

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AISI 316 VE Ck 45 ÇELİĞİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ, KAYNAK İŞLEMİNİN SİMÜLASYONU VE
ISI ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

İsmail ERSÖZLÜ

Balıkesir, Ocak – 2011

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AISI 316 VE Ck 45 ÇELİĞİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ, KAYNAK İŞLEMİNİN SİMÜLASYONU VE
ISI ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

İsmail ERS ÖZLÜ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK (Balıkesir Üniversitesi)

Balıkesir, Ocak – 2011

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AISI 316 VE Ck 45 ÇELİĞİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ, KAYNAK İŞLEMİNİN SİMÜLASYONU VE
ISI ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

İsmail ERSÖZLÜ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK (BAÜ)

Sınav Tarihi : 26 / 01 / 2011

Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ali BAYRAM (UÜ)

Prof. Dr. İrfan AY (BAÜ)

Doç. Dr. Enver ATİK (CBÜ)

Yrd. Doç. Dr. Nedim GERGER (BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK (Danışman-BAÜ)

Balıkesir, Ocak – 2011

ÖZET

AISI 316 VE Ck 45 ÇELİĞİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ, KAYNAK İŞLEMİNİN SİMÜLASYONU VE ISI ANALİZİ

İsmail ERS ÖZLÜ

**Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

(Doktora Tezi / Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Sare ÇELİK)

Balıkesir, Ocak-2011

İmalat sektörü, daha az maliyetli, daha uzun ömürlü seri üretim yapmak için ham madde fiyatı ve işçilik giderlerini minimuma indirmenin yollarını araştırmıştır. Ekonomik ve rekabetçi üretim düzeni, aynı parçanın üretiminin değişik aşamalarında farklı malzemelerin birleştirilerek birlikte kullanımını ortaya koymuştur. Bu nedenle, su pompalarının imalatında kullanılması avantaj sağlayacak olan, AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik ile Ck 45 alaşımsız asal çelik çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin ve birleştirme parametrelerinin belirlenmesi için bu çalışma yapılmıştır. Ayrıca çalıştığımız malzeme çifti ve sürtünme kaynağı birleştirme işlemlerinde kullanılacak olan simülasyon “Visual Studio 2008 Express Edition” programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu program, deneme yanılma sürecini en aza indirecek, atık malzeme miktarını azaltacak, en kısa sürede en az maliyet ile kaynak işlemine geçilmesine olanak sağlayacaktır. Üç boyutlu sıcaklık dağılımı ısı analizi “cfdesign” programı ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen değerler ile simülasyon programından elde edilen sonuçlar kıyaslandığında uyumluluk gösterdiği görülmüştür. Isı analizi sonucunda, Ck 45 malzemesi üzerinde ısının, AISI 316 malzemesinden daha çabuk yayıldığı görülmüştür.

Numunelerin birleştirilmesinde bilgisayar kontrollü sürekli tahrikli s¼rt¼nme kaynak makinesi kullanılmıştır. S¼rt¼nme kaynağı işlemi 19 farklı kaynak parametresi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak sırasında, kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı ile kaynak ara yüzeyinin zamana bağlı sıcaklık değişimleri ölç¼lmüřtür.

Kaynak sonrası numunelere çekme ve mikrosertlik testleri uygulanmış, mikroyapıları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizi ile element dağılımı belirlenerek optimum kaynak parametreleri saptanmıştır. 3000 dev/dk dönme hızında, s¼rt¼nme basıncı 100 MPa, s¼rt¼nme süresi 10 s, yığma basıncı 200 MPa ve yığma süresi 20 s optimum kaynak parametreleri olarak belirlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı 702.15 MPa ile ana malzemeden (AISI 316: 663.53 MPa) % 5.8 daha fazla çıkmıştır. Yapılan mikroyapı incelemesi sonucunda AISI 316 eliğinde kaynak sonrası dinamik yeniden kristalleşmiş yapının gerçekleştiği, Ck 45 eliğinde ise kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde martenzit yapının oluştuğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: S¼rt¼nme kaynağı / AISI 316 ve Ck 45 eliği / s¼rt¼nme kaynağı sim¼lasyonu / ısı analizi.

ABSTRACT

JOINING OF AISI 316 AND Ck 45 STEELS WITH FRICTION WELDING, THE SIMULATION OF THE WELDING PROCESS AND HEAT ANALYSIS

İsmail ERSÖZLÜ

**Balikesir University, Institute of Science,
Department of Mechanical Engineering**

(Ph.D.Thesis / Supervisor : Asst.Prof.Dr. Sare ÇELİK)

Balikesir –January, 2011

The production sector has searched for ways of reducing the costs of raw materials and labor for less costly and longer lasting mass production. Economic and competitive production system has introduced the use of different materials welded together in different phases of the production of the same part. Therefore, this study is conducted to find the possibility of jointing the pair of AISI 316 austenitic stainless steel and Ck 45 unalloyed basic steel, the materials which will provide advantage in the production of water pumps, with friction welding and the parameters for joint. Also, the simulation for friction welding procedures and the material pair we had worked on was realized by “Visual Studio 2008 Express Edition” program. This program would reduce trial and error process time to the minimum and it would decrease the quantity of waste material and would make it possible to start welding process with the least finance in the shortest time. Three dimensional heat analysis was realized by “cfdesign” program. It has been observed that values between the experiment results and the ones from the simulation program are determined by experiment results are consistent. As a result of heat analysis, it has been observed that the heat on Ck 45 material spreads faster than AISI 316 material.

In joining the specimens, computer controlled continuous drive friction welding machine was used. Friction welding process was performed with 19 different parameters. During the welding process, the heat changes of welding interface in relation to the time was measured by an infrared temperature measurement device during welding.

In obtaining optimum welding parameters, after welding process, the tests of tensile and micro hardness were applied, the microstructures were observed by scanning electron microscope (SEM), and ratios of elements were found by energy dispersive spectroscopy (SEM) analysis. The optimum welding parameters of 100 MPa of friction pressure, 10 sec of friction time, 200 MPa of upset pressure and 20 sec of upset time were determined with 3000 rpm rotation speed. The highest tensile strength, which is 702.15 MPa, has resulted 5.8 % more than that of the parent material (AISI 316: 663.53 MPa). As a result of microstructure analysis, it is found that after the welding, dynamic recrystallization structure was formed up on AISI 316 steel while martenzitic structure was formed up on Ck 45 steel on areas close to the welding interface.

Key words: Friction welding / AISI 316 and Ck 45 steels / simulation of friction welding / heat analysis

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	vi
SEMBOL LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xviii
ÖNSÖZ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	3
1.2 Sürtünme Kaynağı	11
1.2.1 Giriş	11
1.2.2 Sürtünme Kaynağının Tarihçesi	13
1.2.3 Sürtünme Kaynağının Yöntemi	14
1.2.4 Sürtünme Kaynağı İşlem Basamakları	16
1.2.5 Sürtünme Kaynağı Parametreleri	17
1.2.5.1 Sürtünme Zamanı	18
1.2.5.2 Sürtünme Basıncı	18
1.2.5.3 Yığma Zamanı	18
1.2.5.4 Yığma Basıncı	19
1.2.5.5 Dönme Hızı	19
1.2.5.6 Durma Süresi	20
1.2.6 Sürtünme Kaynağı Çeşitleri	20
1.2.6.1 Dairesel Sürtünme Kaynağı	21

1.2.6.1.1	Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı	23
1.2.6.1.2	Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı	24
1.2.6.1.3	Kombine Edilmiş Sürtünme Kaynağı	26
1.2.7	Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Malzemeler	28
1.2.8	Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları	29
1.2.9	Sürtünme Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları	30
1.3	Malzemelerin Yüksek Sıcaklıkta Deformasyon Davranışı	32
1.3.1	Dinamik Toparlanma	35
1.3.2	Dinamik Yeniden Kristalleşme	36
1.4	Paslanmaz Çelikler	39
1.4.1	Ostenitik Paslanmaz Çelikler	41
1.4.1.1	AISI 316 Paslanmaz Çeliği	44
2.	ARAÇ VE YÖNTEMLER	46
2.1	Deneyde Kullanılan Sürtünme Kaynak Makinesi	46
2.2	Deneylerde Kullanılan Malzemeler	47
2.2.1	AISI 316 Paslanmaz Çeliğin Kullanıldığı Yerler	47
2.2.2	Ck 45 Çeliğin Kullanıldığı Yerler	47
2.2.3	AISI 316 ve Ck 45 Çeliklerin Özellikleri	47
2.3	Numunelerin Boyutları	56
2.4	AISI 316 Çeliğin Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilmesi	56
2.5	AISI 316 ile Ck 45 Çeliklerin Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmesi	59
3.	BULGULAR	62
3.1	Çekme Testi	63
3.2	Mikrosertlik Testi	68
3.2.1	Yatay Doğrultuda Mikrosertlik Dağılımı	68
3.2.2	Dikey Doğrultuda Mikrosertlik Dağılımı	72
3.3	Mikroyapı İncelemesi	74
3.3.1	Optik Mikroyapı İncelemesi	74
3.3.2	SEM Mikroyapı İncelemesi	91
3.3.3	EDS Analizi	111

3.4	Kaynak Bölgesinin Sıcaklığının Ölçülmesi	138
3.5	Kaynak İşleminin Simülasyonu	141
3.5.1	İstatistiksel Tahmin Modeli	144
3.5.2	Çekme Dayanımı Amaç Fonksiyonu	152
3.6	Zamana Bağlı Sıcaklık Değişim Analizi	157
4.	TARTIŞMA VE SONUÇ	161
	KAYNAKLAR	166

SEMBOL LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Adı</u>
t	Zaman
t_u	Yığma zamanı
t_s	Sürtünme zamanı
p_s	Sürtünme basıncı
p_u	Yığma basıncı
n	Dönme hızı
Δl	Eksenel kısalma miktarı
M_R	Dönme momenti
P	Yüzey basıncı
k	Isı iletim katsayısı
F,A	Yüzey alanı
m	Kütle
σ	Gerilme
UTS	Maksimum çekme dayanımı
c	Özgül ısı
d	Parça çapı
r	Parça yarıçapı
Q	Isı
μ	Sürtünme katsayısı
s	Saniye
h	Saat
E	Enerji
I	Atalet momenti

C	182.4 (Atalet momenti kg.m^2 olarak alındığında)
T	Sıcaklığı
ε	Deformasyon miktarı
ε°	Deformasyon hızı
ε_p	Kritik deformasyon değeri
ΔL	Şekil değiştirme miktarı
α	Ferit yapısı
M	Martenzit yapısı
γ	Ostenit yapısı
V_t	Teğetsel hız
K	0.1 (r metre olarak alındığında)
σ	Gerilme
σ_s	Kararlı hal gerilmesi
σ_p	Maksimum gerilme
G	Kayma elastisite modülü
b	Burgers vektörü
ρ	Dislokasyon yoğunluğu
R^2	Belirlilik katsayısı
W	Ağırlıklar
WC	Çıkış Ağırlıkları
W_b	Bias ağırlıkları
N	Nöronlar

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil

<u>Numarası</u>	<u>Adı</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1	Sürtünme kaynağı işlem basamakları	17
Şekil 1.2	Sürtünme kaynağı teknikleri	20
Şekil 1.3	Kaynak edilen parçaların ısı değişimi	22
Şekil 1.4	Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı şematik şekli	24
Şekil 1.5	Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı parametreleri (t_1 = sürtünme basıncı oluşum zamanı, t_2 = yığılma basıncı oluşum zamanı)	24
Şekil 1.6	Volan tahrikli sürtünme kaynağı şematik şekli	26
Şekil 1.7	Volan tahrikli sürtünme kaynak parametreleri	26
Şekil 1.8	Kombine edilmiş sürtünme kaynağı	27
Şekil 1.9	Kombine edilmiş sürtünme kaynağı parametreleri (1. dönen iş parçasındaki yığılma, 2. dönmeyen iş parçasındaki yığılma)	27
Şekil 1.10	Sürtünme kaynağı uygulama alanları	30
Şekil 1.11	Sıcak işlem esnasında mümkün olan mikroyapısal değişimler (a) Dinamik toparlanmayı takip eden statik toparlanma, b) Dinamik toparlanmayı takip eden statik yeniden kristalleşme, c) Dinamik yeniden kristalleşme ve takip eden statik yeniden kristalleşme)	34
Şekil 1.12	Dinamik toparlanmaya maruz kalan bir malzemenin gerilme deformasyon davranışı	35
Şekil 1.13	Dinamik yeniden kristalleşmeye maruz kalmış bir malzemenin gerilme(σ) - birim şekil değiştirme (ϵ) davranışı	37
Şekil 1.14	Dinamik yeniden kristalleşmenin tane sınırında başlamasının şematik gösterimi (a,b,c,d,e)	38
Şekil 1.15	Dinamik yeniden kristalleşmenin tane sınırında başlamasının mikroyapı resmi (a,b,c,d)	38
Şekil 2.1	Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinin şematik şekli	46
Şekil 2.2	Çekme testi numune boyutu	49

Şekil 2.3	Bakalite alınmış kaynaklı numuneler	50
Şekil 2.4	AISI 316 Çeliğinin kırılma resmi	51
Şekil 2.5	Ck 45 Çeliğinin kırılma resmi	51
Şekil 2.6	AISI 316 Çeliğinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü	52
Şekil 2.7	AISI 316 Çeliğinin kırılma yüzeyinin EDS analizi	52
Şekil 2.8	Ck 45 Çeliğinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü	53
Şekil 2.9	Ck 45 Çeliğinin kırılma yüzeyinin EDS analizi	53
Şekil 2.10	AISI 316 Çeliği mikro yapı resmi (ostenit yapı, Tİ: tavlama ikizi)	55
Şekil 2.11	Ck 45 Çeliği mikro yapı resmi (F: ferrit yapı, P: perrit yapı)	55
Şekil 2.12	Deney numune boyutu	56
Şekil 2.13	Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 316 çeliği resimleri	57
Şekil 2.14	Kaynaklı AISI 316 çeliği kırılma resimleri	58
Şekil 2.15	Kaynaklı AISI 316 çeliği kırılma yüzeyi resimleri	58
Şekil 2.16	Ck 45 ile AISI 316 çeliği kaynaklı numune resimleri	60
Şekil 3.1	Kaynaklı numunelerin çekme dayanımı	63
Şekil 3.2	Numune 4 kırılma resmi	63
Şekil 3.3	Numune 8 kırılma resmi	64
Şekil 3.4	Numune 13 kırılma resmi	64
Şekil 3.5	Numune 8 kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	64
Şekil 3.6	Numune 9 kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	65
Şekil 3.7	Numune 13 kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	65
Şekil 3.8	Numune 8 kırılma yüzeyi EDS analizi	66
Şekil 3.9	Numune 9 kırılma yüzeyi EDS analizi	66
Şekil 3.10	Numune 13 kırılma yüzeyi EDS analizi	66
Şekil 3.11	Sertlik ölçümünün yapıldığı doğrultu ve yerler	68
Şekil 3.12	Yatay ekseninde sertlik dağılımı (x ekseni doğrultusunda)	69
Şekil 3.13	Numune 5 sertlik ölçüm izleri	70
Şekil 3.14	Numune 6 sertlik ölçüm izleri	70
Şekil 3.15	Numune 11 sertlik ölçüm izleri ve çatlak yeri	71

Şekil 3.16	Dikey eksen de sertlik dağılımı (y eksenı doğrultusu)	73
Şekil 3.17	Optik mikroyapı inceleme bölgeleri (A: Ck 45 çeliği geçiş bölgesi, B: Ck 45 çeliği ITAB, C: Ck 45 çeliği ITAB ve kaynak ara yüzeyi, D: Kaynak ara yüzeyi ve AISI 316 çeliği ITAB, E: AISI 316 çeliği ITAB ve F: AISI 316 çeliği geçiş bölgesi)	74
Şekil 3.18	Numune 5 mikroyapı görüntüsü	75
Şekil 3.19	Numune 6 genel mikroyapı görüntüsü	75
Şekil 3.20	Numune 8 genel mikroyapı görüntüsü	76
Şekil 3.21	Numune 8 mikroyapı görüntüsü	77
Şekil 3.22	Numune 9 genel mikroyapı görüntüsü	81
Şekil 3.23	Numune 9 mikroyapı görüntüsü	82
Şekil 3.24	Numune 13 genel mikroyapı görüntüsü	85
Şekil 3.25	Numune 13 mikroyapı görüntüsü	86
Şekil 3.26	Numune 14 mikroyapı görüntüsü	90
Şekil 3.27	Numune 15 mikroyapı görüntüsü	90
Şekil 3.28	Numune 8 Ck 45 çeliği SEM görüntüsü (F: ferrit, P: perlit)	92
Şekil 3.29	Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü	92
Şekil 3.30	Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü	93
Şekil 3.31	Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 3SEM görüntüsü	93
Şekil 3.32	Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 4 SEM görüntüsü	94
Şekil 3.33	Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 5 SEM görüntüsü(M: martenzit)	94
Şekil 3. 34	Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 6 ve kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü	95
Şekil 3.35	Numune 8 kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü	95
Şekil 3. 36	Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü	96
Şekil 3.37	Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü	96
Şekil 3. 38	Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü	97
Şekil 3.39	Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 4 SEM görüntüsü	97
Şekil 3. 40	Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 5 SEM görüntüsü	98
Şekil 3.41	Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 6 SEM görüntüsü	98
Şekil 3. 42	Numune 8 AISI 316 çeliği SEM görüntüsü (O: ostenit, Tİ: tavlama ikizleri)	99

