinde, kaplamasız takımda meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Başak vd. [31], çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan karıştırıcı uçlardan altı farklı tipte pim (karıştırıcı uç) tasarlamışlardır. Pim malzemesi olarak AISI 4340 ıslah çeliği kullanmışlar ve bu çeliği 50-52 HRC sertliğinde ısıtma işlemi tabii tutmuşlardır. Tasarımlarında pim boyunu 5 mm, pim çapını 5 mm almışlar ve bu çapın üzerine vida adımı 1 mm olan yuvarlak, kare, trapez, testere, üçgen vida açarak beş adet vidalı uç ile ham kanallı pim olmak üzere altı adet pim tasarımı ve imalatı gerçekleştirmişlerdir. AA6066 kalite alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kullandıkları farklı tipteki pimlerin hepsinde devir sayısını 900 dev/dak, ilerleme hızını ise 31,5 mm/dak olarak almışlardır. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi için değişik profillere sahip uçlar

içinde en uygun birleşimin üçgen vidalı uç ile elde edileceğini görmüşlerdir.

Sharma ve Dwivedi [32], 3 mm kalınlığındaki tavlanmış yapı çeliği levhalarını 20 mm/dak ilerleme hızı, 508 dev/dak'lık takım dönme hızı ve tungsten karbür pim kullanarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynaklı ve kaynak sonrası ısıtıl işlem görmüş koşullar olarak kaynak bağlantılarının mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak bağlantısının karıştırma bölgesinin sertliği ana malzemeden daha yüksek çıktığını görmüşler ve bunu tane küçüklüğüne ve martenzitik yapının oluşumu ile ilişkilendirmişlerdir. Ayrıca kaynak sonrası ısıtıl işlem görmüş koşuldaki karıştırma bölgesinin sertliğinin kaynaklı duruma göre biraz daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Kaynaklı bağlantının enine ve boyuna çekme dayanımlarını ana malzemeden daha yüksek bulmuşlardır. Kaynak sonrası ısıtıl işlem görmüş koşuldaki maksimum çekme mukavemeti ve akma dayanımına baktıklarında sünekliğin çok az arttığını ve mukavemetinin azaldığını görmüşlerdir. Kaynak sonrası ısıtıl işlemin, sürtünme karıştırma kaynağı bağlantılarının üç bölgesinde, yani karıştırma bölgesinde, ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) ve ana metalde tane irileşmesine yol açtığını belirtmişler, tane irileşmesinin sebebini ise kaynak sonrası ısıtıl işlem sırasında yüksek sıcaklıkta metalin karıştığı bölgedeki ağır plastik deformasyona bağlamışlar.

Ramesh vd. [33], 3 mm kalınlığında haddelenmiş HSLA (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım Çelik) levhaları, 18 mm omuz çapına ve 2,7 mm pim uzunluğuna sahip konik silindirik, tungsten renyum alaşım karıştırıcı uç kullanarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Takım dönme hızını 500 dev/dak, eksenel kuvveti ise 9 kN değerinde sabit tutarak ilerleme hızını 57 mm/dak ile 97 mm/dak arasında değiştirerek mikroyapı ve gerilme mukavemeti arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Makroskobik kusur oluşturma eğiliminin takım ilerleme hızının artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Kaynak dikişinin mikro yapısının üst beynit ince ferrit fazlarından oluştuğunu, üst beynit miktarının tepe sıcaklığındaki düşüş ve hızlı soğumaya bağlı olarak takım dönme hızının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir. HSLA plakaları ile karşılaştırıldıklarında kaynak dikişlerinin sertliğinin daha yüksek olduğunu görmüşler, bunun nedenini ise sert beynit ve ince ferrit fazlarına bağlamışlardır. Ayrıca üç noktadan eğme testi yapmışlar, 97 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak hariç, kaynaklı bağlantıların tamamının eğme testini başarı ile geçtiğini görmüşlerdir.

Zhang vd. [34], sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takım tipleri, şekilleri, boyutları, malzemeleri ve aşınma davranışları hakkında daha önce yapılan çalışmaları incelemişlerdir. Sabit, ayarlanabilir ve bobin tipi olmak üzere üç tip takımın sürtünme karıştırma kaynağında kullanıldığını görmüşlerdir. Bunlardan sabit tipe sahip takımın probun sabit kalınlıktaki parçaları kaynak yapabildiğini, ayarlanabilir tipteki takımın probun omuz ve pin olmak üzere birbirinden bağımsız iki parçadan oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayarlanabilir takımın omuz probun farklı malzemeler kullanılarak üretebileceğini, probun aşındığında veya hasar gördüğünde kolayca değiştirilebileceğine değinmişlerdir. Ayrıca ayarlanabilir takımın probun uzunluğunun değişken

olabileceğinden farklı farklı iş parçalarının kaynaklanmasına ve sürtünme karıştırma kaynağının sonunda bırakılan çıkış deliğinin doldurulması için stratejilerin uygulanmasına izin verilebileceğini belirtmişlerdir. Bobin tipi takımın ise üst omuz, prob ve alt omuz olmak üzere üç parçadan oluştuğunu, üst ve alt omuz arasındaki probun ayarlanabilirliğinden dolayı çoklu kalınlıktaki birleşim yerlerini kaynak yapabildiğini belirtmişlerdir. Üç tip takımını incelediklerinde bobin tip takımın diğer iki tip takımdan farklı olarak destek örsüne gerek olmadığını buna karşılık sadece iş parçası yüzeyine dik olarak çalışabildiğini belirtmişlerdir. Takım problemlerinin şekillerini incelediklerinde, karşılıklarına silindirik ve konik prob olmak üzere iki farklı şeklin çıktığını, her iki prob şekillerinin de avantajlarının ve dezavantajlarının olduğunu görmüşlerdir. Silindirik problemlerin 12 mm kalınlığa kadar levhaların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanıldığını ancak daha kalın levhalarda kaynak bütünlüğünü korumanın zor olduğunu vurgulamışlardır. Konik problemlerde ise yüksek sürtünme ısısının iş parçası ile probun daha geniş temas alanı nedeniyle plastik deformasyonu artırdığını buna karşılık yüksek sıcaklık ve hidrostatik basıncın ise ciddi şekilde takım aşınmasına neden olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca problemlerin dişli, düz ve oluklu olmak üzere farklı şekillerde yapılabileceğini, yüksek mukavemetli ve çok aşındırıcı alaşımların birleştirilmesi durumunda dişlerin kolayca aşınabileceği göz önünde bulundurularak dişli olmayan karıştırıcı uçların (problemlerin) seçilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Takım malzemelerini incelediklerinde kullanılacak takım malzemesinin iş parçası malzemesine, istenen takım ömrüne ve ayrıca kullanıcının kendi deneyim ve tecrübelerine bağlı olarak çok çeşitlilik gösterdiğini görmüşlerdir. Aşınma mekanizmasının iş parçası ile takım malzemeleri arasındaki etkileşime, seçilen takım geometrisine ve kaynak parametrelerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları araştırmalardan Al ve Mg gibi hafif metallerin kaynağında kullanılan karıştırıcı ucun genellikle takım çeliğinden yapıldığını ve çok az aşınmaya maruz kaldığını bununla birlikte bu çeliklerin Ti, Ni, çelik vb. gibi yüksek erime sıcaklığına sahip malzemeler için uygun olmadığını açıklamışlardır. Yüksek mukavemetli malzemeler için karıştırıcı uçların WC-Co, TiC ve PCBN gibi 1000 °C 'den daha yüksek sıcaklıklarda, üstün termal ve aşınma direncine sahip sert metallerden, karbürlerden ve metal matris kompozitlerden yapıldığını belirtmişlerdir. Uygun maliyetli ve uzun ömürlü takımların yüksek mukavemetli malzemeler için kullanılmadığını bu nedenle yeni takım malzemeleri geliştirmek ve yeni etkili özel takımlar tasarlamak için daha fazla çaba sarf edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Sharma vd. [35], çalışmalarında 3 mm kalınlığında alüminyum ve bakır plakayı 900 dev/dak dönme hızı, 40 mm/dak ilerleme hızı kullanarak birleştirmişlerdir. Karıştırıcı uç malzemesi olarak H13 sıcak kalıp çeliğini seçmişler, birleştirme işlemini silindirik, konik, silindirik kam, konik kam ve kare olmak üzere dört farklı pim profili kullanarak gerçekleştirmişlerdir. En iyi birleşme ve mikrosertliği kare pim profiline sahip karıştırıcı uçta gözlemlemişlerdir.

Rafei vd. [36], Al-Mg alaşımı (AA5083) ile A316L ostenitik paslanmaz çeliği

sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirmişlerdir. Kaynağı gerçekleştirmek için 15 mm omuz çapına, 4 mm pim çapına ve 3,9 mm pim uzunluğuna sahip H13 alaşım karıştırıcı takım kullanmışlardır. Daha önce yaptıkları testlere dayanarak takım dönme hızını 250 dev/dak olarak belirlemişler ve kaynak ilerleme hızlarını 25, 20 ve 16 mm/dak olarak seçmişlerdir. Yaptıkları literatür araştırmasına göre işlem sıcaklığında malzemenin erimesini önlemek için, pimin, düşük erime sıcaklığı ile birlikte alüminyum tarafına kaydırıldığını belirtmişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemini yapmak için takımı önce 1200 dev/dak 'lık yüksek dönme hızına sahip iken iş parçasının üst yüzeyine temas edene kadar daldırmışlar, pim iş parçasına daldıktan sonra dönme hızını 250 dev/dak 'ya düşürmüş ve kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Kaynak işlemi sırasında termal geçişleri incelemek için levhalara 1 mm çapında dört adet termokupl yerleştirmişlerdir. Termokuplları, hem ilerleyen (A316L) hem de gerileyen (AA5083) taraflara, kaynak hattına göre simetrik konumlarla yerleştirmişler ve sıcaklıkları, kaynak merkez hattından 1 ve 5 mm mesafelerde izlemişlerdir. Kaynak kesitlerini incelemek için hem optik hem de FE-SEM (alan salınlı taramalı elektron mikroskobu) kullanarak mikroyapı incelemeleri yapmışlardır. Alüminyum tarafındaki 1 mm konumundaki sıcaklığın, çelik taraftaki karşılık gelen noktadan biraz daha yüksek olduğunu, bunu, pimin alüminyum tarafına olan yakınlığından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Optik mikroskopta mikroyapıları incelediklerinde A316L ana alaşımının ortalama çapı yaklaşık 30 µm olan eş eksenli taneler içerdiğini, AA5083 alaşımının ise 50-100 µm olan daha büyük çaplı uzamış tanecikler içerdiğini gözlemlemişlerdir. FE-SEM görüntülerine baktıklarında karıştırma bölgesinin ilerleme hızının 25 mm/dak olduğu durumda alüminyum tarafında karıştırıcı ucun aşınma ve kazıma etkisinden dolayı çelik parçalar ve tünelleme kusurları olduğunu bildirmişlerdir. 20 mm/dak ilerleme hızında tünelleme kusurlarının ortadan kalktığını, bağlantının uygun bir ara yüz kalitesi gösterdiğini, 16 mm/dak ilerleme hızında ise 20 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynağa benzer özellikte bir bağlantı ara yüzü elde edildiğini görmüşlerdir. Gerilme özelliklerini incelediklerinde ilerleme hızının 20 mm/dak ve 25 mm/dak olduğu durumlarda çekme testi için gerekli performansı gösteremediklerini, kopmanın AA5083 tarafında gerçekleştiğini görmüşlerdir. Optimum sürtünme karıştırma kaynağı parametrelerini 250 dev/dak dönme hızı ve 16 mm/dak ilerleme hızı olarak belirlemişlerdir.

Li vd. [37], 2,4 mm kalınlığa sahip süper ostenitik çelik plakaları tungsten renyum (W-Re) pim kullanarak 100 mm/dak 'lık sabit bir ilerleme hızı ile 300 ve 400 dev/dak 'lık dönme hızlarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişler, mikroyapı ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları süper ostenitik çelik S32654 'ü azot atmosferi altında bir endüksiyon ocağı kullanarak eritmişler, sıcak dövme ve 1100 ila 1250 °C arasındaki bir sıcaklık aralığında 3 mm kalınlığındaki bir levha içine sıcak haddelemişlerdir. Sonra ikincil fazın matris içinde tekrar çözünmesini sağlamak için suda sertleştirmişlerdir. Daha sonra plakadan oksidi çıkarmışlar ve 200 x 75 x 2,4 mm boyutlarında kesmişlerdir. Her iki dönme hızında kusursuz birleşme elde ettiklerini,

karıştırma bölgesinde ince taneli mikroyapılar gözlemlediklerini ve sürtünme karıştırma kaynağı sırasında neredeyse hiç azot içeriği kaybetmediklerini belirtmişlerdir. Pim (takım probu) ile kaynaklama arasındaki aşımaya bağlı olarak 400 dev/dak 'da karıştırma bölgesinde tungsten (W) ve renyum (Re) içeren belirgin bant yapıları gözlemlemiştir. Ortalama tane büyüklüğünün dönme hızının 300 dev/dak 'dan 400 dev/dak 'ya yükseltilmesiyle hafifçe düştüğünü gözlemlemiştir. Tane küçültmenin, yüksek yoğunluklu yer değiştirmenin ve altyapıların kombine hareketinin sertliği ve mukavemeti arttırdığını buna karşılık kaynak yerinin (bağlantının) plastik deformasyon kapasitesini büyük ölçüde azalttığını bildirmişlerdir. Uygun kaynağın 300 dev/dak dönme hızı ve 100 mm/dak ilerleme hızında olduğunu belirtmişlerdir.

Husain vd. [38], çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirdikleri C-Mn çeliğinin ısısal durum ve deformasyonunun kaynak dikişindeki doku ve mikroyapı üzerindeki etkisini incelemiştir. 2 mm kalınlığındaki çelik plakaları birleştirmek için ilerleme hızını 50 mm/dak, takım dönme hızını ise 800-1000-1200-1400 dev/dak olarak belirlemiştir. Ana metal, az miktarda perlit içermekte iken sürtünme karıştırma kaynağından sonra kaynak dolgusunun beyrit ile birlikte kalın ferritten oluştuğunu görmüşlerdir. Kaynak dikişinin ortalama mikrosertliğine baktıklarında tek fazlı ostenitten faz dönüşümü sırasında beyrit oluşumu ve dinamik yeniden kristalleşme yoluyla ferrit tane küçülmesinden dolayı ana alaşıma göre önemli bir artış gözlemlemiştir.

Karami vd. [39], kaynak parametrelerinin mikroyapı ve çekme özellikleri üzerine etkisini incelemek için düşük karbonlu çeliği farklı kaynak parametreleri kullanarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Düşük dönme hızında veya yüksek ilerleme hızında yapılan birleştirmelerde ısı girişi miktarı ve akmanın yeterli olmamasından dolayı kaynak hatası oluşma olasılığının yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık, yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızında, karıştırma bölgesinin sıcaklığı önemli miktarda ısı girişi sayesinde tek bir ostenit bölgesine ulaştığını görmüşlerdir. Kaynaklanan numunenin gerilme davranışını incelediklerinde ana numune ile karşılaştırdıklarında nispeten daha yüksek akma dayanımı ve sınırlı düzgün uzama gözlemlemiştir. Bunu da, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunenin karıştırma bölgesi (SZ) veya ısıdan etkilenen bölgelerde (HAZ) daha ince mikroyapıların geliştirilmesine bağlamışlardır.

Kumar vd. [40], sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 316L ostenitik paslanmaz çeliğin kaynağında kullanılan farklı pim (karıştırıcı uç) malzemelerinin mekanik ve mikroyapılara etkisini incelemiştir. 3 mm kalınlığındaki ostenitik paslanmaz çelik plakaları tungsten lantan oksit ve tungsten ağır alaşım olmak üzere iki farklı tungsten esaslı malzemeden oluşan pim kullanarak birleştirmişlerdir. Aynı takım omuzu ve pim geometrisini kullandıkları her iki takımında, aynı dönme hızını, ilerleme hızını eksenel kuvveti ve eğim açısını kullanarak deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Tungsten lantan oksit ve tungsten ağır alaşım pimleri ile yapılan kaynakta, karıştırma bölgesinde (SZ) veya bağlantı ara yüz bölgesinde sigma fazı oluşumunu gözlemlememişlerdir. Her iki pim için, birleşme yerindeki sertlikteki artıştan dolayı kaynaklı bölgenin akma dayanımını

ana metalinkinden önemli ölçüde yüksek bulmuşlardır. İki farklı pim ile yaptıkları birleştirmeleri karşılaştırdıklarında tungsten lantan oksit ile birleştirilen bağlantının üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu, tungsten ağır alaşım pimi kullanarak yaptıkları bağlantının kaynak karıştırma bölgesinde tungsten takım aşınma kalıntısının dağılmasından dolayı zayıf bağlantı verimliliği gösterdiğini, aşınmadan kaynaklı takım bozulmasının bağlantı performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca pimlerdeki kütle kayıplarına baktıklarında tungsten lantan oksit piminin plastik parçalanmaya daha yatkın olduğunu, tungsten ağır alaşım piminin ise aşınmaya bağlı bozulmaya eğilimli olduğunu görmüşlerdir.

1.2. Çalışmanın Literatürdeki Yeri ve Önemi

Teknolojide birçok çelik grubu çok değişik amaçlarla kullanılmaktadır. Çelik bir demir (Fe) – karbon (C) alaşımıdır. İçeriğinde %2'ye kadar karbon bulundurur. Çeliğe farklı özellikler kazandıran içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin içyapısıdır. Mangan(Mn), Fosfor(P), Kükürt(S) ve Silisyum(Si) üretim sırasında hammaddeden kaynaklanan elementler olup, çelik bünyesinde belirli oranlarda bulunur. Diğer elementler ise (Cr, Ni vb.) istenilen miktarlarda çelik bünyesine ilave edilir [41] . Çelikler alaşımsız (sade karbonlu) ve alaşımlı çelikler olarak sınıflandırılabilirler. Mn, Si gibi alaşım elementlerinin bir veya ikisinin çeliğin içindeki değerleri Mn %1.60 ve Si %0.50 değerini geçmiyor ve kimyasal bileşiminde başka herhangi bir alaşım elementinin –en az– belirli bir miktarda bulunması isteniyorsa, bu çelikler sade karbonlu (alaşımsız) çelikler sınıfına girer [41]. Paslanmaz çelik esas olarak oksitleyici ortamlarda paslanmayan çeliklerin genel adıdır. Özellikle nikel ve molibden, çeliğin paslanmazlık özelliğini iyileştirmek için alaşım yapımında kullanılsa da paslanmazlığı sağlayan element kromdur. Paslanmazlık için gerekli en az krom miktarı, kütle olarak, %10,5'tir. Dünyada üretilen çeliğin çoğu karbonlu ve alaşımlı çeliktir. Karbon ve alaşımlı çeliğe göre paslanmaz çeliğin, daha küçük fakat cazip ve gelişen bir pazarı vardır [4]. Paslanmaz çelikler de kendi aralarında birçok türe ayrılır ki bunların en çok bilinenleri östenitik, ferritik, martenzitik, dubleks türleridir. Bunlardan, östenitik paslanmaz çeliğin korozyon direnci, yüksek Ni ve Cr elementini aynı anda içermesinden dolayı (18-12) daha iyidir. Özellikle nikel sayesinde YMK kristal kafesin yoğun kayma sistemlerinden dolayı ferritik paslanmaz çeliklere göre ki bunlar da genellikle HMK kristal kafestedir, daha sünektir ve daha kolay şekillendirilebilir [42].

Çelik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan en önemli yöntem kaynak olmakla birlikte bunun da birçok yöntemi vardır. Bunlardan en çok kullanılanlar elektrik ark, plazma, oksit asetilen, MIG, TIG, MAG tipi birçok teknolojik ve gelişen kaynak yöntemi vardır. Bununla birlikte katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı da önemli ve sürekli gelişme gösterenlerindendir. Sürtünme karıştırma kaynağı 90'lı yılların başında İngiltere Kaynak Enstitüsü'nde (TWI – The Welding Institute) geliştirilen ve patentlenen yeni bir kaynak yöntemidir [1]. Başlangıçta Al 1080 [6], AA6061 [7], AA2024 [8], AA5251 [9] gibi alüminyum alaşımlar için tasarlanmış olmasına rağmen, sürtünme

karıştırma kaynağının alanı artık IF steel, S12C, S35C [13] , AISI 1018 [17] gibi karbon çelikleri [13], [17], AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik [14], [15], [18], [19], AISI 430 kalite ferritik paslanmaz çelik [16], AISI 409 kalite ferritik paslanmaz çelik [21] ve polimerler dahil olmak üzere çeşitli materyallere kadar genişlemiştir [43]. Yukarıda belirttiğimiz benzer metal (similar) kaynağın yanısıra benzer olmayan (dissimilar) yani 2024 – T3 ile 6061 – T6 alüminyum alaşımları [10], IF çeliği ile 6061 – T6 alüminyum alaşımı [11], alüminyum alaşımı ile düşük karbonlu çelik [12], Monel400 ve AISI 316 paslanmaz çelik [22], AISI 304 ile st37 çeliği [23], [24] ve yapı çeliği ve ferritik paslanmaz çelik [25] benzer olmayan metaller de sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi, alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir pimin daldırılması ve kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir. Burada en önemli husus, dönme hızı, ilerleme hızı, dalma derinliği, uç geometrisi veya şekli, omuz çapı gibi bazı parametrelerin doğru belirlenmesi gerekir.

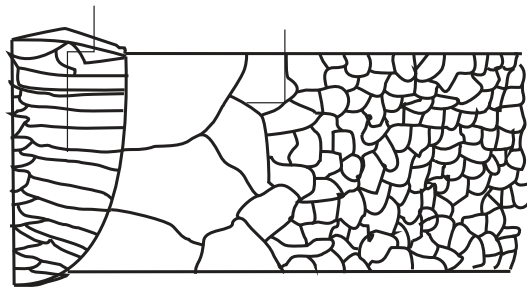
İlk parametre karıştırıcı uç geometrisidir. En iyi mukavemet ve mikroyapıyı elde etmek için çok farklı uç geometrilerine sahip karıştırıcı uçlar kullanılmıştır. Karıştırıcı uç (pim) geometrileri silindirik, konik, dişli silindirik, üçgen, üçgen piramit gibi çok değişik şekillerde yapılmaktadır. Dişler kolayca aşınabileceği için yüksek mukavemetli veya çok aşındırıcı alaşımlar için dişli olmayan karıştırıcı uçlar seçilir [34]. Boz ve Kurt [6] en iyi birleşmeyi 0,85 ve 1,10 hatveli karıştırıcı uç ile elde ederken Elangovan ve Balasubramanian [7] kare profilli takım ile kusursuz kaynaklar ürettiğini belirtmiştir. Haşçalık vd., [9] en mukavemetli birleştirmenin kare piramit geometrisine sahip karıştırıcıda olduğunu görmüştür. Meran ve Canyurt [14] ise çalışmalarında parametre olarak çeşitli takım ucu profillerini incelemişler, üçgen takım ucu profillerine sahip karıştırıcı ucun sürtünme karıştırma kaynağı için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alındığında üçgen geometrili tek tip uç kullanılarak diğer parametrelerin değişimiyle elde edilecek farklılıklar yapılacak çalışmada karakterize edilecektir. Sade karbonlu çelikler ile paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili literatürde sabit uç profile olmasına rağmen devir sayısı ve ilerleme hızı değiştirilerek parametrelerin deneysel olarak optimize edildiği herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmüştür.

İkincisi karıştırıcı takımın omuz çapıdır. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında omuz kısmı baskı uygulayarak ek bir sürtünme oluşturur ve kaynak bölgesinden plastik şekil değiştiren malzemenin uzaklaşmasını önler, böylece kaynaklı birleştirme ortaya çıkar [44]. Omuz çapı arttıkça sürtünme yüzeyi ve buna bağlı olarak meydana gelen ısı miktarı artacaktır [45]. Şık vd., [8] omuz çapını 20 mm alırken Abdulwaddood, [10] 18 mm, Aktarer vd., [11] ise 16 mm’lik omuz çapına sahip bir karıştırıcı takım kullanmışlardır. Nathan vd., [20] sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen 5 mm kalınlığında yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliğin çekme dayanımı ve darbe dayanım özellikleri üzerinde takım omuz çapının levha kalınlığı oranına etkisi araştırmışlardır. 20 mm’den 30

mm'ye değişen omuz çapına sahip beş tungsten esaslı alaşımlı karıştırıcı uçlar kullanarak, 600 dev/dak takım dönme hızı ve 30 mm/dak ilerleme hızı ile kaynaklamışlardır. 25 mm'lik bir takım omuz çapı (plaka kalınlığının 5 katı) kullanılarak imal edilen birleştirmenin, diğer birleşmelere kıyasla üstün mekanik özellikler sergilediğini bildirmişlerdir. Bu durumda 3 mm kalınlığındaki plakayı birleştirmek için 16 mm çapında bir omuza sahip karıştırıcı ucun yeterli olacağı düşünölmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağında ısı girdisini etkileyen en önemli parametre karıştırıcı devir sayısı ve karıştırıcı ucun omuz çapıdır. Kaynak ilerleme hızı ise birim kaynak alanına düşen ısı ve malzeme miktarını etkileyecektir [45]. Göröldüğü üzere literatürde ya ilerleme hızı ya da pim dönme hızı değiştirilmiş ve tek tip parametre incelenmiştir. Ya ısı girdisi ve simölasyon ya da mekanik özellikler incelenerek karakterizasyon SEM analizi ve testlerle yapılmıştır. Yapılacak çalışmada hem devir sayısı hem de buna ait ilerleme hızları değiştirilerek hem sade karbonlu elik ve paslanmaz çeliklerin serileri için ısı girdisi ve beş tip mekanik özellik incelenecek olup, literatürde bu çeliklerin özellikle sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmeleri üzerine en geniş çalışma olup, ilk defa yapılması planlanmaktadır.

Diğer parametrelerden devir sayısı ve ilerleme hızına beraber bakmak gerekir. Yüksek ilerleme hızı düşük devir sayısı ile yapılan birleştirmelerde ısı girdisi düşük olacağından malzeme tam olarak ısınmadan kaynaklanacağı için tam bir birleşme söz konusu olamaz. Aynı şekilde yüksek devir sayısı ve düşük ilerleme hızında ise kaynaklanacak malzeme gereğinden fazla ısınacağı için ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) genişliği artacak ve büyümüş-yarı büyümüş ve uzamış taneler arasındaki geçiş düzenli olmayacak yani ana malzemeden farklı bir kaynak malzeme bölgesi görölerek çentik hassasiyeti oluşacaktır. (Şekil 1.1.)

Erime Bölgesi İri Taneli Bölge



Şekil 1.1. ITAB bölgesinin kaynak bölgesinden içyapıya doğru oluşması muhtemel tane mikro yapısı

Literatür araştırmalarından da göröldüğü üzere similar olarak alüminyum ve alaşımları, paslanmaz çelikler, düşük karbonlu çelikler, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler; dissimilar olarak ise alüminyum – elik, AISI 304 – St 37, Monel 400 – AISI 316 gibi birçok malzeme sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Sade karbonlu çelikler ile paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili literatürde herhangi bir çalışma yapılmadığı görölmüştür. Bu çalışmada farklı kalitede östenitik paslanmaz

elik (AISI 304 ve AISI 316) ve sade karbonlu elikler (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir.



2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde çelikler hakkında genel bilgi verilmiştir. Kaynak işlemine kısaca değinilmiş, sonrasında çeliklerin kaynak kabiliyeti anlatılmıştır. Son olarak sürtünme karıştırma kaynağı hakkında bilgiler verilmiştir.

2.1. Çelikler

Mühendislik malzemesi olarak metaller ve alaşımları, ana metale başka bir element veya elementler eklenmesi ile elde edilen malzemelerdir. Alaşım, bir metale belirli bir özellik elde etmek için en az bir başka elementin (metal veya ametal) bilerek ilave edilmesi ile elde edilen metal tabanlı bir malzemedir. Dünya üzerinde en çok bulunan, sanayi ve yapılarda en çok kullanılan metalik malzeme olan demir, yer kabuğunun yaklaşık olarak % 4,5 ini oluşturur [46]. Çelik ise demir elementi ile çoğunlukla miktarı % 0,2 ile % 2,1 oranlarında değişen karbon elementinin meydana getirdiği bir alaşımdır [47]. Yunanlılar, MS. 83'te, İskoçya'da bir üs kurmuşlar sonrasında birlikleri burasını altı yıl sonra terk etmek zorunda kalınca çekilirken düşmana hiç bir şey bırakmamak için ne var ne yoksa yakıp yıkmışlar, beraberinde götürebileceklerini ise taşımışlardır. Fakat küçükleri 50 mm, en büyükleri 400 mm uzunlukta, kare kesitli, uçları mükemmel şekilde konikleştirilmiş, milyona yakın sayıda başlı çivileri tahrip edemeyince iki metre derinlikte kazdıkları kuyuya gömmüşlerdir. Arkeometalurji ve paleontoloji ile ilgilenen uzmanların inceledikleri bu metalin saf demirden yüksek karbonlu çeliğe kadar değiştiğini saptamışlardır. Bu da o günlerden beri insanların metali elde etme ve işlemekte olduğunu göstermektedir [48]. Her ne kadar Rönesans'tan uzun süre önceleri çelik, çeşitli etkisiz metotlarla üretilmişse de, 17. yüzyılda icat edilen daha etkili üretim metotlarından sonra kullanımı yaygın bir hâl almıştır. 19. yüzyılın sonlarına doğru Bessemer Değiştirgeci (Converter)'nin icadıyla çelik seri olarak üretilmeye başlamıştır. İlerleme sürecinde ilave edilen bazik oksijen ile çelik yapımı gibi mükemmelleştirmeler üretimin maliyetini düşürürken, metalin kalitesini karbon miktarını düşürmek suretiyle arttırmıştır. Günümüzde, her yıl 1.300 milyar ton üretimi ile binalarda, altyapı üretiminde, aletlerde, gemilerde, otomobillerde, makinelerde, aksesuarlarda, silahlarda vb. üretimlerde ana malzeme olarak en çok kullanılan metal malzemelerin temelini oluşturur [47].

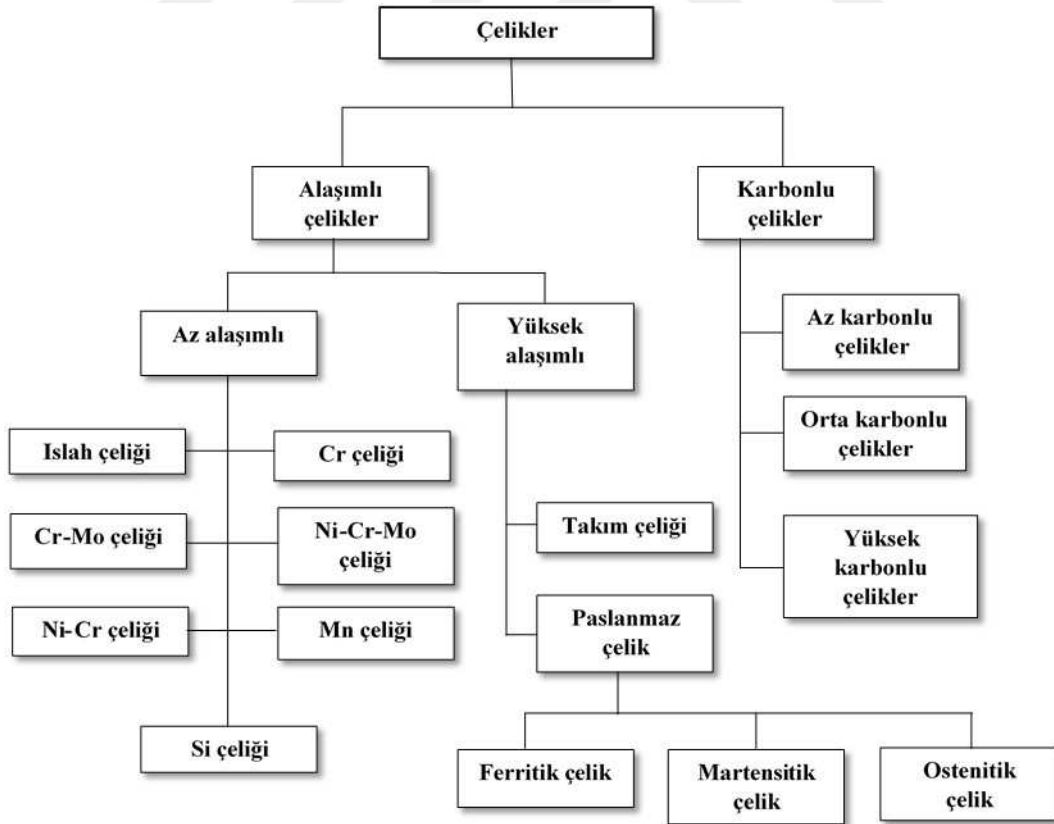
Çelik ayrıca dövülebilme, kırılmaya karşı dayanıklılık, yüksek sertlik, termal işleme, su verilebilirlik, mekanik işlenebilirlik gibi özelliklerinden dolayı son derece önemli bir alaşımdır [49]. Doğada diğer metallere göre çok bulunması, üretimlerinde diğer metal üretimlerine nazaran daha az enerji gerektirmesi ve istenilen özellikler doğrultusunda ve geniş aralıklar içerisinde iyileştirilebilmesi çeliğin endüstride yaygın olarak kullanılmasının başlıca nedenleridir [50].

2.1.1. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler, gerek üretim yöntemleri gerekse kullanım yerleri bakımından demir ve karbondan başka daha pek çok alaşım elementlerini de ihtiva edebilirler. Çelik malzemelerin yapısında bulunan karbonun miktarı ve onunla beraber bulunabilen alaşım elementlerinin cins ve miktarları, çeliklerin pek çok özelliklerini oluşturacak ana faktörlerdir.

Kimyasal bileşimleri yanı sıra haddeleme, dövme, presleme, derin çekme, ekstrüzyon, kaynak, talaşlı imalat vb. şekillendirme yöntemlerine göre oluşan ürünler (külçe, kütük, çeşitli kesit ve boyutta profiller, teller, levha, sıcak/soğuk haddelenmiş sac gibi) ve bu ürünlere çeşitli ısı işlemlerin uygulanması sonucu kazandıkları çok değişik yapı ve özellikleri ile çelikler çok değişik amaçlarla kullanılmaktadır. Başta genel yapı, tesisat, çelik yapılar, makine yapımı, madeni eşya, ulaşım araçları üretimi, madencilik ve kimya sanayinde üretim, depolama, taşıma olmak üzere çok çeşitli kullanım alanına sahiptir.

Bütün bu faktörlerin daha da detayına inilerek yapılabilecek bir sınıflama hem güç hem de kullanışsız olacağından çelikler kendi aralarında Şekil 2.1'de gösterildiği gibi öncelikli olarak karbonlu çelikler ve alaşımlı çelikler olarak iki kısma ayrılmaktadır [51].



Şekil 2.1. Çelik malzemelerin sınıflandırılması [51]

Karbonlu Çelikler

Demirden başka ana alaşım elementi olarak sadece karbon içeren fakat içerisinde belli sınırlar içerisinde alaşım elementlerini de bulundurabilen çeliklerdir. Sade karbonlu çeliklerin tüm özellikleri, içerdikleri karbon miktarına bağlı olarak sahip oldukları yapılarla doğrudan ilişkilidir. Çeliklerde karbon miktarı arttıkça sertlik, akma ve çekme dayanımı artarken süneklik (% uzama ve % kesit daralması) ve darbe dayanımı azalmaktadır.

Sade karbonlu çelikler karbon içeriğine göre az karbonlu, orta karbonlu, yüksek karbonlu olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

Az Karbonlu Çelikler: % 0-0,20 arasında karbon içeren bu çelikler 'yumuşak çelikler' olarak da tanınırlar. Dünya çelik üretiminin en büyük miktarını kapsamaktadırlar. Düşük karbon içeriklerinden dolayı ısıtma işlemi ile kütleli olarak yeterince sertleştirilemezler.

Orta Karbonlu Çelikler: Orta karbonlu çelikler, % 0,20-0,50 arasında karbon ihtiva eden çeliklerdir. Karbon miktarına bağlı olarak orta derecede mekanik özelliklere sahiptirler. Isıl işlemle yeteri derecede sertleştirilebilirler.

Yüksek Karbonlu Çelikler: % 0,5'ten daha fazla karbon içeren çeliklerdir. Normal halde yüksek mukavemetli ve sünekliği az olan bu çelikler, ısıtma işlemiyle sertleştirilmeleri sayesinde yüksek sertlik kazanırlar [51].

Alaşımlı Çelikler

Karbonlu çeliklerden normal olarak sağlanamayan kendine has özellikleri sağlayabilmek amacıyla, bir veya birden fazla alaşım elementi katmak suretiyle yapılan çelikler alaşımlı çeliklerdir. Alaşımlı çelikler, alaşım elemanları (karbon ve arıtilamayan elemanlar dışında kalan diğerleri) toplam miktarı %5'ten az olan (düşük alaşımlı) çelikler ve alaşım elemanlarının toplamı %5'ten fazla olan (yüksek alaşımlı) çelikler olmak üzere, iki ana gruba ayrılırlar.

Paslanmaz Çelikler: Oksitleyici ortamlarda paslanmayan çeliklere paslanmaz çelik denir. Çeliklerde paslanmazlığı sağlayan element kromdur. Çelik içerisinde bulunan nikel ve molibden elementleri de çeliklerin mukavemet, plastik şekil verilebilme, kaynaklanabilme gibi özelliklerini bozmadan korozyona dayanıklı hale getirir. Mekanik özellikler açısından diğer çeliklerden pek farklılık göstermeyen paslanmaz çelikler alaşım elementi olarak yüksek oranda Cr ve Ni içerdikleri için maliyetleri yüksek çeliklerdir. Yüksek maliyete rağmen pratikte çok yaygın olarak kullanılmasının ana nedeni, yüksek korozyon direncine ve gelişen bir pazara sahip olmalarıdır. Paslanmaz çelikler de kendi aralarında birçok türe ayrılır ki bunların en çok bilinenleri östenitik, ferritik, martenzitik, dubleks türleridir. Bunlardan, östenitik paslanmaz çeliğin korozyon direnci, yüksek Ni ve Cr elementini aynı anda içermesinden dolayı (18-12) daha iyidir. Özellikle nikel sayesinde YMK kristal kafesin yoğun kayma sistemlerinden dolayı ferritik paslanmaz çeliklere göre ki bunlar da genellikle HMK kristal kafesidir, daha sünektir ve daha kolay şekillendirilebilir [4], [42], [51], [75].

Ülkemiz endüstrisinin paslanmaz çeliklere olan ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Paslanmaz çelikler özellikle petro-kimya, kimya, gıda sanayinde kullanılırlar. Depolama tankları, paslanmaz borular, ısı değıştiricileri ve basınçlı kapların üretiminde de kullanılan paslanmaz çelikler alışılmış ve modern kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilirler [52].

- **Ferritik Paslanmaz Çelikler:** Martensitik ve ostenitik çeliklere göre daha çok krom, daha az karbon içeren ferritik paslanmaz çelikler karbon miktarının az olması nedeniyle ısıl işlem ile sertleştirilemezler, ancak soğuk şekil değıştirme ile biraz sertleştirilebilirler. Normal atmosfer ve temiz su ortamlarında paslanmaya karşı dayanıklı olmalarına karşın endüstriyel ve kimyasal ortamlarda dayanımları zayıftır. Manyetik özelliklere sahip olan bu çelikler hem sıcak hem de soğuk şekillendirmeye elverişlidir. Mutfak gereçleri, dekoratif uygulamalar, otomobil şasi parçaları, egzoz elemanları, sıcak su tankları kullanım alanlarından bazılarına örnek olarak verilebilir [50], [51], [53], [54].
- **Martensitik Paslanmaz Çelikler:** Martensitik paslanmaz çelikler %3 nikel ve %12-%17 krom içerirler. %0,15'in üzerinde karbon içeren ferritik çelik bileşimlerine benzer olup korozyon özellikleri de benzerlik göstermektedir. 800-825°C sıcaklıktan hızla soğutuldukları zaman sertleşirler ve bu durumda korozyon dirençleri daha fazladır. Ayrıca aşınma dayanımları da iyidir. İnce ağızlı bıçaklar, ameliyat aletleri, miller, pimler, bilyeler, rulman parçaları ve buhar türbinlerinde kullanılırlar.
- **Ostenitik Paslanmaz Çelikler:** Ostenitik paslanmaz çelikler krom, nikel ve mangan içerirler ve bunların içerdikleri krom ve nikel oranlarının toplamı en az %23 değerindedir. Oda sıcaklığında ostenitik yapıya sahiptirler. Isıl işlemle sertleştirilemeyen bu çelikler soğuk şekillendirme ile sertleşme yeteneğine sahiptirler ve dayanımları yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda korozyona karşı dayanıklıdırlar ve tavllanmış durumda manyetik değildirler. Bileşimindeki karbon miktarının yüksekliği, karbür çökelmelerine çok hassas olup hem gevrekleşme hem de istenen korozyon dayanımlarına olumsuz yönde etki etmesi açısından en önemli etkindir. Bu nedenle ostenitik paslanmaz çeliklerde genelde %0,08-0,15 arasında karbon içerikleri istenmektedir. Kolaylıkla kaynak edilirler ve lehimlenirler. Aynı zamanda asitlere karşı dayanıklıdırlar. Makina ve imalat sanayinin çeşitli uygulamalarında, asansörlerde, bina ve dış cephe kaplamalarında, mimari uygulamalarda, gıda işleme ekipmanlarında, mutfak gereçlerinde, kimya tesisleri ve ekipmanlarında, bilgisayar klavye yaylarında, mutfak evyeleri vb. yerlerde kullanılırlar [50], [51], [53], [54].

2.2. Kaynak İşlemi

Gelişen teknoloji ile birlikte, tüm sektörlerde olduğu gibi imalat sektörü de insanların ihtiyaçlarını karşılayabilmek için farklı malzemeleri yeterli mukavemet ve en az maliyetle birleştirerek yeni ürün ortaya çıkarmak istemektedir. Farklı malzemelerin

birleştirilmesinden elde edilen ürünler sayısız avantajları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda gittikçe önem kazanmaktadır. Bunlar sadece istenen ürün özellikleri gibi teknik avantajlar değil, aynı zamanda üretim ekonomisi açısından da faydalar içerir [55].

Farklı malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan imalat yöntemlerinden biri kaynak işlemidir.

İnsanoğlu ilk olarak iki metal parçasını sıcak veya soğuk halde çekiçleyerek birleştirmeyi gerçekleştirmiştir. Demirci kaynağı olarak bilinen, bir külçeden döverek elde edilebilecek altın levhasından daha büyük levha elde etmek isteyen sanatkârlar, altın parçalarının dövülerek birleştirilebileceğini bir şans eseri olarak bulmuşlardır. Demirci kaynağının bu tip örneklerine özellikle tarihi orta bronz devrine ait eserler, Roma medeniyetine ait örnekler dünyanın çeşitli müzelerinde sergilenmektedir. Bugün, bütün ülkelerde, demircinin çekici ile yaptığı basınç kaynağı hemen hemen tarihe karışmıştır.

19. yüzyılın ikinci yarısında kaynak yönteminin endüstriyel uygulamaları başlamıştır. Birinci Dünya Savaşı sırasında silahlar, tanklar, uçaklar ve gemiler kaynaklı konstrüksiyon ile yapılmaya başlanmış, sonrasında ilerlemelerini sağlamlaştırarak tamir yöntemi olarak kullanılmasının yanında üretim aracı haline de gelmiştir [56], [57].

Kaynak, birbirinin aynı veya erime aralıkları birbirine yakın iki veya daha fazla metalik veya plastik (termo-plastik) malzemenin, bir ilave malzeme kullanarak veya kullanmadan, ısı, basınç veya her ikisini birden uygulayarak, malzemenin sürekliliğini sağlayacak şekilde yapılan birleştirme işlemi olarak tanımlanır [58].

Kaynaklı imalatın avantajları:

- Kaynaklı bağlantılar perçinli bağlantılara göre daha hafiftir.
- Kaynakla yapılan birleştirme bağlantılarında cıvata ve perçin bağlantılarında olduğu gibi delikler gerekmez. Bu nedenle deliklerden dolayı parçanın zayıflaması ve korozyona uğraması engellenebilir.
- Az sayıda konstrüksiyon için model masrafı olmadığından dolayı kaynaklı imalat dökümden daha ekonomiktir.
- Dökümle imalatı mümkün olmayan konstrüksiyonlar kaynakla kolayca imal edilebilir.
- Kaynaklı parçaların tamirata mümkündür. Oysaki döküm bir parça hasara uğradığında onu yeniden dökmek gerekebilir.
- Kaynaklı bağlantılardaki sızdırmazlık perçinli bağlantılardan daha iyidir.
- Kaynaklı bağlantıların mukavemeti lehimli, perçinli veya yapıştırırmalı bağlantılardan daha yüksektir.
- Kaynaklı imalatta pahalı olan lehim malzemesi gerekmez.

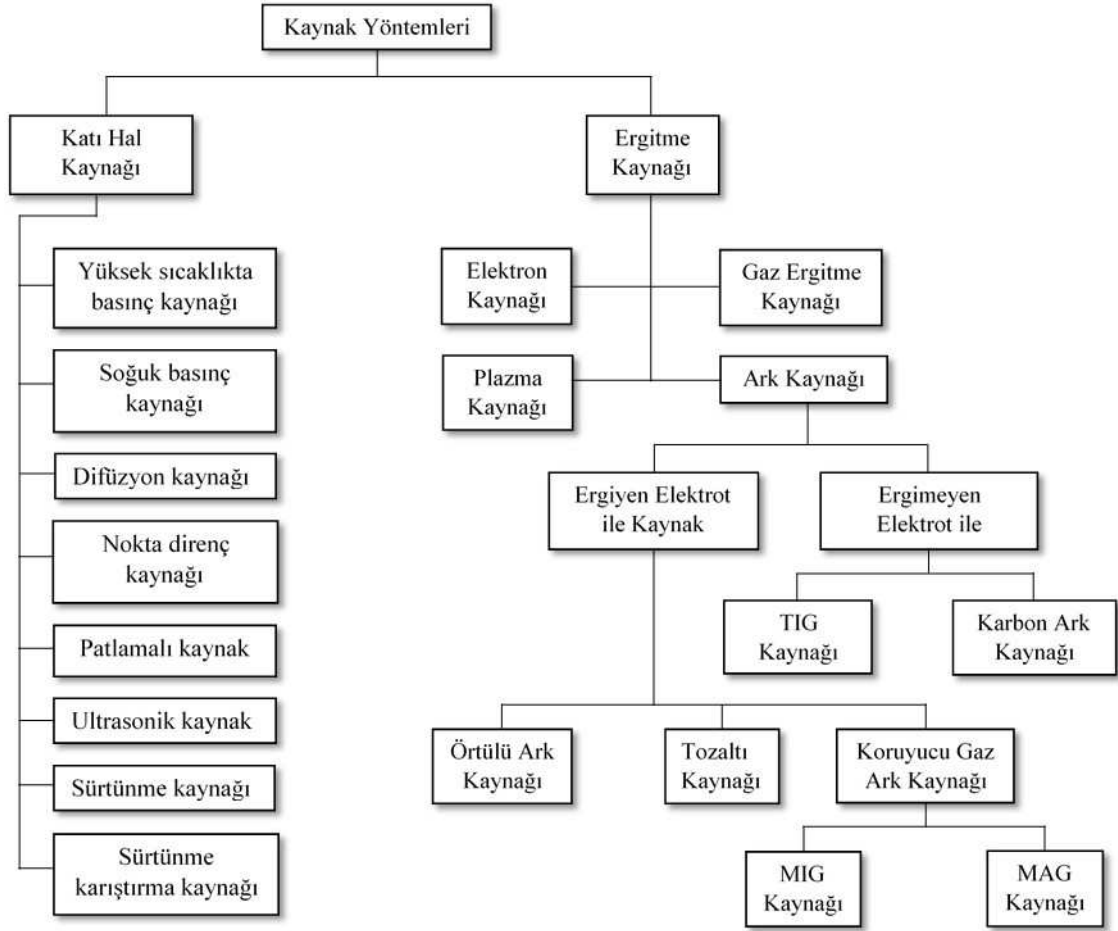
Kaynaklı imalatın dezavantajları:

- Kaynak sonucunda parçada meydana gelebilecek iç gerilmelerden dolayı parçanın mukavemeti azalabilir.
- Genellikle aynı cinsten malzemeler birbiri ile kaynak edilebilir.
- Her malzeme kaynak için uygun olmayabilir.
- Kaynaklı bağlantıların kalite kontrolü zordur ve yapılması özel tecrübe ister.
- Kaynaklı parçaların demontajı yoktur bu nedenle sökölüp yeniden takılamazlar.
- Kaynaklı bağlantılarda kaynak bölgesinde içyapı değişimleri olabilir [59].

2.2.1. Kaynak Yönteminin Sınıflandırılması

Kaynak, uygulanan işleme bağılı olarak ergitme ve katı hal kaynak yöntemi olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır.

- Ergitme kaynağı: Ergitme sıcaklıkları aynı ya da birbirine yakın malzemeleri, bir ilave malzemesi kullanarak veya kullanmayarak, ısı, basınç ya da her ikisini birden kullanarak, malzemenin sürekliliğini sağlayacak şekilde lokal olarak birleştirme işlemidir. Ergitme kaynağında, kaynak sıcaklığı birleştirilen malzemenin erime sıcaklığından daha yüksektir.
- Katı hal kaynağı: Aynı ya da farklı iki malzeme çiftinin ergitme sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta basınç etkisi ile plastik deformasyon ve ekstrüzyonla yapılan birleştirme işlemidir [60]. Kaynak yöntemleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kaynak yöntemleri [51],[60]

2.3. Çeliklerin Kaynak Kabiliyetleri

Kaynakta çeliklerin maruz kaldığı ısıнын etkisi sonucu malzemede çoğu zaman devamlı değişimler meydana gelir. Bir çelik, geniş önlemler almayı gerektirmeden ve bu değişimler kaynaklı konstrüksiyonda sakıncalar yaratmadan kaynak edilebiliyorsa bu çelik iyi kaynak kabiliyetli olarak tanımlanır. Buna karşılık normal bir kaynak işlemi malzemede, konstrüksiyondan beklenenleri ciddi tehlikeye sokacak şekilde değişimlere yol açar veya kaynak işlemi sırasında veya bu işlemten hemen sonra, çatlaklar gibi malzeme kusurları meydana getirirse özel önlemlerin alınması veya bazı kaynak öncesi ve/veya kaynak sonrası işlemleri gerektirir. Böyle çeliklere de sınırlı kaynak kabiliyetli çelikler denir [61].

2.3.1. Karbonlu Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Karbon çelikleri, karbonun genellikle % 1,0'ı aşmadığı demir ve karbon alaşımlarıdır. Karbonlu çelikler genel olarak, Tablo 2.1'de belirtildiği gibi karbon içeriklerine göre sınıflandırılır. Bu çeliklerin özellikleri ve kaynak kabiliyeti karbon

içeriğine bağlıdır. Karbon miktarı arttıkça çeliklerin sertliklerinde bir artış meydana gelir ve buna bağlı olarak kaynak kabiliyeti azalır [62].

Tablo 2.1. Karbon çeliklerinin kaynaklanabilirliği ve sınıflandırılması [62]

Yaygın isim	Karbon %	Sertlik	Kaynaklanabilirlik
Düşük Karbonlu Çelik	0,15 max	60 HRB	Çok İyi
Yumuşak Çelik	0,15-0,30	90 HRB	İyi
Orta Karbonlu Çelik	0,30-0,50	25 HRC	Fena Değil
Yüksek Karbonlu Çelik	0,50-1,0	40 HRC	Kötü

2.3.2. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Paslanmaz çeliklerin büyük bir bölümünün kaynak kabiliyeti yüksektir ve ark kaynağı, direnç kaynağı, elektron ve lazer ışını kaynakları, sürtünme kaynağı ve sert lehimleme gibi çeşitli kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilirler. Bu yöntemlerin hemen hemen hepsinde birleştirilecek yüzeylerin ve dolgu metalinin temiz olması gerekmektedir. Ostenitik tip paslanmaz çeliklerin ısı genleşme katsayısı karbon çeliklerinkinden % 50 daha yüksektir ve çarpılmaları en aza indirmek için bu özelliğe dikkat edilmelidir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin sahip olduğu düşük ısı ve elektrik iletkenliği kaynak açısından genellikle yararlıdır. Kaynak sırasında düşük ısı girdisi ile çalışılması gerekir. Çünkü oluşan ısı, bağlantı bölgesinden, karbon çeliklerinde olduğu kadar hızlı bir şekilde uzaklaşmaz [63].

Martensitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Martensitik paslanmaz çeliklerde (% 12-17 Cr ve % 0,1-1,2 C), kritik soğuma hızları yavaş olduğundan ve devamlı martensitik yapı olduğundan kaynak işlemi zordur.

Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında (% 16-30 Cr ve % 0,05-0,25 C) en büyük sorun malzemenin 1150 °C üzerinde tane büyümesine karşı eğilimidir. Malzeme iri taneli hale geçince gevrekleştiği için ısıl işlemle tekrar ince taneli hale getirmek mümkün değildir. Kaynak çok ince pasolarla yapılmalı ve hemen soğutulmalıdır [51].

Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı

Ostenitik paslanmaz çelikler çeşitli kaynak yöntemleri kullanılarak kolaylıkla kaynak edilebilirler [64].

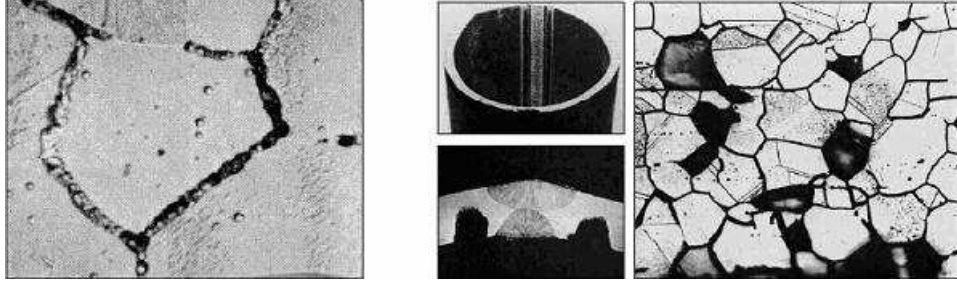
Bu çeliklerin kaynak yeteneği açısından en önemli nitelikleri şöyle sıralanabilir; Isı iletme katsayıları oda sıcaklığında karbonlu çeliklerin üçte biri kadardır. Bu durum, kaynak yapılan bölgede sıcaklığın daha uzun süre kalacağını gösterir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin ısı genleşme katsayıları karbonlu çeliklerden % 50 daha fazladır. Bu husus yalnız kaynakçıyı değil, tasarımcıyı da ilgilendiren bir durumdur. Karbonlu çelikler düşük bir elektrik iletme direncine sahiptir. Bu tür paslanmazlarda ise, bu değer 5 ile 7 kat daha büyüktür. Bu üç faktörün paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti üzerine etkisi büyüktür [65].

Ostenitik paslanmaz çelikler grubunda yer alan malzemelerin başında AISI 302, 304, 310, 316, 321 ve 347 gelmektedir. Bu çelikler için geliştirilen dolgu malzemeleri genellikle ana metal ile benzer yapıdadır. Ancak birçok alaşım için, sıcak çatlak oluşumunu engellemek amacıyla, düşük miktarda ferrit içeren bir mikro yapının oluşmasına olanak sağlayan dolgu malzemeleri kullanılır. Bu şartı gerçekleştirebilmek için 308 türü dolgu malzemeleri AISI 302 türü çeliklerin, 304 ve 347 türü dolgu malzemeleri ise AISI 321 türü çeliklerin kaynağında kullanılır. Diğer çelik türleri ise kendilerine benzer yapıdaki dolgu malzemeleri ile kaynak edilebilirler. AISI 347 türü çelikler 308H türü dolgu malzemeleri ile de kaynak edilebilir. Bu türdeki dolgu malzemeleri örtülü elektrod, dolu tel ve özlü tel olarak üretilir. 321 türü dolgu malzemeleri ise sınırlı olarak, sadece dolu tel ve özlü tel olarak üretilmektedir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında başlıca üç kaynak problemi ile karşılaşılabilir. Bunlar sırası ile;

- Isının etkisi altında kalan bölgede "Krom Karbür" oluşması sonucu meydana gelen hassas yapı,
- Kaynak dikişinde görülen "Sıcak Çatlak" oluşumu,
- Yüksek çalışma sıcaklıklarında karşılaşılan "Sigma Fazı" oluşumu riskleridir [63]

Erime çizgisinin esas metal tarafında, kaynak sırasında uygulanmış olan ısınn oluşturduğu çeşitli ısı çevirimlerden etkilenmiş ve dolayısıyla içyapı değişimine uğramış bir bölge vardır. Bu bölgeye ısınn tesiri altında kalan bölge (ITAB) adı verilmektedir [66].

Paslanmaz çeliklerin kaynağında, sıcaklığın 450 °C 'nin üzerine çıkması ile karbonun difüzyon hızı, karbon molekülünü tane sınırlarından dışarı çıkaracak kadar artar. Tane sınırlarında biriken karbon, kroma karşı olan yüksek ilgisinden dolayı bu bölgede krom ile birleşerek krom karbür oluşur. Isı tesiri altında kalan bölgenin 427-871 °C sıcaklığa kadar ısınan bölümünde yer alan tane sınırlarında çökelen ve tane sınırları arası korozyonu hızlandıran krom karbürler burada " Hassas Yapı" oluşmasına neden olurlar (Şekil 2.3). Bu oluşum sırasında bir miktar krom çözeltiden tane sınırlarına doğru yer değiştirir ve bu alanlarda krom miktarında azalma meydana gelir ve korozyon dayanımı düşer. Korozyon dayanımı düşen malzeme korozif bir ortamda bulunduğu anda, kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon meydana gelir. Bu şekilde taneler arası ortaya çıkan korozyon bütün malzemeyi çok kısa bir zamanda kullanılamaz hale getirir. Çeliğin karbon içeriği arttıkça bu olay şiddetlenir [63], [66].



Şekil 2.3. Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökmesi [63]

Krom-karbür oluşumunu önlemek için C oranı düşük tutulmalı, bu oran % 0,03 – % 0,06 arasında olmalıdır. Ya da karbonun kroma olan ilgisinden daha fazla ilgiye sahip Ti, Nb, Ta gibi başka elementleri çeliğe katarak karbonun o elementle bileşik oluşturması sağlanmalıdır. Bunun yanında kaynak işleminin ön tav uygulanmadan yapılması, ısı girdisinin düşük seviyede tutulmasına özen gösterilmesi ve bakır altlık kullanılarak hızlı soğuma sağlanması hassas sıcaklık aralığında kalma süresinin kısa tutulması açısından oldukça yararlıdır. Bunların dışında kalan bazı ısıtım yöntemleri pahalı olmaları, pratik olmamaları ve parçalarda çarpılmalara yol açmaları nedeniyle pek tercih edilmezler [63], [66].

Sıcak Çatlak Oluşumu

Sıcak çatlak kükürt (S) ve fosfor (P) gibi elementlerin oluşturduğu ve tane sınırlarında toplanma eğilimi yüksek olan düşük ergime sıcaklığına sahip metalik bileşimler nedeniyle oluşur. Bu bileşimler, kaynak dikişinde veya ısıtım etkisi altında kalan bölgede bulunuyorsa, tane sınırlarına doğru yayılırlar ve kaynak dikişi soğurken ve çekme gerilmeleri oluştuğunda çatlak oluşumuna neden olurlar. Sıcak çatlak oluşumunu, ostenitik yapının içinde düşük miktarda ferrit içeren bir mikro yapı elde edilecek şekilde ayarlanması ile önlenabilir. Çünkü ferrit, kükürt ve fosfor bileşimlerini kontrol altında tutabilen ve ferritik-östenitik yapıya sahip olan tane sınırları oluşturarak sıcak çatlak oluşumunu engeller. Ferrit bazı korozyon ortamlarında malzemenin korozyonunu düşürdüğünden ve yapıdaki aşırı ferrit miktarı süneklik ve tokluğu azalttığından ferrit miktarının gerekenden daha fazla olmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca bu sorun yapıdaki kükürt ve fosfor miktarlarının düşük seviyelerde tutulması ile de önlenabilir fakat bu durumda ise çeliklerin üretim maliyetleri önemli ölçüde artar [63].

Sigma Faz Oluşumu

“Sigma fazı”, çok sert (700-800 Vickers) manyetik olmayan ve gevrek bir yapıya sahip metaller arası bir bileşiktir. X ışını difraksiyonu ile yapılan analizde bileşimin yaklaşık olarak % 52 krom ve % 48 demirden oluştuğu ancak bunun yanında molibden gibi diğer alaşım elementlerini de içerebildiği görülmüştür. 550°C ilâ 925°C arasındaki sıcaklıklarda meydana

gelir. Sigma fazı, kromlu veya krom-nikel esaslı paslanmaz veya ısıya dayanıklı çeliklerin kaynak bölgesinde oluşur. Ostenitik çeliklerde bu fazın meydana gelebilmesi için, ostenitik yapı içinde bir miktar da ferrit olması lazımdır. Soğuk şekil değiştirme, niobyum, molibden, silisyum gibi elementlerin varlığı sigma fazı oluşumunu teşvik eder. Kaynak kabiliyetini olumsuz yönde etkileyen sigma fazı çelikte uzama, büzülme ve çentik darbe mukavemetini azalttığından varlığı istenmez. Karbür çökmesini yok etmek için uygulanan ısı işlem sigma fazının da yok olmasını sağlar. Ostenitik paslanmaz çeliğe daha önceden bir homojenizasyon tavlı uygulanmış ve içindeki ferrit miktarı % 6,5'in altına düşürülmüş ise, kaynak bölgesinde oluşacak sigma fazı bu bölgenin özelliklerine olumsuz bir etkide bulunmaz [63], [67].

Sigma fazı ile krom karbür çökmesi birbirinden tamamen farklı iki oluşumdur. Sigma fazı kırılabilirliği 650-850 °C sıcaklıklar arasında görülür ve bu sıcaklık aralığında kalma süresi ile oluşan yapının yoğunluğu arasında yakın bir ilişki vardır. Faz dönüşüm yoğunluğunun en yoğun olduğu sıcaklık 720 °C civarındadır. Yapıda bulunan ferrit miktarının % 3-4 ile sınırlı tutulması durumunda, ostenit tanelerinin etrafı ferrit ile çevrelenmeyecek ve kırılabilirlik riski önlenecektir. Buna karşın ferrit miktarının % 12' yi geçmesi ile birlikte, süneklik kabiliyeti hızla azalacaktır [63].

Sigma fazı hakkında yapılan araştırmaların sonucu aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

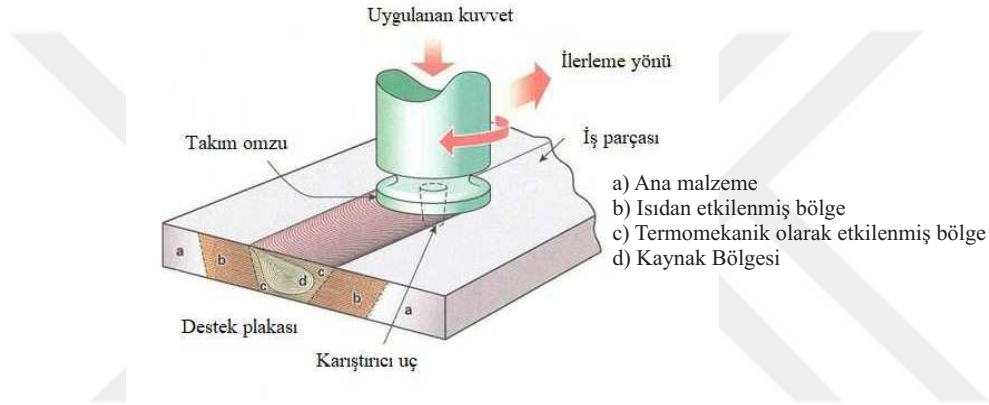
- Sigma fazının oluşumu 750 °C'de, 650 °C'den daha çabuk meydana gelmektedir. 750 °C'de sigma fazına dönüşümün olması için 30 saat süreye ihtiyaç vardır.
- Sigma fazının oluşumu soğuk şekillendirme ile hızlanmaktadır.
- Sigma fazı oluşumuna kuvvetle tesir eden elamanlar: molibden, krom, niobyum ve silisyumdur.
- Sigma fazı 950-1050 °C sıcaklıklar arasında belirli bir süre tavlandıktan sonra suda hızlı soğutulularak giderilir.
- Ferrit miktarını parçayı 1150 °C'de homojenleştirme tavlmasına tabi tutarak daha da düşürmek mümkündür
- 300-400 °C'nin üzerinde gayet iyi çentik darbe değerleri elde edildiğinden, yüksek işletme sıcaklığında çalışan konstrüksiyonlarda, sigma fazının sebep olduğu gevrekleşmeden korkulmamalıdır [68].