Şekil 3. 43	Numune 9 Ck 45 çeliği SEM görüntüsü (F: ferrit, P: perlit)	99
Şekil 3. 44	Numune 9 Ck 45 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü	100
Şekil 3. 45	Numune 9 Ck 45 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü	100
Şekil 3. 46	Numune 9 Ck 45 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü	101
Şekil 3. 47	Numune 9 Ck 45 çeliği ITAB 4 ve kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü (M: martenzit)	101
Şekil 3. 48	Numune 9 kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü	102
Şekil 3. 49	Numune 9 AISI 316 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü	102
Şekil 3. 50	Numune 9 AISI 316 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü	103
Şekil 3. 51	Numune 9 AISI 316 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü	103
Şekil 3. 52	Numune 9 AISI 316 çeliği SEM görüntüsü	104
Şekil 3. 53	Numune 13 Ck 45 çeliği SEM görüntüsü (F: ferrit, P: perlit)	104
Şekil 3. 54	Numune 13 Ck 45 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü	105
Şekil 3. 55	Numune 13 Ck 45 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü	105
Şekil 3. 56	Numune 13 Ck 45 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü	106
Şekil 3. 57	Numune 13 Ck 45 çeliği ITAB 4 ve kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü (M: martenzit)	106
Şekil 3. 58	Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 1 ve kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü	107
Şekil 3. 59	Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü	107
Şekil 3. 60	Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü	108
Şekil 3. 61	Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 4 SEM görüntüsü	108
Şekil 3. 62	Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 5 SEM görüntüsü	109
Şekil 3. 63	Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 6 SEM görüntüsü	109
Şekil 3. 64	Numune 13 AISI 316 çeliği SEM görüntüsü	110
Şekil 3. 65	Numune 8 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktaları	111
Şekil 3. 66	Numune 8 Ck 45 çeliği 1. noktanın EDS analiz sonuçları	112
Şekil 3. 67	Numune 8 Ck 45 çeliği 2. noktanın EDS analiz sonuçları	112
Şekil 3. 68	Numune 8 Ck 45 çeliği 3. noktanın EDS analiz sonuçları	113
Şekil 3. 69	Numune 8 Ck 45 çeliği 4. noktanın EDS analiz sonuçları	113
Şekil 3. 70	Numune 8 AISI 316 çeliği tarafı EDS analiz noktaları	114
Şekil 3. 71	Numune 8 AISI 316 çeliği 1. noktanın EDS analiz sonuçları	114

Şekil 3.72	Numune 8 AISI 316 çeliği 2. noktanın EDS analiz sonuçları	115
Şekil 3.73	Numune 8 AISI 316 çeliği 3. noktanın EDS analiz sonuçları	115
Şekil 3.74	Numune 8 AISI 316 çeliği 4. noktanın EDS analiz sonuçları	116
Şekil 3.75	Numune 8 AISI 316 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları	116
Şekil 3.76	Numune 8 AISI 316 çeliği 6. noktanın EDS analiz sonuçları	117
Şekil 3.77	Numune 9 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktaları	117
Şekil 3.78	Numune 9 Ck 45 çeliği 1. noktanın EDS analiz sonuçları	118
Şekil 3.79	Numune 9 Ck 45 çeliği 2. noktanın EDS analiz sonuçları	118
Şekil 3.80	Numune 9 Ck 45 çeliği 3. noktanın EDS analiz sonuçları	119
Şekil 3.81	Numune 9 Ck 45 çeliği 4. noktanın EDS analiz sonuçları	119
Şekil 3.82	Numune 9 Ck 45 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları	120
Şekil 3.83	Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 1. bölge	121
Şekil 3.84	Numune 9 AISI 316 çeliği 1. bölgenin EDS analiz sonuçları	121
Şekil 3.85	Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 2. bölge	122
Şekil 3.86	Numune 9 AISI 316 çeliği 2. bölgenin EDS analiz sonuçları	122
Şekil 3.87	Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 3. bölge	123
Şekil 3.88	Numune 9 AISI 316 çeliği 3. bölgenin EDS analiz sonuçları	123
Şekil 3.89	Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 4. bölge	124
Şekil 3.90	Numune 9 AISI 316 çeliği 4. bölgenin EDS analiz sonuçları	124
Şekil 3.91	Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 5 (+2 noktası) ve 6 (+1 noktası) noktalar	125
Şekil 3.92	Numune 9 AISI 316 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları	125
Şekil 3.93	Numune 9 AISI 316 çeliği 6. noktanın EDS analiz sonuçları	126
Şekil 3.94	Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 7. nokta (+1 noktası)	126
Şekil 3.95	Numune 9 AISI 316 çeliği 7. noktanın EDS analiz sonuçları	127
Şekil 3.96	Numune 13 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktaları	127
Şekil 3.97	Numune 13 Ck 45 çeliği 1. noktanın EDS analiz sonuçları	128
Şekil 3.98	Numune 13 Ck 45 çeliği 2. noktanın EDS analiz sonuçları	128
Şekil 3.99	Numune 13 Ck 45 çeliği 3. noktanın EDS analiz sonuçları	129
Şekil 3.100	Numune 13 Ck 45 çeliği 4. noktanın EDS analiz sonuçları	129

Şekil 3.101	Numune 13 Ck 45 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları	130
Şekil 3.102	Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 1. bölge	131
Şekil 3.103	Numune 13 AISI 316 çeliği 1. bölgenin EDS analiz sonuçları	131
Şekil 3.104	Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 2. bölge	132
Şekil 3.105	Numune 13 AISI 316 çeliği 2. bölgenin EDS analiz sonuçları	132
Şekil 3.106	Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 3. bölge	133
Şekil 3.107	Numune 13 AISI 316 çeliği 3. bölgenin EDS analiz sonuçları	133
Şekil 3.108	Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 4. bölge	134
Şekil 3.109	Numune 13 AISI 316 çeliği 4. bölgenin EDS analiz sonuçları	134
Şekil 3.110	Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 5 (+1 noktası) ve 6 (+2 noktası) noktalar	135
Şekil 3.111	Numune 13 AISI 316 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları	135
Şekil 3.112	Numune 13 AISI 316 çeliği 6. noktanın EDS analiz sonuçları	136
Şekil 3.113	Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 7 nokta (+1 noktası)	136
Şekil 3.114	Numune 13 AISI 316 çeliği 7. noktanın EDS analiz sonuçları	137
Şekil 3.115	Kaynaklı numunelerinin kaynak ara yüzeyi çevre sıcaklığı	139
Şekil 3.116	Sürtünme basıncı sabit tutulup ($P_s= 100$ MPa), sürtünme süresi ($t_{s_5}= 6$ s, $t_{s_6}= 6$ s, $t_{s_7}= 6$ s, $t_{s_8}= 8$ s, $t_{s_9}= 8$ s, $t_{s_{10}}= 8$ s, $t_{s_{11}}= 10$ s, $t_{s_{12}}= 10$ s, $t_{s_{13}}= 10$ s) değiştirildiğinde kaynak sıcaklığının değişimi	140
Şekil 3.117	Sürtünme süresi sabit tutulup ($t_s= 8$ s), sürtünme basıncı ($P_{s_2}= 80$ MPa, $P_{s_{10}}= 100$ Mpa, $P_{s_{19}}= 120$ Mpa) değiştirildiğinde kaynak sıcaklığının değişimi	140
Şekil 3.118	Simülasyon programının akış şeması	141
Şekil 3.119	Simülasyon programının ara yüzeyi	142
Şekil 3.120	Üç boyutlu kaynak işleminin sürtünme aşaması	143
Şekil 3.121	Üç boyutlu kaynak işleminin yığıma aşaması	144
Şekil 3.122	İstatistiksel tahmin modeli şematik şekli	145
Şekil 3.123	Çekme dayanımı amaç fonksiyonu akış şeması	153
Şekil 3.124	Yapay sinir ağı model yapısı	154
Şekil 3.125	Çekme dayanımı amaç fonksiyonu belirlilik katsayısı grafiği	156
Şekil 3.126	Analiz için ısı giriş noktası ve sıcaklık izleme noktaları (1, 2, 3, 4 ve 5)	157

Şekil 3.127	Zamana bağlı üç boyutlu sıcaklık değişimini gösteren animasyon görüntüsü	157
Şekil 3.128	Analiz için numuneler ve bağlantı şekli	158
Şekil 3.129	Analiz için kullanılan çözüm ağı bölgeleri	158
Şekil 3.130	Numune 8 için izleme noktalarındaki sıcaklık-zaman grafiği	159
Şekil 3.131	Numune 9 için izleme noktalarındaki sıcaklık-zaman grafiği	159
Şekil 3.132	Numune 13 için izleme noktalarındaki sıcaklık-zaman grafiği	160

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>		
<u>Numarası</u>	<u>Adı</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1	Kaynak teknolojisinin tarihsel gelişimi	12
Tablo 1.2	Krom karbür çökmesinin karbon içeriği, zaman ve sıcaklığa bağlılığı	43
Tablo 2.1	Tablo 2.1 Numunelerin standart mekanik ve kimyasal özellikler	48
Tablo 2.2	AISI 316 Çeliğinin spektrum analiz değerleri	48
Tablo 2.3	Ck 45 Çeliğinin spektrum analiz değerleri	48
Tablo 2.4	Tablo 2.4 AISI 316 ve Ck 45 Çeliklerine ait mekanik özellikler	50
Tablo 2.5	Tablo 2.5 AISI 316 ve Ck 45 Çeliklerinin kırılma yüzeyinin EDS analizi	54
Tablo 2.6	AISI 316 Çeliğinin sürtünme kaynağı parametreleri ve çekme dayanımı	56
Tablo 2.7	AISI 316 ile Ck 45 çeliklerinin sürtünme kaynağı parametreleri	59
Tablo 3.1	Kaynaklı numunelerin boyda kısalma miktarı, flaş çapı ve genişliği	62
Tablo 3.2	Numune 8, 9 ve 13 kırılma yüzeyi element dağılımı	67
Tablo 3.3	Kaynaklı numunelerin ITAB genişliği	91
Tablo 3.4	Numune 8 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktalarının element dağılımı	113
Tablo 3.5	Numune 8 AISI 316 çeliği tarafı EDS analiz noktalarının element dağılımı	117
Tablo 3.6	Numune 9 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktalarının element dağılımı	120
Tablo 3.7	Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analiz bölge ve noktaların element dağılımı	127
Tablo 3.8	Numune 13 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktalarının element dağılımı	130

Tablo 3.9	Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analiz bölge ve noktaların element dağılımı	137
Tablo 3.10	Ck 45 çeliği boy da kısalma miktarı istatistiksel tahmin modeli	145
Tablo 3.11	AISI 316 çeliği boy da kısalma miktarı istatistiksel tahmin modeli	147
Tablo 3.12	Ck 45 çeliği flaş çapı istatistiksel tahmin modeli	148
Tablo 3.13	AISI 316 çeliği flaş çapı istatistiksel tahmin modeli	149
Tablo 3.14	Ck 45 çeliği flaş genişliği istatistiksel tahmin modeli	150
Tablo 3.15	AISI 316 çeliği flaş genişliği istatistiksel tahmin modeli	151
Tablo 3.16	Kaynak yeri sıcaklığı istatistiksel tahmin modeli	152
Tablo 3.17	Çekme dayanımı amaç fonksiyonu normalizasyon değerleri ve ağırlıklar	155
Tablo 3.18	Çekme dayanımı amaç fonksiyonu çıkış ağırlıkları	155

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesi ile desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK' e en içten teşekkürlerimi sunarım. BAÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü hocalarına ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Laboratuvarlarında çalışmama olanak sağlayan GÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metalürji Bölümü Malzeme Bilimi Eğitimi Anabilim Dalı Başkanlığına ve yardımlarından dolayı Araştırma Görevlisi Sayın Volkan KILIÇLI' ya, Çekme testlerinin gerçekleştirildiği ROKETSAN A.Ş.'ye ve Sayın Haluk TANSU 'ya, Balıkesir 1012 Ana Tamir Fabrikasına, mikrosertlik testlerinin gerçekleştirildiği K.K. Astsubay Meslek Yüksek Okuluna ve Sayın Tuncay KAYA' ya, malzeme desteğinde bulunan Sayın Gökhan CENGİZ 'e, simülasyon programının yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Murat GENC 'e, ısı analizinin yapılmasında yardımcı olan Sayın Dr. Yıldray YEDİKARDEŞ 'e ve Punto Mühendisliğe, istatistiksel tahmin modellerinin çıkarılmasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Serhat BURMAOĞLU' na, sistemin analitik modellemesinde yardımcı olan Sayın Nida BİRGÜL 'e teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora eğitimim esnasında her türlü desteklerini sunan ve bende emeği bulunan tüm büyüklerime, annem ve babama, bana hep destek olan eşim Hasel 'e, kızlarım İlinay ve Aylin 'e sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Balıkesir, 2011 İsmail ERSÖZLÜ

1. GİRİŞ

İnsanların ihtiyaçlarının sınırsız olması ve bu ihtiyaçları karşılamak için gerekli olan araç ve gereçleri elde etme çalışmaları teknolojideki gelişmenin başlıca sebeplerinden olmuştur. Teknolojideki bu gelişim imalat sektörünü makineye bağımlı hale getirmiştir. Makineye bağlı endüstriyel devrimin gerçekleşmesiyle üretimde hızlı artış ve rekabet ortamı oluşmuştur. Bu durum üretimin seri ve maliyetinin ucuz olmasını gerekli kılmıştır.

İmalat sektörü, üretimin seri ve daha az maliyetle gerçekleştirebilmesi için ham madde fiyatı ve işçilik giderlerini minimuma indirmenin yollarını araştırmıştır. Böylece endüstride otomasyon ve değişik imalat yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır.

Çeşitli metallerden mamul hem büyük hem de küçük parçaların üretiminde döküm, dövme, presleme, eğme, ekstrüzyon, sıvama ve talaş kaldırma gibi imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Ekonomik üretim düzeni, aynı parçanın üretiminin değişik aşamalarında bu yöntemlerin iki veya daha fazlasının uygun olarak seçilmiş bir birleştirme tekniği ile birlikte kullanılmasını gerekli kılmıştır [1].

Bugün cıvatalama, perçinleme, lehimleme ve son olarak da kaynak gibi çok sayıda kullanılabilir birleştirme tekniği vardır ve günümüzdeki sorun birleştirmenin nasıl yapılacağı değil, en iyi birleştirme yönteminin nasıl seçileceğidir. Bir tasarım mühendisi, aynı derecede uygun dört veya beş değişik birleştirme tekniğinin olduğu durumlarla kolaylıkla karşılaşabilir. Her yöntemin kendine has özellikleri vardır ve en uygun seçim için mukavemet, üretim kolaylığı, maliyet, ömür, korozyon dayanımı ve görünüş gibi birçok hususun değerlendirilmesi gerekir [2]. Kaynak yöntemlerinden sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak benzer ve benzer olmayan, hatta birçok karmaşık malzemenin birleştirilebilmesi imalat sektöründe enerji ve materyal tasarrufu sağlamıştır.

Bu çalışma, minimum elektrik enerjisi ile daha yüksek döndürme momentini oluşturacak, korozyona dayanıklı, uzun süre çalışma ömrü olan ve üretiminde maksimum ekonomikliği sağlayacak bir su pompası imalatı ihtiyacından doğmuştur. Pompanın suya maruz kalan pompa kısmını oluşturan pervanenin korozyona ve oksidasyona dayanıklı bir malzemededen, pervaneyi döndüren mil kısmının ise manyetik alan geçirgenliği (elektrik motoru için) olan daha ucuz bir malzemededen yapılması ekonomiklik ve dayanım faktörü göz önüne alındığında, pervane mil kısmının iki farklı çelikten imal edilmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Pervane kısmı için korozyona yüksek dayanım gösteren AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliği, mil kısmı için Ck 45 alaşımsız asal çeliği kullanılması uygun görülmüştür. AISI 316 çeliğinin manyetik özelliği olmadığından elektrik motoru kısmında kullanılması hem elektrik enerjisi sarfiyatını arttıracak hem de daha pahalı bir malzeme olduğu için maliyeti arttıracaktır. Bu malzemelerin birleştirilmesi, günümüzde farklı çeliklerinin kaynağında kullanılan katı hal kaynak yöntemlerinden sürtünme kaynak yöntemi ile gerçekleştirilecektir. Bağlantı mukavemeti için sürtünme kaynağı parametrelerinin optimizasyonu önem arz etmektedir.