2.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

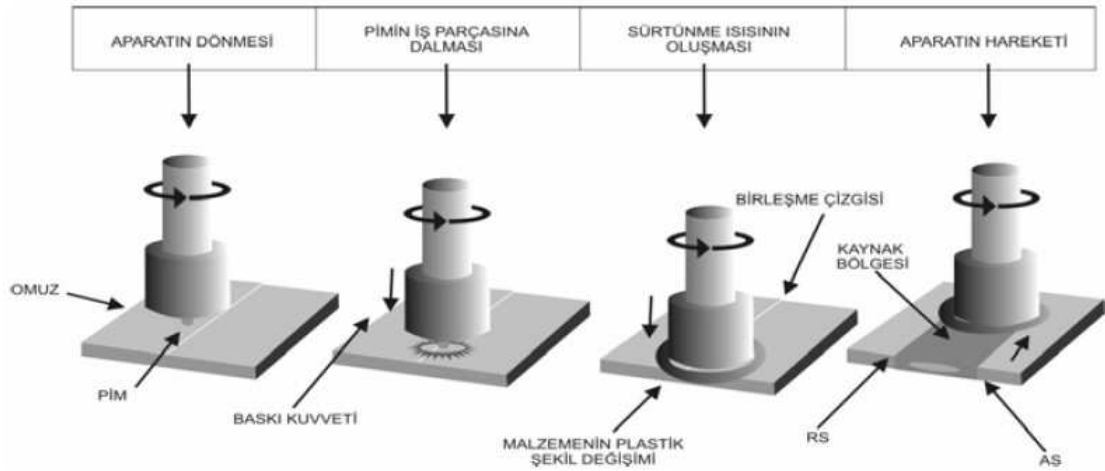
1991 yılında TWI (The Welding Institute) Ltd'de Wayne Thomas tarafından icat edilen Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW), malzemeleri birleştirmek için dönen bir pim tarafından üretilen sürtünme ısısını kullanan bir katı hal birleştirme işlemidir. Birleştirmede, kaynaklanacak malzemeden daha sert olan bir malzemeden yapılmış tükenmeyen bir pim kullanılır [69].

2.4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulanma Prensibi

Pim bir omuz ve karıştırıcı uçtan meydana gelir. Belirli bir devirde dönen pim, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi bir destek plakasına sıkı bir şekilde sabitlenmiş olan iki metal plakanın kesişimi boyunca ilerletilir. Plakaların üst yüzeyi omuz yüzeyiyle temas ettiğinde sürtünme gelişir. Omuzdaki sürtünme ve karıştırıcı ucun dönmesiyle oluşan ısı kaynak yapılacak malzemede yumuşamaya neden olur. Metalin plastik deformasyonu, kaynağın ilerleme yönü boyunca birleştirme alanında meydana gelir. Pim, kesişim bölgesinde bir karıştırma hareketi meydana getirir ve daha sonra metalin ilerleyen taraftan geri çekilme tarafına transferini sağlar, böylece plakaların kaynak işlemi gerçekleştirilir [70]. Şekil 2.5'te sürtünme karıştırma kaynağı aşama aşama gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Sürtünme Karıştırma Kaynak işlemi



Şekil 2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı şematik gösterimi [71]

Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları

- Sıcak çatlama, boşluklu yapı veya katılaşma çatlakları olmayan, büyük ölçüde hatasız bir birleştirme yöntemidir.
- Düşük sıcaklıklardan dolayı oluşan çekme ve bükülme çok azdır.
- Alüminyum alaşımları için dolgu malzemesi, akı veya koruyucu gaz gereksinimi yoktur.
- Sıçrama gerçekleşmez.
- Duman veya UV radyasyonu üretmediğinden dolayı çevre dostudur.
- Takım tezgâhı teknolojisi kullanarak ve işlemi otomatik hale getirmeyi kolaylaştırarak, yüksek oranda tekrarlanabilir ve kalifiye kaynakçılara olan ihtiyacı azaltabilir.
- Yatay, dikey, vb. herhangi bir pozisyonda çalışabilir.
- Alüminyum alaşımları için genellikle diğer kaynak işlemleriyle elde edilebilecek olanlara göre daha iyi mekanik özellikler sergiler.
- Verimli enerjiye sahiptir.
- Kaynak yapılamayan birçok alüminyum alaşımını kaynaklayabilir.
- Çoğu uygulamalarda özel kenar hazırlığı gerektirmez [72].

Sürtünme Karıştırma Kaynağının Dezavantajları

- Malzemeler birleştirildikten sonra kaynağın sonunda karıştırıcı uç çıkarılınca delik kalır.
- Baskı kuvvetine gereksinim duyduğu için pabuçlar veya mengene yardımıyla sabitlenmesi gerekir.
- Kaynak hızı ergitme kaynaklarına göre daha yavaştır.

2.4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar

Takım geometrisi sürtünme karıştırma kaynağının gerçekleştirilebileceği hareket hızını yönettiği için malzeme akışında kritik bir rol oynar. Bu nedenle takım geometrisi, süreci geliştirmenin en etkili yönüdür. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takım, bir omuz ve pimden oluşmaktadır. Takımın bölgesel ısıtma ve malzeme akışı olmak üzere iki temel işlevi vardır [73].

Sürtünme karıştırma kaynağında Şekil 2.6'da gösterildiği gibi sabit, ayarlanabilir ve makara tipi olmak üzere üç tip karıştırıcı takım kullanılır.

Sabit takım, omuz ve pimi içeren tek bir parçadan oluşur (Şekil 2.6a). Sabit kalınlıktaki parçaları kaynakla birleştiren bu takım belirgin bir şekilde aşırırsa veya kırılırsa, takımın tamamı değiştirilmelidir.

Ayarlanabilir takım, sürtünme karıştırma kaynağı sırasında pim uzunluğunun ayarlanmasını sağlamak amacıyla ayrı bir omuz ve pimi içeren iki bağımsız parçadan

meydana gelir (Şekil 2.6b). Omuz ve pimin farklı malzemeler kullanılarak üretilebildiği bu tasarımda, pim aşındığında veya hasar gördüğünde kolayca değiştirilebilir. Ayrıca pimin uzunluğu ayarlanabildiğinden uzunluğu değişken olan ve birden fazla kalınlığa sahip iş parçalarının kaynaklanmasına izin verebilir. Sabit ve ayarlanabilir takımlar destek plakasına ihtiyaç duyar.

Makara (bobin) tipi takımlar ise Şekil 2.6c’de görüldüğü gibi üst omuz, pim ve alt omuz olmak üzere üç parçadan oluşur. Üst ve alt omuzlar arasındaki ayarlanabilir pim nedeniyle birden fazla kalınlığa sahip iş parçasının birleştirilebilmesini sağlayan bu takımın destek plakasına ihtiyacı yoktur. Ancak sadece iş parçası yüzeyine dik olarak çalışabilir. Buna karşılık sabit ve ayarlanabilir takımlar boyuna ve yana doğru yatırılabilir [34].



Şekil 2.6. Karıştırıcı takım tipleri a) sabit pim, b) ayarlanabilir pim, c) makara tipi pim [34]

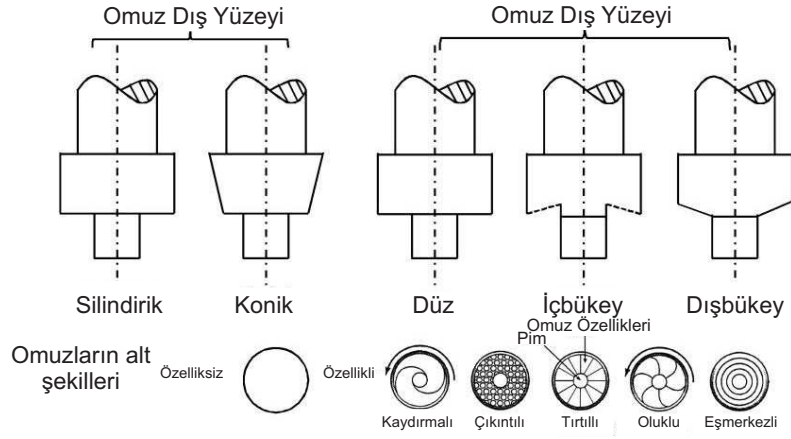
2.4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Omuz ve Pim Şekilleri

Karıştırıcı takımlar çok çeşitli omuz ve pim şekillerine sahiptir.

Omuz Şekilleri

Şekil 2.7’de tipik omuz dış yüzeylerini, alt uç yüzeyleri ve uç özellikleri gösterilmektedir. Tipik olarak üç tip omuz yüzeyi kullanılmaktadır. Bunlardan, düz omuz uç yüzeyi en basit tasarımıdır. Bu tasarımın dezavantajı, düz omuz uç yüzeyinin, akan metal malzemenin alt omuz altında tutulması için etkili olmaması ve aşırı materyal çapaklarının üretilmesine yol açmasıdır. İç bükey omuz yüzeyinin tasarlanması bu sorunun ortadan kaldırılması için tasarlanmıştır. İçbükey omuz, düz omuz yüzeyinden sadece 6-10 derecelik küçük bir açı ile eğimlidir. Takımın dalması sırasında, pim ile yer değiştiren malzeme takım omuz boşluğuna birikir. Dolayısıyla, takım omzunun içbükey yüzey profili, pim tarafından çıkarılan malzeme için bir çıkış hacmi veya hazne olarak görev yapar. Takımın aşağı doğru uygulanan baskı kuvveti sayesinde ve aynı zamanda ilerleme hareketi ile haznedeki malzeme omuz altındaki boşluğa zorlanarak pimin arkasına iter. Diğer omuz şekli ise dışbükey profildir. Dışbükey yüzey için TWI’de yapılan ilk denemeler malzemeyi pimden uzağa ittiği için başarısız olmuştur.

Omuz ucu biçimleri, Şekil 2.7’de görüldüğü gibi düz (pürüzsüz veya özelliksiz), salyangoz şekilli, çıkıntılı, tırtıl, oluklu ve eş merkezli daireler içerir. Bu özellikler içbükey, düz veya dışbükey omuz uçlarına uygulanabilir [34].



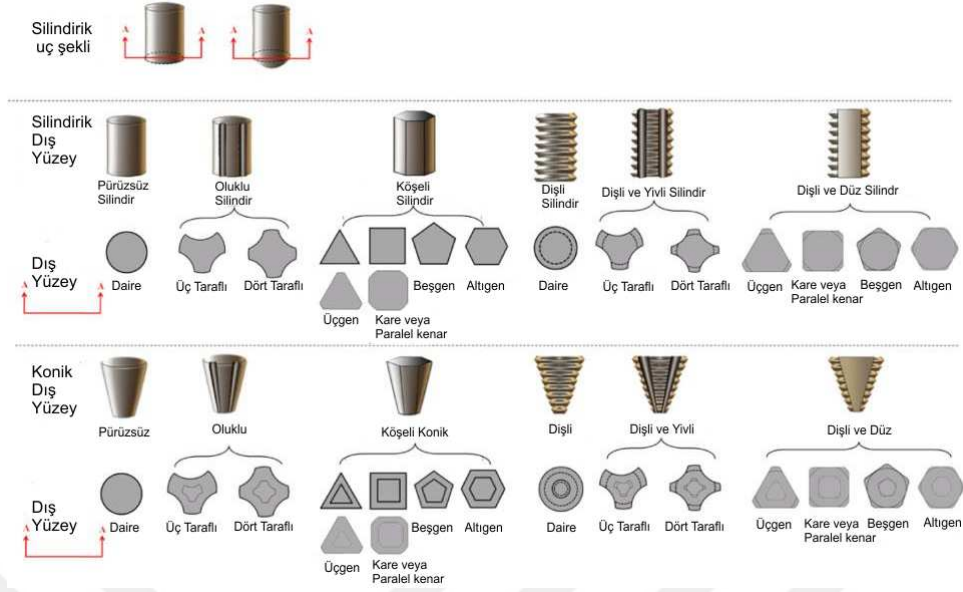
Şekil 2.7. Omuz şekilleri ve özellikleri [34]

Pim Şekilleri

Sürtünme karıştırma pimi iş parçasına temas ettiği yüzeyleri keserek buradan kestiği parçayı iş parçasının arka tarafına taşımak için tasarlanmıştır. Bu esnada malzemede deformasyon ve sürtünme ısısı meydana getirir. Pim şekilleri Şekil 2.8’de görüldüğü gibi ya düz ya da kubbe şeklindedir. Düz pimlerin üretimi kolay olduğundan en yaygın pim şeklidir. Ancak iş parçasına dalması sırasında şekil verme kuvveti yüksek olduğundan bu pimin dezavantajı olur. Buna karşılık, kubbe şeklindeki uç şekli pimin iş parçasına dalmasında oluşacak şekil verme kuvvetini ve takım aşınmasını azaltabilir, bölgesel gerilme yığılmalarını ortadan kaldırarak takım ömrünü arttırabilir.

Sürtünme karıştırma pimleri genellikle silindirik dış yüzeye sahip olurken Şekil 2.8’de gösterildiği gibi konik bir dış yüzeyde kullanılmaktadır. Silindirik pimler ile özellikle 12 mm kalınlığa kadar olan iş parçalarını birleştirmek için yaygın şekilde kullanılırlar. Ancak kalın levhalarda kaynak bütünlüğünü bozmamak için ilerleme hızı düşürülerek yüksek devir sayılarında çalışılır. Bu ise işlem parametrelerini önemli ölçüde sınırlandırır. Konik pim ile daha yüksek sürtünme ısısı, pim ile iş parçası arasında daha geniş temas alanı nedeniyle plastik deformasyonu artırır. Ayrıca konik pim kaynak bölgesinde yüksek bir hidrostatik basınç oluşturur; bu ise malzemenin karışması ve kaynak bütünlüğünü sağlamak için son derece önemlidir. Fakat bu yüksek sıcaklık ve hidrostatik basınç ciddi şekilde takım aşınmasına neden olabilmektedir [34].

Pim dış yüzeyleri dişli, düz veya yivli gibi farklı şekillere ve özelliklere sahiptirler. Düz pimler yüksek mukavemetli veya yüksek aşındırıcı alaşımlar için seçilir. Çünkü dişli pimlerde dişler kolayca aşınabilir [34].



Şekil 2.8. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan karıştırıcı takım pimleri [34]

2.5. Kaynağın Metalurjik Yapısı

Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında karıştırılmış bölge içindeki yüksek sıcaklığa maruz kalmanın ve yoğun plastik deformasyona uğramanın katkısı, karıştırılmış bölge içinde yeniden kristalleşme ve doku gelişimine neden olur ve karıştırma bölgesi içinde ve etrafında irileşme ve çökelti oluşmasına neden olur. Çökeltilerin ve tanelerin mikro yapılarına dayanarak Şekil 2.9'da görüldüğü gibi karıştırılmış (kaynak) bölge, termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB) ve ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) olmak üzere üç ayrı bölge tanımlanmıştır [73].



Şekil 2.9. 7075 Al-T651'deki (standart dişli pim, 400 dev/dak ve 51 mm/dak) makro yapısal bölgeler [73]

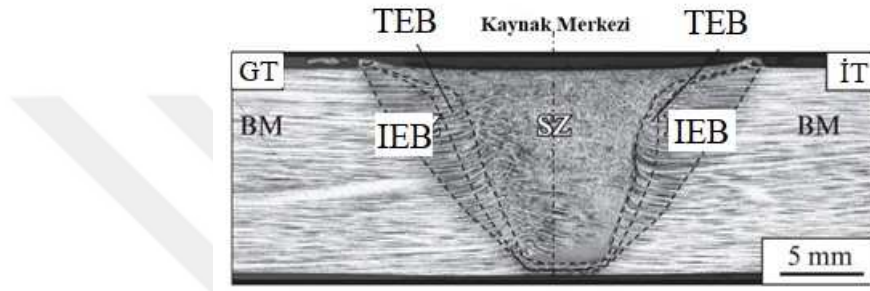
2.5.1. Kaynak Bölgesi

Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında yoğun plastik deformasyon ve sürtünme ısısı, karıştırılmış bölgede yeniden kristalize edilmiş ince taneli bir mikro yapı oluşmasına neden olur. Bu bölge genellikle kaynak bölgesi (KB) veya dinamik olarak yeniden

kristalleşmiş bölge (DKB) olarak adlandırılır. Yeniden kristalleşmiş tanelerin içlerinde genellikle düşük kayma yoğunluğu vardır. Yeniden kristalleşmiş kaynak bölgesi ve ana metal arasındaki ara yüz, takımın geri çekilme tarafında göreceli olarak yayılmıştır, ancak takımın ilerleyen tarafında oldukça keskindir.

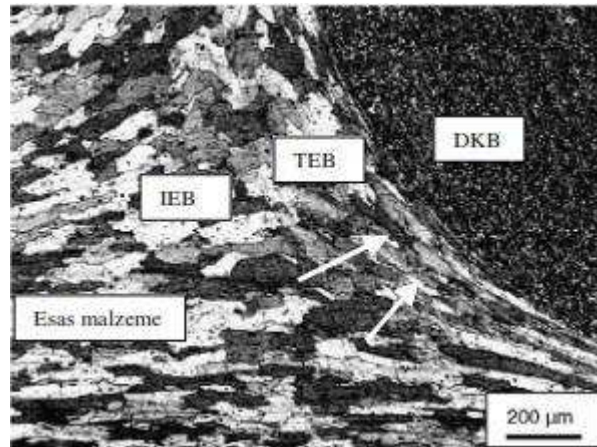
2.5.2. Termo-mekanik Olarak Etkilenen Bölge (TEB)

Sürtünme karıştırma kaynağına özgü, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi ana malzeme (BM) ile kaynak bölgesi arasında termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB) olan bir geçiş bölgesi oluşur.



Şekil 2.10. Çelik plakanın kaynağının enine makro yapısı (Pikrik asit çözeltisi ile dağlanmış) [74]

Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgede (TEB), sürtünme karıştırma kaynağı sırasında hem sıcaklık hem deformasyon oluşur. Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgenin tipik mikro yapısı Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Burada oldukça deforme olmuş bir yapı ile belirlenmiştir. Ana metalde uzamış taneler, karıştırma bölgesinin etrafında yukarı akan bir profilde deformasyona uğramıştır [73].



Şekil 2.11. Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgenin mikro yapısı [73]

2.5.3. Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB)

Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgenin ötesinde, ısıdan etkilenmiş bir bölge (IEB) vardır. Ana metale komşu olan bu bölgede termal bir döngü olur, ancak herhangi bir plastik deformasyona uğramaz (Şekil 2.10) [73].



3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada farklı kalitede östenitik paslanmaz çelik (AISI 304 ve AISI 316) ve sade karbonlu çelikler (AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070) sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada paslanmaz çelikler kendi aralarında similar (benzer metal kaynakları) olarak birleştirilmiş ve optimum değerler elde edilmiştir. İkinci aşamada ise elde edilen optimum değerler ile paslanmaz çelik-sade karbonlu çelik dissimilar (benzer olmayan metal kaynakları) olarak kaynaklanmıştır. Yapılan çaprazlamalarda kaynaklı bölgelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak en iyi kaynak çifti elde edilmeye çalışılmıştır.

Sürtünme Karıştırma Kaynak işlemleri için Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Meslek Yüksekokulu atölyesinde bulunan Şekil 3.1’de görülen 10 kW gücünde Taksan FU 315x1250 V/2 marka Universal Freze tezgâhı kullanılmıştır. Tezgâh 16 mm/dak ile 800 mm/dak arasında değişen ilerleme hızına, 28 dev/dak ile 1400 dev/dak arasında değişen freze mili devir sayısına sahiptir.



Şekil 3.1. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan freze tezgâhı

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan AISI 304, AISI 316, AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070 çeliklerinin kimyasal bileşimleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1. AISI 304 ve AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri

	Çelik	Türü
Kimyasal Bileşim	AISI 304	AISI 316
C	0,04	0,03
Cr	17,646	16,967
Ni	7,904	10,023
Mn	1,535	0,993
Mo	0,026	2,046
Ti	0,022	0,033
V	1,132	0,079
Co	0,375	0,306
Cu	0,113	0,514

Tablo 3.2. AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070 çeliklerinin kimyasal bileşimleri

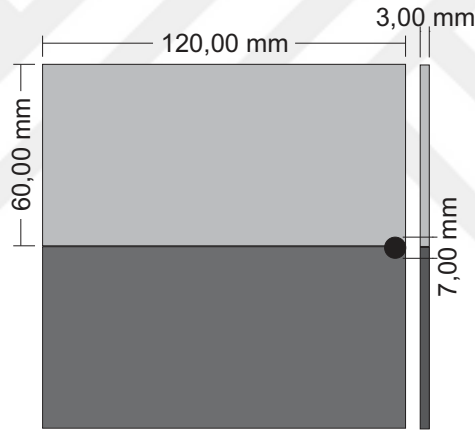
	Kimyasal Bileşim				
Çelik Türü	C	Mn	Si	P	S
AISI1010	0,119	0,495	0,087	0,017	0,013
AISI1030	0,306	0,512	0,026	0,032	0,018
AISI1050	0,538	0,389	0,035	0,115	0,003
AISI1070	0,659	0,559	0,049	0,019	0,02

3.1. Malzemelerin Kaynağa Hazırlanması

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek plakaların kenarlarında kesim nedeni ile çapak oluşmaması ve dolayısıyla iyi bir kaynak dikişi oluşturulması için Şekil 3.2’de görüldüğü üzere freze tezgâhında kenarları düzgün bir şekilde kesilmiştir. Şekil 3.3’te gösterildiği gibi her bir plakanın boyutu 60x120 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Alın alına getirilen plakanın birleşme noktasını ortalayacak şekilde 7 mm çapında bir delik açılmıştır. Böylece karıştırıcı uç, malzemeye ilk teması sırasında herhangi bir yük ile karşılaşmayacaktır.



Şekil 3.2. Numunenin kenarlarının freze tezgahında kesilmesi



Şekil 3.3. Deney numunesi boyutları

3.2. Karıştırıcı Uç Malzemesi

Çeliklerin faz diyagramlarına göre de yumuşama, homojenizasyon veya ısıtma işlemleri için uygun tek faz bölgesi ortalama 900°C'den başladığı için, sürtünme karıştırma kaynağı yapılırken kullanılacak uç malzemesinin de bu sıcaklıklardan mümkün oldukça az etkilenecek şekilde ya seramik metal kompozit ya da refrakter sert metallere seçilmesi gerekmektedir.

Yapılan literatür araştırmasında [16, 19, 20, 25] çelik plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kullanılan takım malzemesinin tungsten karbür sert metal kompozit olduğu görülmüştür. Bu nedenle deneyleri yapmak için piyasada sert metal olarak bilinen tungsten karbür uç kullanılması uygun bulunmuştur. Firmalarla iletişime geçilerek Tungsten karbür uç temin edilmiştir (Şekil 3.4).

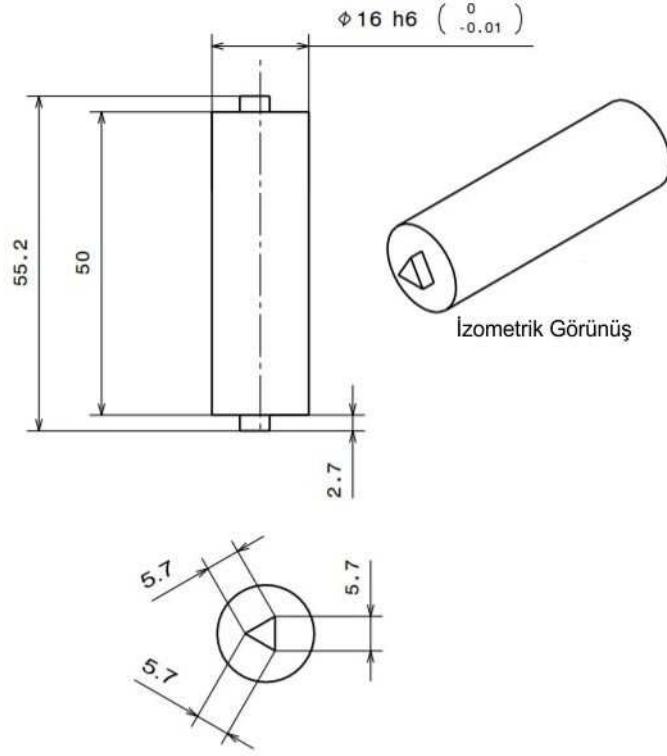


Şekil 3.4. Tungsten karbür karıştırıcı uç

3.3. Karıştırıcı Uçların Hazırlanması

Karıştırıcı ucun omuz çapı literatür araştırmasından [20] plaka kalınlığının 5 katı olarak seçilmiştir.

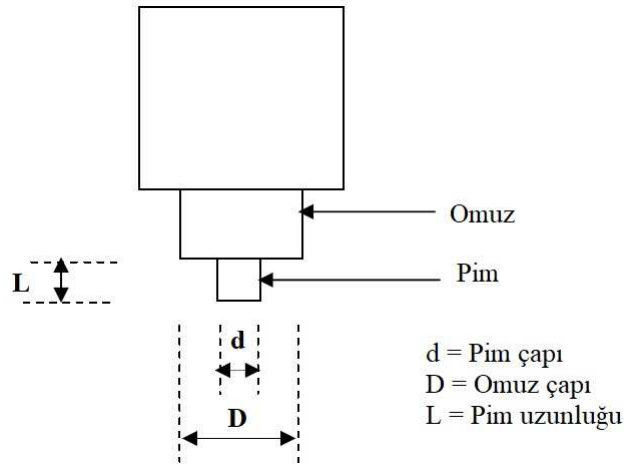
Yapılan literatür araştırmasında Meran ve Canyurt [14] AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı için en uygun uç geometrisinin üçgen profilli takım ucuna sahip sert metal karbür takımlar olduğunu vurgulamışlardır. Bu nedenle deneylerde karıştırıcı uç olarak eşkenar üçgen profilli uç kullanılmıştır. Eşkenar üçgen profilli tungsten karbür uç, ucu temin ettiğimiz firmaya yaptırılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Karıştırıcı uç teknik resmi

3.4. Takım Boyutları

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takım boyutları Şekil 3.6’da verilmiştir. Karıştırıcı ucun pim uzunluğu sürtünme karıştırma kaynağı için çok önemlidir [19]. Çünkü pim boyu kısa olursa kök nüfuziyeti gerçekleşmemekte, uzun olursa da birleştirilen parçalar ana tablaya yapışmaktadır.



Şekil 3.6. Sürtünme karıştırma kaynağı takım boyutları [7]

Yapılan literatür araştırması [14,15] sonucunda karıştırıcı takımın pim uzunluğu sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştireceğimiz malzemenin kalınlığından az olup 2,5 ile 2,7 arasında seçilmiştir. Deneyler sonucunda 2,5 mm pim uzunluğunda yeterli nüfuziyet sağlanamadığından deneylere 2,7 mm pim uzunluğu ile devam edilmiştir.

3.5. Deneyler İçin Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

Literatür araştırmasına [13, 14, 19, 23] istinaden deneylerde kullanacağımız ilerleme hızları 50 mm/dak ile 80 mm/dak arasında üç değer, devir sayıları ise 400 dev/dak ile 1120 dev/dak arasında beş değer seçilmiştir. Bu değerler Tablo 3.3'te verilmiştir. Sonrasında elde edilen optimum değerlerle ikinci aşama deneylere devam edilmiştir.

Tablo 3.3. Optimum deneylerin belirlenmesi için kullanılan değerler

Deney No	İlerleme Hızı (mm/dak)	Devir Sayısı (dev/dak)
1	50	450
2	63	450
3	80	450
4	50	560
5	63	560
6	80	560
7	50	710
8	63	710
9	80	710
10	50	900
11	63	900
12	80	900
13	50	1120
14	63	1120
15	80	1120

3.6. Deneylerin Yapılması

Çalışmada östenitik paslanmaz çelik olarak AISI 304 ve AISI 316 kalite ve sade karbonlu çelik olarak da AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070 kalite çelikler kullanılmıştır. İlk önce AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik ile AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik birleştirilmiştir. Bunun nedeni öncelikli olarak benzer metal (similar) kaynaklanabilirliğini belirleyip, bu paslanmaz çeliklerin birbirleriyle kaynak yapılmasıyla elde edilen kaynak bölgesinin mikroyapılarını referans olarak belirlemek ve mekanik özelliklerde karşılaştırma yapmaktır. İki aynı metalin kaynaklanabilmesindeki hem faz diyagramları hem de mekanik zorlukların üst limit olarak tutulması hem de diğer benzer olmayan metal kaynakları (dissimilar) için optimum ilerleme hızı ve devir sayısı belirlenmesidir. Daha sonra AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik, sade karbonlu

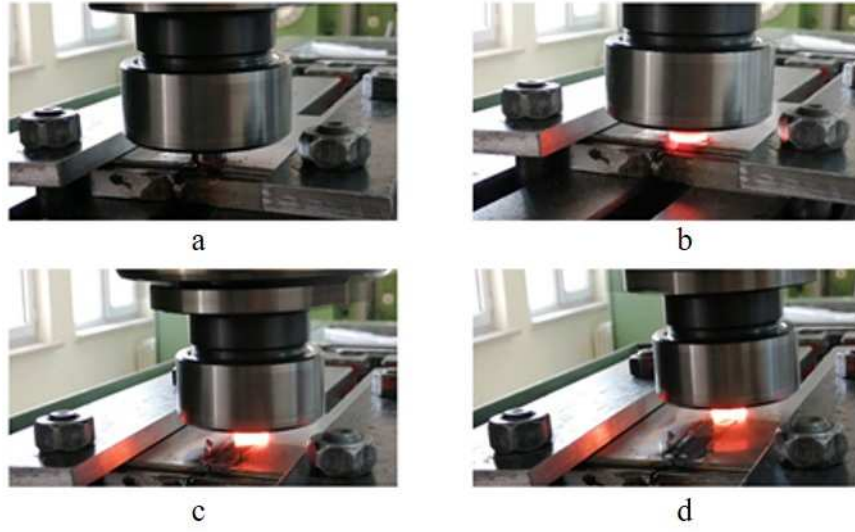
çelikler olan AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050 ve AISI 1070 kalite çeliklerle kaynak yapılmıştır. Elde edilen kaynaklı birleştirmelerden hangisinin mikroyapısının/mechanik özelliklerinin AISI 304 – AISI 304 birleştirmesinden elde edilen sonuçlara daha yakın bir sonuç verdiğine bakılarak parametrik bir deneysel benzeşim kurulmuştur. Buradaki etken parametreler altında metallerin elementel geçişlerinin benzer metal kaynağındaki geçişlere benzer özellikler göstermesidir.

Yukarıda anlatıldığı gibi ilk önce AISI 304 kalite paslanmaz çelik kendisi ile kaynaklanmıştır. Daha önceden hazırlayıp istenilen boyutlara getirdiğimiz AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik plakalar alın alına getirilerek Şekil 3.3'te görüldüğü gibi başlangıç deliği için iki plakanın birleşme noktasını tam ortalayacak şekilde delik açılmıştır. Böylece kullanılacak plakalarda ön ısıtma sırasında takım pimi yük görmeden malzemeye daldırılabilir [65]. Delik açma işleminden sonra kaynak sırasında titreşimleri, farklı yönlerde itilme hareketlerini ortadan kaldırmak için plakalar Şekil 3.7'de gösterildiği gibi tutucu pabuçlar vasıtasıyla sabitlenmiştir.



Şekil 3.7. Plakaların pabuçlarla bağlanması

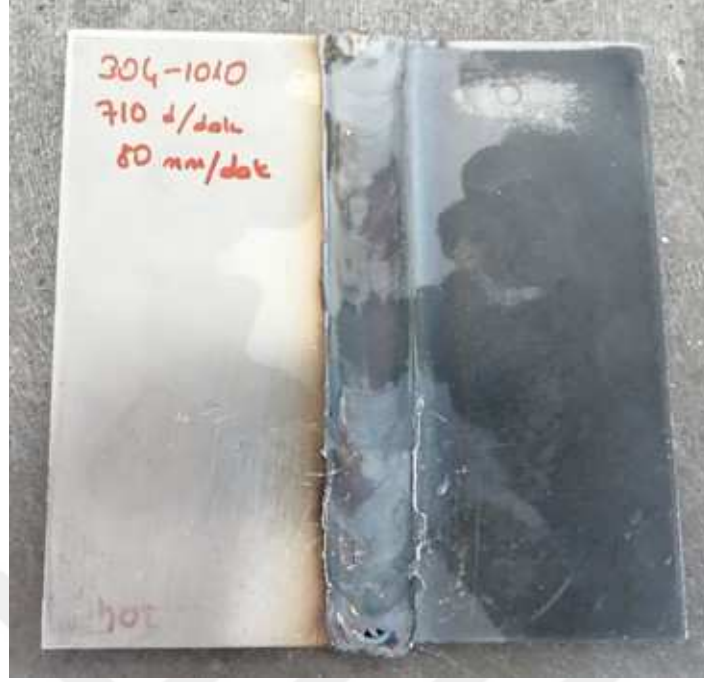
Daha sonra freze pensinin ucuna, kaynak yapmak için kullanılacak olan karıştırıcı uç takılmıştır. Başlangıç deliğine sıfırlanan takım ucuna dönme hareketi verilerek numuneye sentrik olarak daldırılmış, takım omuzunun sürtünmeye başlaması (Şekil 3.8a) ile birlikte ucun kızarması (Şekil 3.8b) üzerine takıma ilerleme hareketi verilmiş (Şekil 3.8c), malzemenin bitim noktasına kadar devam ettirilerek bu noktadan sonra kaynak işlemi bitirilmiştir (Şekil 3.8d).



Şekil 3.8. AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik plakının sürtünme karıştırma kaynağı, a) Sürtünme başlangıcı, b) Omuzun ısınıp kızarmaya başlaması, c) İlerleme, d) Sonlandırma

Bu işlemlere Tablo 3.3'te belirtilen devir sayıları ve ilerleme hızları kullanılarak devam edilmiştir. Daha sonra yapılacak deneylerde ise bu deneylerimizde uygulanan deney setlerinden en iyi sonucu veren optimum değerlerimiz belirlenmiştir. En iyi sonuç olarak AISI 304'ün ve AISI 304'lerin kaynaklanmış durumundaki numunelerin çekme testleri karşılaştırmalar yapılarak parametrelerin en iyisi belirlenip diğer benzer olmayan metallerin kaynaklanabilirliğinde kullanılmıştır.

En iyi çekme değerlerine sahip AISI 304 – AISI 304 paslanmaz çelik çiftine uygulanan devir sayısı ve ilerleme hızı optimum değerler olarak belirlenmiştir. Elde edilen optimum değerler kullanılarak AISI 304 – AISI 1010 çelik çifti sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir (Şekil 3.9). Kaynaklanması planlanan çeliklerin bir tarafı paslanmaz seri iken diğer tarafı da sade karbonlu alaşımsız yapı çelikleridir. Burada öncelikli amaçlarımız; yüksek maliyetli paslanmaz çeliklerin belli ortamlarda çok iyi mukavemetlerinin olmasına karşın sürekli aynı malzemeyi ortam dışında kullanmanın maliyetleri arttırması, hem de paslanmaz çeliklerin üretilme zorluğundan dolayı endüstriyel enerji sarfiyatının minimize edilmesinin istenmesidir. Dolayısıyla paslanmaz çeliklerde kaynaklanabilme problemlerinde ortaya çıkan taşıma problemleri kendisine en yakın özellikteki bir sade karbonlu gruba değiştirilebilecek, hem maliyet hem de enerji sarfiyatının önüne geçilmiş olacaktır.



Şekil 3.9. Kaynaklanmış AISI 304 – AISI 1010 çelik çifti

Tablo 3.4'te belirtilen malzeme çiftleri yukarıda anlatılan işlemlere tabi tutularak deneyler tekrarlanmıştır.

Tablo 3.4. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek malzeme çiftleri

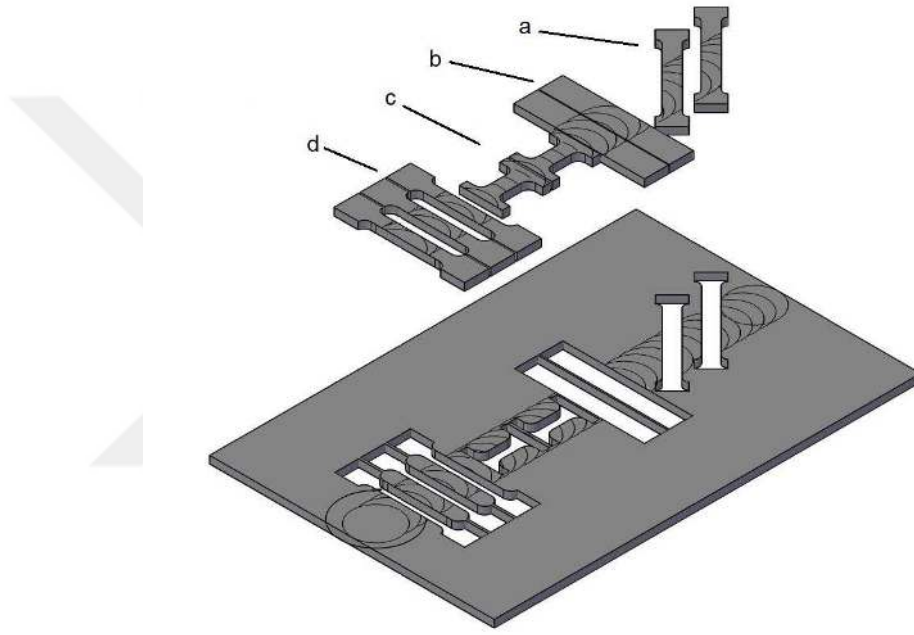
	Birinci Malzeme	İkinci Malzeme
1	AISI 304	AISI 304
2	AISI 304	AISI 1010
3	AISI 304	AISI 1030
4	AISI 304	AISI 1050
5	AISI 304	AISI 1070
6	AISI 316	AISI 316
7	AISI 316	AISI 1010
8	AISI 316	AISI 1030
9	AISI 316	AISI 1050
10	AISI 316	AISI 1070

Tüm malzemelerin kaynaklanma işlemleri bitirildikten sonra birleştirilen AISI 304 – AISI 1010, AISI 304 – AISI 1030, AISI 304 – AISI 1050, AISI 304 – AISI 1070 çelik çiftlerinin kaynak bölgesindeki mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar optimum değerlere sahip olan AISI 304 – AISI 304 çiftinin kaynak bölgesindeki mikroyapı ve mekanik özelliklerinin sonuçları ile karşılaştırılarak bu çifte en yakın kaynak çifti elde edilmeye çalışılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AISI 316 – AISI 1010,

AISI 316 – AISI 1030, AISI 316 – AISI 1050, AISI 316 – AISI 1070 çelik çiftleri için de kaynak bölgesindeki mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmesi yapılmış, sonuçlar optimum değerlere sahip olan AISI 316 – AISI 316 çiftinin kaynak bölgesindeki mikroyapı ve mekanik özelliklerinin sonuçları ile karşılaştırılarak bu çifte en yakın kaynak çifti elde edilmeye çalışılmıştır.

3.7. Numunelerin İncelenmesi

Deney numuneleri Şekil 3.10'daki gibi çıkarım planı yapılarak mekanik özellik ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 3.10. Deney numunelerinin birleştirilmiş levhalardan çıkarım planı a) Enine çekme numunesi, b) Boyuna çekme numunesi, c) Çentik darbe numunesi, d) 45°'lik kayma numunesi

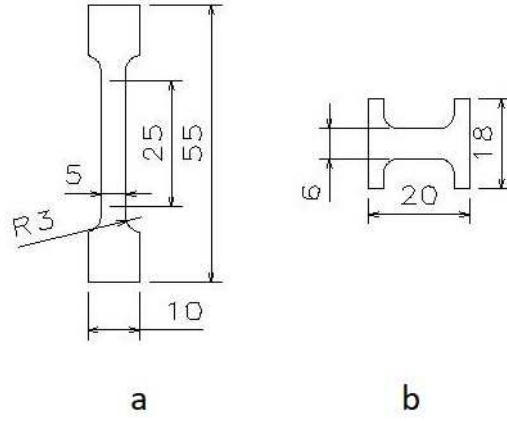
3.7.1. Mekanik Testler

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzeme çiftlerinin mekanik özellikleri Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan çekme, çentik darbe ve mikrosertlik deney setleri ile incelenmiştir. Şekil 3.11'de çekme deneylerinin yapıldığı Shimadzu marka çekme deney seti görülmektedir.



Şekil 3.11. Çekme deneylerinin yapıldığı Shimadzu marka çekme deney seti

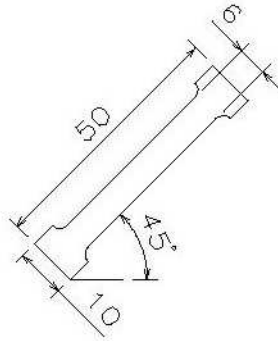
Çekme testi için kaynaklanan malzeme çiftinden belirli bir geometrik kesite sahip enine çekme ($l_o=25$ mm, $t_o=5$ mm) ve boyuna çekme numuneleri ($l_o=10$ mm, $t_o=6$ mm) çıkarılarak çekme deney setinde çekme testine tabi tutulmuştur (Şekil 3.12). Her testen dört adet çekme testi yapılmıştır. Çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler doğrudan mühendislik hesaplarında kullanıldığı için en yaygın olarak kullanılan tahribatlı malzeme muayenesi yöntemlerinden birisidir. Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması amacıyla yapılır [53]. Dolayısıyla kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme testleri sayesinde, bağlantıların yük dayanım kapasiteleri, bağlantı verimlilikleri, süneklikleri gibi özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Ayrıca numunelerdeki kırılma yüzeyi, yetersiz ergime, yetersiz nüfuziyet, porozite, inklüzyonlar ve çatlaklar gibi süreksizliklerin varlığı ve etkileri hakkında bilgi sahibi olunabilir.



Şekil 3.12. Çekme numuneleri a) Enine çekme numunesi; b) Boyuna çekme numunesi

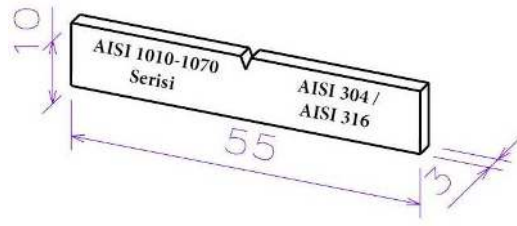
Aynı şekilde kayma testi için 45° 'lık çekme numunesi hazırlanmış ve çekme deney setinde çekme testine tabi tutulmuştur (Şekil 3.13).

45° 'lik açılarda oluşan çekme değerleri, kayma düzlemleriyle Schmid faktörü gereğince ilerleyebilen dislokasyonların sürekliliğini sorgulamak amacı ile yapılan deneylerdir. Bu durumda, kayma eksenini hem kaynak mukavemetini hem de büyüyen veya yönelen tanelerin mukavemetini (Kayma mukavemeti) göstermektedir. Bilinmelidir ki kayma eksenini 45° 'lik açıda olduğundan kayma mukavemeti değerleri minimum çekme değerleri olacaktır.



Şekil 3.13. Kayma deney numunesi boyutu

Çentik darbe testi için ise birleştirilen malzeme çiftleri Charpy testi ile belirlenmiş malzemenin orta noktasında (kaynak bölgesinin içinde) V çentik açmak suretiyle elde edilen belirli bir geometrik kesite sahip numuneler ile yapılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Çentik darbe deney numunesi

Malzemelerde yapılan darbe deneyi, malzemenin ekstrem şartlarda, çok hızlı çatlak ilerlemesine zorlandığı zamanlarda, absorbe ettiği enerjiyi öğrenmek için yapılmaktadır. Darbe enerjisi hem soğuk deformasyon şartları hem de sıcak deformasyon (oda sıcaklığı ve üstü) şartlarında yapılarak malzemede gevrek-sünek geçiş sıcaklığı ve tokluk değerleri de belirlenebilir. Şekil 3.15'te çentik darbe deneylerinin yapıldığı Brooks marka çentik darbe deney cihazı görülmektedir.



Şekil 3.15. Brooks marka çentik darbe deney cihazı

Mikrosertlik incelemesi sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerin kaynak bölgelerinden alınan metalografi numunelerinin kaynak bölgesi boyunca normal metal, ısıdan etkilenmiş kaynak metali bölgesi olarak 1,5 kg yük altında 15 sn bekletilerek, 1 mm aralıklarla ilerletilip mikrosertlik testine tabi tutularak yapılmıştır. Şekil 3.16'da Shimadzu HMV M3 marka mikro sertlik ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 3.16. Shimadzu HMV M3 marka mikro sertlik ölçüm cihazı

3.7.2. Mikroyapı İncelemeleri

Yapılan kaynaklar sonucunda malzeme çiftlerinin mikroyapıları Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde bulunan XRD (X-ışını difraktometresi) ve CÜTAM'da (Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi) SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Müh. bünyesinde bulunan optik mikroskop aracılığı ile incelenmiştir.

OM (Optik Mikroskop), malzemelerin mikro yapısını incelemek için kullanılan en yaygın araçtır. Ürün geliştirme, malzeme işleme süreçlerinde kalite kontrolü için, malzeme hasarlarının sebeplerini belirlemek için ve malzeme yapısı ile özellikleri arasında ilişki kurmak için kullanılır [75]. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerin kaynak bölgelerinden metalografi numuneleri alınmıştır. Şekil 3.17'de gösterilen Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskop ile numunelerin mikro yapı görüntüleri incelenmiştir. Numune öncelikle 600-800-1200'lük SiC zımpara ile sulu zımpara yapılmıştır. Daha sonra 1 µm'lik alümina pasta ile çuhada parlatılmıştır. %65'lik nitrik asitten (HNO_3) 5 ml,

%99,6'lık saf alkolden 95 ml karıştırılarak 100 ml'lik stok dağılama çözeltisi hazırlanmıştır. Daldırma usulüyle 3 sn tüm numune daldırılıp bekletilerek derhal saf su ve alkol ile temizlenmiştir. Kurulandıktan sonra mikroskopta incelenmek üzere hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.17. Nikon Eclipse L150 marka optik mikroskop

SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemeler hem yüzey morfolojisi, hem elementel dağılım için hem de çekme, çentik darbe ve kayma deneylerine tabi tutulduktan sonra bu deneylerden elde edilen kırık yüzeyler Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan TESCAN MIRA3 XMU marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. TESCAN MIRA3 XMU marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)

XRD (X-Işını Kırınım Yöntemi), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. Birleştirilen malzemenin kaynak bölgesinden alınan numunenin mikroyapısı XRD ile incelenmiş ve kaynak esnasında ısınma soğuma şartlarından dolayı oluşabilecek yeni fazlar ve Fe için genlemeden dolayı oluşacak faz kaymaları ve safsızlıkların da faz analizi X ışınları difraksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.19'da gösterilen Rigaku Miniflex 600 model XRD cihazı ile Cu K α ışınmasının dalga boyu (λ) 1.5408, 20°-80° 2θ aralığında ve 3°/dk tarama hızı ile ve adım aralığı 0.05° olacak şekilde paternler alınıp kaydedilmiştir. Kaydedilen paternler, MDI® Jade 6.5 XRD analiz programında çözümlenerek fazlar belirlenmiştir.



Şekil 3.19. Rigaku miniflex 600 marka XRD cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Optimum değerleri belirlemek için deneylere ilk olarak devir sayısı 450 dev/dak ve ilerleme hızı ise ilk olarak 50 mm/dak değerleri alınarak başlanmıştır. Fakat bu parametrelerle yapılan kaynaklarda malzemelerin birleştirilemediği gözlemlendiği için (Şekil 4.1) bu devir sayısı ve ilerleme hızlarından vazgeçilmiş, deneylere 560 dev/dak devir sayısı, 50 mm/dak ilerleme hızı ile devam edilmiştir. Şekil 4.2’de yapılan kaynaklarda da gözle görülür şekilde oyuk ve birleşmemeler olduğu belirlenince bu parametrelerden de vazgeçilmiş, bundan sonra deneylere Tablo 4.1’deki parametreler kullanılarak devam edilmiştir.



Şekil 4.1. Devir sayısı 450 dev/dak, ilerleme hızı 63 mm/dak ile kaynaklanan malzeme



Şekil 4.2. Devir sayısı 560 dev/dak, ilerleme hızı 80 mm/dak ile kaynaklanan malzeme

Tablo 4.1. Optimum deneylerin belirlenmesi için kullanılan değerler

Deney No	İlerleme Hızı (mm/dak)	Devir Sayısı (dev/dak)
1	50	710
2	63	710
3	80	710
4	50	900
5	63	900
6	80	900
7	50	1120
8	63	1120
9	80	1120

Şekil 4.3'te paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş plakalarından birisinin fotoğrafı temsili olarak verilmiştir.



Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik

4.1. Mekanik Deney Sonuçları

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen plakalara çekme, kayma, çentik darbe ve mikrosertlik deneyleri yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir.

4.1.1. Çekme Deney Sonuçları

Kaynak işlemi bittikten sonra lazer kesim ile Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görüldüğü gibi hem kaynaklı çekme numuneleri hem de kaynaklı haldeki AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çeliklerinden çekme numuneleri çıkarılmıştır. Lazer ile kesilen numunelerin kenarlarında oluşan çapaklar temizlenmiştir.



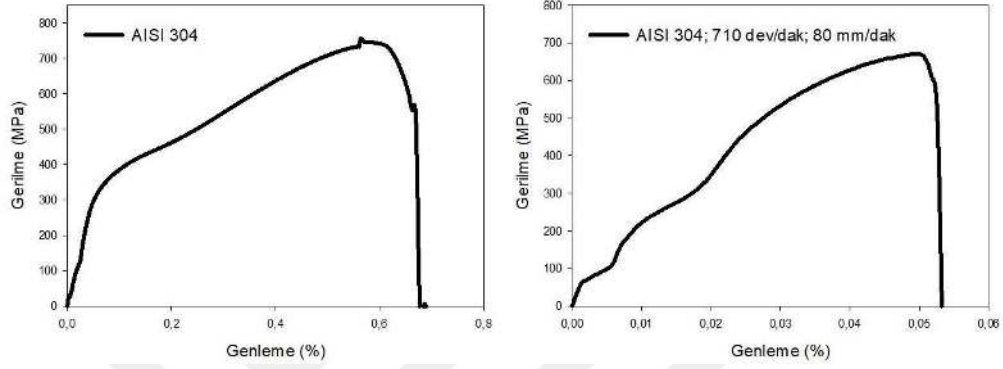
Şekil 4.4. Kaynaklı çekme numuneleri



Şekil 4.5. Kaynaksız çekme numuneleri

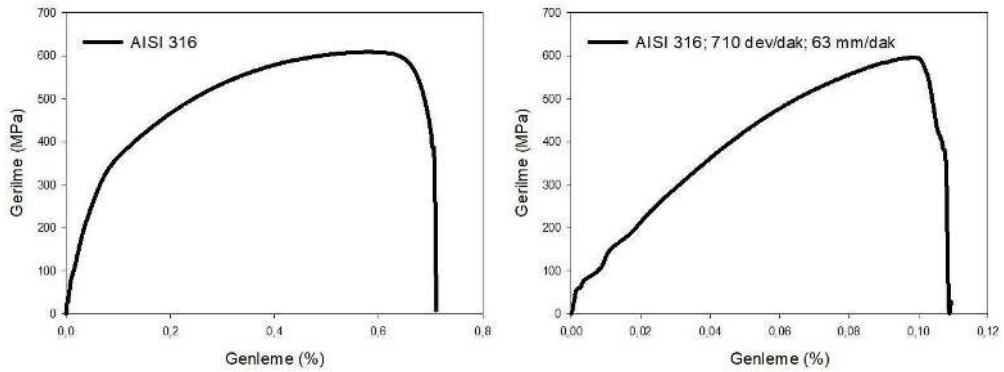
Çekme testleri, üniversal test cihazında (Shimadzu® Trapezium, Japonya) yapılmıştır. Testlerde numunelere, 1 mm/dak'lık çekme hızı ile çekme kuvveti uygulanmıştır. Çekme kuvvetine karşılık gelen uzama kaydedilmiştir. Elde edilen kuvvet-uzama verilerinden gerilme (σ)-genleme (ϵ) grafiğini elde etmek için, kuvvet ilk alana bölünerek çekme gerilmesi, uzama miktarı ise numunenin ilk boyuna bölünerek genleme elde edilmiştir. Aynı koşullar altında tüm deneyler için mühendislik gerilme (σ)-birim şekil değiştirme/genleme (ϵ) grafiği oluşturulmuştur. Oluşturulan grafikler kaynaksız çekme numunelerinin gerilme (σ)-birim şekil değiştirme/genleme (ϵ) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağında ilerleme hızı, dönme hızı parametrelerinin deneysel optimizasyonu ve optimizasyon katsayısı olan 0.70'den daha büyük değerlerde uygunluk sağlanması açısından, kaynaksız numunelerin çekme gerilmesi

değerlerinin %70'i hesaplanmış ve çıkan sonuçlar sıralanarak optimum değerler belirlenmiştir. AISI 304 kaynaklı numunesinin çekme deneyi sonucunda maksimum gerilme değeri 755,9 MPa olarak bulunmuştur. Kaynaklı numunelerin maksimum gerilmelerinin %70'i hesaplanarak 529,13 MPa ve yukarı olanlar sıralandığında, Şekil 4.6'daki grafiklerden görüldüğü üzere maksimum gerilmesi 670,35 MPa değeri ile 710 dev/dak devir sayısı, 80 mm/dak ilerleme hızına sahip olan AISI 304 kaynaklı numune tespit edilmiş ve optimum değer olarak belirlenmiştir.



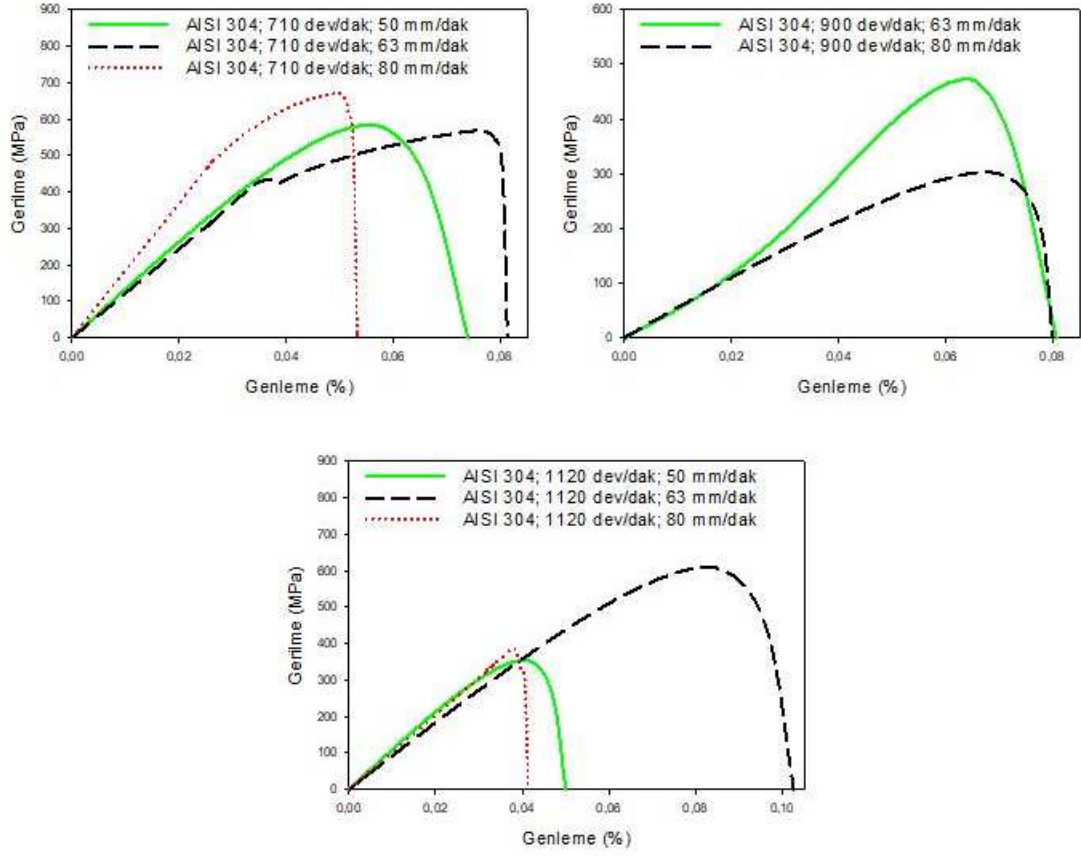
Şekil 4.6. a) AISI 304 kaynaklı numune, b) AISI 304 kaynaklı numune

AISI 316 kaynaklı numunesinin çekme deneyi sonucunda, maksimum gerilme değeri 607,8 MPa olarak bulunmuştur. Kaynaklı numunelerin maksimum gerilmelerinin %70'i hesaplanarak 425,5 MPa ve yukarı olanlar sıralandığında, Şekil 4.7'deki grafiklerden görüldüğü üzere maksimum gerilmesi 595,24 MPa değeri ile 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızına sahip olan AISI 316 kaynaklı numune tespit edilmiş ve optimum değer olarak belirlenmiştir. Her iki çelik plaka için, 710 dev/dak devir sayısı malzemelerin birbirlerine karıştırılması açısından yeterli olmuştur. AISI 304 paslanmaz için 80 mm/dak ve AISI 316 paslanmaz için 63 mm/dak ilerleme hızlarında yeterli ısı girdisi sağlanmış ve malzemeler birbirine homojen bir şekilde dağılmışlardır.

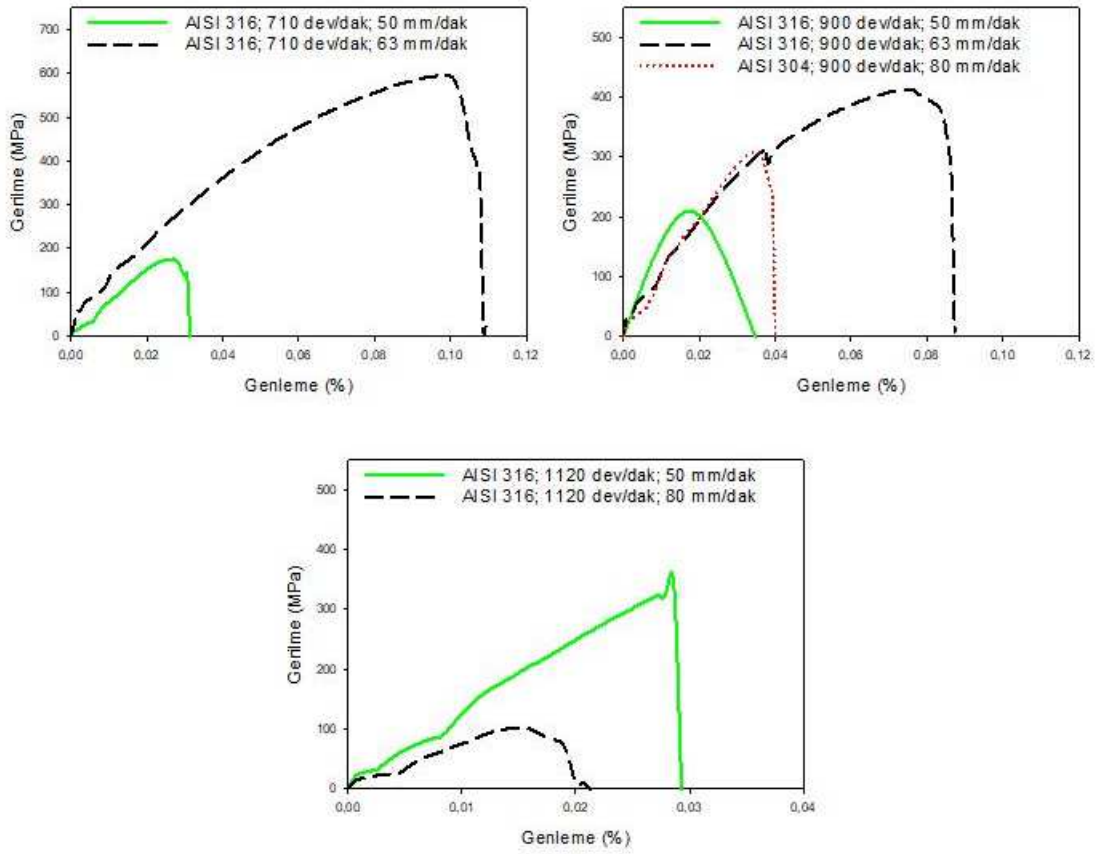


Şekil 4.7. a) AISI 316 kaynaklı numune, b) AISI 316 kaynaklı numune

Şekil 4.8’de AISI 304, Şekil 4.9’da AISI 316 paslanmaz çeliklerine ait mühendislik gerilme (σ)-genleme (ϵ) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.8. AISI 304 paslanmaz çeliklerine ait mühendislik gerilme (σ)-genleme (ϵ) grafikleri



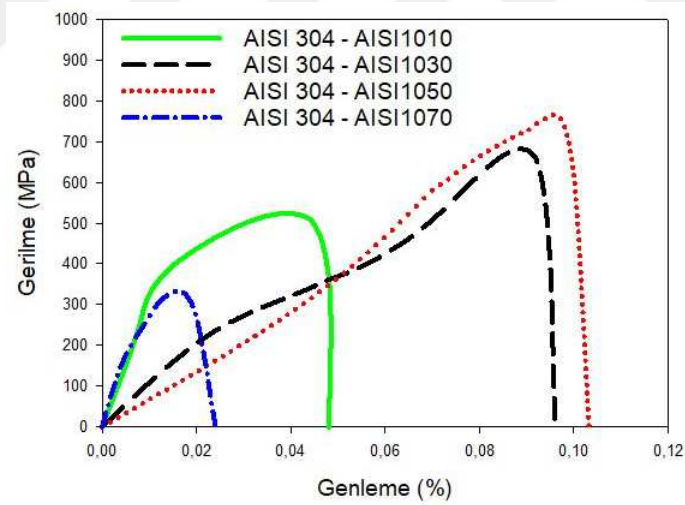
Şekil 4.9. AISI 316 paslanmaz çeliklerine ait mühendislik gerilme (σ)-genleme (ϵ) grafikleri

Belirlenen optimum değerler ile paslanmaz çelik - karbonlu çelik sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş, daha sonra Şekil 4.10'da görüldüğü gibi çekme numuneleri çıkarılmış ve çekme testine tabi tutulmuştur. Numunelere 1 mm/dak'lık çekme hızı ile çekme kuvveti uygulanmıştır.



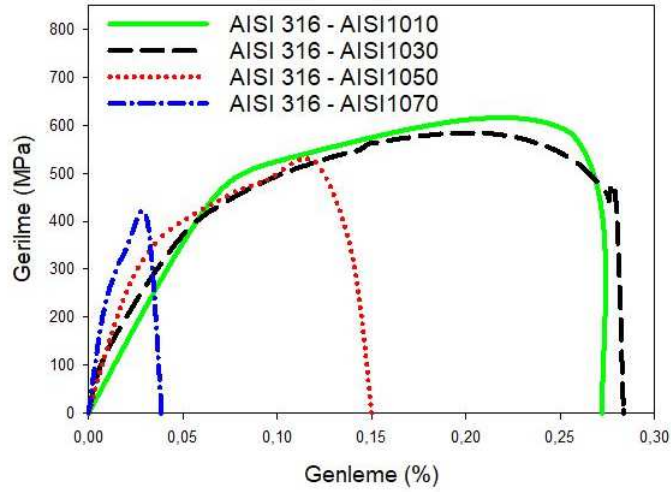
Şekil 4.10. Kaynaklanmış paslanmaz çelik-karbonlu çelik çiftinin deney numuneleri

AISI 304-AISI 10X0 serisi çekme değerleri Şekil 4.11’de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde AISI 304-AISI 1050 kaynak çifti en iyi çekme değerine sahip olduğu görülmektedir.



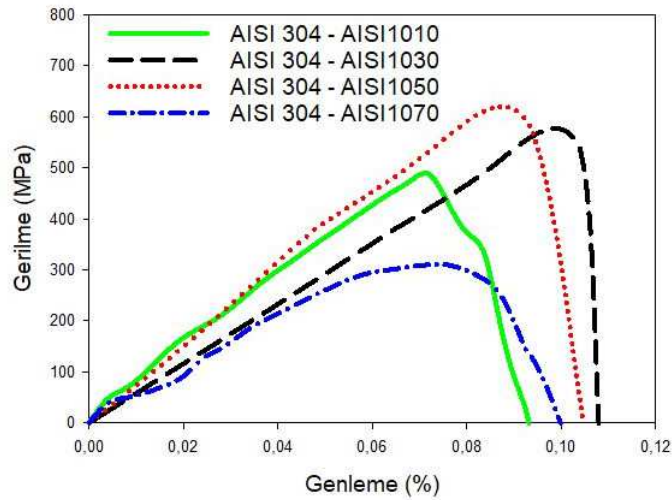
Şekil 4.11. AISI 304-AISI 10X0 serisi 710 dev/dak devir sayısı, 80 mm/dak ilerleme hızındaki çekme değerleri

AISI 316-AISI 10X0 serisi çekme değerleri Şekil 4.12’de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde AISI 316-AISI 1010 kaynak çifti en iyi çekme değerine sahip olduğu görülmektedir.



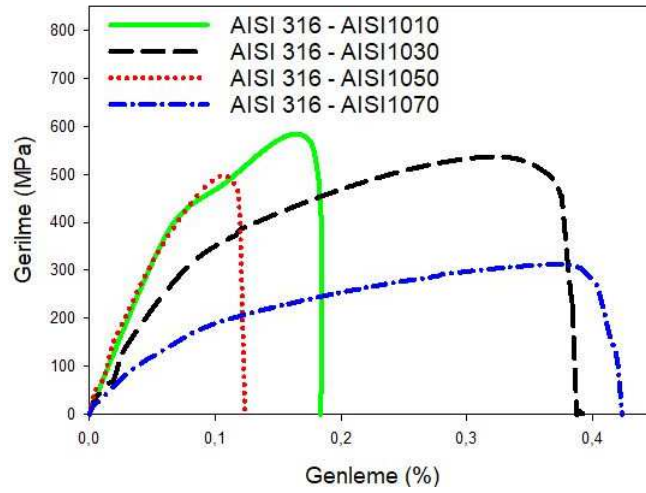
Şekil 4.12. AISI 316-AISI 10X0 serisi 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızındaki çekme değerleri

AISI 304-AISI 10X0 serisi kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.13'te görülmektedir. Grafikler incelendiğinde AISI 304-AISI 1050 kaynak çifti en iyi kayma gerilmesi değerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13. AISI 304-AISI 10X0 serisi 710 dev/dak devir sayısı, 80 mm/dak ilerleme hızındaki kayma değerleri

AISI 316-AISI 10X0 serisi kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.14'te görülmektedir. Grafikler incelendiğinde AISI 316-AISI 1010 kaynak çifti en iyi kayma gerilmesi değerine sahip olduğu görülmektedir.