Bu çalışmada; sürtünme kaynağı yöntemi kullanılarak, AISI 316 paslanmaz çeliği ile Ck 45 alaşımsız asal çeliğinin birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin, çekme deneyi, mikrosertlik deneyi, makro ve mikro yapı incelemesi, enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizi yapılarak bağlantı mukavemeti test edilmiş ve uygun kaynak parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kaynak işlemi esnasında, kaynak yerinin sıcaklık değişimi kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı ile ölçülmüş ve sürtünme kaynağı parametrelerinin kaynak bölgesi sıcaklığı üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca sürtünme kaynağı çalışmalarında kullanılacak ve sürtünme kaynağını görselleştiren, numunelerin boyda kısalma miktarını, flaş çapı ve genişliğini, kaynak ara yüzeyi sıcaklık değerini (Regresyon Analizi ve SPSS 16.0 İstatistiksel Paket Programı” ile denklemleri elde edilmiştir) ve çekme dayanımı değerini (“Yapay Sinir Ağları ve Phytia 1.6 Programı” ile denklemi elde edilmiştir) veren simülasyon programı “Visual Studio 2008 Express Edition” programıyla ve kaynak esnasında numuneler üzerindeki zamana bağlı üç boyutlu sıcaklık dağılımını veren ısı analizi “cfdesign” programı ile gerçekleştirilmiştir.

AISI 316 çeliği ile Ck 45 çeliğini sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirmeden önce, AISI 316 çeliği sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ve kaynaklı numunelere çekme testi uygulanarak çekme dayanımı tespit edilmiştir. Böylece sürtünme kaynağı parametrelerinin AISI 316 çeliğinin kaynak mukavemetine olan etkisi ön bilgi olarak elde edilmiştir. Daha sonra AISI 316 çeliği ile Ck 45 çeliği sürtünme kaynağı ile 19 farklı kaynak parametresi kullanılarak birleştirilmiştir ve bu malzemelerin kaynağında sürtünme kaynağı yönteminin kullanılabilir olduğu görülmüştür. Kaynak işleminden sonra, kullanılan kaynak parametrelerinin kendi aralarında doğrusal bir ilişkinin varlığını belirlemek için parametreler ile kaynaklı numunelerden edilen çekme dayanımı ve numunelerde gerçekleşen boyda kısalma miktarları, flaş çapı ve genişliği regresyon analizi ile istatistiksel olarak test edilmiştir. Test sonucunda kaynak parametrelerinin birbirleri ile doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu görülmüştür. 3000 dev/dk dönme hızı, 100 MPa sürtünme basıncı, 10 s sürtünme süresi, 200 MPa yığma basıncı ve 20 s yığma süresi optimum kaynak parametreleri olmuştur. Bu parametrelerle kaynak yapılan numunenin çekme gerilmesi 702.15 MPa ile ana malzemeden (AISI 316: 663.53 MPa) % 5.8 daha fazla çıkmıştır. Yapılan mikro yapı incelemesi sonucunda AISI 316 çeliğinde kaynak sonrası dinamik yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği, Ck 45 çeliğinde ise kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde martenzit yapının oluştuğu ve ısıdan etkilenmiş bölgenin, AISI 316 çeliğinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliği ile Ck 45 alaşımsız asal çeliği sürtünme kaynağı ile birleştirilmesinde en etkili kaynak parametrelerinin sürtünme zamanı ve yığma basıncı olduğu görülmüştür. İstatistiksel model de bu sonucu desteklemiştir.

1.1 Literatür Araştırması

Sönmez, sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş yüksek hız çeliği (HSS) ve AISI 1040 çeliklerinde mukavemet ve metalürjik özellikleri incelemiştir. Çalışmasında, yüksek hız çeliği S 6-5-2 (HSS) ve orta karbonlu çelik türü olan AISI 1040 çeliği sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi ile birleştirilmiş ve optimum kaynak parametreleri elde etmiştir. Daha sonra, optimum parametrelerde birleştirilen parçalara, 650 °C 'de 4 saat süresince tavlama uygulamıştır. Bu birleştirmelerin

mukavemet ve metalürjik özelliklerini incelemiştir. Sürtünme süresinin 4 saniye, sürtünme basıncının 110 MPa, yığma süresinin 20 saniye ve yığma basıncının 150 MPa olduğu kaynak parametreleri ile en yüksek çekme mukavemeti elde etmiştir. Elde edilen en yüksek çekme mukavemeti (600 MPa) değeri, daha düşük dayanımı olan AISI 1040 (800 MPa) çeliği mukavemetinin % 75 'i kadar çıkmıştır [2].

Arivazhagan ve arkadaşları, AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik ile AISI 4140 düşük alaşımlı çeliği sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi kullanarak sürtünme kaynağı ile birleştirmişler. Kaynaklı numunelerin 500 °C ve 550 °C sıcaklıklarda erimiş tuzlu [$\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ (% 60)] ortamda laboratuvar tipi tüp fırında 50 defa yapılan bir saat ısıtma ve 20 dakika soğutma ile sıcak korozyon davranışlarını araştırmışlardır. Kaynak işlemini, 1500 dev/dk, sürtünme yükü 37.5 kN, yığma yükü 50 kN ve boyda kısıalma miktarını 5 ve 12 mm olarak yapmışlar. Isıdan etkilenmiş bölge AISI 4140 tarafında daha geniş, AISI 304 tarafında çok az görmüşlerdir. Elektron prob mikro analizinde (EPMA) kaynak esnasında Cr ve Ni elementlerinin paslanmaz çelik tarafından düşük alaşımlı çelik tarafına, demir elementinin ise, düşük alaşımlı çelik tarafından paslanmaz çelik tarafına difüze olduğunu tespit etmişler. EDAX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) analizinde kaynak yerinde maksimum Cr_2O_3 ölçülmüş, kaynak yerinden AISI 4140 çeliğinin ısıdan etkilenmiş bölgesine gidildikçe azalmış ve AISI 4140 çeliği tarafında ise yok denecek kadar az olduğu tespit edilmiştir. AISI 4140 çeliği üzerinde Fe_2O_3 ölçülmüş, bu bölgeden ısıdan etkilenmiş bölgeye ve kaynak yerine gittikçe azaldığı tespit edilmiştir [3].

Domblesky ve Kraft, AA2024/AA2024 ve AISI 304/304 benzer metallere AISI 304/AISI 1018 ve AISI 1018/ETP Cu benzer olmayan metalleri sürtünme kaynağı ile birleştirerek, bu metallerin yığma performanslarını metalografik incelemeyle belirlemeye çalışmışlar. Aynı metal numunelerinin sıcak çalışmadan sonra mikrosertlik ve mikroyapı sonuçları ana metal parçalarını çevreleyen kaynak çevresi ile oldukça düzgün ve tutarlı çıkmıştır. Farklı metal numunelerinde, asimetrik bir sertlik eğimi oluşmuştur. Güçlü olan metal tarafında, ana metalden kaynak çizgisine doğru sertlik eğilimi artarken diğer tarafta ana metalden daha zayıf olduğu tespit edilmiştir [4].

Özdemir ve arkadaşları, AISI 304L ile AISI 4340 alaşımlı çeliği sürtünme kaynağı ile birleştirerek, dönme hızının ara yüzey özelliklerine etkisini araştırmışlar. Sürtünme basıncı ve zamanını, yığıma basıncı ve zamanını sabit tutup, beş farklı dönme hızı uygulamışlar. Dönme hızının artışı ile kaynak ara yüzeyinden çok fazla kütle dıŖa çıkması sonucu ara yüzey ful plastik deformasyon bölgesinin kalınlığının azaldığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda dönme hızının artmasıyla çekme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir [5].

El Wahabi ve arkadaşları, farklı karbon içeren AISI 304L (% 0.02 C) ve AISI 304H (% 0,087 C) ostenitik paslanmaz çeliklerin sıcak deformasyon davranışını incelemişler. Testleri her iki çelik için farklı sıcaklıklarda ve farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirerek, gerilme deformasyon eğrileri içeren grafikler elde etmişlerdir. Her iki çelik için eğrilerin çoğunda tek pikli dinamik yeniden kristalleşme görmüşler. Seçilen yüksek sıcaklıklarda en düşük deformasyon hızında çok pikli dinamik yeniden kristalleşme davranışını gözlemlemişler. Çalışmalarında iki çelik için karbon oranının dinamik yeniden kristalleşme ve dinamik yeniden kristalleşme kinetiği üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [6].

Sahin, değişik çaplarda ve birbirine eşit çaplarda AISI 1040 çeliğinin sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi esnasında flaş oluşumunu simüle eden bir bilgisayar programı hazırlamıştır. Program “Microsoft® Visual Basic™ 6.0” ile kodlanmış. Parametre optimizasyonu; yığıma zamanı (20 s), yığıma basıncı (110 MPa) ve dönme hızı (1440 dev/dk) parametreleri sabit tutularak, “deneylerin faktöriyel tasarımı” kullanarak optimum sürtünme süresi (5 s) ve sürtünme basıncı (30 MPa) tespit edilmişler. Bu simülasyon programdan elde edilen kaynak parametrelerinin aynı çapta veya farklı çapta kaynak numuneleri için kullanılabilir olduğunu savunmuştur. Malzemelerin çap oranı arttıkça, çekme dayanımının düştüğünü tespit etmiştir [7].

Alvise ve arkadaşları, atalet sürtünme kaynak işleminin ayarlarını kolaylaştıran, kaynak işlemini görselleştiren ve kaynak işleminin kalitesini tanımlamaya yarayan bir simülasyon için sonlu elemanlar kodu geliştirdiler ve deneysel geçerliliğini araştırmışlardır. Mekanik denklemlerin yanında atalet fiziği,

güçler ve sürtünme de hesaba katılmıştır. Mekanik denklemler, aynı zamanda mini-element olarak bilinen $P1^+/P1$ enterpolasyonu ile karışık bir hız-basınç formülü ile çözülmüş, parçalar üzerindeki basınç değişimini dikkate almamışlardır. Parçaların dönme hareketi yüzünden bilinmeyen üçüncü bir düğüm, dönme hızına ($V\theta$), V_r , V_z bileşenleri de eklemişler. Termal hesaplamayı etkileyen akış ve sürtünme parametreleri ve mekanik çözüm ile birleştirmişler. Benzer olmayan malzemelerin kaynak ara yüzeyinde meydana gelen flaş oluşumunu modelleyen temas algoritması uygulamışlar. Atalet sürtünme kaynağındaki fiziksel olaylara uygun sürtünme kanunu için yeni bir formül denemişlerdir. Nümerik modelden elde edilen değerlerle deneysel verilerden elde edilen değerler arasında maksimum sapma sıcaklık değerinde % 6.6, flaş yarıçapın da % 1.1 ve flaş genişliğinde % 3.8 olarak görmüşlerdir. Aynı zaman da boyda kısalma miktarlarını kıyaslamışlardır [8].

Sahin, istatistik metodunu kullanarak optimum parametrelerini elde etmek için farklı sürtünme süresi ve sürtünme basınç altında pilot kaynak deneyler yapmıştır. Parametre optimizasyonu deney faktöriyel tasarım kullanarak çekme dayanımına göre gerçekleştirmiştir. Sürtünme süresi ve sürtünme basıncı iki faktör olarak seçmiştir. Yığma zamanı, yığma basıncı ve dönme hızı gibi diğer parametreler sabit tutmuştur. Regresyon katsayılarının optimal tahminleri “Fisher Oranı Yöntemi” kullanılarak elde etmiştir. Kaynaklı bağlantıların (numune sayısı 5 adet) dayanımı belirlemek için çekme testi, yorulma testi ve çarpma testi yapılarak ana malzeme dayanımı ile karşılaştırmıştır. Denklemden elde edilen çekme dayanımı % 90 gerçek çekme dayanımına yakın çıkmıştır. Kaynaklı numunelerin çekme dayanımı ana malzemenin çekme dayanımından % 4 düşük çıkmıştır [9].

Sahin ve arkadaşları, çalışmalarında bakır (% 98 saf ticari bakır) ile iki farklı çeliği (DIN-X 30 W Cr V 93=H21 ve DIN-1141=1015) sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirmişler. Sürtünme kaynağı işlemini tetikleyen ısı transferi mekanizması test edilmiş ve bu mekanizmayı yöneten bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu modelde, iki farklı silindirik metal çubuğun sürtünme kaynağı için geçişken iki boyutlu ısı iletim denklemi oluşturmuşlardır. Teorik tahminler ile deneysel çalışmalardan elde edilen bilgileri ilişkilendirebilmek için deneyleri farklı kaynak koşullarında yapmışlardır. Kaynak ara yüzeyinde sürtünme katsayısı ve basıncı sabit

ve yüzey boyunca üniform varsayımlardır. Sonlu fark tekniğini kullanarak kaynak yerinin merkezinden çevreye doğru sıcaklık değişimini hesaplayan formül geliştirmişler. Bu formülü kullanarak maksimum sıcaklığın kaynak işlemi esnasında merkezden uzakta yüzeye yakın, ama yüzeyde olmadığını tespit etmişlerdir. Normalde çevresel hızın yarıçapa bağlı olarak artmasından dolayı maksimum sıcaklığın yüzeyde olması gerekirken, dönme işlemi esnasında yüzeyde meydana gelen konveksiyonla soğumadan dolayı yüzey sıcaklığının azalmış olduğuna karar vermişlerdir. Kaynak işleminde, kaynak parametrelerinden dönme hızı, sürtünme zamanı ve basıncının etkili olduğunu tespit etmişlerdir [10].

Maalekian ve arkadaşları, çelik çubukların yörüngesel sürtünme kaynağının ısı analizini farklı ısı üretim modeli kullanarak yapmışlardır. Sabit coulomb sürtünmesi (Constant friction coefficient=sabit sürtünme katsayısı), kayma yapışma sürtünmesi (Sliding-sticking friction), ölçülmüş güç yayılma metodu (Experimental power dissipation), ve ters ısı iletim metodunu (Inverse heat conduction method) kullanarak dört farklı yöntemle analiz etmişlerdir. Isı ölçümünü kaynak ara yüzeyinden ana malzemeye doğru 2.5 mm, 5 mm ve 7.5 mm mesafeye termokupl yerleştirerek yapmışlardır. Analizlerden elde edilen veriler ile deney esnasında ölçülen sıcaklık değerlerini kıyaslayarak ısı üretim modellerini test etmişlerdir. Ters ısı iletim yönteminin en doğru yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir [11].

Cheng, boru şeklindeki AISI 4140 alaşımlı çeliğin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi esnasındaki geçişken sıcaklık dağılımını elde etmiştir. Değişken termal özellikleri, zamana bağlı ısı girişini ve kaynak sırasındaki faz değişimlerini yaptığı analizde ele almıştır. Aynı zamanda farklı malzemedeki yapılmış boruların sürtünme kaynağı esnasındaki geçişken sıcaklık dağılımını incelemiştir. Isı dağılımı eksenel yönde ara yüzey çevresinden vermiştir [12,13].

Sun ve arkadaşları, ostenitic paslanmaz çeliği (Fe-0.08C- 18Cr- 11Ni-0.2Mo-0.06Ti all wt%) öğütülmüş sementit karpit kesici (ISO K30) ile farklı hızlarda kesmişler ve kesici (freze kesicisi) ile numune arasında gerçekleşen yapışma mekanizmasını incelemişlerdir. Kesici yüzeye yapışan tabakadaki tane çapını mikroyapı incelemesi ile tespit etmeye çalışmışlardır. Kesme hızı ve kesme

süresinin aşınmanın ana faktörü olduğunu belirtmişlerdir. Frezeleme orta hızda yapılırsa, ara yüzeyde oluşan karşılıklı erimeden dolayı gerçekleşen elementlerin difüzyonu ve yeniden kristalleşme ile krater tabakanın kesici yüzeyine yapışma veya kaynakla güçlü birleştiğini belirtmişlerdir. Frezeleme düşük hızda yapılırsa yapışkan tabakanın oluşmadığı ve sadece kesici yüzeyi üzerinde çukur tipi kırılmaların oluştuğunu belirtmişlerdir. Frezeleme yüksek hızda yapıldığında ise kesici yüzeyi üzerinde krater ve yapışma olmadığını belirtmişlerdir [14].