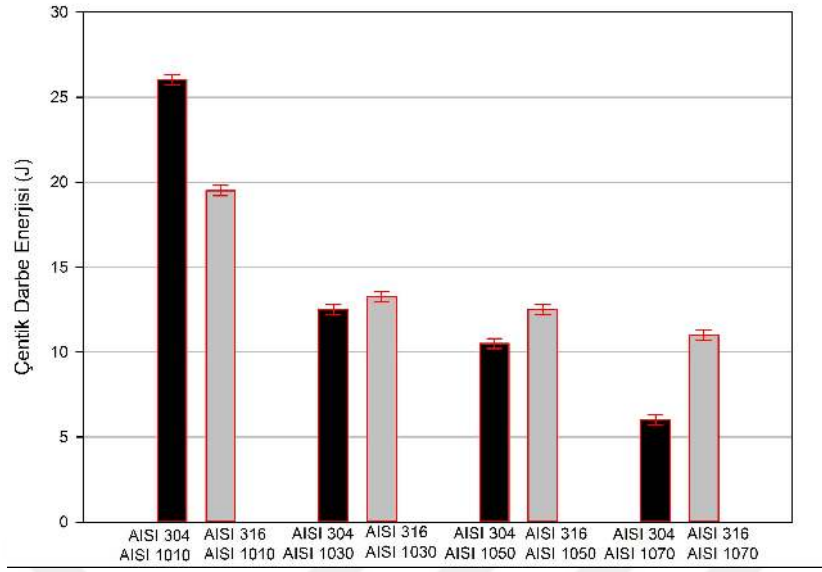
Şekil 4.14. AISI 316-AISI 10X0 serisi 710 dev/dak devir sayısı, 63 mm/dak ilerleme hızındaki kayma değerleri

4.1.2. Çentik Darbe Deney Sonuçları

Tablo 4.2’de paslanmaz çelik-karbonlu çelik kaynaklarından elde edilen çentik darbe deney sonuçları görülmektedir. Kırılma enerjilerine bakıldığında AISI 304-AISI 10X0 serisinde en yüksek kırılma enerjisine 26 J ile AISI 304-AISI 1010 çelik çifti sahiptir. Yüksek kırılma enerjisine sahip malzemelerin sünek olduğundan yola çıkarak AISI 304-AISI 1010 çelik çiftinin diğer malzemelere göre daha sünek olduğunu söylenebilir. Aynı şekilde AISI 316-AISI 10X0 serisinde 19,5 J kırılma enerjisine sahip AISI 316-AISI 1010 çelik çifti diğerlerine göre daha sünek davranış göstermektedir. Şekil 4.15’te çentik darbe deney sonuçları grafik halinde verilmiştir.

Tablo 4.2. Paslanmaz çelik-karbonlu çelik kaynaklarından elde edilen çentik darbe deney sonuçları

Deney No	İlerleme Hızı (mm/dak)	Devir Sayısı (dev/dak)
1	50	710
2	63	710
3	80	710
4	50	900
5	63	900
6	80	900
7	50	1120
8	63	1120
9	80	1120

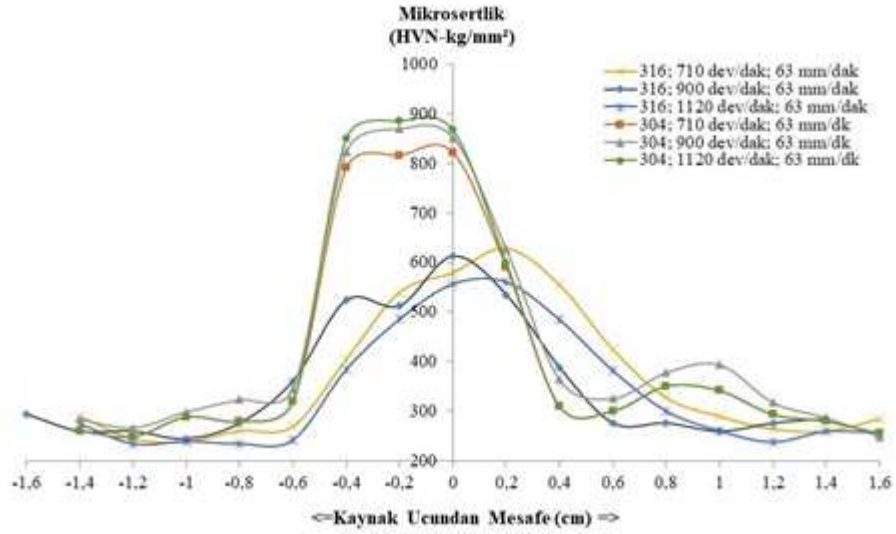


Şekil 4.15. Çentik darbe deney sonuçları grafikleri

4.1.3. Mikrosertlik Deney Sonuçları

Şekil 4.16'da mikrosertlik sonuçları gösterilmiştir. AISI 304 paslanmaz çeliklerden 63 mm/dak ilerleme hızına, 710 dev/dak, 900 dev/dak ve 1120 dev/dak devir sayılarına sahip numunelerin sertlik değerleri incelenmiştir. 1120 dev/dak devir sayısında ısı girdisi fazla olduğu için tane yapısı büyüdüğünden malzeme gevrekleşmiş ve sertlikte düşmüştür. 900 dev/dak devir sayısında ise ısı girdisi 1120 dev/dak ile kıyaslandığında nispeten daha düşük olduğundan dolayı sertlik değerinin düşük olduğu düşünülmektedir. 710 dev/dak devir sayısında düşük ısı girdisi ve orta düzeyde ilerleme hızına sahip olduğundan diğer devir sayılarına göre daha az gevrek ve sertlik değeri de diğerlerine nazaran düşük olduğu düşünülmektedir. 304 çeliği zaten genel olarak ostenitik ve yüksek Cr miktarına sahip bir çeliktir. Hem 304'teki sert karbürler hem de orta yüksek seviyedeki C oranı ile 1050'nin sertliğinin en yüksek çıkması da beklenen bir durumdur. Burada oluşan taneler arası karbür çökeltileri, yapının sert kalmasında ve tane büyümesinin durdurulmasında önemli rol oynamaktadır. 304 çeliklerinin sertlikleri genel olarak 850-900 kg/mm² iken 316 çeliklerinin sertlikleri 550-600 kg/mm² seviyelerindedir.

Sabit ilerleme hızı ile 710 dev/dak, 900 dev/dak ve 1120 dev/dak devir sayılarına sahip AISI 316 kaynaklı numunelerin sertlik değerlerine bakıldığında 1120 dev/dak ile kaynaklanan numunenin daha düşük sertliğe sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebepleri olarak, 316 plakanın SEM fotolarından da görüldüğü üzere delamine olması, ayrıca ısı girdisinin düşük olması, ilerleme hızının yüksek olması ile tanelerin arasındaki uyumsuzluğun fazla olması ile çabuk çekme göstermesi sayılabilir. En yüksek çekme mukavemetini veren 316-1010 çiftinde de benzer şekilde yüksek mukavemetin ve sünekliğin yol açtığı düşük sertlikle karşılaşılmaması da olasıdır.



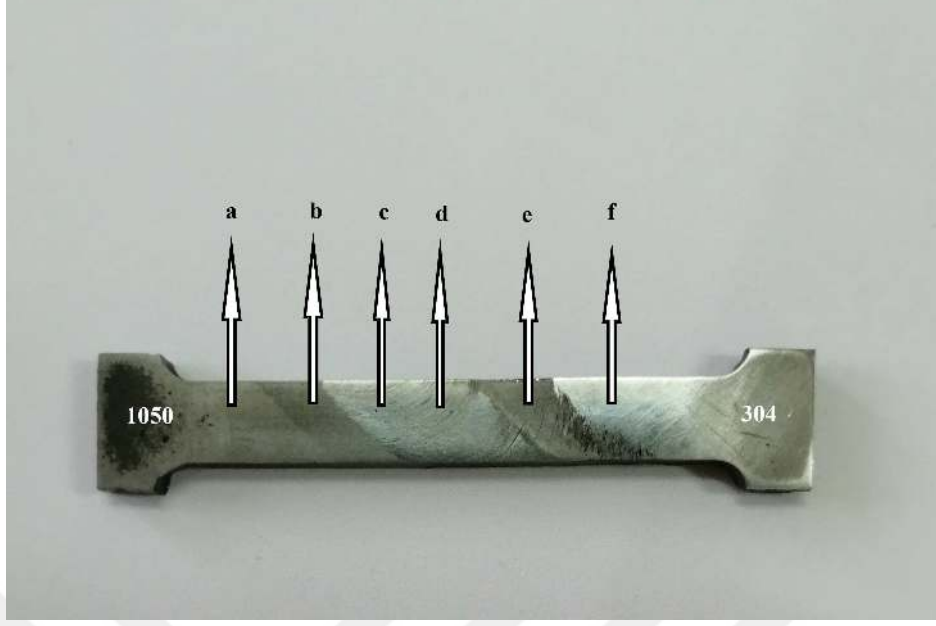
Şekil 4.16. Mikrosertlik deney sonuçları

4.2. Mikroyapı Deney Sonuçları

Mikroyapı deney sonuçlarında kaynaklı bölgeler optik mikroskopta, çekme, kayma ve çentik darbe deneylerinden elde edilen kırık yüzeyler taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiş ve XRD ile faz analizleri yapılmıştır.

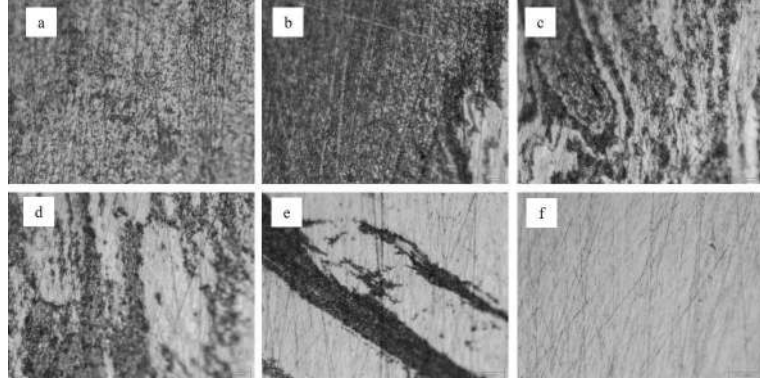
4.2.1. Optik Mikroskop Deney Sonuçları

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin mikroyapıları Şekil 4.17’de görüldüğü gibi optik mikroskopta incelenmiş ve bu bölgeler, a ile gösterilen bölge sade karbonlu çelik, b ile gösterilen bölge kaynak bölgesine giriş, c ve d ile gösterilen bölgeler kaynak bölgesi, e bölgesi paslanmaz tarafında kaynak bölgesinden çıkış ve f bölgesi paslanmaz çelik kısmını göstermektedir.



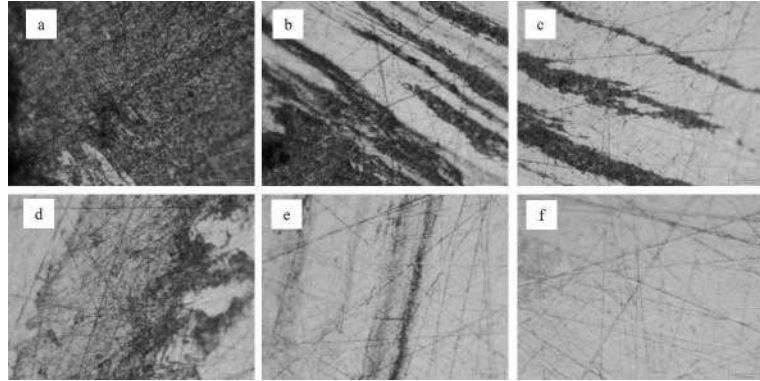
Şekil 4.17. Kaynaklı numunenin optik mikroskopta incelenen bölgeleri

Şekil 4.18’de AISI 316-AISI 1010 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.18a’da kaynaklı numunede AISI 1010 çeliği görülmektedir. Koyu gri görünen yerlerin perlit, açık renkte görülen yerlerin ise ferrit olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.18b’de karbonlu çelikten karışma bölgesine giriş kısmında, yoğunluklu olarak ferrit ve perlitin olduğu, bu bölgede paslanmaz çeliğin varlığı da görülmektedir. Karıştırma bölgesinin tam ortası olan Şekil 4.18c’ de paslanmaz çelikten karbonlu çeliğe doğru karıştırma bölgelerinin olduğu ve Şekil 4.18d’de ise karbonlu çelikteki perlit ve ferritin paslanmaz çelik içerisinde öbek öbek karıştığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.18e’de kaynak bölgesinin paslanmaz çelik tarafına doğru gidildiği ve yapıda daha fazla paslanmaz çeliğe karşılık bant şeklinde çok az miktarda perlit ve ferritte gözlemlenmektedir. Koyu siyah görünen yerlerde ise çukurların olduğu ve bu nedenle bu bölgelerin dağlama sırasında diğer kısımlardan daha fazla dağlandığı düşünülmektedir. Şekil 4.18f’de yapının tamamıyla paslanmaz çelik olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. AISI 316-AISI 1010 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri

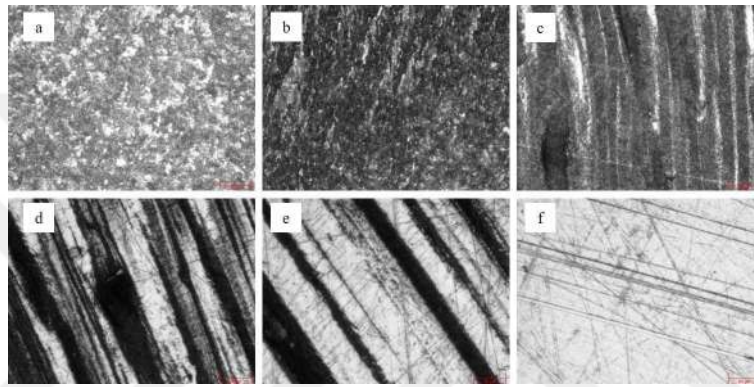
Şekil 4.19'da AISI 316-AISI 1030 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.19a'da karıştırma bölgesi sınırındaki AISI 1030 karbonlu çelik tarafı görülmektedir. Karbonlu çelikten kaynak bölgesine ilerledikçe (Şekil 4.19b ve 4.19c) paslanmaz çeliğin içerisinde bant şeklinde 1030'ların varlığı göze çarpmakta fakat karbonlu çelik ile yüksek miktarda krom (Cr) ve nikel (Ni) içeren paslanmaz çelikte fazların birbiri içinde çözünmediği gözlemlenmektedir. Buna karşılık yüzeyde siyah görülen bölgelerin ısıdan dolayı çökelmiş karbür partiküllerinin varlığı ihtimali düşünülmektedir. Kaynaklı bölgenin devam ettiği Şekil 4.19d'de dönmeden dolayı malzemeler birbiri içine akmış durumda, orta kısımlar 1030 iken kenar kısımların paslanmaz çelik olduğu görülmektedir. Şekil 4.19e'de paslanmaz kısmına doğru çıkış olup paslanmaz-karbonlu çelik geçiş bölgeleri gözlemlenmektedir. Şekil 4.19f ise paslanmaz çeliğin olduğu kısımdır.



Şekil 4.19. AISI 316-AISI 1030 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri

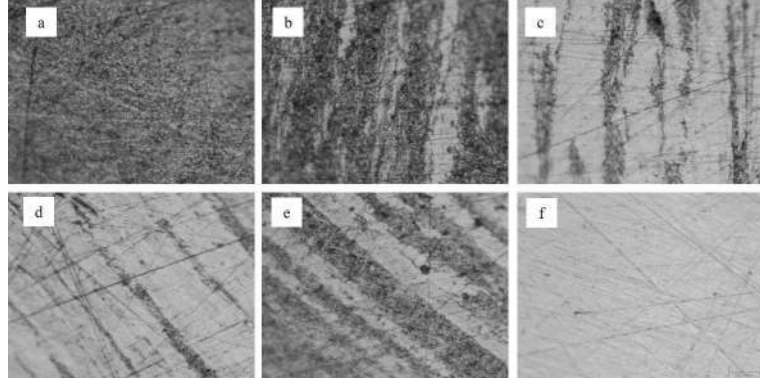
Şekil 4.20'de AISI 316-AISI 1050 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.20a'da kaynaklı numunenin AISI 1050 çeliğinin olduğu kısım verilmiştir. Burada beyaz renklerde görünen bölgeler ferrit, koyu gri-siyah görünen bölgeleri ise perlittir. Yapısında 0,5 oranında karbon içeren AISI 1050 yaklaşık %35 içeren ferrit, yaklaşık %65 oranında perlit içermektedir. AISI 1050 tarafından kaynak bölgesine

girildiğinde (Şekil 4.20b) perlit miktarı artarken ferritin azaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.20c’de blok blok şeklinde görülen beyaz renkler kalıntı ostenit bölgelerinin varlığını göstermektedir. Kaynaklı bölge 800-900°C gibi yüksek sıcaklıklardan aniden 723°C’nin altına düştüğünde ostenit fazı dönüşemeyip, kalıntı ostenit olarak yüksek gerilimli bölgelerin perlit plakaları arasında kalmasına ve böylece genlemenin de düşük olması ile düşük uzama göstermesine neden olmuştur. Şekil 4.20d’de kaynağın orta noktasına gelindiği bembeyaz ve hiç dağlanamayan paslanmaz çeliğin varlığıyla anlaşılmaktadır. Yapıda paslanmaz çeliğin yanında perlit miktarı fazlaşmış, ferrit ise azalmıştır. Şekil 4.20e’de paslanmaz çelik miktarı artmış ve perlitin miktarının daha azaldığı, Şekil 4.20f’de ise tamamıyla paslanmaz çelik yapının olduğu görülmektedir.



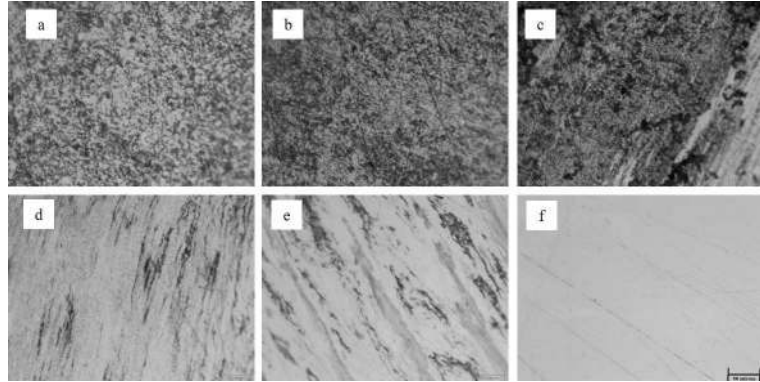
Şekil 4.20. AISI 316-AISI 1050 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.21’de AISI 316-AISI 1070 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.21a kaynaklı AISI 1070 iken Şekil 4.21b’de 1070 tarafından karıştırma bölgesine geçiş görülmektedir. Paslanmaz çelikten 1070 tarafına çok fazla geçişin olduğu Şekil 4.21c’de karıştırma kuşakları bant şeklinde gözlemlenmektedir. Kaynağın orta bölgesi olan Şekil 4.21d’de ise Şekil 4.21e’de ki gibi blok blok 1070 görülmekte fakat yapıda paslanmaz çeliğin daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. 1070 çeliğinin yüksek miktarda karbon içermesinden dolayı sert olması ve bunun sonucunda 316 paslanmaz çeliğinin 1070 karbonlu çeliğini deforme edememesinden dolayı malzeme akışının olmadığı düşünülmektedir. Şekil 4.21e’de karıştırıcı ucun 1070’ten kopardığı parçaları paslanmaz çeliğin içerisine blok blok kattığı fakat birbiri içerisine karışmadığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.21f’de paslanmaz çelik görülmektedir.



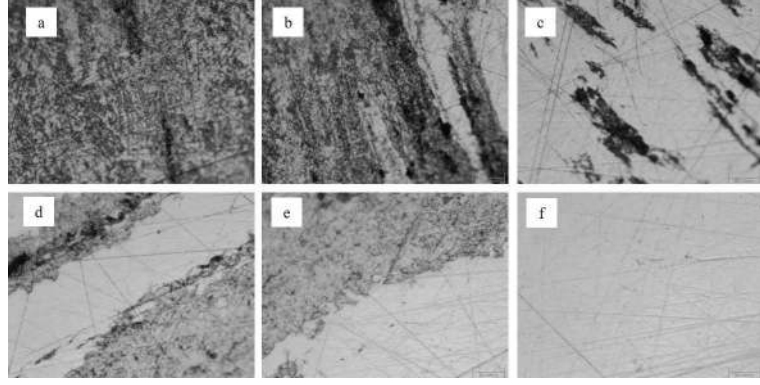
Şekil 4.21. AISI 316-AISI 1070 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri

AISI 304-AISI 1010 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri verilen Şekil 4.22a'da tipik 1010-1020 aralığındaki çelik görülmektedir. Şekil 4.22b karıştırma bölgesine gidilen bölgede yine yapıda ferrit ve perlitin olduğu düşünülmekte, Şekil 4.22c'de ise karbonlu çeliğin içerisinde yer yer paslanmaz çeliğin girdiği, kaynak bölgesinin ortasına doğru ise (Şekil 4.22d) 304 paslanmaz çelik miktarının arttığı görülmektedir. Şekil 4.22e'de kaynaklı bölgenin paslanmaz tarafına doğru gidildikçe, paslanmaz çelik aralarında gri renkte bant şeklinde 1010 karbonlu çelikler görülmekte iken siyah olarak görülen kısımların boşlukların dağlanmasıyla meydana geldiği düşünülmektedir. Şekil 4.22f'de kaynak bölgesinden çıkışta 304 paslanmaz çeliğin olduğu gözlemlenmektedir.



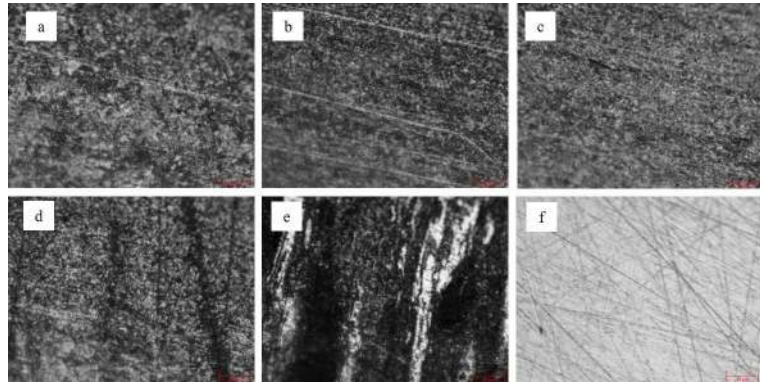
Şekil 4.22. AISI 304-AISI 1010 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.23a'da AISI 304-AISI 1030 kaynaklı numunenin karbonlu çelik kısmı görülmektedir. Kaynak bölgesine girişte (Şekil 4.23b) karbonlu çeliğin paslanmaz çeliğe bir miktar penetre olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.23c'de 1030'un nispeten düşük karbon miktarından dolayı paslanmaz çelik ile karıştığı, koyu siyah görülen kısımların ise gözenekler olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.23d ve Şekil 4.23e'de bant şeklinde 1030 karbonlu ve 304 paslanmaz çelik bölgelerinin olduğu, son olarak şekil 4.23f'de AISI 304 paslanmaz çelik ile kaynak bölgesinden çıkıldığı görülmektedir.



Şekil 4.23. AISI 304-AISI 1030 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri

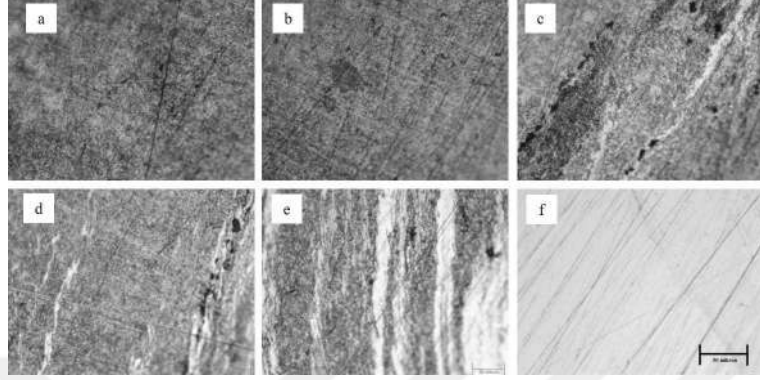
Şekil 4.24'de kaynaklı AISI 304-AISI 1050 çelik çiftinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.24a'da beyaz renklerde görünen bölgelerin ferrit, koyu gri-siyah görünen bölgelerin ise perlit olduğu AISI 1050 karbonlu çelik görülmektedir. Şekil 4.24b'de kaynak bölgesine doğru gidildikçe sıcaklığın etkisi ile taneler büyüdükçe ferrit azalırken perlit oluşumunun arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.24c'de perlit yapının daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.24d'de paslanmaz çelikten olan tarafta perlitin olduğu, perlitin sağında ve solunda ferrit yapının olduğu görülmektedir. Ferritten sonraki bölgelerde dağlanmayan bölgeler görülmekte, bu da bu kısımlarda paslanmaz çelik yapının olduğunu göstermektedir. Şekil 4.24e'de blok blok (karıştırmadan kaynaklı, OM'de renk yansımayan bölgeler siyah görünür) beyaz yerlerin varlığı dağlanamayan paslanmaz çelik yapının olduğunu göstermektedir. Bunun yanında perlit ve ferrit yapıları varken Şekil 4.24f'de ise yapının tamamen paslanmaz çelik olduğu görülmektedir.



Şekil 4.24. AISI 304-AISI 1050 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.25'te optik görüntüleri verilmiş AISI 304-AISI 1070 kaynaklı numunenin kaynaklı 1070 (Şekil 4.25a) ve kaynağa giriş (Şekil 4.25b) kısımları görülmektedir. Şekil 4.25c ve Şekil 4.25d'de karıştırma bölgesinin orta kısmında yapıda daha fazla 1070 karbonlu çelik görülmesine karşılık içerisinde öbek öbek ve şeritler halinde paslanmaz

Çeliklerin olduğu, Şekil 4.25e’de ise kaynak bölgesinden paslanmaz çeliğe doğru çıkışta yine karbonlu ve paslanmaz çeliğin birbirine karışmadan bant Şeklinde dizilim gösterdiği görülmektedir. Son olarak kaynak bölgesi dışındaki AISI 304 paslanmaz çeliği gözlemlenmektedir (Şekil 4.25f).



Şekil 4.25. AISI 304-AISI 1070 kaynaklı numunenin optik mikroskop görüntüleri

4.2.2. SEM Analizi Sonuçları

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerin kırık yüzeyleri Şekil 4.26’da grldğu gibi kırık yüzeyler numune platformuna yerleştirilerek taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

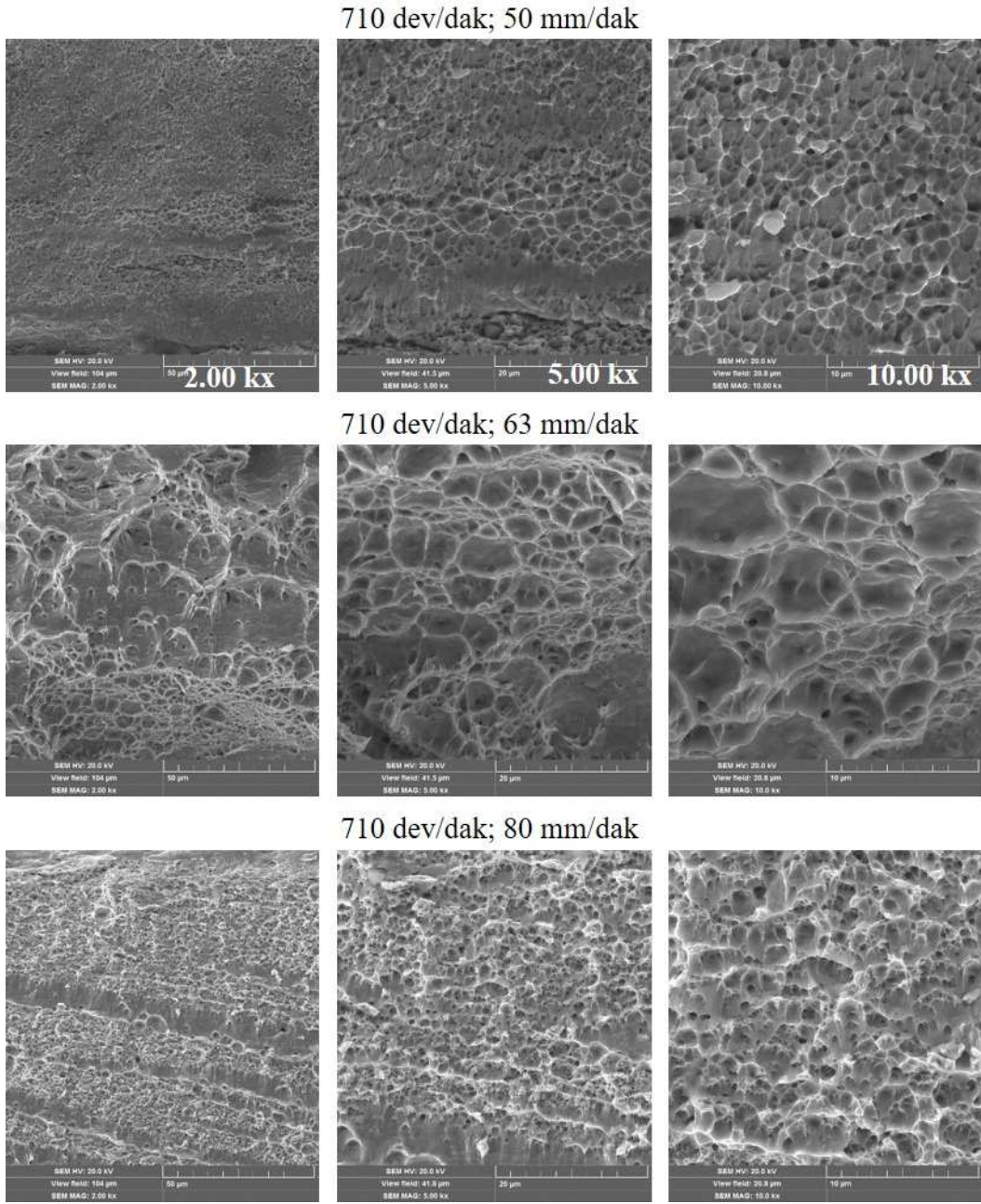


Şekil 4.26. Kırık yüzeylerin numune platformuna yerleştirilmesi

Çekme Deneyi Sonrası oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AISI 304-AISI 304 ve AISI 316-AISI 316 elik çiftlerinin farklı devir sayıları ve ilerleme hızlarında kaynaklandıktan sonra

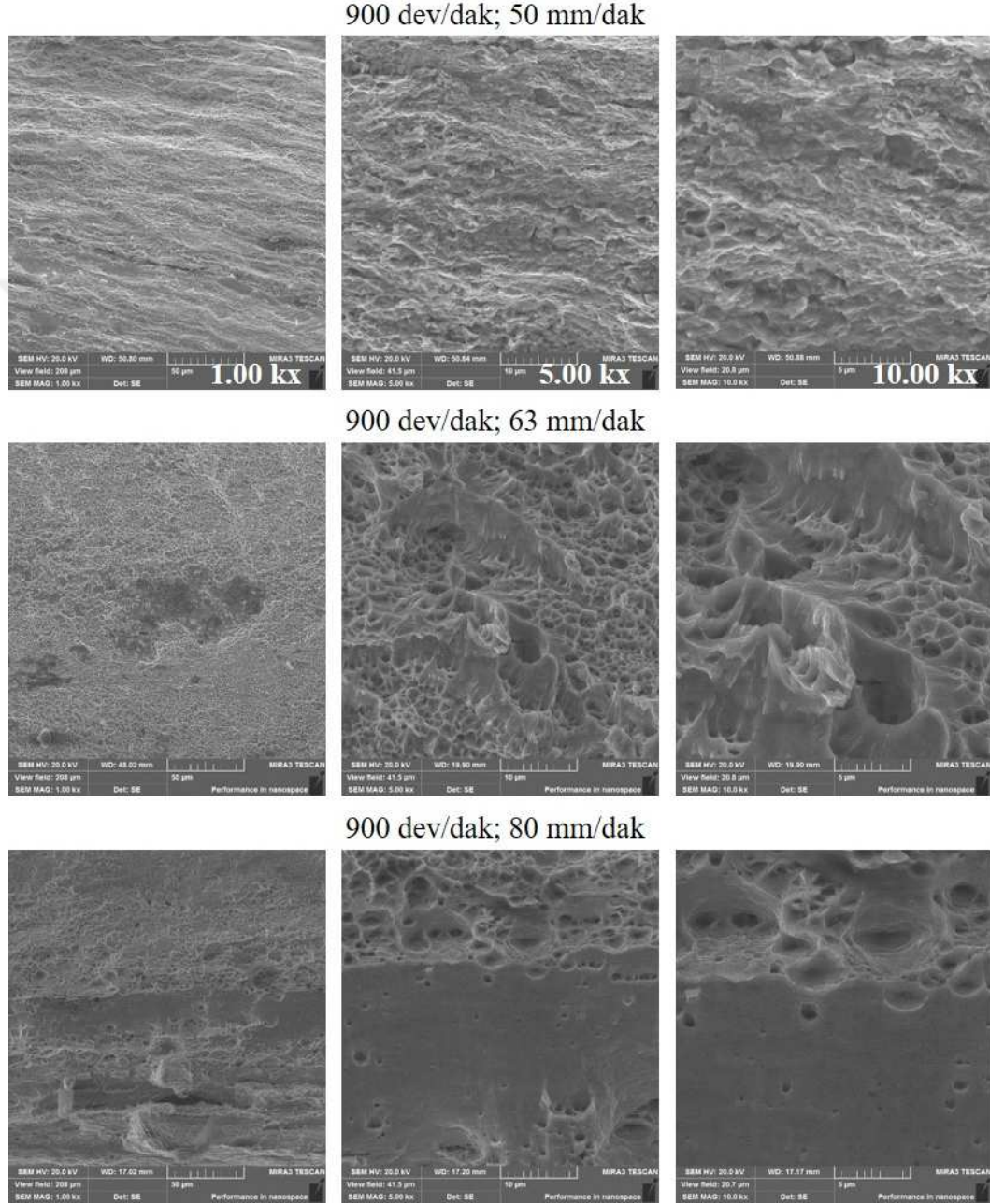
çekme deneyi yapılmış, kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Şekil 4.27’de AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 710 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. 50 mm/dak ilerleme hızında küçük taneli yapılar olmasına rağmen büyük taneler ve bölgesel çekme boşlukları görülmektedir. Isı girdisi ve ilerleme hızının her ikisi de nispeten düşüktür böylece karıştırma bölgesindeki büyük taneli yapıların olması yüksek çatlak enerjisi oluşturduğundan küçük tanelerin mukavemeti ve genlemesi çatlak enerjisini karşılayamadığından kırılmanın gerçekleştiği düşünülmektedir. İlerleme hızı arttıkça görülmektedir ki, ısı girdisi azalmakta ve böylece büyük tanelerin kuşakları daralmaktadır. Bu da küçük tanelerde deformasyon enerjisi depolanmasına ve çatlak enerjisinin küçük taneler tarafından absorbe edilmesine, böylece daha yüksek çekme gerilmesine ve kırılmaya sebep olmuştur. 80 dev/dak ilerleme hızında çoğunlukla küçük tanelerden oluşan yapının blok blok büyük taneler içerdiği görülmektedir. Küçük çekme boşluklarının olduğu, bu çekme boşluklarının büyüyerek kırılmayı gerçekleştirdiği düşünülmektedir.