Maki ve arkadaşları, 18-8 paslanmaz çeliği ve 18 Ni Maraging çeliğinde 800°C ile 1200 °C sıcaklıkları arasında sıcak çalışma esnasında oluşan dinamik yeniden kristalleşmeyi araştırmışlardır. Malzemenin sıcak deformasyonundan önce ve sonra tane boyutunu ölçmüşler ve tane yapısını incelemişlerdir. Paslanmaz çeliğin testten önce normal ostenit mikro yapısında tavlama ikizleri ve tane sınırlarının düz çizgisel yapıda olduğunu gözlemlemişlerdir. Sıcak deformasyonun ilk aşamasında ostenit tane sınırında ince tırtıklı, şişkin yapı ile orijinal yapıyı bir arada olduğunu tespit etmişlerdir. Sıcak deformasyon miktarı arttıkça ostenit tane sınırı ve tavlama ikizleri sınırlarında ince taneli dinamik yeniden kristalleşmeyle oluşmuş taneleri tespit etmişlerdir. Deformasyon daha da arttıkça orijinal ostenit yapı ve tavlama ikizlerinin yerine tamamen yeni yeniden kristalleşmiş taneler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sıcaklık veya deformasyon miktarı arttıkça yeni oluşan tane boyutunun küçüldüğünü tespit etmişlerdir [15].

Atsushi ve arkadaşları, 1160 °C 'de vakum içerisinde, 80 dakika sürede sinterlenmiş yüksek karbonlu ve yüksek kromlu çelik (PM) ile piyasadan temin edildiği gibi kullandıkları S25C çeliğini sürtünme kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak öncesi ve sonrası malzemelere üç ayrı şekilde ısıl işlem uygulayarak kaynaklı numunelerin mekanik ve metalürjik özelliklerini test ederek, kaynak bağlantısının dayanımını araştırmışlardır. Birincisinde kaynak öncesi ve sonrası malzemelere ısıl işlem uygulamadan, ikincisinde kaynak işleminden sonra malzemelere ısıl işlem yaparak ve üçüncüsün ise malzemelere ısıl işlem uyguladıktan sonra kaynak yaparak test işlemini gerçekleştirmişlerdir. Malzemelere önce su verme ve devamında menevişlenme ısıl işlemini uygulamışlardır (vakum sertleşmesi [16]). Yaptıkları çekme testinde, birinci tip kaynakta dayanım yetersiz ve kırılma

kaynak yerinde, PM metalinin ısıdan etkilenmiş bölgesinde ve PM ana metalinde görmüşlerdir. İkinci tip kaynakta kırılma PM ana metalinde (çekme dayanımı 21 kgf/mm²) ve ortalama olarak 30.1 kgf/mm² olarak en yüksek değerde olduğunu görmüşlerdir. Üçüncü tip kaynakta dayanım en düşük çıkmış ve kırılma kaynak yeri ve PM metalinin ısıdan etkilenmiş bölgesinde görmüşlerdir [17].

Zhang ve arkadaşları, atalet sürtünme kaynağı işleminin ısıalanını simüle etmek için bir ısı-mekanik sonlu elemanlar bağıntısı kurmuşlar ve Msc. Marc yazılımı baz almışlardır. GH4169 süper alaşımlı iki benzer numunenin atalet sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi esnasında geçici sıcaklık dağılımını hesaplamışlardır. Numunelerin dairesel enine kesit alanı dört düğümlü izoparametrik (aynı değiştirgesel) elementlere bölünmüştür. Bu modelde, ısıya bağlı termal özellikler, zamana bağlı ısı girdileri, kaynak ara yüzeyinin temas şartları ve flaşın deformasyonu göz önüne alınmıştır. Aynı zamanda numunelerin yüzeyindeki konveksiyon ve radyasyon nedeni ile oluşan ısı kayıpları da hesaba katmışlardır. Sıcaklık verileri 'armored thermocouple' kullanılarak elde etmişlerdir. Bu sistem kullanılarak kaynak ara yüzeyine 3.5 mm, 5.1 mm ve 5.5 mm uzaklıklardaki sıcaklıkları ölçmüşlerdir. Hesaplanan sıcaklık değerleri ile deneylerden elde edilen sıcaklık değerleri kıyaslanmış ve değerlerin oldukça iyi örtüştüğü belirtmişlerdir [18].

Uzku ve arkadaşları, egzoz supabının sap kısmının imalatında kullanılacak olan X45CrSi93 çeliği (Çekme dayanımı 1030 MPa) ile egzoz supabının kafa (tabla) kısmının imalatında kullanılacak olan X53CrMnNiN219 çeliğini (çekme dayanımı 1120 MPa) sürtünme kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak parametrelerini 3000 dev/dk 'da, sürtünme süresi 3.7 saniye, sürtünme basıncı 207 MPa, yığma basıncı 414 MPa, ve yığma süresi 2 saniye olarak sabit almışlar. Kaynaklı numunelere mekanik ve metalografik incelemeler yapmışlardır. Çekme dayanımı 1081 MPa çıkmış ve kırılma X53CrMnNiN219 çeliği tarafında ve kaynak bölgesinde olmadığını belirtmişlerdir. Sertlik değerinin kaynak bölgesinde maksimum değere ulaştığını tespit etmişlerdir. Metalografik incelemede tane yassılaşması küçülmesinin deformasyona dik istikamette tanelerin yönlenmesi şeklinde olduğunu görüntülemişlerdir [19].

Gül, farklı metelse malzemelerinin sürtünme kaynağında, kaynak parametrelerinin dikış özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmasında, bakır alaşımı (CuCrZr, çekme dayanımı 370 MPa) ve otomat çeliği (9SMn28, çekme dayanımı 585 MPa) numuneleri sürtünme kaynağı ile farklı parametre gruplarında kaynak yapmış ve elde edilen kaynak bağlantılarının mekanik özellikleri incelemiştir. Elde edilen çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, sürtünme basıncı azaltılıp, sürtünme zamanı arttırıldığıça çekme dayanımının düştüğu, diğer bir deyişle, düşük sürtünme süresi ve yüksek sürtünme basıncı ile yapılan numunenin çekme dayanımının, yüksek sürtünme süresi ve düşük sürtünme basıncı ile yapılan numuneden daha fazla olduğu görmüştür. Artış oranının % 50 'nin üzerine çıktığı dahi saptamıştır. En yüksek çekme dayanımı (309.78 MPa), sürtünme süresinin 5.5 saniye, sürtünme basıncının 68 MPa, yığma süresinin 10 saniye ve yığma basıncının 82 MPa olduğu kaynak parametreleri ile elde edmiştir [20].

Dinç, AISI 1040 ve AISI 304 çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğini araştırmıştır. Çalışmasında, AISI 304 (çekme dayanımı 881.2 MPa) paslanmaz çeliği ve AISI 1040 (çekme dayanımı 915.1 MPa) çeliğinin sürtünme kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynak sırasında, kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı ile kaynak yerinin sıcaklık değişimleri ölçmüştür. Kaynak sonrası numunelere çekme, sertlik deneyleri uygulanmış, mikro yapı incelemeleriyle birlikte EDS analizleri yapılarak optimum kaynak parametrelerini saptamıştır. En yüksek çekme dayanımı (792,4 MPa, düşük mukavemeti olan AISI 304 çeliğinin çekme dayanımından % 10 daha düşük), 3000 dev/dk 'da, sürtünme süresinin 6 saniye, sürtünme basıncının 20 daN/cm², yığma süresinin 6 saniye ve yığma basıncının 20 daN/cm² olduğu kaynak parametreleri ile elde edmiştir [21].

Uzun, sürtünme kaynak makinesinin imalatı ve kullanabilirliğini araştırmıştır. Deneysel amaçlı bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak tezgâhı tasarlanmış ve deneysel çalışmalarında kullanmıştır. Geliştirilen cihazda sürtünme ve yığma basıncı için pnömatik tahrikli piston silindir düzeneği kullanmıştır. Sanayi uygulamalarında en çok tercih edilen malzeme olan AA 2024 ile AA 2024 numuneleri ve AA 6063 ile AA 6063 numuneleri imalatı gerçekteştirilen sürtünme kaynak tezgâhı kullanılarak birleştirmiştir. Deneysel numuneleri mekanik testlere tabi tutularak çekme ve sertlik

dayanımları incelemiştir. Yapılan testler sonucu AA 2024 alaşımı için en iyi kaynak, sürtünme süresinin 24 saniye, sürtünme basıncının 4 bar, yığıma süresinin 2 saniye ve yığıma basıncının 4 bar olduğu kaynak parametreleri ile elde etmiştir. AA 6063 alaşımı için ise, sürtünme süresinin 20 saniye, sürtünme basıncının 2.5 bar, yığıma süresinin 3 saniye ve yığıma basıncının 2.5 bar olduğu kaynak parametreleri ile elde etmiştir [22].

1.2 Sürtünme Kaynağı

1.2.1 Giriş

Metali keşfettikten sonra günlük hayatında verimli bir şekilde kullanmak isteyen insan metallerin eritilmesi ve birleştirilmesi hususunda derin araştırmalarda bulunmuş ve bu araştırmalar sonucunda da günümüzdeki kaynak teknolojisine yön vermiştir. Yaklaşık 3500 yıl önce, iki metal parçası sıcak durumda çekilenecek ilk kaynaklı birleştirme gerçekleştirilmiştir [22]. Tarih içerisinde kaynak teknolojisi gelişmeler göstererek günümüzdeki modern kaynak teknikleri kullanılmaya başlanmış ve farklı malzemeler başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.

Kaynaklı yapı elemanları kullanılarak imalat yapma, mümkün olan en düşük maliyette, fonksiyonunu tam olarak yerine getirme ve işletmede uzun süre kullanılma imkânı sağlamıştır [1]. Kaynak teknolojisinde kullanılan yöntemlerin tarihsel gelişimi Tablo 1.1 'de verilmiştir [22].

Kaynak; parçaların ısı veya basınç ile ya da her ikisini de uygulayarak, ilave malzeme kullanarak veya kullanmadan yapılan birleştirme işlemidir. Bu işlem esnasında birleştirilecek malzemelerin kaynak bölgeleri plastik veya sıvı duruma getirilmektedir. Klasik kaynak yöntemlerinde sıvı katılaştığı zaman, bağlantının iki elemanı arasında yük taşıyabilen metalden bir köprü oluşur. Elemanların yüzeyinden eriyen metal bir köprü oluşturmak için yeterli olmayabilir. Bu durumda yeterli mukavemete sahip bir metal köprü sağlanması için dolgu metali adı verilen ilave metal kullanımı gerekir [2,23,24].

Tablo 1.1 Kaynak teknolojisinin tarihsel gelişimi

M.Ö. 3500- M.Ö. 1000 Lehimleme ve Demirci Kaynağı	
1890	*Karbon elektrot ile ark kaynağı *Elektrik direnç kaynağı *Tel elektrot ile kaynak *Ergiyen elektrot ile kaynak
1900	*Havanın sıvılaştırılması *Asetilenin aseton içinde çözündürülmesi *İlk kaynak üfleci (oksi-asetilen)
1910	*Örtülü elektrot ile ark kaynağı
1920	*Oksijenle kesme *Gazaltı kaynağı
1930	*Tozaltı kaynağı
1940	*Soğuk basınç kaynağı *Sürtünme kaynağı *Ultrasonik kaynak
1950	*Plazma arkı ile kesme *Elektron ışın kaynağı *Difüzyon kaynağı
1960	*Plazma ark kaynağı
1970	*Lazer kaynağı *Kaynak yöntemlerinin mekanizasyon ve otomasyonu *Kaynak robotları
1980	*Kaynak robotlarının yaygın kullanıma girmesi
1990	*Özel kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi (Elektroerüf Kaynağı) *Sürtünen elemanla birleştirme kaynağı *Manyetik alan kaynağı
2000	*Hybrid kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi (Laser-MIG/MAG, Laser –TIG, TIG-Plazma Ark)

Bir kaynak bağlantısında yeterlik mukavemet sadece atomlar arası bağ yoluyla oluşturulabilir. Bu nedenle bir kaynak işleminin birinci işlevi birleşme ara yüzelerindeki atomlar arasında bağlar oluşmasını sağlamaktır. Bu bağların oluşması için iki şart gereklidir. Birincisi, yüzeyler tam bir temas halinde olmalıdır. Bunun anlamı yüzeylerin atomsal mertebede düzgün olması yani yüzeler bir araya getirildiklerinde karşılıklı yüzey atomları arasındaki uzaklığın malzeme içindeki atomlar arası uzaklığa (yani $1,24 \times 10^{-10}$ m) eşit olmasıdır. İkinci olarak, yüzeyler metalürjik olarak temiz olmalıdır [1]. Malzemeleri uygun şekilde birleştirebilmek için kaynak yöntemleri geliştirilmiştir.

Difüzyon hipotezine göre temas halindeki yüzeyler arasında sağlam bir bağ oluşumu malzeme atomları arasındaki difüzyona bağlıdır [23]. Sonuçta, bir pratik kaynak sistemi basit atomlar arası bağ oluşturma fikri üzerine kurulmuş ise bu kaynak sisteminin yüzeyleri tam bir temas haline getirecek ve aynı zamanda da yüzeydeki maddeleri dağıtacak vasıtalara sahip olması kesinlikle gereklidir [1].

Bu zorlukları ortadan kaldırarak, malzemeleri uygun bir şekilde kaynak yapmak için katı hal kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Katı hal kaynak yöntemleri dolgu metal ilavesi ve katkı malzemesi olmadan ana metalin erime noktası altında aslında yüksek sıcaklıkta ve basınç altında elde edilmektedir. En basit şekliyle katı hal kaynak tekniğinde kaynak ara yüzeyinde bağlantı (köprü) kurmak için bir iş parçasının atomları ile diğer iş parçasının atomlarını yeterince yakınlaştırarak atomlar arası bağ kuvvetlerinin kurulmasına ihtiyaç vardır [23, 25,s.303, 26,s.444]. Bu noktada günümüzde yaygın olarak endüstride kullanım alanı bulan bir katı hal birleştirme kaynağı olan sürtünme kaynağı önem kazanmaktadır. Bu yöntemle bir problem olarak görülen farklı malzemelerin birleştirme işlemi başarıyla gerçekleştirilebilmektedir. Sürtünme kaynağı yönteminde dolgu metali, erikten ve koruyucu gaza ihtiyaç yoktur [27,s.739-761].

1.2.2 Sürtünme Kaynağının Tarihçesi

Sürtünme kuvvetleri, daima hareketi önleyecek yönde etkilediğinden, mühendislikte çok defa bir enerji kaybı olarak görülür ve bunun da mümkün olduğu kadar küçültülmesi için çalışılır. Tarih öncesinde dahi insanlar ateş yakmak için sürtünme ısısından yararlanmışlardır. Sürtünme enerjisinden doğan ısıdan faydalanabilmek ve bu ısyı malzemelerin kaynağı ve şekillendirilmesi için kullanma fikri, oldukça eskidir. Sürtünme kaynağının başlangıcı 15. yüzyıla kadar gitmektedir, fakat konu ile ilgili ilk patent 19. yüzyılda 1891 'de Amerikalı makineci J.H. Bevington tarafından alınmıştır [2,20,22,28]. Bevington sürtünme ısını kullanarak metal boruların kaynağını gerçekleştirmiştir. Daha sonraları konu ile ilgili W. Richter tarafından 1924 yılında İngiltere 'de (patent no: 572789) ve H. Klopstock tarafından Sovyetler Birliği'nde birer patent alınmıştır. 1929 yılında

Almanya 'da (Dr-patent no: 477084), H. Klopstock ve A.R. Neelands silindirik parçaların sürtünme kaynağı için 1941 yılında bir patent almışlardır. Ayrıca 2. Dünya savaşı sırasında Almanya ve Amerika 'da plastik malzemelerin kaynağı için sürtünme kaynağı kullanılmıştır [2,20].

Bununla birlikte sürtünme kaynağının ticari bir süreç olarak gelişimi ve konu ile ilgili bilimsel çalışmaların başlaması bir Rus makinist tarafından gerçekleştirilmiştir. Rus makinist AJ. Chdikov iki metal çubuk arasında başarılı bir kaynak gerçekleştirerek 1956 yılında Sovyetler Birliği 'nde (patent no: 106207) konu ile ilgili bir patent almıştır. Sovyetler Birliği'ndeki daha yoğun çalışmalar Vill ve arkadaşları tarafından yürütülmüştür. Bu kaynak işlemi ABD 'ye 1960 yılında girmiştir. American Machine and Foundry Co. da Holland ve Cheng adlı araştırmacılar sürtünme kaynağının termal ve parametre analizleri üzerine çalışmışlardır. İngiltere 'de ilk sürtünme kaynağı kaynak enstitüsü tarafından 1961 yılında üretilmiştir. 1962 Yılı itibariyle ise Sovyetler Birliği 'nde, birçok fabrikada sürtünme kaynağı kullanılır hale gelmiştir (Kharkov ısıtma ve havalandırma fabrikası, Lysbensk metal fabrikası, Vitebsk takım fabrikası, K. Gotwald otomobil fabrikası, Minsk traktör fabrikası vb.). Yine 1962 yılında ABD 'de Caterpillar Tractor Co. sürtünme kaynağını modifiye ederek atalet kaynağı olarak anılan yöntemi geliştirmiştir ve bundan sonra konvansiyonel sürtünme kaynağı Rus tipi proses, atalet kaynağı ise Caterpillar tipi proses olarak adlandırılmıştır. Bu tarihten itibaren daha hızlı gelişme gösteren süreç hızla bütün dünyaya yayılmış ve birçok endüstride uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde sürtünme kaynağı modern kaynak yöntemleri arasında elektron ışın kaynağından sonra pratikte en çok uygulama alanı bulmuş olan yöntemdir [2,20].