Şekil 4.27. AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 710 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.28’de AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 900 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. 50 mm/dak ilerleme hızında aşırı büyümüş tanelerden dolayı yapıda gevrek bölgelerin ve tabakaların olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin dönüş hızının orta derecede yüksekliğinden ve en düşük ilerleme hızından dolayı oluşan ısı girdisi olduğu düşünülmektedir. 63 mm/dak ilerleme hızında taneler büyüktür fakat büyük tanelerin yanında küçük tanelerin fazlalığından

dolayı 80 mm/dak ilerleme hızı ile birleştirilen numuneden daha yüksek gerilme değerine sahip olduğu düşünülmektedir. 80 mm/dak ilerleme hızında ısıdan etkilenmiş bölge tam ortaya yakın (karıştırma bölgesi) bir yerde görülmüştür. Dolayısıyla çatlak ilerlemesinin daha hızlı olduğu düşünülmektedir. Buda yapının düşük genleme ile deforme olduğu fikrini uyandırmıştır.

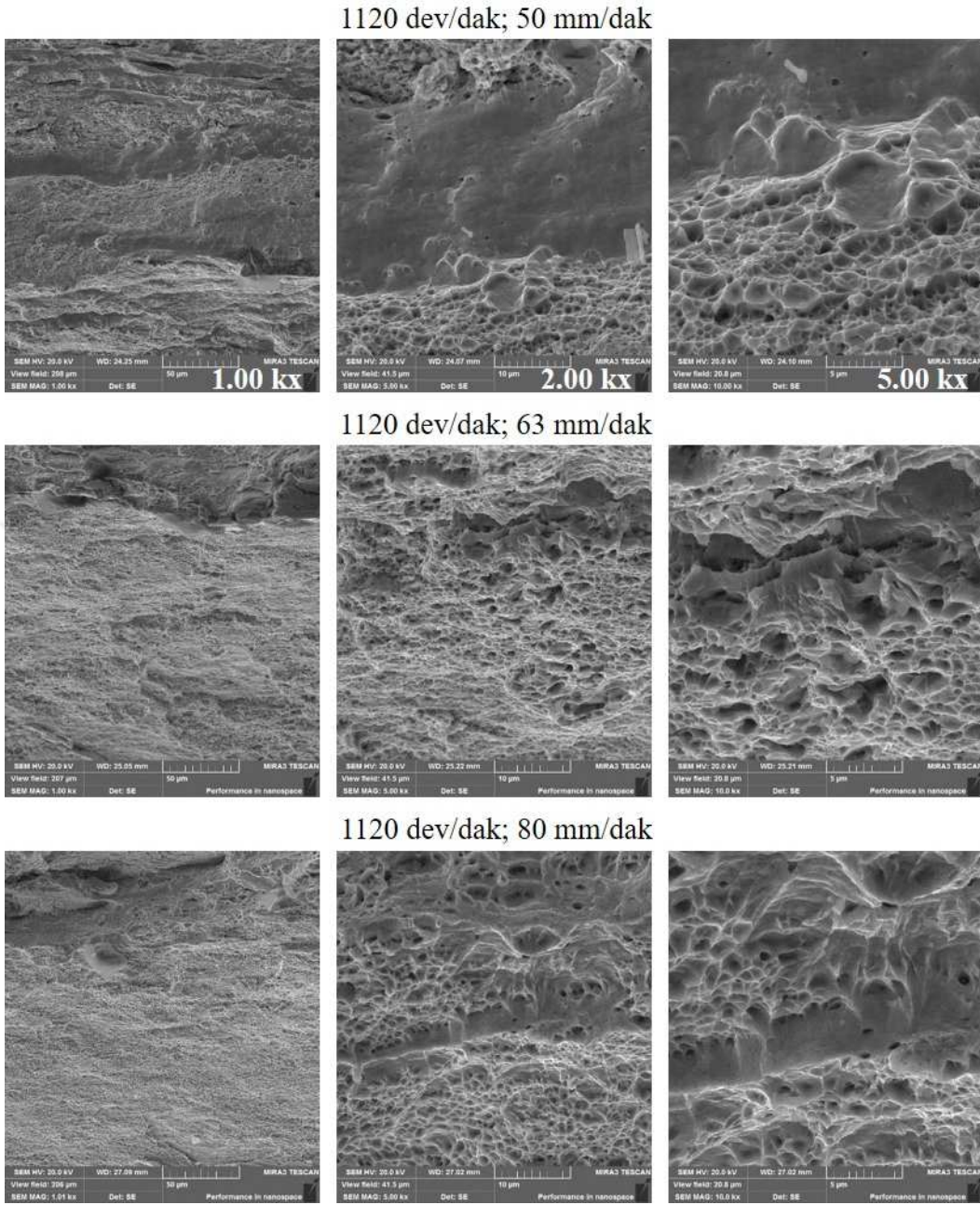


Şekil 4.28. AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 900 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.29'da AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 1200 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin

çekme sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. 50 mm/dak ilerleme hızında yüksek ısı girdisinden dolayı bölge bölge ısınmalar olmuş, özellikle karıştırma bölgesinde büyük taneler oluşmuştur. Oluşan büyük tanelerde çatlak enerjisinin yüksekliğinden dolayı çabuk kırılma (yarı sünek) özelliklerinin görülmesine neden olmuştur. 63 mm/dak ilerleme hızında yüksek devir hızına karşılık orta derecede ilerleme hızından dolayı özellikle karıştırma bölgesinde büyük taneler oluşmuştur. Bunun ise çatlak enerjisinin artmasına ve düşük süneklığe sebep olduğu düşünülmektedir. 80 mm/dak ilerleme hızında dönüş hızı arttıkça ısı girdisi fazla olmasına rağmen yüksek ilerleme hızı ile yüzeydeki tanelerde aşırı tane büyümesi olmasına karşın derindeki tanelerin ısıdan etkilenmediği görülmektedir.

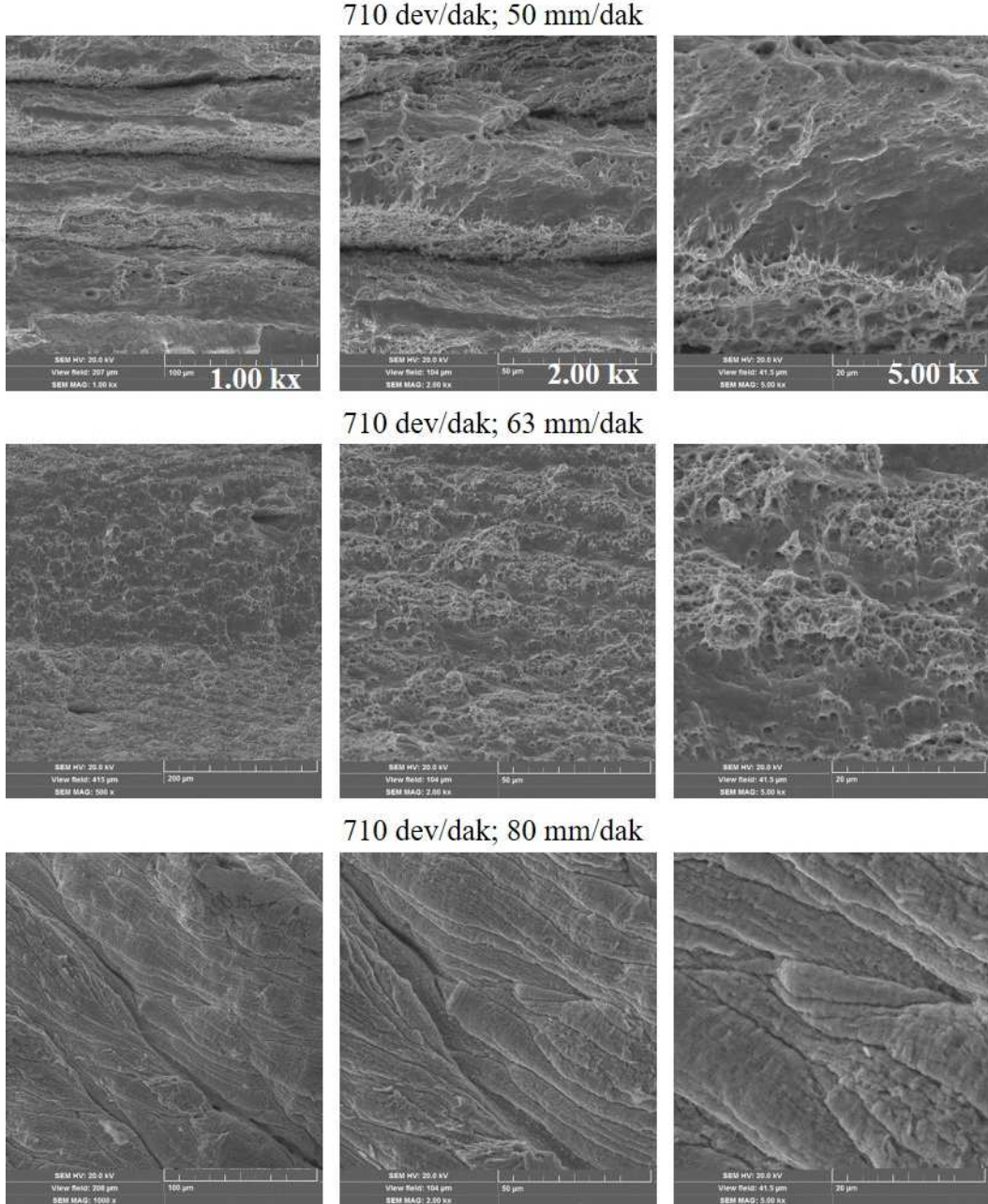




Şekil 4.29. AISI 304-AISI 304 çelik çiftlerinin 1120 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.30'da AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 710 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. 50 mm/dak ilerleme hızında yapı gevrek haldedir. Orta derecede ısı girdisine rağmen düşük ilerleme ile beraber büyüyen tanelerde delaminasyon oluşmuş ve çekme boşluklarının yüksek çatlak enerjisi ile yapının çabuk deforme olduğu gözlemlenmiştir. 63 mm/dak ilerleme hızında yüzeyde büyük taneli yapıların varlığı yüksek çatlak gerilmesi ve enerjisi oluşturmuştur. Isı

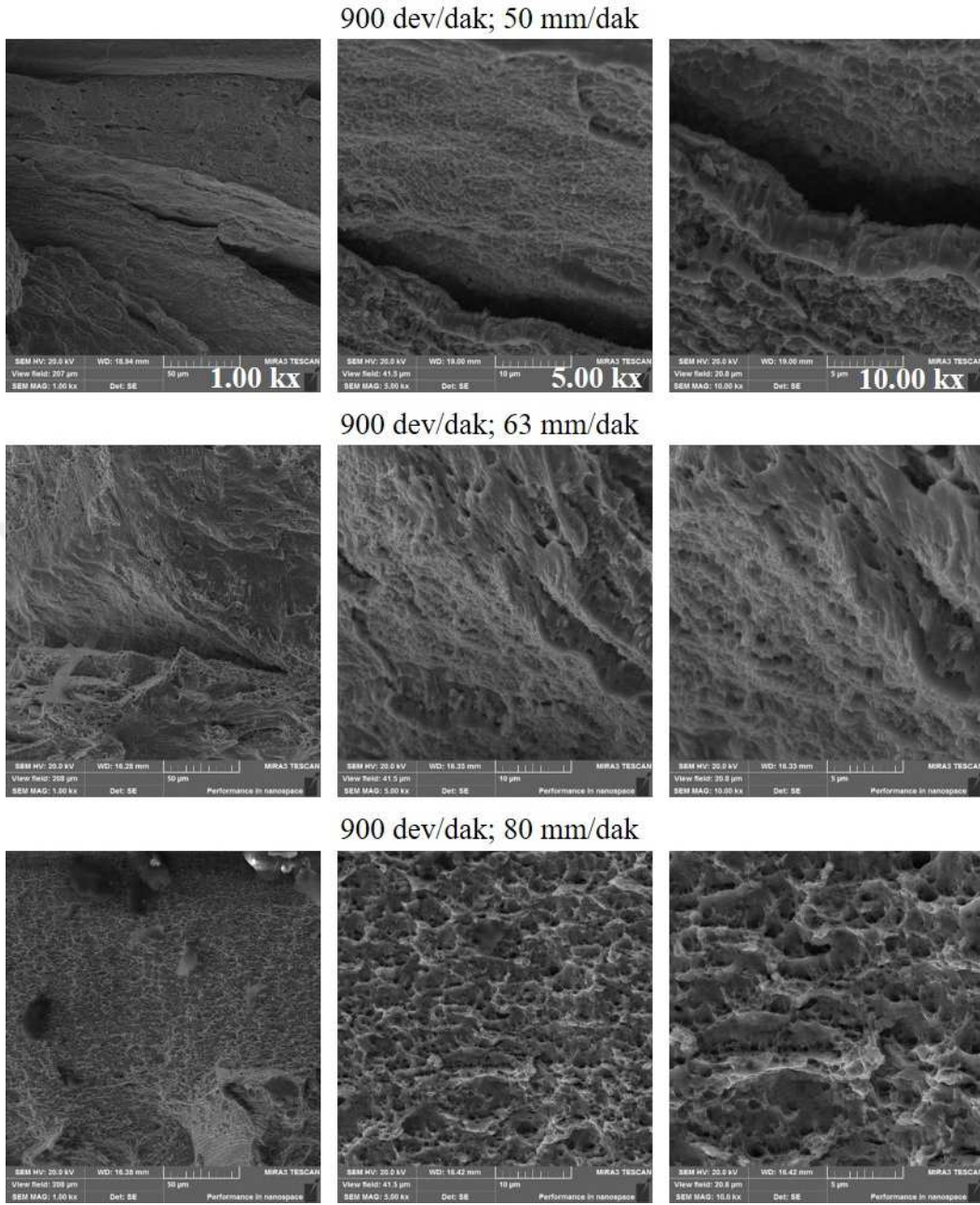
girdisinin ve ilerleme hızının orta derecede olduğu fakat yer yer boşlukların oluşu yapıda bu boşlukların birleşerek kırılmayı meydana getirdiği düşünülmektedir. 80 mm/dak ilerleme hızında yapının gevrek olduğu görülmektedir. Orta düzeyde ısı girdisi olmasına rağmen ilerleme hızının yüksek oluşu malzemenin çabuk soğumasına ve büyük tanelerin oluşmasına neden olmuştur. Büyük tanelerin ve çekme boşluklarının malzemenin kırılmasına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.30. AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 710 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.31’de AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 900 dev/dak devir sayısı ve 50

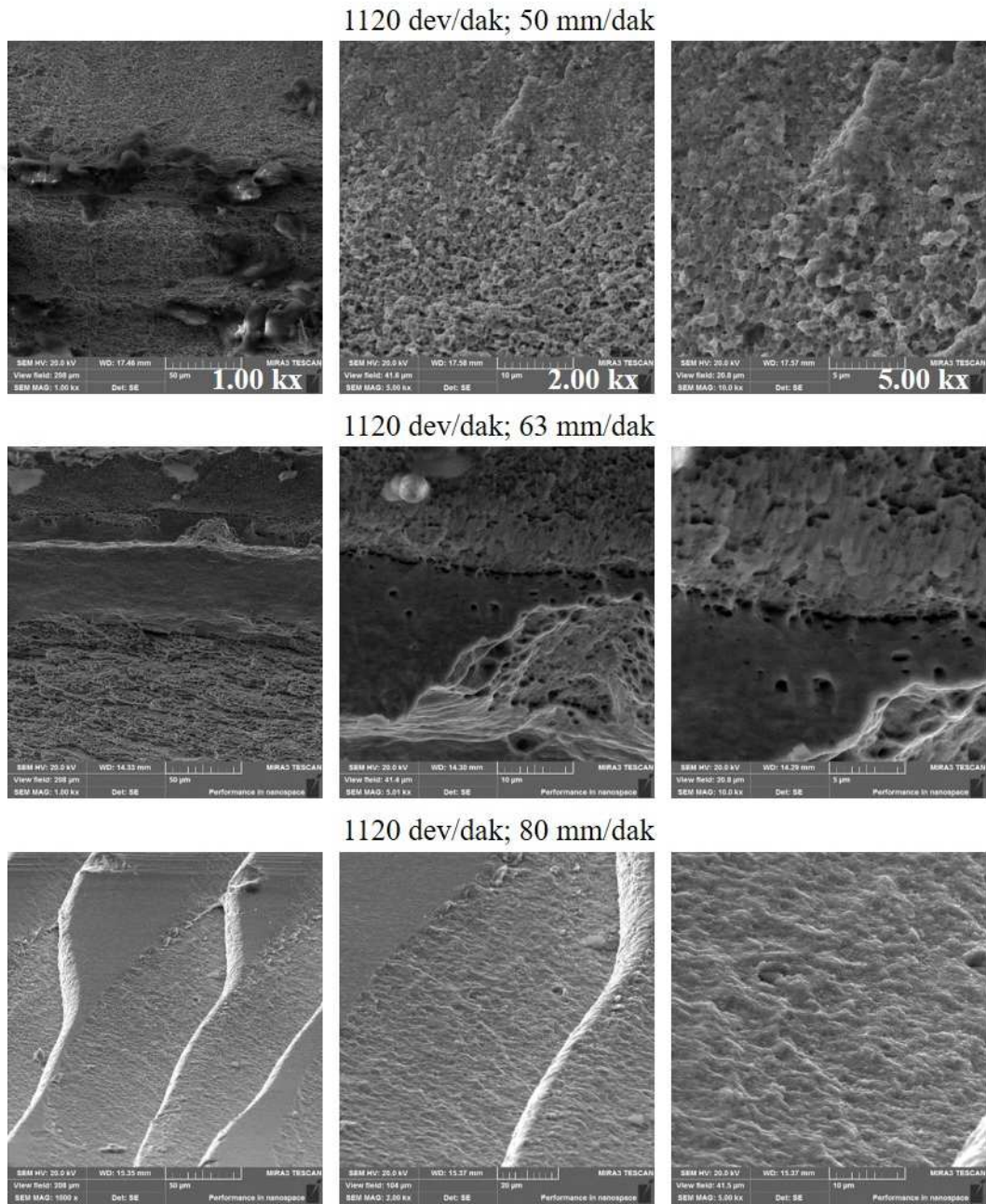
mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. 50 mm/dak ilerleme hızında yapının genellikle büyük taneler içerdiği görülmektedir. 900 dev/dak orta hızda bir devir olmasına karşın 50 mm/dak ilerleme hızına sahip olduğundan dolayı ısı girdisi daha fazladır. Isı girdisi yüksek olduğundan dolayı yani aşırı ısınıp çabuk soğumasından dolayı tabakalar arasında delaminasyon (tabakalara ayrılma) olmuştur. Delaminasyonun da büyüyen taneler ile küçük taneler arasında ara yüzey farklılıklarından ortaya çıktığı düşünülmektedir. 63 mm/dak ilerleme hızında ısı girdisi biraz daha az olduğundan yüzeye doğru büyümüş taneler görülmektedir. 50 mm/dak ilerleme hızına göre yapraklanmanın olmadığı fakat karıştırma bölgesinde çekme boşluklarının olduğu görülmektedir. 80 mm/dak ilerleme hızında küçük taneli yapılar olmasına karşın çekme boşlukları çok küçük alanlarda bölgesel olarak görülmektedir. 900 dev/dak malzemeyi ısıtmak için yeterli bir devir sayısı olmasına rağmen ilerleme hızı yüksek olduğundan dolayı küçük taneler yapıda varlığını korumaktadır. Sadece yüzeyde büyük taneler olması çatlak enerjisini arttırdığından küçük tanelerin mukavemeti ve genlemesi çatlak enerjisini karşılayacak kadar yüksek değildir.



Şekil 4.31. AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 900 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.32’de AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 1120 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin çekme sonrası kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. 50 mm/dak ilerleme hızında karıştırma bölgesinde küçük taneler olmasına rağmen yüzey tanelerinin büyüklüğünden dolayı oluşan çatlak enerjisi difüzyon ile birbirine bağlanmış ve büyüme eğiliminde olan tanelerinde gevrek bir şekilde kırılmasına sebep olmuştur. 63 mm/dak ilerleme hızında karıştırma bölgesindeki bölgesel büyük tane bloğu aynı zamanda

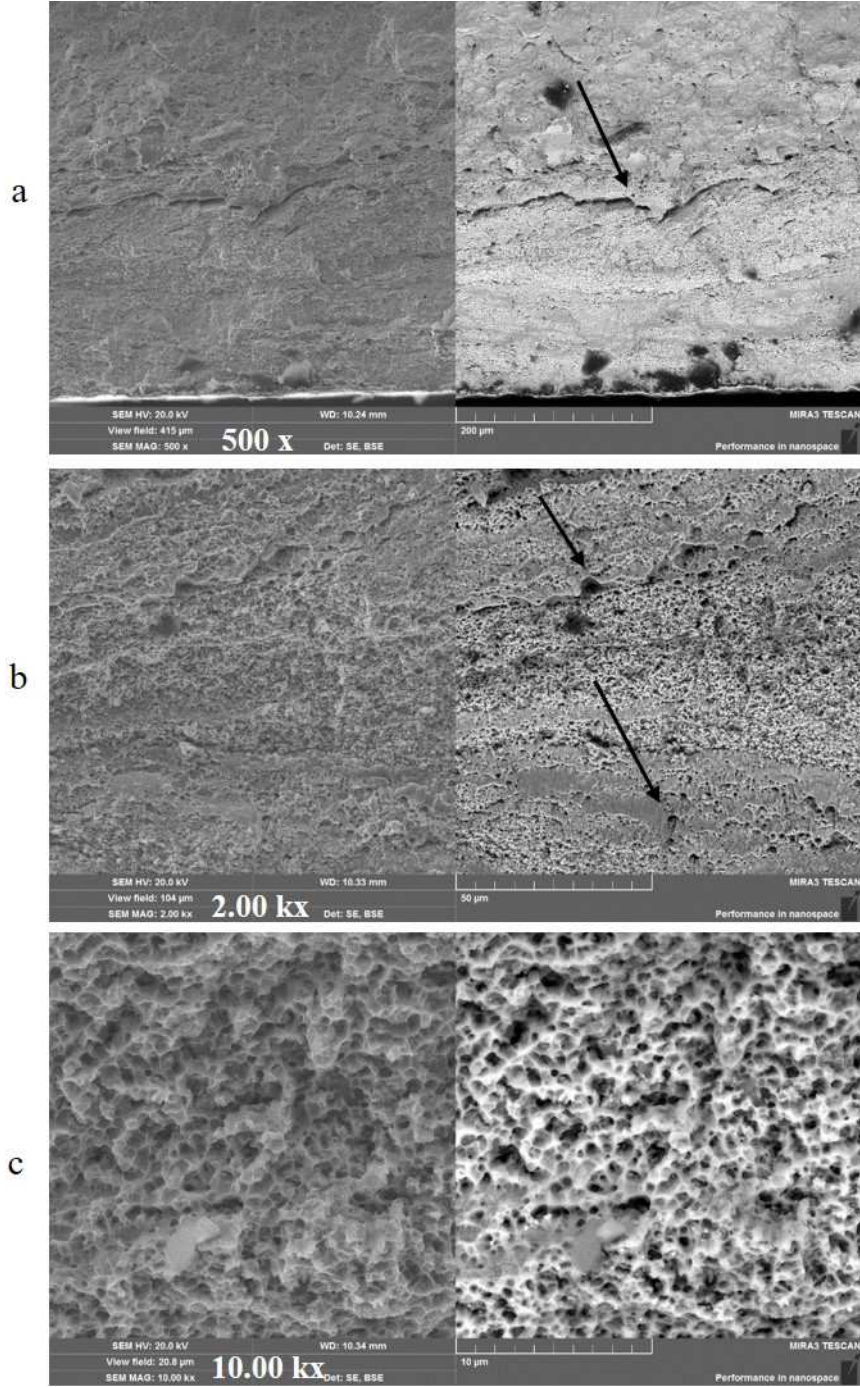
delaminasyon bölgesi olarak da davranmıştır. Buda tane ara yüzeylerinde uyumsuzluğa ve yüksek çatlak enerjisine sebep olduğundan yapının gevrek kırılma eğilimine sebep olduğunu göstermektedir. 80 mm/dak ilerleme hızında yüksek devir sayısı ve yüksek ilerleme hızından dolayı ara yüzeyde ilerleme yönünde dalgalanmalar yani kaynaklanamamalar, derinlere doğru ise hem baskı kuvveti hem de yüksek sıcaklıkta tanelerin boyutunda artış ve gevrek kırılma görülmektedir. Bu ara boşlukların çok küçük tutunma alanları oluşturmasıyla çatlak enerjisine karşı koyamadan gevrek kırılmış olması olasıdır.



Şekil 4.32. AISI 316-AISI 316 çelik çiftlerinin 1120 dev/dak devir sayısı ve 50 mm/dak, 63 mm/dak, 80 mm/dak ilerleme hızlarındaki kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

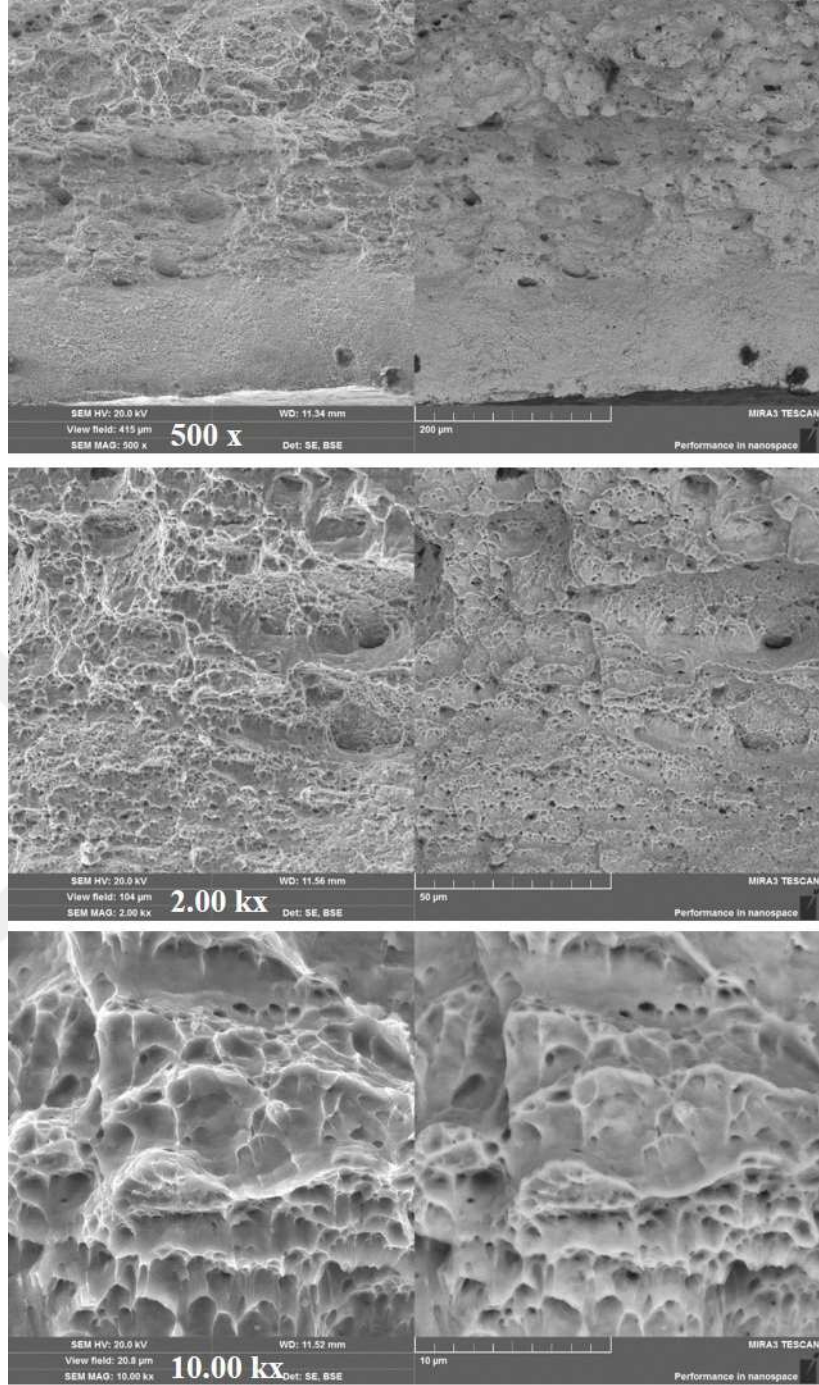
Şekil 4.33'te AISI 304-AISI 1010 kaynak çiftinin SEM analizinde çatlağın oluşturduğu deformasyon bölgesi görülmektedir. Tanelerin büyüdüğü yerlerde dinamik yeniden kristalleşme bölgeleri meydana geldiği ve bu bölgelerde çatlağın ilerlediği düşünülmektedir. Şekil 4.33a'da siyah ok ile gösterilen yerin çekme boşluklarının yoğunlaşarak çatlak oluşturduğu ve sünekten gevreğe geçen bölge olduğu görülmüştür. Şekil 4.33b'de ise oklarla gösterilen kuşakların ısıdan etkilenecek dinamik yeniden kristalleşmiş ve büyümüş tanelerin yoğunlaştığı bölgeler olduğu, bu bölgelerinde çatlak enerjisini artırarak aradaki taneleri gevrek kırılmaya zorlayacak şekilde yüksek mukavemette deformasyona neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.33c'de hem küçük taneler hem de kuşak şeklinde büyümüş büyük tanelerin varlığı çatlağın hızlı ilerlediğinin göstergesidir.





Şekil 4.33. AISI 304-AISI 1010 kaynak çiftinin SEM görüntüleri

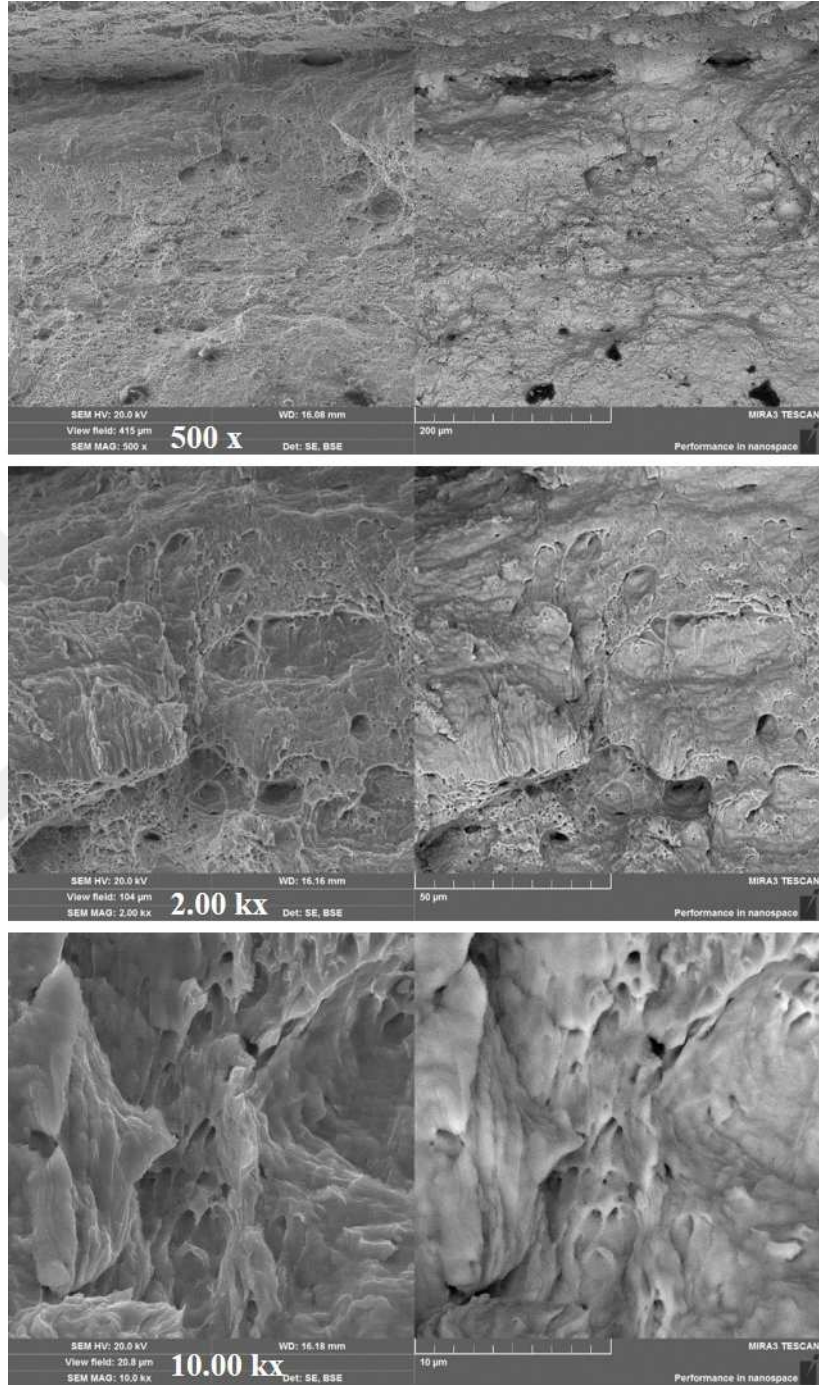
Şekil 4.34'te AISI 304-AISI 1030 kaynak çiftinin SEM analizine baktığımızda malzemenin içinde oluşan çatlakların çok büyümesinden kaynaklanan ani kırılmaların meydana geldiği düşünülmektedir. Çekme boşluklarının birleşerek büyüdüğü, çatlak enerjisi arttığında kırılmanın meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.34. AISI 304-AISI 1030 kaynak çiftinin SEM görüntüleri

Şekil 4.35'te AISI 304-AISI 1050 kaynak çiftinin aşırı büyümüş taneleri görülmektedir. Dinamik yeniden kristalleşmiş bölgelerin blok blok büyüdüğü, çatlakların yüksek enerjili olarak uzun mesafeler boyunca ilerlediği kırık yüzeyler fotoğrafı görülmektedir. Tane büyümesi fazla olduğu için 1 mikrometreden daha küçük tanelerin yanında 10-50 mikrometrelik tanelerde bulunmaktadır. Bu 10-50 mikrometrelik tanelerin başlattığı çatlaklar (crack propagation and initiation) yüksek enerjilerinden dolayı küçük

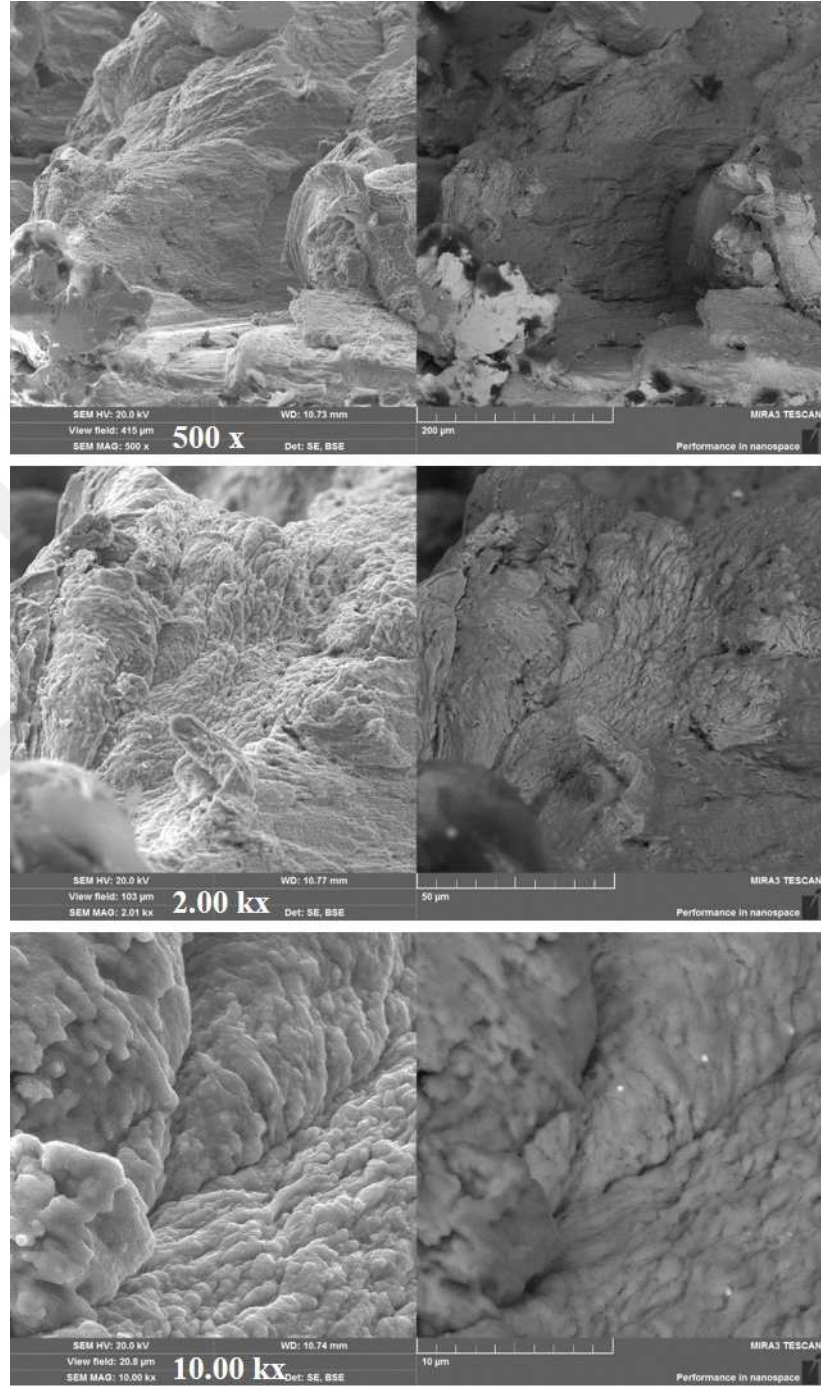
taneler tarafından durdurulamamış ve klivaj düzlemleri boyunca merdiven basamağı şeklinde diğer küçük tanelerin sünmesine izin vermeden kırılma gerçekleşmiştir.



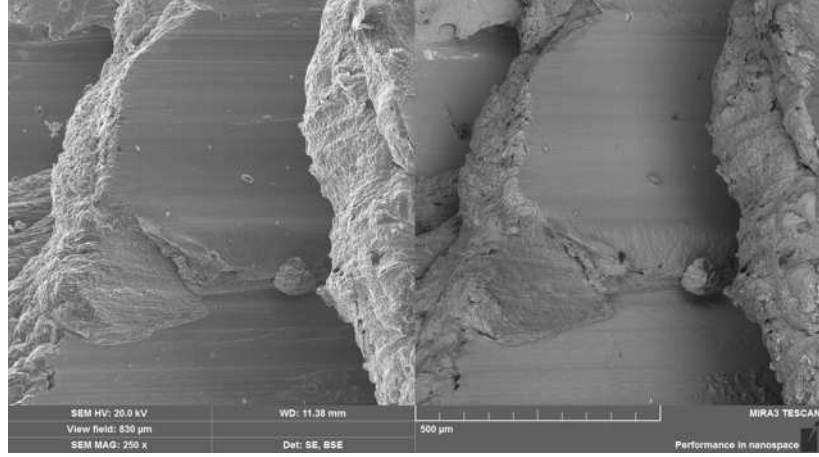
Şekil 4.35. AISI 304-AISI 1050 kaynak çiftinin SEM görüntüleri

Şekil 4.36'da tutunan taneler ısı ile birlikte belli başlı bölgelerden boyun vererek tutunmuşlar, karbon miktarının yüksekliğinden dolayı da düşük mukavemette tabaka şeklinde kırılmıştır. Bununla birlikte AISI 1070'in yüksek sertliği ve mukavemetinden

dolayı düşük tokluğa sahip olan tungsten karbür parçalanarak kırılması görülmektedir. Böylece kaynak bölgesi hem ısı hem yük kaybederek ilerlemede zorlanmıştır. Ayrıca Şekil 4.37'de yapraklanma şeklinde tabakalanma olduğu görülmüştür.

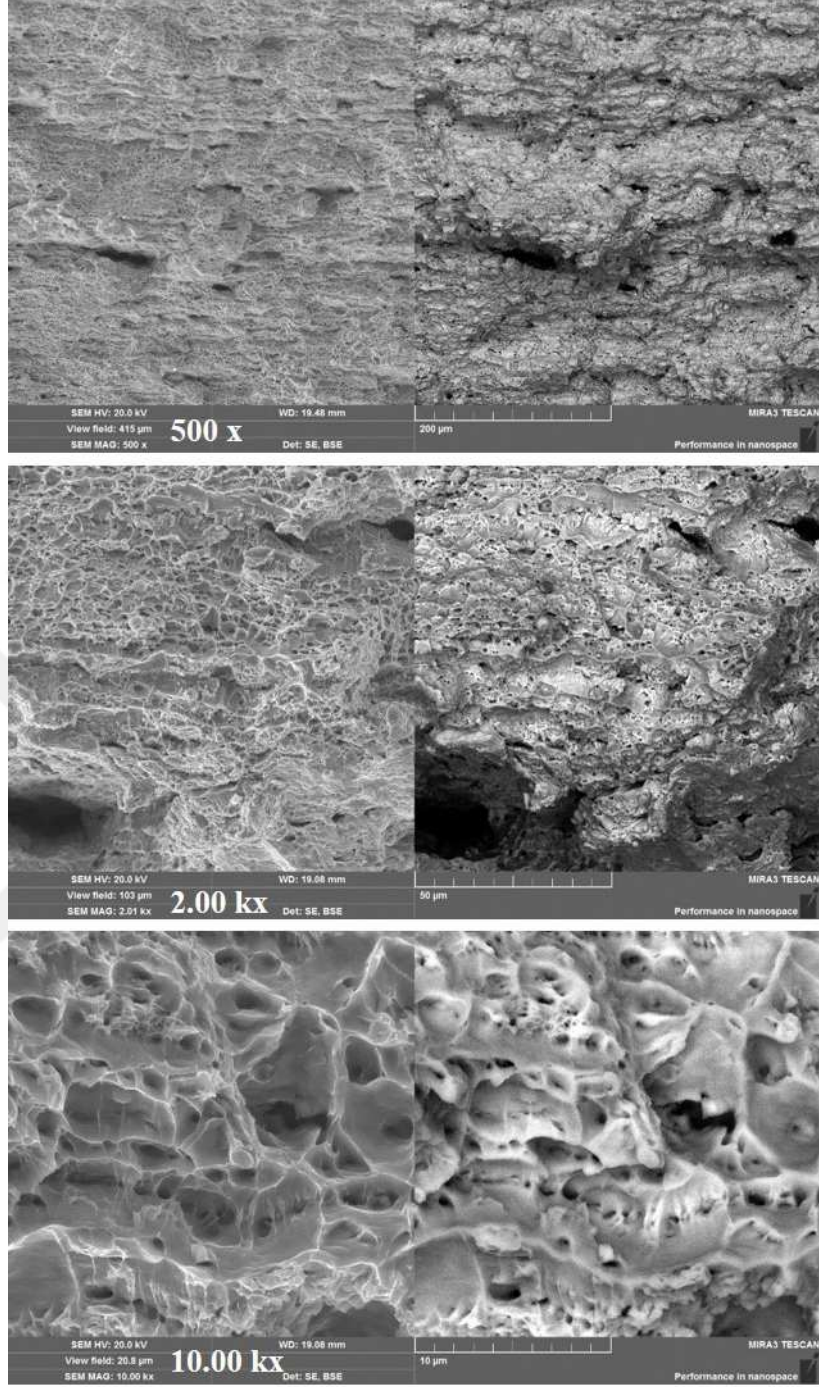


Şekil 4.36. AISI 304-AISI 1070 kaynak çiftinin SEM görüntüleri



Şekil 4.37. Yapraklanma şeklinde tabakalanma

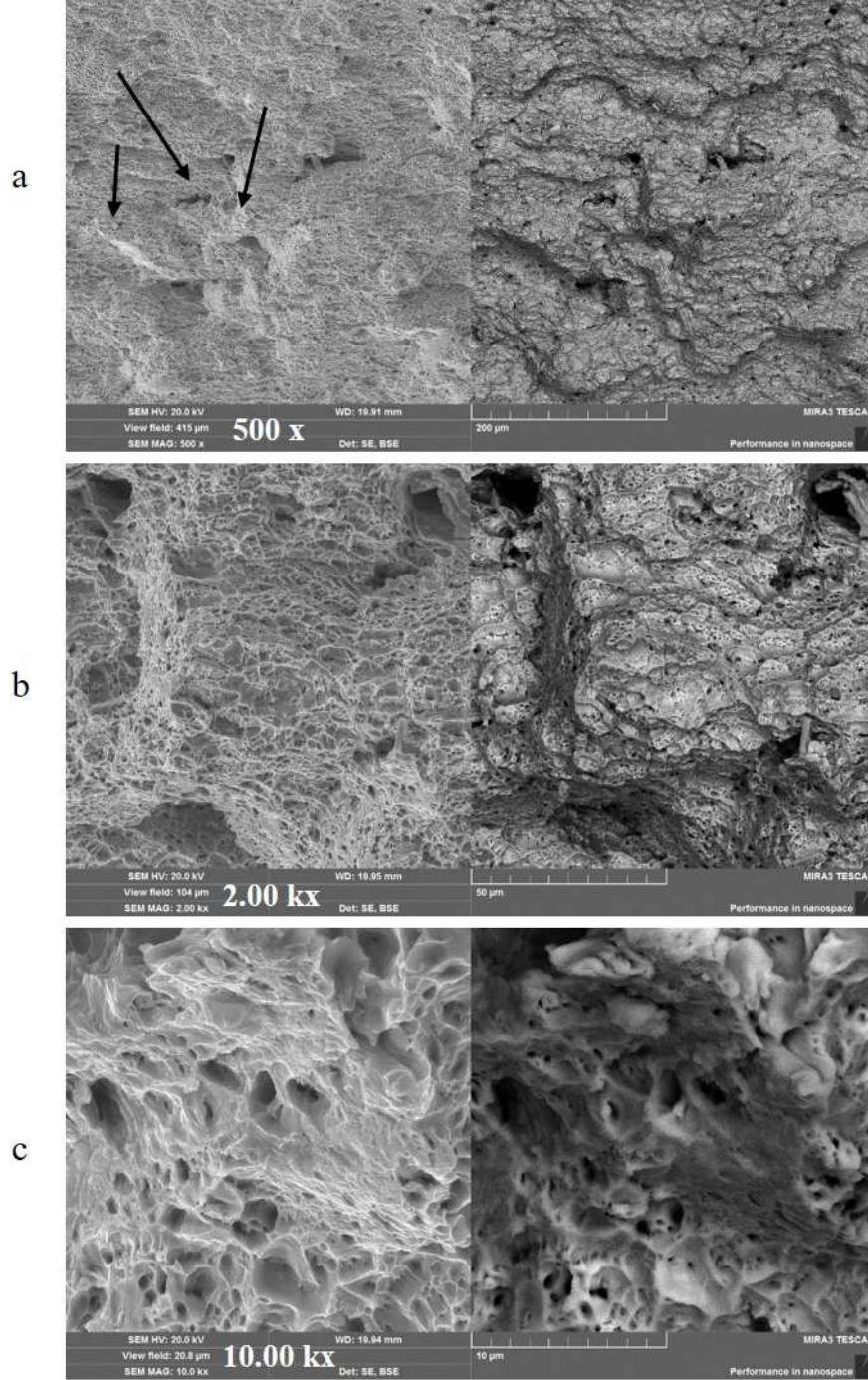
Şekil 4.38’de görüldüğü gibi içeriden oluşmaya başlayan çekme boşlukları vasıtasıyla malzemedeki iç yüzey alanının düştüğü ve sünek kırılma olduğu gözlemlenmiştir. Tane morfolojileri genellikle fiber yapılı olup yüksek miktarda süneklik gösteren tanelerle birlikte klivaja (düşük yoğunluklu yönlenmeye) sahip olan tanelerde görülmektedir. Isıdan etkilenen bölge civarında oluşan kopma hem kısmen büyümüş ve yeniden kristalleşmiş taneler hem de küçük ve sünen taneler içermektedir.



Şekil 4.38. AISI 316-AISI 1010 kaynak çiftinin SEM görüntüleri

Şekil 4.39'da AISI 316-AISI 1030 çelik çiftlerinin kırık yüzeyinin SEM analizi görülmektedir. Şekil 4.39a'da ok işareti ile gösterilmiş parlak yerler tamamen büyük tanelerin olduğunu göstermektedir ve buralarda enerji tanenin diğer ucuna aktarıldığında sünek taneye uğradığında plastik deformasyona tekrar başladığından kırılmayı durdurur. Sünek taneler artan gerilmeyi taşıyamayacak duruma gelene kadar tekrar mukavemeti artmaya devam eder, taşıyamayacak duruma geldiğinde ise kırılır. Burada tanelerin fiber

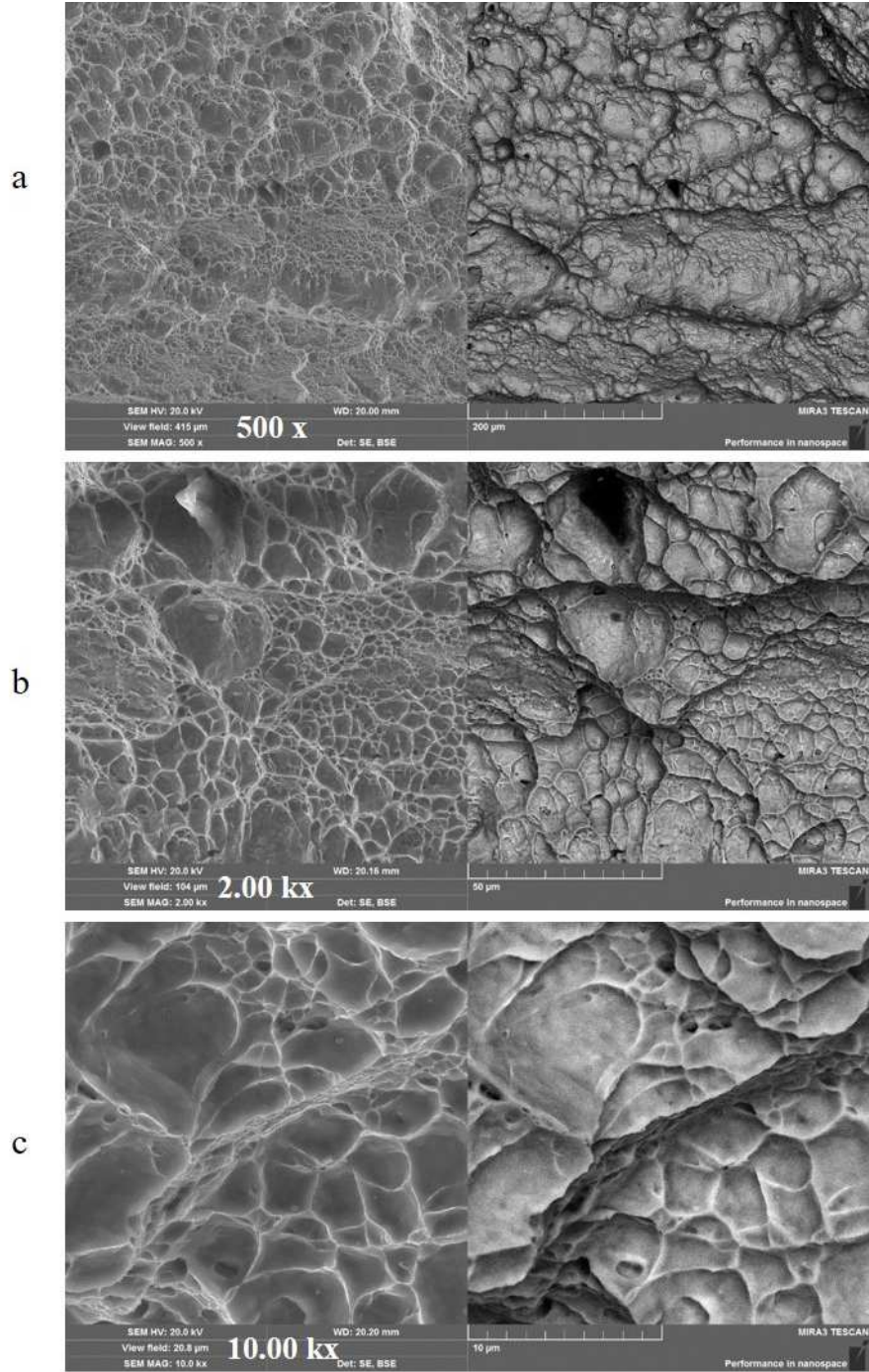
yapısından dönüşüp tane büyümesine uğradığı düşünülmektedir. Şekil 4.39b ve Şekil 4.39c'de ise tane içerisinde çukurların oluştuğu ve bu çukurların büyüyerek malzemeyi deformasyona uğratarak kırılmaya maruz bıraktığı düşünülmektedir.



Şekil 4.39. AISI 316-AISI 1030 kaynak çiftinin SEM görüntüleri

Şekil 4.40'ta AISI 316-AISI 1050 çelik çiftinin sünek davranış gösterdiği fakat AISI 316-AISI 1010 ve AISI 316-AISI 1030 çelik çiftleri ile kıyaslandığında daha az sünek olduğu

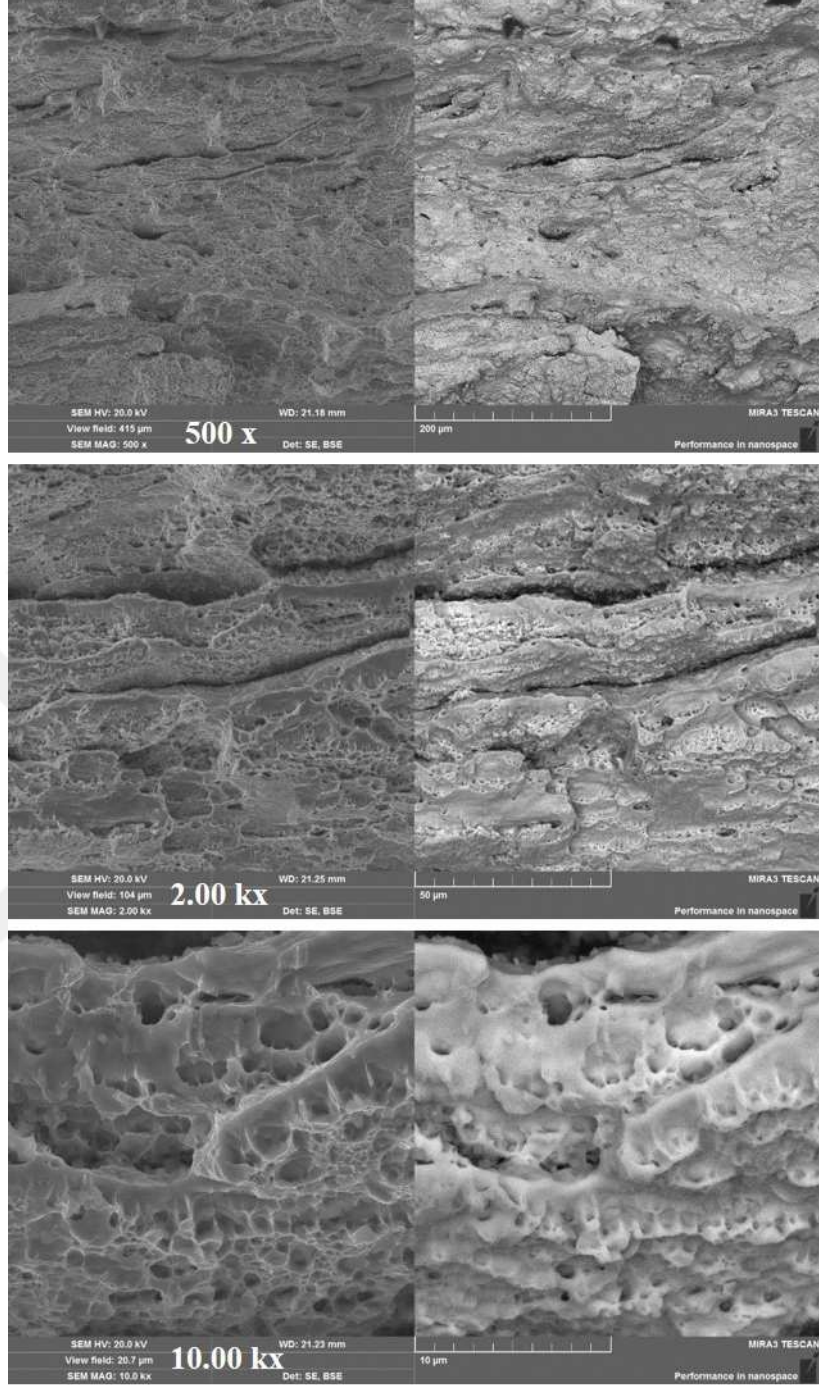
görülmektedir. Şekil 4.40b ve Şekil 4.40c'de büyümüş taneler görülmektedir. Büyümüş tanelerde sünekliliği azalttığı için tanenin şekil değiştirme kapasitesini olumsuz yönde etkiler ve kırılma olayını hızlandırır. Bu çelik çiftinin tane büyüklüğünün genellikle AISI 316-AISI 1010 ve AISI 316-AISI 1030 çelik çiftlerinden daha fazla olduğu görülmekte, bunun sonucunda da AISI 316-AISI 1010 ve AISI 316-AISI 1030 çelik çiftlerinden daha çabuk kırıldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.40. AISI 316-AISI 1050 kaynak çiftinin SEM görüntüleri

Şekil 4.41’de AISI 316-AISI 1070 çelik çiftinde yüksek sertlik ve mukavemetten dolayı kaynak bölgesinde olan daralma diğer çelik çiftlerine nazaran daha az görülmüştür. Kaynağın dikiş tarafında (pimin olduğu tarafta) yüksek sıcaklıktan dolayı aşırı tane büyümesi; büyüyen tanelerin soğurken çekmesinden dolayı gözenek oluşumu gözlemlenmiştir. Katmanlara ayrılmaya (delaminasyon) bağlı olarak kaynak yüzeyinden 1 mm içeride karıştırma ısısından kaynaklı yüksek sıcaklıkla beraber difüzyonla aşırı büyümüş ve plakanın kalınlığı doğrultusunda aşağı yönlü aşırı büyümüş taneler olduğu gözlemlenmiştir.





Şekil 4.41. AISI 316-AISI 1070 kaynak çiftinin SEM görüntüleri

Kayma Deneyi Sonrası Oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

Paslanmaz çelik - karbonlu çelik kaynaklarından elde edilen kayma deneylerinin sonucunda oluşan kırık yüzeyler incelenmiştir.

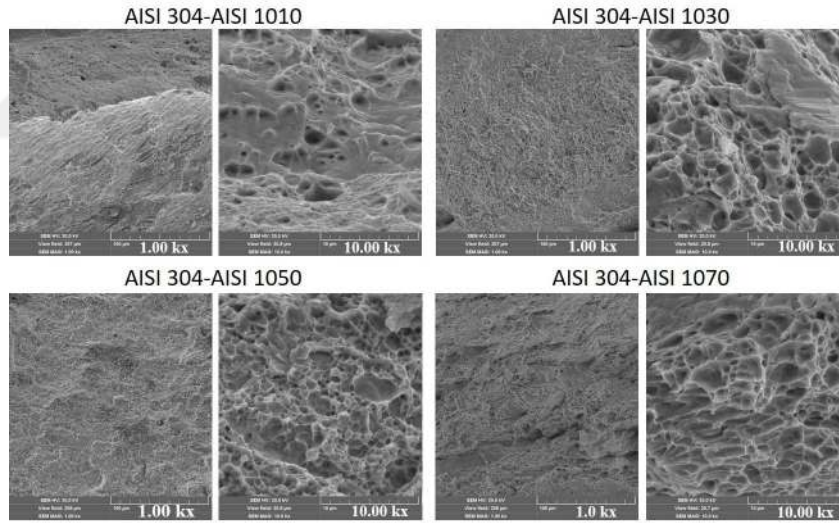
Şekil 4.42’de AISI 304-AISI 1010, AISI 304-AISI 1030, AISI 304-AISI 1050, AISI 304-AISI 1070 çelik çiftinin kayma yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. AISI

304-AISI 1010'da sünek tanelerin bitişi ile yapıda yük kaldıramayacak kadar küçük olan tanelerin kalması ve kalan küçük alanında mukavemete dayanamayarak kırılmaya uğraması görülmektedir. Sünek taneler çok büyük olduğundan gerilmeye dayanamayıp bir süreden sonra gevrek-sünek gerilmeye uğramış olduğu düşünülmektedir.

AISI 1030'un düşük sertliği ve mukavemetinden dolayı kısmen uzama göstermesine rağmen, yüksek sıcaklıktan etkilenerek dinamik yeniden kristalleşen taneler meydana gelmiş ve bu taneler difüzyonel hareketle büyümüştür. Buda malzemenin sünek küçük taneler ile birlikte gevrek kopmasına neden olduğunu düşündürmüştür.

AISI 304-AISI 1050 çelik çiftine baktığımızda blok blok gevrek kırılmaların olduğu görülmektedir. Yüksek enerjili bir çatlakla düşük düzlemsel yoğunluğa sahip kristallerin deforme olmadan klivaj düzlemleri ile kırılması görülmektedir. Büyük çatlaklar yüksek enerjili olduğundan malzemedeki tanelerin kayma mukavemetinden daha fazla mukavemet ürettiğinde çok az deformasyonla yapının gevrek olarak kırıldığı düşünülmektedir.

AISI 304-AISI 1070 çelik çiftinde genel olarak sünek bir yapı gözlenmektedir. Büyük taneler ise yeniden kristalleşme bölgelerinde meydana gelmiştir. Büyük tanelerde kayma gerilmeleri daha hızlı olur. İçyapıdaki çekme boşluklarından dolayı kayma gerilmelerinde hızlı bir şekilde büyüyerek malzemenin kırıldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.42. AISI 304-AISI 1010, AISI 304-AISI 1030, AISI 304-AISI 1050, AISI 304-AISI 1070 çelik çiftlerinin kayma yüzeylerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.43'te AISI 316-AISI 1010, AISI 316-AISI 1030, AISI 316-AISI 1050, AISI 316-AISI 1070 çelik çiftinin kayma yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir.