1.2.3 Sürtünme Kaynağının Yöntemi

İki yüzey bir yağlayıcı olmadan birlikte ovuşturulduklarında ara yüzeyde aradaki sürtünmeden dolayı mekanik enerji ısı enerjisine dönüşür. Sürtünme direncinin ısıya dönüşen kısmı, malzemeleri çok dar bir bölgede de olsa kaynak yapma, hatta ergitme sıcaklığına kadar yükseltebildiği için, bu enerjiden sürtünme

kaynağı yapabilmek için faydalanılmaktadır [28,29,s.536-537, 30-33]. Sürtünme kaynağı elektriksel enerji veya diğer enerji kaynaklarından yararlanmaksızın, çalışma parçalarının ara yüzeylerinde mekanik olarak oluşturulan sürtünme yoluyla üretilen mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısıdan yararlanılarak yapılan bir kaynak tekniğidir [2,20].

İki iş parçasının birbirine teması ve basıncın birleştirme etkisi, malzemenin birleşme yeri ara yüzeyinin ısınması ve plastik şekil değiştirme oluşumu vasıtasıyla malzemelerin kaynaşması sağlanır. Normal şartlarda ara yüzeydeki maksimum sıcaklık erime sıcaklığının hemen altında olduğundan sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak tekniğidir [28,30-33].

Kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler basınç altındadır ve ısıtma fazı ya da sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç yüzeylerde plastik şekil verme sıcaklığı oluşana kadar sürer. Çoğu durumda ısıtma fazı sonrasında basınç artırılarak ara yüzeydeki ısıtılmış metal yığılır. Böylece kaynak bölgesi bir tür termomekanik işleme tabii tutulmuş olur ve dolayısı ile bu bölge iyi bir tane yapısı gösterir [20].

Sürtünme kaynağı yapılan kaynak yerinde malzemelerin birbirine geçiş yaptığı bir bölge ile bunun etrafında her iki ana malzemenin ısıdan etkilenen bölgeleri bulunmaktadır. Malzemelerin birbirine geçiş yaptığı bölgede, her iki malzeme atomlarının karşılıklı olarak birbiri içine difüzyona uğradıkları görülür. Eğer bu bölgede mekanik olarak bir karışma ve girdap olayı da varsa, difüzyon olayı daha geniş bir bölgede cereyan etmektedir. Isıdan etkilenen bölgeler (metalürjik dönüşümün gerçekleştiği bölgeler) genellikle kaynak yapılırken oluşan sıcaklığın yaklaşık olarak malzemelerin ergime sıcaklığının yarısına kadar yükseldiği ve bu sıcaklığın üzerine çıktığı yerlerdir. Frenleme ve yığılma anında (yığılma basıncı etkisi altında) bağlantıda meydana gelen sıcak torsiyon tane küçülmesine yardımcı olur. Bir dizi bozucu metalürjik olay, örneğin iri tane oluşumu bu arada önlenir. Kaynak dikışı bölgesindeki yüksek soğuma hızı dönüşme sertleşmesi yapan çeliklerde martenzit oluşumuna neden olabilir [20].

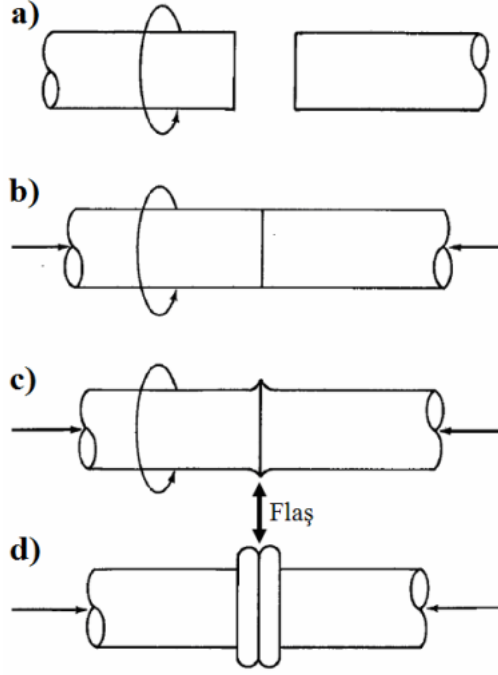
Bundan dolayıdır ki, diğer yöntemlerle kaynak edilemeyen metaller ve metal alaşımları rahatlıkla kaynak edilebilir. Bilindiği gibi parçalar arasında kaynak bağı oluşabilmesi için çıplak yüzeylerin temas haline gelmesi gerekir, sürtünme kaynağında bütün temassızlıklar sürtünme yolu ile giderildiği için bu temas çok iyi gerçekleşir. Normal şartlar altında sürtünen yüzeylerde bir ergime olayı oluşmaz, şayet çok küçük miktarlarda bir ergime oluşmuşsa da kaynak sonu uygulanan yığıma işleminden dolayı ergimiş metale ait bir delil bulunmaz [20,25,27].

Rölatif hareketin durdurulmasından sonra uygulanan yığıma basıncı etkisi ile plastik hale gelen malzeme bir çapak halkası (flaş) oluşturur. Bu arada birleştirilen parçalar aksel yönde kısılır. Böylece ilave malzeme kullanmaksızın, genellikle ısının tesiri altındaki bölgesi (ITAB) çok dar olan bir kaynak bağlantısı elde edilmiş olur. Çelikler için bağlantı bölgesindeki sıcaklık 900–1300 °C arasındadır [2]. Farklı cinsten malzemelerin sürtünme kaynağı esnasında intermetalik faz oluşumu, çeliklerin martenzitik içyapı dönüşümü, yüksek alaşımlı çeliklerde karbon azalması olayları meydana gelebilir. Intermetalik fazın oluşmaması veya azaltılması için ara malzeme kullanımı da yapılmaktadır [28,30].

1.2.4 Sürtünme Kaynağı İşlem Basamakları

Sürtünme kaynağı temel işlem basamakları Şekil 1.1 'de gösterilmektedir. İlk aşamada iş parçasının biri döndürülür ve diğeri sabit tutulur (Şekil 1.1a). İstenilen dönme hızına ulaşıldığı zaman aksel kuvvet (sürtünme basıncı) uygulanarak iki iş parçası birlikte bir araya getirilir (Şekil 1.1b). Bu esnada ara yüzeydeki sürtünme ile iş parçası bölgesel olarak ısınır ve yığılma başlar (Şekil 1.1c). Plastik deformasyon sonucu oluşan yığılmış malzemeye flaş denir ve düz bir kaynak yüzeyi isteniyorsa daha sonra yapılacak bir işlemle alınabilir (Şekil 1.1) [36,s.81]. Son olarak, dönen iş parçası durdurulur ve yığıma kuvveti (yığıma basıncı) uygulanarak işlem tamamlanır (Şekil 1.1d). Küçük çaplı parçaları birleştirmek için gerekli olan aşırı hızı önlemek için iki parça zıt yönde döndürülebilir [27,29].

Kaynak yapılacak olan alaşımın özelliğine göre bazı durumlarda ön ısıtmaya ihtiyaç duyulabilir. Uygulanan ön ısıtma, kaynağın ısıdan etkilenen bölgesindeki soğuma değerini düşürür. Böylece yumuşak bir birleşim sağlanır ve soğuma çatlaklarının oluşum ihtimali azaltılmış olur [22].



Şekil 1.1 Sürtünme kaynağı işlem basamakları

1.2. 5 Sürtünme Kaynağı Parametreleri

Konu ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalar, sürtünme kaynağı metodu üzerinde en etkili olan ve optimizasyonu gereken parametrelerin; sürtünme zamanı (t_s), sürtünme basıncı (p_s), yığılma zamanı (t_u), yığılma basıncı (p_u) ve dönme hızının (n) olduğunu göstermiştir. Bunların dışında durma süresi, numune geometrisi, malzemenin ısı kapasitesi, malzemenin şekil değiştirme yeteneği ve parça boyundaki aksel kısılma miktarı (Δl) gibi parametreler de birleştirmede etkilidir. Konu ile ilgili temel eserler incelendiğinde kaynak parametreleri ile ilgili şu genel sonuçlar çıkartılabilir [2,20,22,27,28,34].

1.2.5.1 Sürtünme Zamanı

Sürtünme süresi, malzemenin türüne ve şekline göre değişiklik göstermektedir. Sürtünen yüzeylerdeki olası kalıntı ve pislikleri temizleyecek ve gerekli plastik deformasyon için üniform bir kaynak bölgesi sıcaklığına ulaşmayı sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Tatminkâr bir kaynak bağlantısı için belirli bir minimum bir ısıtma süresi değeri aşılmalıdır. Buna karşın sürtünme süresinin aşırı uzun olması ITAB 'ın genişlemesine ve aşırı yığılmaya sebep olacaktır.

1.2.5.2 Sürtünme Basıncı

Sürtünme basıncı, numune geometrisi ve birleştirilecek malzeme çiftinin plastik şekil değiştirme yeteneğine bağlı olarak değişir. Bu kuvvet, temas eden ara yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek, yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve ara yüzeyde üniform bir ısıtma sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Genellikle yumuşak çelikler için sürtünme basıncı 30-65 MPa, orta karbonlu ve yüksek karbonlu çelikler için sürtünme basıncı 70-210 MPa değerleri arasındadır.

1.2.5.3 Yığma Zamanı

Malzeme çifti ara yüzeyinde gerekli plastik deformasyonu oluşturmak ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından biri olan difüzyonu hızlandıracak düzeyde olmalıdır. Durdurma safhası içinde kaynak yerindeki sıcaklık, hemen hemen sabit değerdedir. Fakat durdurma zaman aralığının bitiminden itibaren radyasyon ve kondüksiyon yoluyla olan ısı kayıpları nedeniyle bu sıcaklık düşmeye başlar. Bu nedenle dönme hareketi durdurulduğu anda hemen bir yığma basıncı uygulanmalıdır ki kaynaklanacak numuneler daha fazla soğumadan önce, sıcak işleme kaynak bağı tam olarak gerçekleştirilmiş olsun. Malzemede soğuma basıncı altında gerçekleşmelidir.

1.2.5.4 Yığma Basıncı

Sürtünme süresi sonrasında bir yığma basıncının uygulanması bağlantı kalitesini artırır. Malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır ve aşırı kaynak yığılmasına sebep olacak kadar yüksek, yetersiz kaynaklanmaya sebep olacak kadar düşük olmamalıdır. Yığma basıncı kuvveti, sürtünme süresi sonrasında iş parçaları arasında difüzyon mekanizmasını hızlandırmak amacıyla uygulanır ve bu malzemelerin sıcak dövme mukavemetlerinin altında olmamalıdır. Buna karşın yığma basıncı çok yüksek alınırsa aşırı metal deformasyonu oluşur. Genellikle yumuşak çelikler için yığma basıncı 75-140 MPa, orta karbonlu ve yüksek karbonlu çelikler için yığma basıncı 100-420 MPa değerleri arasındadır.

1.2.5.5 Dönme Hızı

Literatürde sürtünme kaynağında, ara yüzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerinde en etkili parametrenin çevresel hız olduğu söylenmektedir. Isı girdisi miktarında kaynak hızının çok önemli bir etkisi olduğundan kaynak hızına bağlı olarak hem mikro yapı hem de sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerde değişmektedir. Yüksek çevresel hız, yüksek ara yüzey sıcaklığı üretirken, düşük çevresel hız, yetersiz ısıtma sonucu kaynak bağlantısını olumsuz etkiler. Yüksek çevresel hıza bağlı olarak deformasyon hızının artışı, hem kaynak süresini kısaltır hem de ısı girdisini azaltır. Dönme hızı özellikle ITAB 'ın genişliğine etkir.

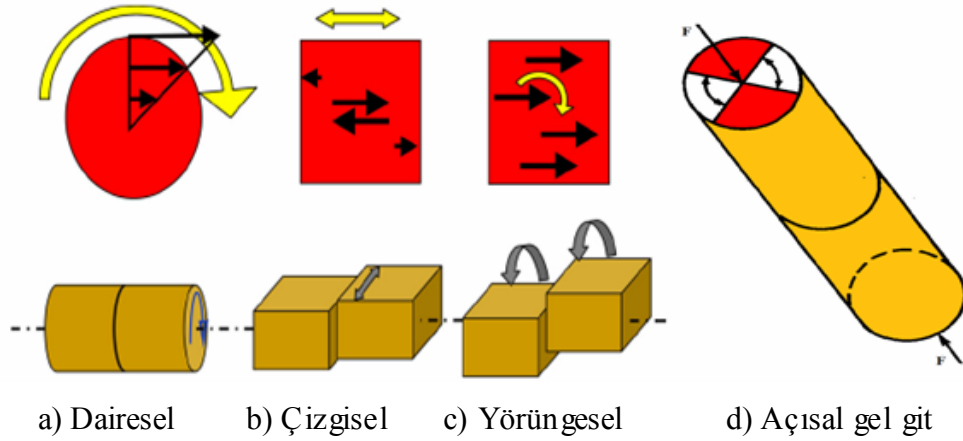
Genellikle çelikler için çevresel hız 1.2-1.8 m/s arasında önerilmektedir. Çevresel hız 1.2 m/s altında olursa çok yüksek momentler, dolayısıyla da üniform olmayan bir yığma oluşur. Eğer çevresel hız 1.8 m/s 'den büyük ise, yani yüksek hızlar kullanılırsa, kaynak bölgesinde oluşan aşırı ısınmayı önlemek için sürtünme basıncı ve sürtünme süresi çok dikkatli kontrol edilmelidir.

1.2.5.6 Durma Süresi

Kaynak ekinin büyüklüğüne ve şekline bağlı olarak çok büyük önem arz eder. Örneğin, ince cidarlı boruların sürtünme kaynağının başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için dönme hareketinin çok hızlı bir şekilde durdurulması, diğer bir deyişle durdurma zaman aralığının çok kısa olması gerekmektedir. Buna karşılık büyük çaplı dolu millerin sürtünme kaynağında, daha fazla kütle nedeniyle ısıyı daha fazla tuttuklarından ya da daha yavaş soğudukları için durma zaman aralığı daha geniş olabilir [2,33].

1.2.6 Sürtünme Kaynağı Çeşitleri

Sürtünme kaynağın da sürtünme enerjisi elde etmek için dört farklı hareket kullanıldığından kaynak tekniği dörde ayrılır: dairesel, yörüngesel, doğrusal (çizgisel) gel-git (linear reciprocating) ve açısal gel-git (angular reciprocating) hareketli sürtünme kaynağı (Şekil 1.2). Dairesel sürtünme kaynağı 1940 'dan, yörüngesel sürtünme kaynağı 1970 'den ve çizgisel sürtünme kaynağı 1980 tarihinden itibaren kullanılmaktadır [11,20,27,35].



Şekil 1.2 Sürtünme kaynağı teknikleri

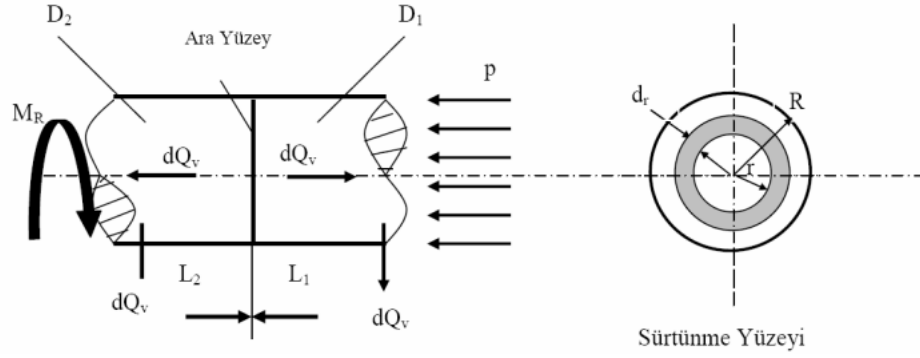
Sürtünme kaynağı uygulamalarının büyük çoğunluğunu dairesel kesitli çubukların ya da boruların kaynağı oluşturmaktadır. Bu tür uygulamalarda sürtünmeyi oluşturan temel hareket dönme hareketidir ve işlem dairesel (konvansiyonel) sürtünme kaynağı olarak adlandırılır (Şekil 1.2a). Çizgisel titreşim hareketinde parçalardan biri uygulanan basınç altında ileri geri titreşim hareketi yapar (Şekil 1.2b). Bu yöntem, alüminyum alaşımlarının kaynağında başarılı olarak uygulanır [36,s.81]. Yörüngesel hareket silindirik olmayan parçaların kaynağı için kullanılmaktadır. Bu uygulamada sabit duran parça üzerinde diğer parça bir kösesi dairesel bir yörünge çizecek şekilde hareket eder (Şekil 1.2c). Açısal gel git hareketi öncelikle silindirik plastik malzemelerin kaynağında kullanılmaktadır. Bu uygulamada dönme hareketi belli açı aralığında ileri geri şeklinde olur, yani tam dönme hareketi gerçekleşmez (Şekil 1.2d) [20,27].

1.2.6.1 Dairesel Sürtünme Kaynağı

Dairesel sürtünme kaynağı (aynı zamanda spin kaynağı da denir) [36,s.331], gerekli mekanik enerjiyi sağlayan kaynağa göre sürekli tahrikli ve volan (atalet) tahrikli olmak üzere ikiye ayrılır. Günümüzde bu iki yöntemin bileşimi olan kombine kaynak yöntemleri de geliştirilmiştir. Bu üç yöntemi birbirinden farklı yapan özellik, tahrik ve ilave basınç işleminin uygulama şeklidir [22,37].

Hem sürekli tahrikli ve hem de atalet sürtünme kaynağı için moment eğrilerinin değişimi kaynak işleminin izahı için önemli değer taşımaktadır. İşleminin başlangıcında kuru sürtünme hâkimdir ve bu sürtünmenin etkisiyle moment eğrisi bir zirve yaptıktan sonra dengeye gelir. Süreç içerisinde oksit tabakalarının parçalanması sonucu çıplak yüzey temasları artar ve bu temaslar sırasında kuvvetli atomsal bağlar oluşmaya başlar. Sürtünme hareketi ile bu bağlar koparılmaya çalışılır. Sonuçta bu temas noktalarında güçlü adhezyon kuvvetleri oluşur, moment artar ve sıcaklık istenilen düzeye ulaşır. Frenleme sonrası hız azalırken moment de sifıra düşer [2,22,23,26,27].

Şekil 1.3 'de görünen sürtünme yüzeyindeki halka elemanda ortaya çıkan frenleme momenti sürtünme yüzeyi boyunca toplandığında döndürme momenti [2]:



Şekil 1.3 Kaynak edilen parçaların ısı değişimi

$$M_R = \int_0^R \mu p 2\pi r dr \quad (1.1)$$

Buradan;

$$M_R = \mu(2/3)\pi p r^3 \quad (1.2)$$

bulunur.

Denklem (1.2) 'ye göre sürtünme basıncı, kaynak ara yüzeyinin merkezinden radyal olarak çevreye doğru yeterli miktarda sürtünme momenti elde edilecek değerde olmalıdır ve malzeme yapısına göre iyi ayarlanmalıdır.

Bu denklemde yarıçap sıfır alınırsa (merkez) sürtünme momenti sıfır olur, yarıçap merkezden çevreye doğru artacağından çevrede sürtünme momenti maksimum olur. Sürtünme momenti merkezden çevreye doğru radyal olarak artar.

Basınç etkisi altında sürtünen yüzeylerde oluşan ısı ifadesi[2]:

Oluşan enerji:

$$Q_R = M_R n t \quad (1.3)$$

Kullanılan enerji:

$$Q_n = \Delta mc\Delta T \quad (1.4)$$

Kaybolan enerji:

$$Q_v = k F (T - T_0) t \quad (1.5)$$

Verilen (1.1), (1.2), (1.3), (1.4) ve (1.5) denklemlerinde görüldüğü gibi devir sayısının yüksek olması ile oluşan enerji yükselecektir. Diğer taraftan işlemin kısa zamanda tamamlanması ile kayıp enerji azalacaktır.

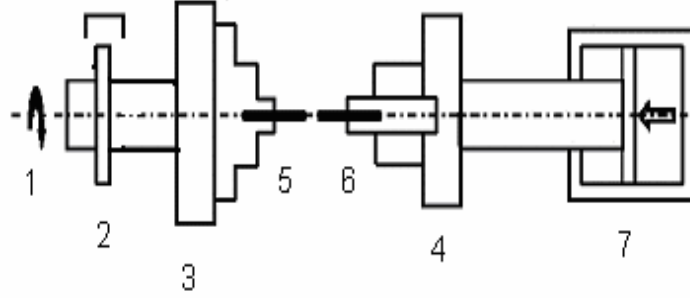
Yukarıdaki (1.1), (1.2), (1.3), (1.4) ve (1.5) denklemlerinde;

- M_R : Dönme momenti(kgf. cm)
- P : Yüzey basıncı(kgf/cm²)
- n : Devir sayısı(dev/dk)
- k : Isı iletim katsayısı(W/m² °C)
- F : Yüzey alanı(m²)
- T : Sıcaklık(°C)
- t : Süre(s)
- m : Kütle(kg)
- c : Özgül ısı(kj/kg°C)
- d : Parça çapı(mm)
- r : Parça yarıçapı(mm)
- Q : Isı(kcal)
- μ : Sürtünme katsayısı

1.2.6.1.1 Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı

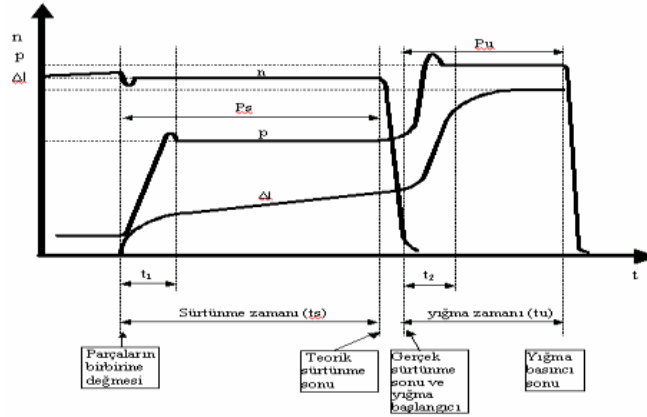
Sürekli tahrikli sürtünme kaynağında, enerji girdisi sürekli tahrikle, yani bir motor vasıtasıyla, sabit dönme hızında sağlanarak işlem yapılır. Kaynak işlemi ısıtma ve yığma olmak üzere iki aşamada gerçekleşir. Açıklamadan da anlaşılacağı gibi basınç iki kademeli olarak uygulanmaktadır. Basıncın birinci kademesine “Isınma veya Sürtünme Basıncı” ve ikinci kademesine de “Yığma veya Dövme Basıncı” denir. Kaynak yapılacak iş parçasının biri döndürülerek, diğerini döndürmeden öbürüne doğru bastırarak suretiyle aradaki sürtünme ile mekanik enerji ısı enerjisine çevrilir. Birleştirilen yüzeyler plastik şekil değiştirme sıcaklığına ulaştığında dönme birden durdurulur ve basınç artırılır. Bir süre bu konumda

tutularak kaynak yapılmış olur. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı işleminin şematik şekli Şekil 1.4 'de ve zamana bağlı parametre grafiği Şekil 1.5 'de görülmektedir [2,20,22,26,27].



- | | |
|--|----------------------|
| 1. Tahrik motoru | 5. Dönen iş parçası |
| 2. Fren | 6. Sabit iş parçası |
| 3. Dönen iş parçasının bağlandığı ayna | 7. Hidrolik silindir |
| 4. Sabit iş parçasını bağlandığı ayna | |

Şekil 1.4 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı şematik şekli



Şekil 1.5 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı parametreleri (t_1 = sürtünme basıncı oluşum zamanı, t_2 = yığılma basıncı oluşum zamanı)

1.2.6.1.2 Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

Volan tahrikli sürtünme kaynak yönteminde döndürülecek iş parçası volanlı tutucu bir çeneye bağlanır ve volandaki kinetik enerjiden yararlanır. Volan ivmelendirilerek mekanik enerjinin volanda depolanması sağlanır ve belirlenen bir

devir sayısına ulaştığında volanın tahriki kesilir ve serbest dönmeye bırakılır. Basınç altında iki iş parçası birbirine temas ettirilerek ara yüzeydeki sürtünme ile mekanik enerji, ısı enerjisine çevrilir. Volan kinetik enerjisi kaynak yüzeyinde hızlı bir şekilde ısıya dönüşür ve volanın dönmesi durduğunda kaynak da tamamlanmış olur. Bazı uygulamalarda volan tamamen durmadan basınç arttırılarak kaynaklanmanın olduğu görülmüştür. Volan tahrikli sürtünme kaynağı işleminin şematik şekli Şekil 1.6 'da ve zamana bağlı parametre grafiği Şekil 1.7 'de görülmektedir [2,20,22,26,27].

İşlem esnasında herhangi bir zamanda volandaki enerji [27],

$$E = \frac{I s^2}{C} \quad (1.6)$$

Eşitliği ile bulunur. Burada;

E=Enerji (J)

I=Atalet momenti (kg.m²)

s=Hız (dev/dk)

C=182.4 (Atalet momenti kg.m² olarak alındığında)

Volandaki enerji, onun herhangi bir andaki dönme hızı ile bulunur. Eğer volanın kütlesi değişirse kullanılabilir enerji de değişir. Ancak, volan tahrikli sürtünme kaynak yönteminde makineye bağlanabilecek volanın kütlesi, makinenin kapasitesine bağlıdır.

Teğetsel hız, yarıçap ve dönüş hızı arasındaki bağıntı ise [27],

$$V_t = K.r.s \quad (1.7)$$

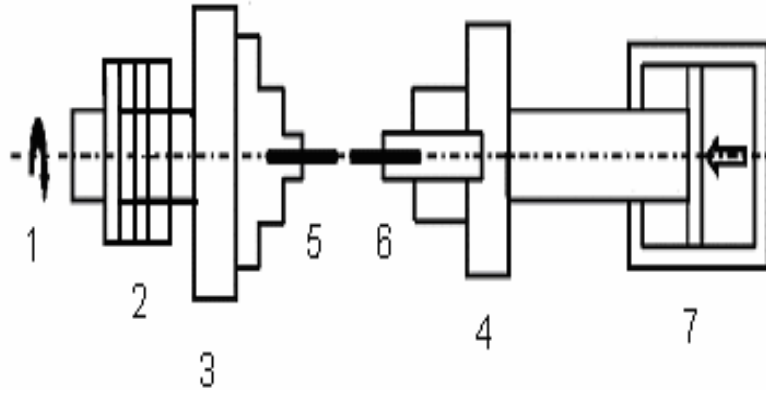
Eşitliğiyle bulunur. Burada;

V_t = Teğetsel hız (m/s)

s = Anlık hız (dev/dk)

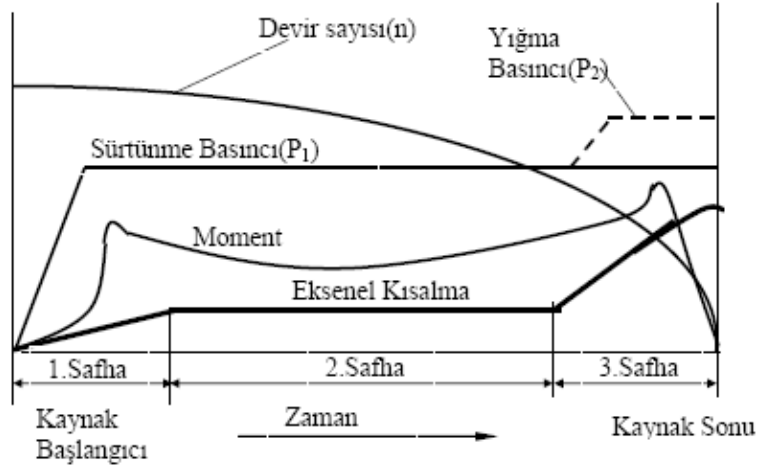
r = Yarıçap (m) olarak tanımlanır.

K = 0.1 (r metre olarak alındığında)



- | | |
|--|----------------------|
| 1. Tahrik motoru | 5. Dönen iş parçası |
| 2. Değiştirilebilir volan | 6. Sabit iş parçası |
| 3. Dönen iş parçasının bağlandığı ayna | 7. Hidrolik silindir |
| 4. Sabit iş parçasını bağlandığı ayna | |

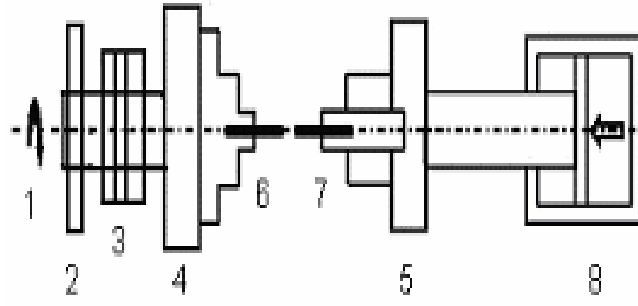
Şekil 1.6 Volan tahrikli sürtünme kaynağı şematik şekli



Şekil 1.7 Volan tahrikli sürtünme kaynak parametreleri

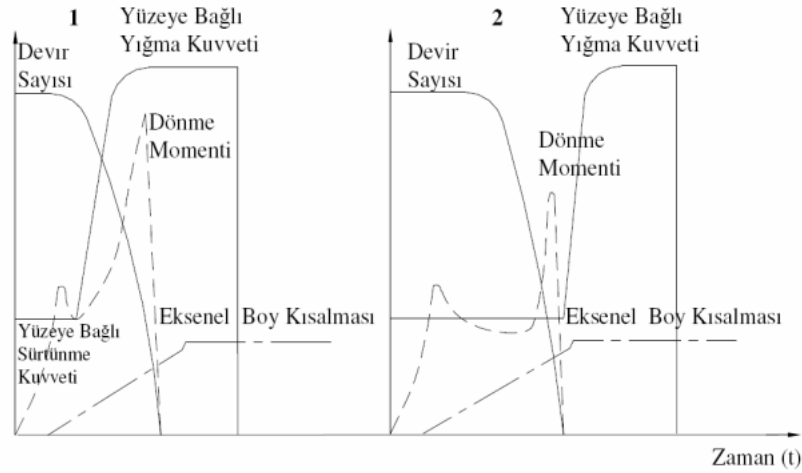
1.2.6.1.3 Kombine Edilmiş Sürtünme Kaynağı

Bu yöntem sürekli tahrikli sürtünme kaynağı metodu ile volan tahrikli sürtünme kaynağı metodunun birleşimidir. Kombine edilmiş sürtünme kaynağı işleminin şematik şekli Şekil 1.8 'de ve zamana bağlı parametre grafiği Şekil 1.9 'da görülmektedir.



- | | |
|---|--|
| 1. Tahrik motoru | 5. Sabit iş parçasını bağılandığı ayna |
| 2. Kavrama | 6. Dönen iş parçası |
| 3. Değiştirilebilir volan | 7. Sabit iş parçası |
| 4. Dönen iş parçasının bağılandığı ayna | 8. Hidrolik silindir |

Şekil 1.8 Kombine edilmiş sürtünme kaynağı



Şekil 1.9 Kombine edilmiş sürtünme kaynağı parametreleri [20] (1. dönen iş parçasındaki yığılma, 2. dönmeyen iş parçasındaki yığılma)

Bu yöntemle büyük kapasiteli parçaların birleştirilmesi avantajlıdır [23]. Bu kaynak yönteminde, volan mili kavramayla hareketli bir motor miline bağlanır. Volan sistemi motor sayesinde sürekli dönerken, dönen iş parçası istenilen hıza ulaştığında motor mili kavrama ile sayesinde volan milinden ayrılır. Parçalar birbirine bastırılır ve düşük atalet sistemine sahip olan ayna volan fren yapmaksızın kendiliğinden hızlı bir şekilde durur ve kaynak tamamlanır [20,23,33,34].