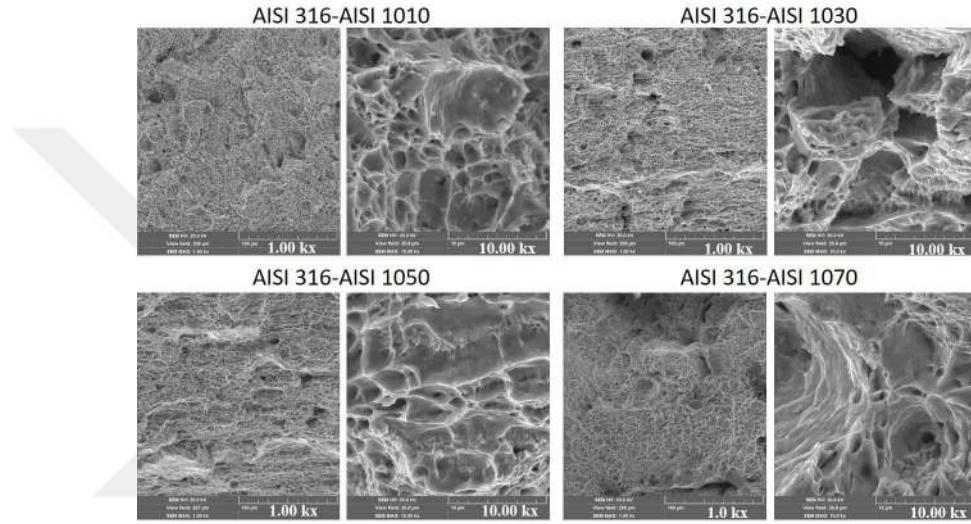
AISI 316-AISI 1010 kaynaklanmış çelik çiftinin SEM görüntülerine bakıldığında sünek küçük tanelerin etrafında dinamik yeniden kristalleşme ile büyümüş taneler görülmektedir. Çekme boşluklarının da birleşerek büyüdüğü ve alan azaltarak düşük genleme ile kısmi sünek şekilde kırıldığı düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1030 çelik çiftine baktığımızda deformasyon çatlakları, sünek taneler,

sünek tanelerin dinamik olarak yeniden kristalleşmesi ile büyümüş. Her birinde çekme boşluğu oluşmuş ve büyüyen çekme boşlukları yüksek çatlak enerjisi oluşturmuş. Buda yapıda sünek-gevrek kırılma özelliklerini göstermiştir.

AISI 316-AISI 1050 çelik çiftinin incelediğimizde küçük tanelerin yanı sıra blok blok büyük taneler görülmektedir. Yer yer küçük çatlaklarında olduğu, bu çatlakların büyüyerek gevrek kırılmaya neden olduğu düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1070 sünek küçük tanelerin etrafında dinamik yeniden kristalleşme ile büyümüş taneler görülmektedir. AISI 1050 de olduğu gibi çatlakların büyüyerek gevrek kırılmalara neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.43. AISI 316-AISI 1010, AISI 316-AISI 1030, AISI 316-AISI 1050, AISI 316-AISI 1070 çelik çiftlerinin kayma yüzeylerinin SEM görüntüleri

Çentik Darbe Deneyi Sonrası Oluşan Kırık Yüzeylerin SEM Görüntüleri

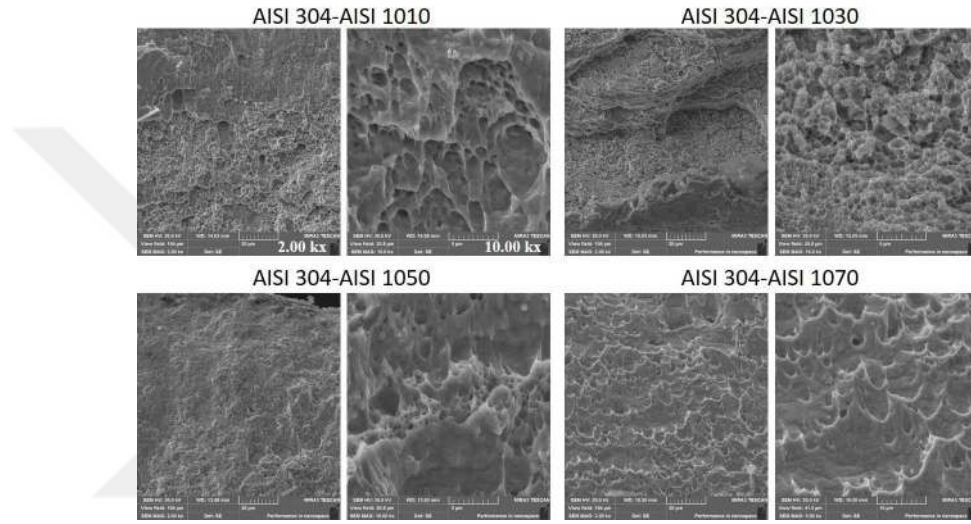
Şekil 4.44'te AISI 304-AISI 1010, AISI 304-AISI 1030, AISI 304-AISI 1050, AISI 304-AISI 1070 çelik çiftinin çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir.

AISI 304-AISI 1010 çelik çiftinde kısa mesafeli bir hızlı çatlak ilerlemesinden sonra (100 μm) küçük taneli yapılar çatlak durdurucu şekilde mukavemet göstermişlerdir.

AISI 304-AISI 1030 'da tabakalı yapılardan dolayı ok işareti ile gösterilen yerden darbe etkisi yapan çekiç, özellikle dinamik yeniden kristalleşmiş kaynağa yakın bölgelerdeki kristallerin varlığıyla gevrek kırılma eğilimi göstermekte olup, küçük tanelerin yüksek çatlak enerjisine sahip olduğu ve çatlak sivriliğinden dolayı da gevrek kırıldığı düşünülmektedir. Çarpma anından sonra darbe enerjisini bir miktar kaybeden çekicin 300 μm 'lik kısmından sonra (resmin üst tarafı) kısmen sünek kırılma (tane sınırı deformasyonu) kaynaklı bölgeyi ikiye böldüğü gözlemlenmiştir.

AISI 304-AISI 1050 kaynaklamış çelik çiftinde, hem AISI 1050'nin yüksek sertlik ve mukavemetinden hem de kaynak bölgesindeki dinamik yeniden kristalleşmiş tane büyümelerinden dolayı deformasyon enerjisinin düşük olduğu düşünülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere dinamik yeniden kristalleşmiş küçük tanelerin sünekliğini engelleyen büyük tanelerde görülmektedir.

AISI 304-AISI 1070 kaynak çiftine baktığımızda, darbe etkisinden sonra çok uzun mesafede etki eden çatlak enerjisi; malzeme sertliği, mukavemeti ve aşırı büyümüş tanelerden dolayı düşük enerjiyle bile olsa büyük mesafe kat ederek yapının diğerlerine göre daha gevrek kırılmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.44. AISI 304-AISI 1010, AISI 304-AISI 1030, AISI 304-AISI 1050, AISI 304-AISI 1070 çelik çiftlerinin çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

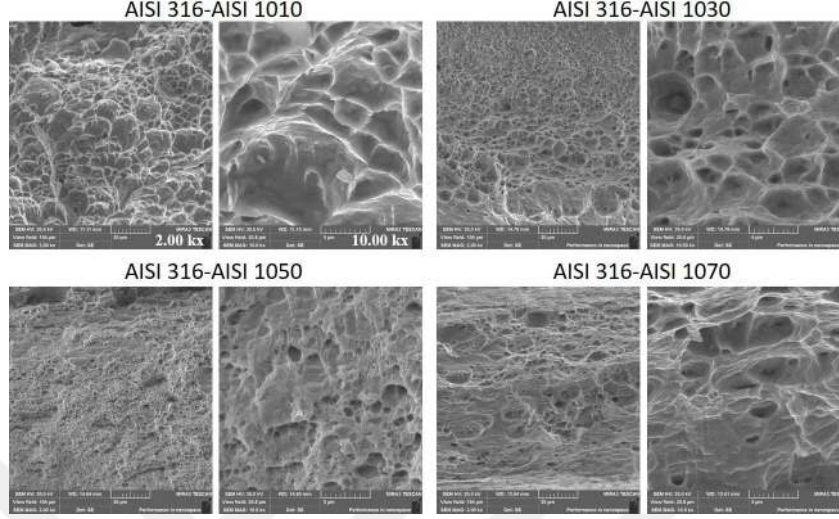
Şekil 4.45'te AISI 316-AISI 1010, AISI 316-AISI 1030, AISI 316-AISI 1050, AISI 316-AISI 1070 çelik çiftinin çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir.

AISI 316-AISI 1010 çelik çiftinin deformasyon başlangıcında (çentik girişinde) yüksek enerji ile gevrek tipte kırılma olduğu, daha sonra ısıdan etkilenmeyip küçük kalan taneler tarafından enerjinin absorbe edilerek çatlak ilerlemesinin kısmen yavaşlatıldığı ve böylece kırılma enerjisinin yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir.

AISI 316-AISI 1030 çelik çiftinde, çentik ucundan sonra çatlak ilerlerken sürekli küçük taneli yapılara denk gelerek çatlak enerjisini durdurucu yönde rol oynamış ve çekme boşluklarına benzer sünme bölgeleri (dimple) olduğu gözlemlenmiştir. Çatlak büyüdüktan sonra iç yüzeydeki ısıdan etkilenmiş bölgelere denk gelen çatlak ucunun büyük tanelerin genleyememesinden dolayı kırılmaya uğradığı düşünülmektedir.

AISI 316-AISI 1050 çelik çiftinde malzeme mukavemeti ve sertliğindeki artıştan, ayrıca yapıda yüksek sıcaklıkla birlikte oluşmuş büyük taneleri zor genlemesinden dolayı darbe enerjisinde de düşüş gözlenmiştir.

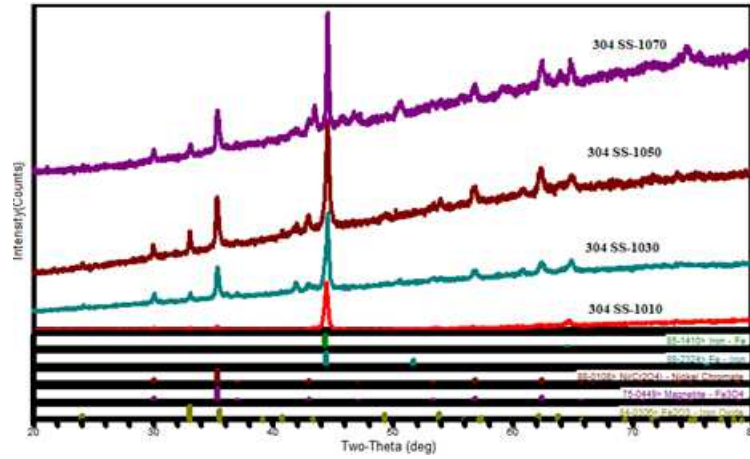
AISI 316-AISI 1070 çelik çiftinde darbe enerjisinden sonra etkili olan çatlak enerjisi, malzemenin sertliği ve mukavemetinden dolayı gevrek kırılmaya neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.45. AISI 316-AISI 1010, AISI 316-AISI 1030, AISI 316-AISI 1050, AISI 316-AISI 1070 çelik çiftlerinin çentik darbe deneyi sonrası oluşan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

4.2.3. XRD ile Faz Analizi Sonuçları

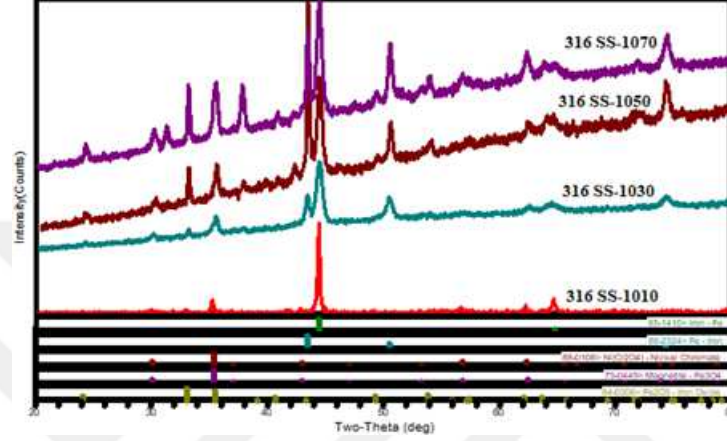
Şekil 4.46'da 304 paslanmaz çeliğin 10X0 serisi ile sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış yüzeylerinin kaynak bölgesinden alınan XRD desenleri görülmektedir.



Şekil 4.46. AISI 304-AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050, AISI 1070 çelik çiftlerinin 710 dev/dak ve 80 mm/dk ilerleme hızındaki kaynak bölgelerinden alınmış XRD desenleri

XRD desenlerinden görüldüğü üzere, AISI 1010 çeliğinde HMK kristal kafes baskın ve yüzey oksitleri düşük seviyede kalmıştır. Artan C miktarı ile yani AISI 1030, AISI 1050

ve AISI 1070’te yüzey oksitlerinin fark edilir derecede arttığı görülmüştür. Bununla birlikte artan C miktarı ve bunu takip eden faz dönüşüm miktarı ile de YMK kristal kafesin, özellikle 43.8° 2tetada görülen (111) düzleminin şiddetinde artış görülmüştür. Aynı şekilde 52° ve 76° ’deki ikincil (200) ve (311) piklerinde de artışlar belli olmaktadır. HMK yapının YMK ile birlikte görülmesi demek aslında kalıntı östenit fazının yapıda fazlaştığının, gerilimin arttığının ve bu nedenle de hem mukavemette hem de süneklilikte düşüşün meydana gelmesinin kanıtıdır.



Şekil 4.47. AISI 316-AISI 1010, AISI 1030, AISI 1050, AISI 1070 çelik çiftlerinin 710 dev/dak ve 63 mm/dak ilerleme hızındaki kaynak bölgelerinden alınmış XRD desenleri

Şekil 4.47’de 316 paslanmaz çeliğin 10X0 serisi ile kaynaklanmasından sonra, kaynak yüzeyinden elde edilen XRD desenleri görülmektedir. Buna göre, AISI 1010 ile kaynaklanan östenitik paslanmaz çelik, AISI 1010’un ferritik yapısından dolayı HMK kristal kafeste bulunmaktadır. Bu fazda kalıntı östenit miktarı çok düşük seviyede ve tane büyümesi de çok azdır. Artan C miktarı ile YMK kristal kafesi yine 43.8° ’de (111) piki ile kendini göstermekte ve artan C oranlarında çok yüksek miktarda YMK kafes yapısı görülmektedir. Bunun sonucu olarak da 316 paslanmaz çeliğinin 10X0 serisine kaynaklanabilirliğinde karışma problemleri ile birlikte mukavemette ve sertlikte düşüşler gözlenmesi olasıdır. Sertlik çok fazla malzeme yapısından etkilenmez iken, özellikle mukavemetin düşmesinin sebebinin kalıntı östenit miktarındaki artış ve iç gerilmeler olduğu, bunların da yapıda uyumsuzluklara sebep olarak büyük tane-küçük tane ayrımını meydana getirdiği düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR

AISI 304 kaynaklı numunesinin çekme deneyi sonucunda bulunan 755,9 MPa maksimum gerilme değerine en yakın değer, 670,35 MPa değeri ile 710 dev/dak ve 80 mm/dak ilerleme hızında birleştirilen AISI 304 austenitik paslanmaz çelik olduğu tespit edilmiştir. Bu devir sayısı ve ilerleme hızı AISI 304-AISI 10X0 çelik çiftlerinin birleştirilmesinde optimum parametre olarak belirlenmiştir.

Aynı şekilde kaynaklı halde AISI 316 austenitik paslanmaz çeliğin çekme deneyi sonucunda 607,8 MPa gerilme değerine sahip olduğu bulunmuştur. 710 dev/dak devir sayısı ve 63 mm/dak ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı numunenin gerilme değerleri 595,24 MPa olarak tespit edilmiş ve AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerinin kaynaklanmasında optimum parametre olarak belirlenmiştir.

Elde edilen optimum parametrelerle birleştirilen AISI 304-AISI 10X0 ve AISI 316-AISI 10X0 çelik çiftlerine yapılan mekanik testlerden (çekme, çentik darbe, sertlik, kayma) ve mikroyapı analizlerinden en iyi sonuçların AISI 304-AISI1050 ile AISI 316-AISI 1010 olduğu ortaya çıkmıştır. Mekanik testlerde AISI 304-AISI 1050 çelik çifti için 766,46 MPa ile asıl metale en yakın değeri görülmüştür. AISI 316-AISI 1010 çelik çifti için ise 582,58 MPa çekme değeri bulunmuştur.

Kırılma enerjileri incelendiğinde AISI 304-AISI 1010'un 26 J ile en yüksek kırılma enerjisine, AISI 316-AISI 1010'un 19,5 J ile en yüksek kırılma enerjisine sahip olduğu tespit edilmiş, dolayısıyla bu çelik çiftlerinin diğerlerine göre daha sünek olduğu belirlenmiştir.

Mikroyapı analizlerinde SEM ve OM sonuçları incelendiğinde tane boyutunun ve plakaların delaminasyonunun, malzeme mukavemeti ve sertliğini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu numunelerde özellikle tane büyümesinin olduğu yerlerde düzensizliklerle birlikte mukavemetin de düştüğü gözlemlenmiştir.

Mikroyapıda ise küçük tane boyutuna ve sürekli dikişe sahip kaynakların daha yüksek çekme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Metalde çekme ile oluşan deformasyonun en çok olduğu kaynakların aynı zamanda ince tane boyutunda ve yüksek sünme göstermiş malzemelerde olduğu görülmüştür.

Çeliklerde karakteristik olan dimple yani tane sınırı deformasyonundan sonra oluşan parçacıkların tüm 710 dev/dak devir sayılarında oluşumunun temeli olduğu anlaşılmıştır.

ÖNERİLER

TEM analizlerinin de yapılarak düzlemlerin yoğunlukları ve bu yoğunlukların kaynağının iç gerilmeler yani kalıntı östenit mi olduğu yoksa dislokasyon yığılmaları mı olduğu belirlenmelidir. Böylece 304 ve 316 paslanmaz çeliklerinin de deformasyon kabiliyetleri ile sade karbonlu çeliklerin kaynaklanabilirlikleri daha da iyi aydınlatılabilir.

XRD analizlerinde kalıntı östenit miktarları ve deformasyon belirlenmesi için kalibrasyonlu deneyler yapılarak kaymalar ortaya çıkarılmalıdır.

Kaynak numuneleri farklı ısıtım koşullarına maruz bırakılarak, oluşan veya dönüşen fazlar belirlenip tüm mekanik özellikler ortaya çıkarılabilir. Böylece tüm elementlerin yapıya etkileri de belirlenmiş olur.



KAYNAKLAR

- [1] Thomas, W. M.; Nicolas, E. D.; Needham, J. C. (1991). *International Patent Application* , No: PCT/GB92/0220
- [2] Kaluç, E. (2007). *Sürtünen Eleman ile Kaynak Yöntemi*, (Makine Mühendisleri Odası Yayını) (MMO/2007/460), Ankara Matbası, Ankara
- [3] Walker, R. A.; Noble, D. N. (1990). *Weldability of Materials* , Conferans Proceeding, ASM
- [4] Kayır, Y. Z. (2003). 2. Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi, *Türkiye’de Paslanmaz Çelik Üretebilir mi?*, 98–101, Zonguldak
- [5] Tülbentçi, K. (1998). Arctech Kaynak Elektrodları Yayını, *MIG-MAG Gazaltı Kaynak yöntemi*, İstanbul
- [6] Boz, M.; Kurt, A. (2004). The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process, *Materials & Design*, C. 25, 343-347, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.11.005>
- [7] Elengovan, K.; Balasubramanian, V. (2008). Balasubramanian, Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, *Materials & Design*, V. 29, 362-373, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.030>
- [8] Sık, A.; Erturk, I.; Onder, M. (2010). A Study Into Effects of Different Parameters on Mechanical Properties in Friction Stir Welding of AA 2024 Aluminium Alloy, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, V. 16(2), 139-147
- [9] Hascalık, A.; Caydas, U.; Unal, E.; Karaca, F. (2007). A Study Into Effects of Different Parameters on Mechanical Properties in Friction Stir Welding of AA 2024 Aluminium Alloy, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* , V. 4, 1-7
- [10] Abdulwaddood, N. M. (2013). Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys 2024–T3 To 6061-T6, *Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* , 25-37
- [11] Aktarer, S. M. Küçükömeroglu, T. Sekban, M. (2015). IF Çeliği ile AA 6061 Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliği, *Kaynak Kongresi IX. Ulus. Kongre ve Sergisi Bildir. Kitabı* , 435-445
- [12] Kimapong, K. Watanabe, T. (2004). Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel, *Welding journal*, 277-282
- [13] Fujii, H. Cui, L. Maeda, M. Nakata, K. Nogi, K. (2006). Friction stir welding of carbon steels, *Materials Science and Engineering: A*, 50-57, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.118>
- [14] Meran, C. Canyurt, O. E. (2010). Friction stir welding of austenitic stainless steels, *The Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 432-439
- [15] Lakshminarayanan, A. K. (2016). Enhancing the properties of friction stir welded stainless steel joints via multi-criteria optimization, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 605-617, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.03.012>
- [16] Bilgin, M. B. Meran, C. (2012). The effect of tool rotational and traverse speed on friction stir weldability of AISI 430 ferritic stainless steels, *Materials & Design*, 376-383, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.013>
- [17] Lienert, T. J. Stellwag, W. L. Grimmet, B. B. Warke, R. W. (2003). Friction stir welding studies on mild steel tool durability and steel microstructure, *Supplement to the Welding Journal*, 1-9
- [18] Park, S. H. C. Sato, Y. S. Kokawa, H. Okomoto, K. Hirano, S. Inagaki, M. (2003). Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding, *Materials Science*, 1175-1180, [doi:10.1016/j.scriptamat.2003.08.022](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2003.08.022)

- [19] Meran, C. Kovan, M. Alptekin, A. (2007). Friction stir welding of AISI 304 austenitic stainless steel, *Materials Science and Engineering Technology*, 829-835, <https://doi.org/10.1002/mawe.200700214>
- [20] Ragu Nathan, S. Balasubramanian, V. Malarvizhi, S.V. Rao, A. G. (2016). Effect of Tool Shoulder Diameter on Stir Zone Characteristics of Friction Stir Welded HSLA Steel Joints, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 1861-1869, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-016-0846-3>
- [21] Cho, H. H. Han, H. N. Hong, S. T. Park, J. Kwon, H. Y. J. Kim, S. H. Steel, R. J. (2010). Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, 2889-2894, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.061>
- [22] Aghaei, A. Dehghani, K. (2015). Characterizations of Friction Stir Welding of Dissimilar Monel400 and Stainless Steel 316, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 573-579, <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6467-2>
- [23] Jafarzadegan, M. Feng, A. H. Abdollah-Zadeh, A. Saeid, T. Shen, J. Assadi, H. (2012). Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel, *Materials Characterization*, 28-41, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.09.004>
- [24] Jafarzadegan, M. Feng, A. H. Abdollah-Zadeh, A. Saeid, T. Shen, J. Assadi, H. (2013). Microstructure and Mechanical Properties of a Dissimilar Friction Stir Weld between Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel, *Journal of Materials Science and Technology*, 367-372, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.02.008>
- [25] Sharma, G. Dwivedi, D. K. (2017). Study on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Steel Joint Developed Using Friction Stir Welding, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1299-1307, <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8763-5>
- [26] Reynolds, A. P. Tang, W. Gnaupel-Herold, T. Prask, H. (2003). Structure, Properties, and Residual Stress of 304L Stainless Steel Friction Stir Welds, *Scripta Materialia*, 1289-1294, [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(03\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(03)00024-1)
- [27] Çakır, R. Çelik, S. (2018). Al 5754-Cu Malzeme Çiftinin Alın Sürtünme Karıştırma Kaynak Kabiliyeti, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 82-91, <https://doi.org/10.31202/ecjse.289640>
- [28] Lakshminarayanan, A. K. Balasubramanian, V. (2010). An Assessment of Microstructure, Hardness, Tensile and Impact Strength of Friction Stir Welded Ferritic Stainless Steel Joints, *Materials and Design*, 31(10), 4592-4600, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.049>
- [29] Kumar, S. S. Murugan, N. Ramachandran, K. K. (2018). Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AISI 316L Austenitic Stainless Steel Joints, *Journal of Materials Processing Technology*, 254(March 2017), 79-90, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.015>
- [30] Bozkurt, Y. Boumerzoug, Z. (2018). Tool Material Effect on The Friction Stir Butt Welding of AA2124-T4 Alloy Matrix MMC, *Journal of Materials Research and Technology*, 7(1), 29-38, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.04.001>
- [31] Başak, H. Kayır, Y. Türkyılmaz, E. H. (2018). Sürtünme Karıştırma Kaynağında Farklı Karıştırma Uç Formlarının Oluşturduğu Kuvvetlerin Ve Birleşmeye Etkisinin Deneysel İncelenmesi, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2), 249-257, <https://doi.org/10.31202/ecjse.318209>
- [32] Sharma, G. Dwivedi, D. K. (2017). Structure and Properties of Friction Stir Weld Joints of Structural Steel, *Trans Indian Inst Met*, 70(1), 201-208
- [33] Ramesh, R. Dinaharan, I. Kumar, R. Akinlabi, E. T. (2017). Microstructure and Mechanical Characterization of Friction Stir Welded High Strength Low Alloy Steels, *Materials Science and Engineering A*, 687, 39-46

- [34] Zhang, Y. N. Cao, X. Larose, S. Wanjara, P. (2012). Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(3), 250–261
- [35] Sharma, N. Siddiquee, A. N. Khan, Z. A. Mohammed, M. T. (2018). Material Stirring During FSW of Al–Cu: Effect of Pin Profile, *Materials and Manufacturing Processes*, 33(7), 786–794
- [36] Rafiei, R. Moghaddam, A. Ostovari, A. Hatami, M. R. Khodabakhshi, F. Abdolazadeh, A. Shokuhfar, A. (2017). Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of The Dissimilar Friction-Stir Butt Welds Between an Al–Mg Alloy and A316L Stainless Steel, *Int J Adv Manuf Technol*, 90, 2785–2801
- [37] Li, H. Yang, S. Zhang, S. Zhang, B. Jiang, Z. Feng, H. Li, J. (2017). Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welding Super-Austenitic Stainless Steel S32654, *Materials and Design*, 118, 207–217
- [38] Husain, M. M. Sarkar, R. Pal, T. K. Ghosh, M. Prabhu, N. (2017). Quantification of Microtexture at Weld Nugget of Friction Stir-Welded Carbon Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 2047–2056
- [39] Karami, S. Jafarian, H. Eivani, A. R. Kheirandish, S. (2016). Engineering Tensile Properties by Controlling Welding Parameters and Microstructure in a Mild Steel Processed by Friction Stir Welding, *Materials Science and Engineering A*, 670, 68–74
- [40] Kumar, S. S. Murugan, N. Ramachandran, K. K. (2016). Influence of Tool Material on Mechanical and Microstructural Properties of Friction Stir Welded 316L Austenitic Stainless Steel Butt Joints, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 58, 196–205
- [41] Anonim. Metalurji Akdağ, adresinden erişildi: <https://www.metalurjiakdag.com.tr/dosya/seminer-notlari-2013.pdf>, erişim 20-7-2016
- [42] Aran, A. (2008). *Malzeme Bilgisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, TR.
- [43] Nandan, R. Debroy, T. Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent Advances in Friction-Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties, *Progress in Materials Science*, 53, 980–1023
- [44] Bradley, G. James, M. N. G. (2000). Geometry And Microstructure Of Metal Inert Gas And Friction Stir Welded Aluminium Alloy 5383-H321, *Metallurgical and Materials Transactions*, 30, 121–125
- [45] Kurt, A. Boz, M. Özdemir, M. (2004). Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleştirilebilirliğe Etkisi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 19(2), 191–197
- [46] Tosun, K. (2019). *Yapı malzemesi: Mühendislik Metal ve Alaşımları*, erişildi: https://kisi.deu.edu.tr/kamile.tosun/Malzeme_ders_9_Muhendislik_metal_ve_alasimlari-1.pdf, erişim 15-6-2019
- [47] Ersöz, F. Ersöz, T. Erkmen, İ. N. (2016). Dünyada ve Türkiye’de Ham Çelik Üretimine Bakış, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 32(2), 1–12
- [48] Oğuz, B. (1989). *Malzeme Bilgisine Giriş*, Erdini Basım ve Yayınevi, İstanbul, TR.
- [49] Şahin, S. (1997). *Malzeme Bilgisi*, Şafak Matbası, Ankara, TR.
- [50] Gürü, H. Yalçın, M. (2012). *Malzeme Bilgisi*, Palme Yayıncılık, Ankara, TR.
- [51] Dikeç, G. (2013). *Malzeme Bilgisi ve İmal Usulleri*, Gedik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, TR.
- [52] Kahraman, N. Gülenç, B. Akça, H. (2002). Ark Kaynak Yöntemi İle Birleştirilen Ostenitik Paslanmaz Çelik İle Düşük Karbonlu Çeliğin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 17(2), 75–85
- [53] Savaşkıran, T. (1999). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*, Beta Basım A.Ş., Trabzon, TR.
- [54] Aran, M. A. Temel, A. (2004). *Paslanmaz Çelik Üretimi, Kullanımı, Standartları*, Acar Matbacılık A.Ş., İstanbul, TR.

- [55] Sun, Z. (1995). Joining Dissimilar Material Combinations: Materials And Processes, *Int. J. of Materials and Product Technolog*, 10, 16–26
- [56] Anık, S. Tülbentçi, K. Kaluç, E. (1991). *Örtülü Elektrod ile Elektrik Ark Kaynağı*, Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, TR.
- [57] Anık, S. (1991). *Kaynak Tekniği El Kitabı*, Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, TR.
- [58] Çigdem, M. (1996). *İmal Usulleri*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, TR.
- [59] Meran, C. (2001). *Pirinç Malzemelerin Kaynak Edilebilirliği ve Uygun Kaynak Parametrelerinin Tespiti*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [60] Kırık, İ. (2012). *Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 1040/AISI 304L Çelik Çiftinin Elektrokimyasal Korozyon Davranışının Araştırılması*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [61] Oğuz, B. (1985). *Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti*, Oerlikon Yayımları, İstanbul, TR.
- [62] Oates, W. R. Saitta, A. M. (1998). *Welding Handbook*, Vol. 4: Materials and Applications, Part 2, 8th Edition. Miami- Florida: American Welding Society.
- [63] Odabaş, C. (2004). *Paslanmaz Çelikler*, Kaynak Tekniği Sanayi, İstanbul, TR.
- [64] Castner, H. R. (1992). Material And Procedure Consideration For Welded Austenitic Stainless Steels, *In 8th Annual North American Welding Research Conference*, Columbus, Ohio: Edison Welding Institute, 1–6
- [65] Alptekin, A. (2006). *Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönetiminin Paslanmaz Çeliklere Uygulanabilirliğinin Araştırılması*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [66] Kurt, A. (2013). *Kaynak Metalurjisi Ders Notları*, Ankara, TR.
- [67] Tülbentçi, K. (1990). *MIG-MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı*, Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul, TR.
- [68] Orhan, A. (2008). *Gaz Tungsten Ark Kaynak Yöntemiyle Üretilen Fe Esaslı Kaplama Tabakalarının Aşınma Mikroyapı Karakteristiklerinin Araştırılması*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [69] Thomas, W. M. Threadgill, P. L. Nicholas, E. D. (1999). Feasibility of Friction Stir Welding Steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(6), 365–372
- [70] Pradeep, A. (2012). A Review on Friction Stir Welding of Steel, *International Journal of Engineering Research and Development*, 3(11), 75–91
- [71] Sayer, A. (2007). *AA 6063 (AlMgSi0.5) Tipi Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin, Bağlantının Dayanımı Ve Mikroyapı Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [72] Twi (2019). , erişildi: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-friction-stir-welding>, erişim 16-12-2019
- [73] Mishra, R. S. Ma, Z. Y. (2005). Friction Stir Welding and Processing, *Material Science Engineering*, 50, 1-78
- [74] Muneo, M. Yasushi, K. Rinsei, I. (2015). Applicability of Friction Stir Welding (FSW) to Steels and Properties of the Welds, *MJFE Tech. Rep.*, 20, 133-140
- [75] Tekin, A. (1981). *Çeliklerin Metalurjik Dizaynı*, Doyuran Matbaası, İstanbul, TR.

ÖZGEÇMİŞ

Yeliz ALNAK

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : Almanya
Doğum Yılı : 1980
Uyruğu : T.C.
Adres : Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Sivas
E-posta : ytas@cumhuriyet.edu.tr
Yabancı Diller : İngilizce (YÖKDİL: 73,75)

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 2008
Lisans : Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 2003
Lise : Sivas Kongre Lisesi, 1998

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

✓ : CNC-Torna, CNC-Freze, Ansys, Autocad, Catia, Solidworks

İŞ DENEYİMİ

2005 – ... :Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

AKADEMİK FALİYETLER

Makaleler :
1. : Alnak Yeliz, Aslan Züleyha (2010). Characterization of Interlaminar Shear Strength of Laminated Woven E-Glass/Epoxy Composites by Four Point Bend Shear Test. Polymer Composites, 31(2), 359-368.
Bildiriler :
1. : Karabulut K., Alnak, Y., (2019). Sıvı Sodyumun Geriye Dönük Adım Akısında Isı Transferi Artışı ve Akış Özelliklerinin Araştırılması. 2. Uluslararası 19 Mayıs Yenilikçi Yaklaşımlar Kongresi, 163-179.
2. : Alnak, Y. Ozer, A. Savaş V. (2019). The Effect of Different Rotation Speeds and Feedrates on the Friction Stir Welding of AISI304/AISI316 Stainless Steel Pairs. Proceedings of 7th International Academic Conference, 84.