1.2.7 Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Malzemeler

Sürtünme kaynağı ile birleştirme yapılacak malzemelerin mukavemeti, eksenel basınç ve dönme momentiyile aşırı bir deformasyonun oluşumunu önleyecek düzeyde ve yeterli sıcak şekil değiştirme kabiliyetine sahip olmalıdır [20]. Sürtünme kaynağı, diğer kaynak yöntemleri ile kaynak edilemeyen farklı termik ve mekanik özelliklere sahip metallerin kaynağında kullanılabilir. Erime sıcaklığı altındaki sıcaklıklar ve kısa kaynak süresi sürtünme kaynağına bu olanağı vermektedir. Dövülebilen iyi kuru sürtünme özellikleri olmayan bütün malzemeler ve kuru yağlama sağlayan alaşım elementleri bağlantı bölgesinin kaynak sıcaklığına erişmesini engeller. Sürtünme kaynağı ile birleştirme yapılabilecek malzemeler [2,20,23,33,36,38,39]:

- Çelik ve yüksek alaşımlı çelikler,
- Sinterlenmiş çelikler
- Maraging çelikleri,
- Demir ve demir dışı metaller,
- Alaşımlı ve alaşımsız çelikler ile alüminyum, bakır ve alaşımları,
- Düşük karbonlu çelikler ile paslanmaz çelikler,
- Paslanmaz çelikler,
- Paslanmaz çelik ile zirkonyum,
- Alüminyum ve alaşımları,
- Alüminyum ile toz metalürjisi ile üretilen parçalar ve seramikler,
- Titanyum alaşımları,
- Titanyum ve titanyum alaşımları ile çelik,
- Titanyum ve titanyum alaşımları ile alüminyum ve alaşımları,
- Bakır ve alaşımları,
- Zr alaşımları,
- Mg alaşımları,
- Ni-Co alaşımları,
- Refrakter metaller olan T, Mo, Ni ve Ta alaşımları
- Metalik camlar
- Metalik camlar ile Al alaşımları.

Bazı metal ve alaşımlarında aşağıda belirtilen metalürjik içeriklerinden dolayı başarılı bir kaynak yapılamaz. Bu sınırlamalar genelde sürtünme ısısı ve dönmeye yöneliktir [2,33].

- Bazı dökme demirler, serbest grafitin sürtünme sıcaklığını sınırlaması nedeniyle,
- % 0,3'ün üzerinde kurşunlu bronz ve pirinçler, sürtünme aralığının sınırlanmasından,
- % 0,13'ün üzerinde S, Pb içeren çelikler, sürtünme sıcaklığını sınırlanmasından,
- Yüksek derecede anizotropik malzemeler geçiş bölgesi kırılma dayanımından,
- Yapısında hazır olarak grafit, Mn, serbest Pb gibi zayıflatıcı faz içeren malzemeler.

1.2.8 Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları

Otomotiv endüstrisinde, supaplar, bendiks dişlileri, aks milleri, aks köprüleri, kardan milleri, krank milleri, dişli-mil parçaları, turbo şarj pervane milleri, şanzıman parçaları, çatal-mil bağlantıları, piston kolları, fren milleri, emme manifoldları, yakıt tankları, pompa gövdeleri, amortisörlerin imalatında kullanılır.

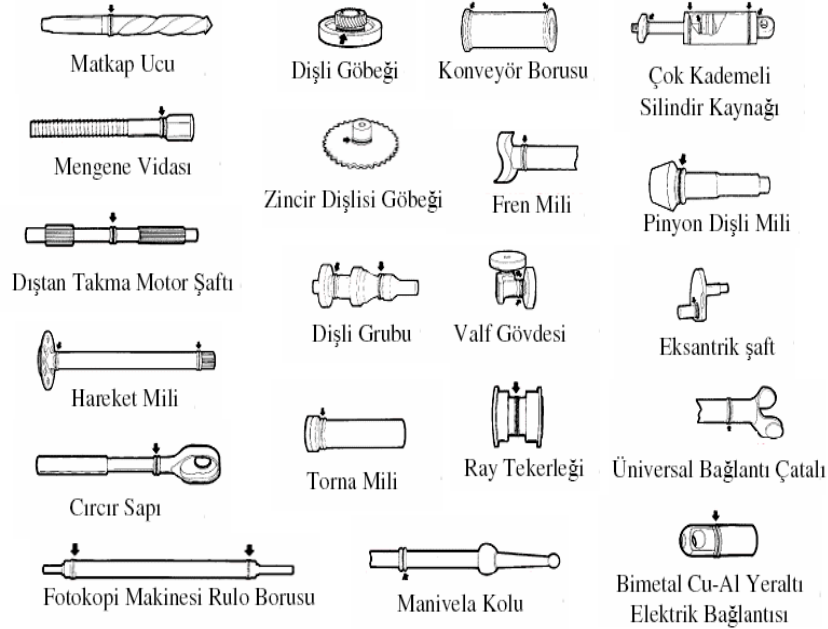
Kesme delme takım endüstrisinde, matkap uçları, delik zımbaları, raybalar, freze bıçakları, çelik kalemlerin imalatında kullanılır.

Makine imalatı ve yedek parça endüstrisinde, dişli çarklar, piston kolları, hidrolik silindirler, radyal pompa pistonları, sonsuz vidalı miller, miller, borular, flanşlar, valflerin imalatında kullanılır.

Havacılık ve uzay endüstrisinde, yanma odaları, türbinler, itme jetleri (memeler), miller, rotorlar, borular, bağlantı parçaları, flanşlar, fittinglerin imalatında kullanılır.

Elektronik ve elektroteknik endüstrisinde, gaz analizleri alıcı kameralar, kromatografiler için ayırma sütunları, röntgen cihaz tüpleri için döner anot miller, sürekli lehim uçları, devre kontakları, geçiş parçaları, boru tesisatı bağlantıları imalatında kullanılır.

Ayrıca tarım, savunma, deniz, petrol endüstrisinde ve arızalanmış parçaların onarılmasında sürtünme kaynağı tekniği uygulanmaktadır. Şekil 1.10 'da sürtünme kaynağı uygulama alanları görülmektedir [2,20,22,33,36,39,40].



Şekil 1.10 Sürtünme kaynağı uygulama alanları

1.2.9 Sürtünme Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Sürtünme kaynağının diğer kaynak yöntemlerine göre yararlarını şöyle sıralayabiliriz [27,39-41]:

1. İşçilik değeri en az durumdadır.
2. Parçalar çok kısa zamanda birleştirilebilmektedir.
3. Benzer olmayan malzemeler kaynak yapılabilmektedir.
4. Parçalar aynı eksen doğrultusunda tam olarak kaynatılır.

5. Çenelere bağlanmış olarak kaynatılan ve bir süre kaynak sonrası bağlı olarak beklediği için parçalarda çarpılma veya şekil değiştirme durumu yok denecek kadar azdır.
6. Birleşme yüzeylerinde % 100 oranında kaynama olmaktadır.
7. Kaynak için dolgu metali, temizleme maddesi, koruyucu gaz, kaynak tozu (çevre dostudur) ve benzeri herhangi bir eleman kullanmaya gerek yoktur.
8. Çok küçük kesitli parçalar kaynak yapılabilir.
9. Birleşme yüzeylerinde bulunan oksit ve diğer yabancı maddeler kaynak sırasında dışarı atılır.
10. Sürtünme kaynağı ile kaynatılan parçaların kaynak maliyeti, aynı parçaların diğer bir kaynak yöntemi ile kaynak yapılması sonucu ortaya çıkan kaynak maliyetinden daha düşüktür.
11. İşlem temiz olup, zorunlu bir durum yoksa ayrıca kaynak yerini çok iyi temizlemeye gerek yoktur.
12. Hızlı lokal ısıtma ve ayrıca bağlantıya bitişik olan relatif olarak geniş ısıtılmamış alanla, lokal ısınmış alanlardan hızla ısıyı çekmesi sonucunda çok dar bir ITAB oluşur.
13. Kararlı ve tekrarlanabilir işlemdir.
14. Ham maddenin her bir bölgesi için uygun malzeme seçimi dizayn esnekliğinin çok artmasını sağlar.
15. Deneme modelinden fabrikasyon üretime kadar sayısal miktar aralığı için uygundur.
16. Aletle işleme maliyeti yüksek olmaması ve çok az miktarda donanım ile gerçekleştirilmesi ile döküm ve dövme yöntemi ile üretilmiş ham maddelerden yeni malzemeler oluşturulmasını sağlar.
17. Bi-metal uygulamalarıyla ham madde maliyetini düşürür, sadece işlenmemiş malzemelerin gerekli olan yerlerinde pahalı malzemeler kullanılır.
18. Kaynaklanan bölgenin dayanımı birleştirilen malzemelerin dayanımına denk, bazı durumlarda da yüksek olabilmektedir.
19. Frenleme ve yığılma anında (yığılma basıncı etkisi altında) bağlantıda meydana gelen sıcak torsiyon tane küçülmesine yardımcı olur. Bir dizi bozucu metalürjik olay, örneğin iri tane oluşumu bu arada önlenir.

Sürtünme kaynağı uygulamalarında görülen bazı sınırlamalarda aşağıdaki gibidir [5,7,27,29,39]:

1. İş parçalarından birinin kaynak yüzeyi yuvarlak veya silindire yakın olmalı, tutulabilir ve döndürülebilir büyüklükte olmalıdır.
2. İş parçaları torca, ısınmaya ve birleştirme esnasındaki aksel basınca dayanıklı olmalıdır.
3. İş parçalarını tutan cihazlar ağır şok ve tork yüklerine dayanacak güçte olmalıdır.
4. Açısal birleşimler için pahalı değişikliklerin yapılmasını gerektirir.
5. Büyük parçalarda kaynak edilebilme zordur. Kesit alanının artması motor gücü basıncı değerlerinin artmasına neden olur.
6. Sürtünme kaynağı makine ve donanımlarının maliyeti yüksektir.
7. Sürtünme kaynağında ara yüzeyde sıcaklığın homojen olmaması büyük bir dezavantajdır. Bunun sebebi, çevresel hızın çubuğun çevresinden merkezine doğru azalmasıdır. Ara yüzeyin merkezinde hız sıfır olduğundan ısı üretilmez.
8. Sürtünmeyi önleyecek veya azaltacak, kav, hadde ve döküm tabakaları, kalın oksit tabakaları, çekme veya dövme işlemi tozları, yağlama maddeleri, kaplama tabakaları gibi yabancı maddeler kaynak yüzeylerinden uzaklaştırılmalıdır.
9. Ağız bölgesindeki su verilmiş sert tabakalar da yumuşatma tavlamaıyla giderilmelidir veya bu tabaka kaynak işlemi sırasında ortadan kalkabilecek şekilde ince olmalıdır.

1.3 Malzemelerin Yüksek Sıcaklıkta Deformasyon Davranışı

Plastik deformasyonu gerçekleştirecek gerilmeyi ve yapılabilecek deformasyon oranını etkileyen faktörler şunlardır; malzeme yapısı, mekanik özellikler, deformasyon hızı, sıcaklık, sürtünme ve yağlama, hidrostatik basınç, kalıntı gerilmeler, geometrik faktörler. Malzemelerin yapısı, mekanik özellikleri ve deformasyon şartları (sıcaklık, deformasyon hızı) malzemelerin plastik deformasyon kabiliyetlerini etkileyen en önemli faktörlerdir [42,43].

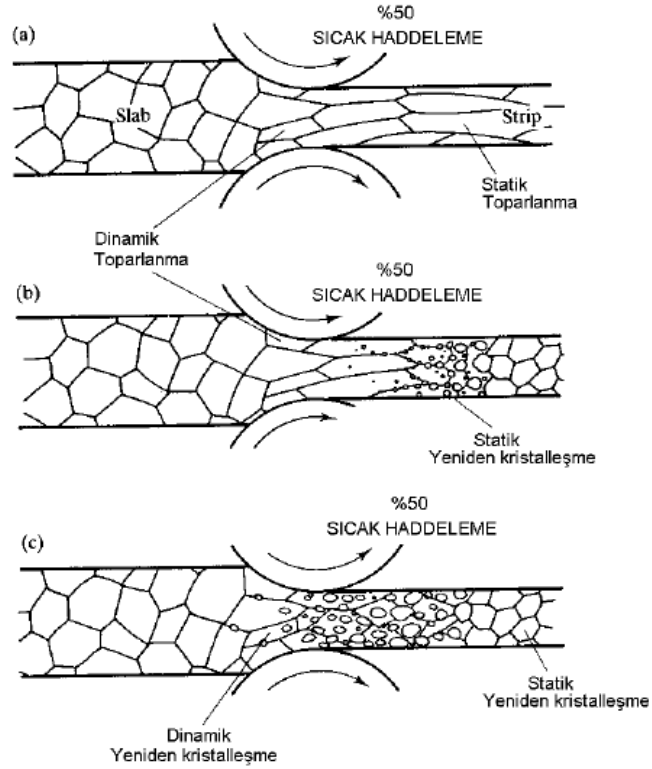
Malzemenin yapısı, kimyasal bileşimi ile termo-mekanik geçmişine bağlıdır. Çeşitli mekanik ve ısı işlemlerle malzemenin yapısını değiştirmek mümkündür. Metalik malzemelerde plastik deformasyonu etkileyen malzeme yapısıyla ilgili en önemli faktörlerden birisi tane boyutudur. Genel olarak, ince taneli malzeme yüksek kırılma tokluğu ve süneklik özelliklerine sahip olmasına karşın mukavemetinin yüksek olması nedeniyle plastik deformasyon için daha yüksek gerilme uygulanmasını gerektirir [43].

Metalik malzemelerin mekanik özellikleri, kimyasal bileşimlerine ve mikro yapılarına bağlıdır. Mekanik işlemlerde gerekli olan gerilme, malzemenin deformasyon şartlarındaki mukavemetine, uygulanabilecek deformasyon oranı ise malzemenin deformasyon şartlarındaki sünekliğine bağlıdır. Değişik deformasyon şartlarında (sıcaklık ve deformasyon hızı) yapılan deneylerden elde edilen "gerilme-birim şekil değiştirme" eğrilerinin şekli, mekanik işlem sırasında malzemenin deformasyon özellikleri hakkında fikir verir. Genellikle deformasyon sıcaklığı arttıkça malzemelerin sünekliği artar, mukavemeti azalır. Bunun sebebi; atomların hareket etme, yer değiştirme imkânının artması, dislokasyonların hareket etme (özellikle "tırmanma" hareketi) imkânının artması, yayınmayı hızlandıran atom boşluklarının artması vs.'dir. Deformasyon hızının da mekanik özelliklere önemli ölçüde etkisi vardır. Deformasyon hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artar, sünekliği azalır [42,43].

Sabit sıcaklık ve sabit yük (veya gerilme) altında, zamanla malzemede meydana gelen plastik deformasyona "sürünme" adı verilir [42,43]. Sürünme sıcaklıkla hızlanan bir olaydır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda ($T > 0.5T_m$) gerçekleştirilen plastik deformasyon esnasında görülen "dinamik toparlanma" ve "dinamik yeniden kristalleşme" olayları, yumuşama prosesleridir. Deformasyondan serbest yeni tanelerin oluşumuna kadar olan tavlama işlemine toparlanma denir. Soğuk işlemden sonra, malzemenin yüksek sıcaklıkta tutulmasıyla meydana gelen "statik toparlanma" ve "statik yeniden kristalleşme" olaylarından bu prosesleri ayırabilmek için, "dinamik" terimi kullanılır [43].

Dinamik toparlanmanın metallerdeki işlem sertleşmesini önleme eğilimine rağmen, kritik koşulun elde edilmesiyle meydana gelen dinamik yeniden kristalleşme için gereken deformasyon enerjisi oldukça yüksektir. Yüksek sıcaklıktaki deformasyon esnasında meydana gelen bu iki yumuşama prosesi, farklı karakteristik mikroyapısal değişimlerle sonuçlanır. Fakat iki olay da termal olarak uyarılmıştır ve güçlü bir şekilde sıcaklık ve deformasyon hızıyla ilişkilidir [43].

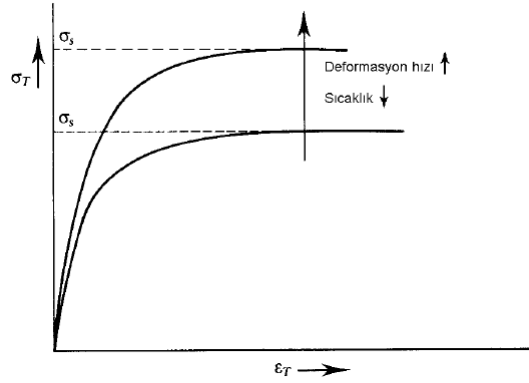
Şekil 1.11 'de tipik sıcak işlem esnasında meydana gelen yapısal değişimler görülmektedir. Şekil 1.11(a ve b) 'deki gibi sadece dinamik toparlanma olursa, taneler malzemedeki deformasyon oranına uygun olarak şekil değiştirirler. Şekil 1.1(c) 'de deformasyon esnasında oluşan dinamik yeniden kristalleşme olayı görülmektedir [43,44,s.141-145].



Şekil 1.11 Sıcak işlem esnasında mümkün olan mikroyapısal değişimler (a) Dinamik toparlanmayı takip eden statik toparlanma, b) Dinamik toparlanmayı takip eden statik yeniden kristalleşme, c) Dinamik yeniden kristalleşme ve takip eden statik yeniden kristalleşme)

1.3.1 Dinamik Toparlanma

Deformasyon esnasında meydana gelen toparlanmaya "dinamik toparlanma" adı verilir. Sıcak işlemden sadece dinamik toparlanma olayının gerçekleştiği durumlarda, malzemenin gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi davranışı Şekil 1.12'deki gibidir.



Şekil 1.12 Dinamik toparlanmaya maruz kalan bir malzemenin gerilme-deformasyon davranışı

Tavllanmış bir malzemeye belirli hızda deformasyon uygulandığında malzemenin mukavemeti artar ve deformasyon hızına bağlı olarak akma başlar. Artan deformasyon miktarıyla artan gerilme alt tane oluşumu nedeniyle kararlı hal gerilmesi (σ_s) değerine ulaşır (Şekil 1.12). Eğer malzeme ilk önce soğuk işlem görmüş halde ise, akma gerilmesi tavllanmış haldeki akma gerilmesinden daha yüksek olabilir. Bu başlangıç dislokasyon yoğunluğunun, tavllanmış haldeki yapının dislokasyon yoğunluğundan daha fazla olmasından kaynaklanır. Fakat kararlı hal gerilmesi malzemenin ilk halinden bağımsızdır. Kararlı hal mikroyapısı, kararlı sürünme esnasında deforme olmuş malzemenin yapısına oldukça benzer; yani taneler deformasyon yönünde uzar ve ayrıca eş eksenli alt tane yapısı oluşur. Kararlı gerilme değeri, deformasyon hızı arttığında ve sıcaklık düştüğünde artar [43].

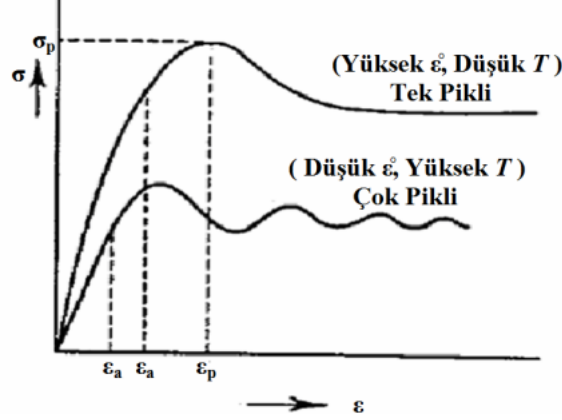
Dinamik toparlanma, birbirlerini yok edebilecek zıt işaretli kenar dislokasyonlarının tırmanması ve vida dislokasyonlarının çapraz kaymasıyla,

dislokasyon yoğunluğunun azalmasına yol açar. Dinamik toparlanma ayrıca, dislokasyonların yeniden düzenlenerek, yüksek dislokasyon yoğunluğundaki sınırlarla çevrelenmiş ve göreceli olarak düşük dislokasyon yoğunluğuna sahip hücrelerin oluşumuna da neden olur. Toparlanmanın gelişmesi ile (örneğin, sabit deformasyon hızında deformasyon sıcaklığının artırılmasıyla) hücreler daha kabalaşır ve hücre sınırları belirginleşir. Yüksek sıcaklıkta oluşan bu hücre sınırları iki boyutlu dislokasyon ağları haline geldiğinde, hücreler alt tanelere dönüşür. Alt tane yapısı soğuk islenmiş bir yapının tavlanması esnasında görülen statik toparlanmadaki poligonizasyona benzer. Sürünme koşulları altındaki deformasyon hızı, bu alt tane ağına doğru olan dislokasyon hareketinin hızı (dinamik toparlanma hızı) ile belirlenir. Alt tane boyutu kararlı hal gerilmesi ile ters orantılıdır [43].

1.3.2 Dinamik Yeniden Kristalleşme

Sürekli plastik deformasyon sırasında, her bir deformasyon aralığında depolanan enerjinin de neden olduğu ve hatalar üzerinde meydana gelen ani yeniden kristalleşmedir. Örnek, inşaat demiri üretimi, sürekli haddelerde parça üretimi [45]. Dinamik yeniden kristalleşmeye düşük ve orta istif hatası enerjisi değerine sahip YMK metal ve alaşımlarda sıcak deformasyon esnasında rastlanır [6,43]. Dinamik yeniden kristalleşme ayrıca çok yüksek safiyetteki HMK metallerde de görülebilmektedir. Bu tür metallerde ekstrüzyonda olduğu gibi yüksek oranda deformasyon uygulandığında, deformasyon bölgesinde yeniden kristalleşmenin meydana geldiği saptanmıştır. Sıcak işlem esnasında dinamik yeniden kristalleşmeye maruz kalan bir malzemenin, gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi Şekil 1.13 'de görülmektedir [43].

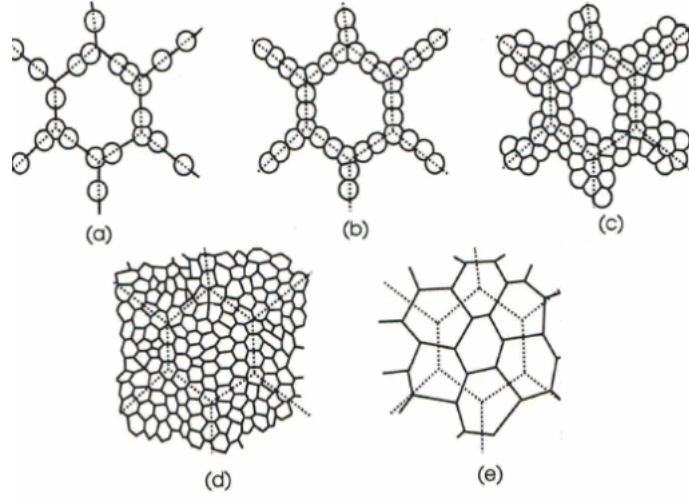
Dinamik yeniden kristalleşme davranışı, tek pikli veya çok pikli olmak üzere iki şekilde olabilir. Nispeten yüksek deformasyon hızlarında ($\dot{\epsilon}^0$) ve düşük sıcaklıklarda tek pikli dinamik yeniden kristalleşme davranışı görülürken, düşük deformasyon hızlarında ve yüksek sıcaklıklarda çok pikli dinamik yeniden kristalleşme davranışı görülür (Şekil 1.13) [6,43]. Şekil 1.13 'de görülen çekme



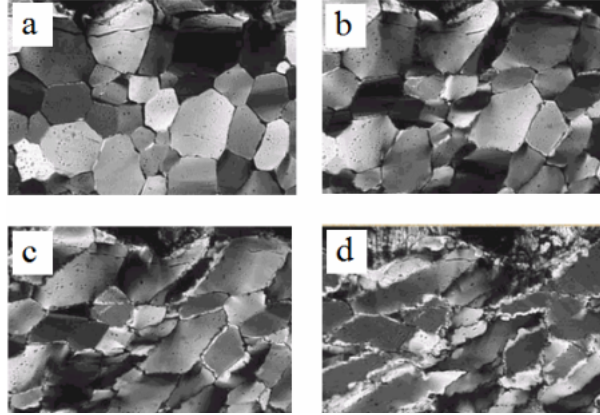
Şekil 1.13 Dinamik yeniden kristalleşmeye maruz kalmış bir malzemenin gerilme(σ) - birim şekil değiştirme(ϵ) davranışı

eğrisinde ϵ_a deformasyon miktarına kadar yalnızca dinamik toparlanma söz konusudur. Dinamik yeniden kristalleşme yaklaşık olarak ϵ_a değerinde baslar, kritik deformasyon değerinde (ϵ_p) maksimum gerilme (σ_p) değerine ulaşılır, daha sonra artan deformasyon ile gerilme azalır (yumuşama), sonuçta kararlı haldeki gerilme (σ_s) değerine ulaşır. Kararlı hal gerilmesi, maksimum gerilme ile akma gerilmesi arasında bir değerdedir. Düşük gerilmeler uygulandığında, yalnızca toparlanma olayı gerçekleşir ve deformasyon ile birlikte sürünme hızı düzgün bir şekilde kararlı hal değerine doğru azalır. Daha büyük gerilmelerde ise, sürünme hızı kararlı hal değerine ulaşamaz ve alt tane yapısının oluşması ile sürünme direnci artmaya başlar. Alt tane yapısındaki dislokasyon yoğunluğu yeterli miktara ulaştığında dinamik yeniden kristalleşme meydana gelir. Dinamik yeniden kristalleşme sonucu sürünme hızı artar ve bu proses böylece kendini tekrar ederek sürer [43].

Düşük istif hatası enerjisi olan metallerde, dislokasyonlar kısmi dislokasyonlara ayrılır. Bu durumda dislokasyonların çapraz kaymaları ve tırmanmaları zorlaşır, toparlanma hızı yavaşlar. Çünkü alt tane sınırları daha az gelişir ve dislokasyon sıraları iki boyutlu ağlara göre daha karmaşık olma eğilimindedir. Deformasyonla birlikte bu yapıların depo ettiği enerji artar ve dinamik yeniden kristalleşmenin çekirdeklenebilmesi için gerekli değere erişebilir. Dinamik yeniden kristalleşme çekirdeği tercihli olarak tane sınırlarında oluşur (Şekil 1.14 ve 1.15) [43,45].



Şekil 1.14 Dinamik yeniden kristalleşmenin tane sınırında başlamasının şematik gösterimi (a,b,c,d,e)



Şekil 1.15 Dinamik yeniden kristalleşmenin tane sınırında başlamasının mikroyapı resmi (a,b,c,d)

Çekirdek ilk önce hızlı bir şekilde büyür. Ancak deformasyon aynı anda büyüyen tanelerin içindeki dislokasyon yoğunluğunu artırır ve bunun neticesinde, büyüme duruncaya kadar sınır göçü için gerekli itici kuvvet azalır. Bu nedenle, taneler deformasyon koşullarının belirlediği boyuta ulaşır [15,43] ve dinamik yeniden kristalleşme daha fazla çekirdekleşme ile devam eder. Artan deformasyonla birlikte, tekrarlı çekirdekleşme prosesi ve sınırlı büyüme nedeniyle dinamik yeniden kristalleşme, statik yeniden kristalleşmede olduğundan daha hızlı yayılır. Çünkü statik yeniden kristalleşmede, sınırlı çekirdekleşme ve yeni tanelerin birbirlerine

temasına kadar sürekli büyüme olayları vardır. Dinamik yeniden kristalleşmede oluşan tane boyutu kararlı hal gerilmesiyle ters orantılıdır [43].

Dinamik yeniden kristalleşmenin oluşmasını önemli derecede etkileyen faktörler; deformasyon hızı, sıcaklık, istif hatası enerjisi ve alaşım elementi ilavesidir. Dinamik yeniden kristalleşme, kinetik açıdan çapraz kayma ve tırmanmanın sınırlı ve zor olduğu düşük istif hatası enerjisine sahip metallerde daha kolay oluşur. Çözelti elementi ilavesi, tane sınırı hareketini engellediğinden, dinamik yeniden kristalleşme oluşumunu yüksek deformasyon hızlarına taşır [6,43]. Mikroyapıda ince ve düzgün dağılmış partikül şeklinde bulunan alaşımlar, dislokasyonlarla etkileşir. Partikül yoğunluğunun artması alt tane yapısını etkiler. Sıcak işlemde partiküllerin etkisi soğuk işlemdekinden çok daha belirgindir. Partiküller, alt tane boyutunu inceltir veya alt tane oluşumunu engelleyebilir. Alt tane sınırındaki ince partiküller alt taneleri stabilize ederek statik veya dinamik yeniden kristalleşmeyi engelleyebilirler [43].

1.4 Paslanmaz Çelikler

1913 'te Harry Brearley tüfek namlularının korozyonu için bir çare bulmaya çalışırken krom çelikleri ile deney yaptı ve düşük karbon içeriği olan ve krom içeren aside dirençli paslanmaz çeliği buldu. Bu mühendisleri, korozyona, kimyasal etkiye ve ısıya karşı güç ve direnç gerekliliği olan çeşitli fiziksel koşulları karşılayacak malzemeler için demir ve karbon ile öteki elemanların alaşımının araştırmasına götürdü. Almanya 'da Strauss ve Maurer, bu çeliğe nikel ilave ederek ve krom içeriğini % 18 'e yükselterek “Brearley Çeliğinin” çekme mukavemeti ile haddelenebilirliğinin çok daha düzeleceğini buldular. Bu ise, nikel ve kromun değişen oranlarına, molibden, titanyum ve niyobyum gibi öteki elemanların küçük ilavelerini içeren bir çelik sınıfı ile sonuçlandı ve bu alaşımların yararlılığını büyük ölçüde yaygınlaştırdı [46].

İlk önce yalnız paslanmaz çelik bıçaklar yapıldı. Korozyona direncinden ayrı olarak bu çeliğin yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeye de direnci olduğu bulundu ve bu

özelliğe 1914-1918 I. Dünya Savaşı sırasında başvurularak, uçak motorları için supap üretiminde kullanıldı. Aynı zamanda sirke ve öteki yiyecek asitlerine karşı dirençliydi [46].

Paslanmaz çeliklerde gerçekleşen kimyasal olay; çelik içerisindeki demir elementi oksijen ile tepkimeye girmeden önce, krom elementi oksijenle tepkimeye girmesidir. Yani çelik üzerinde demir ile oksijen birleşip demir oksit bileşeni oluşmadan, krom ile oksijenin birleşerek çok ince bir katman olarak çeliği kaplayan krom oksit tabakasının oluşmasıdır. Bu katman o kadar incedir ki, dışarıdan bakıldığı zaman gözle görülmez. Bu şekilde çeliğin oksijenle teması kesilerek demir oksit (pas) oluşması engellenmiş olur. Bunun için çeliğin içerisindeki krom miktarı en az % 12 olmalı ve bütün yapıya homojen olarak dağılmalıdır [44,46].

Bir paslanmaz çelik için ciddi sonuçları olan kasıtsız mikro yapısal değişikliğin bir örneği 450-850 °C aralığındaki sıcaklıklara maruz kalması sonucudur. Bu esnada krom karbürleri tane sınırında oluşur ve bu durum tane sınırına yakın yerlerdeki krom oranını azaltır. Bu sıcaklık aralığında ısıya ne kadar çok maruz kalırsa o kadar çok krom azalır. Bu bölgede krom oranı % 12 'nin altına düşer ve tane sınırları boyunca korozyona neden olabilir. Krom karbür sürecine “duyarlılaşma” denir [47,s.74]. Böylece korozyon dayanıklılık özelliği kaybolur. Dolayısıyla çelik içerisindeki karbon oranı yükseldikçe, krom miktarı artırılmalı veya karbür yapma eğilimi kromdan fazla belirli elementler katılarak krom karbürün meydana gelmesi engellenmelidir [46]. Paslanmaz çeliklerde başlıca alaşım elementleri önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Yüksek alaşımli çelik grubuna giren paslanmaz çelikler içyapıda bulunan bu alaşım elementlerinin miktarlarına göre farklı özellikler gösterir. Yüksek oranlarda içerdikleri krom ve nikel içyapının ferritik veya ostenitik olmasını belirler. Paslanmaz çelikler martenzitik, ferritik, ostenitik ve dubleks (ostenitik-ferritik) paslanmaz çelikler olmak üzere dört gruba ayrılır [42,44,s.495-531,46,47].

Martenzitik paslanmaz çelikler, % 12-18 arasındaki oranlarda Cr içeren yüksek alaşımli çeliklere suda veya yağda su verilerek elde edilir. Ferritik paslanmaz çelikler, % 14-27 arasındaki oranlarda Cr içerirler ve karbon oranı martenzitik

paslanmaz çeliklerin karbon oranından daha düşüktür. Dupleks paslanmaz çelikler, içyapısında hemen hemen eşit oranda ostenitik ve ferritik faz bir arada bulunur. Çift fazlı mikro yapı, % 21-25 Cr ve % 5-7 Ni içeren çeliğin 1000-1050 °C sıcaklıkta tavlınması ve ardından hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilir. Bu sayede ostenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin her birinin de ötesinde iyileştirilmiş özellikler gösterirler. Böylece ostenitik paslanmaz çeliklere kıyasla daha iyi gerilme korozyonu dayanımına; ferritik paslanmaz çeliklerle kıyaslandığında ise daha iyi tokluk ve sünekliğe sahip olurlar [42,44,s.495-531,46-48]. Deneysel çalışmada AISI 316 ostenitik paslanmaz çelik kullanıldığından, ostenitik paslanmaz çelik hakkında daha ayrıntılı bilgi verilmiştir.

1.4.1 Ostenitik Paslanmaz Çelikler

1912-1913 'de, Almanya 'da F. Krupps 'un araştırma laboratuvarında çalışan B. Strauss ile E. Maurer % 15-20 krom içeren ferritik paslanmaz çeliğe eğer nikel ilerleyici bir biçimde ilave edilirse, ostenitin dengesinin arttığını buldular ve böylece ostenitik paslanmaz çelik elde edilmiş oldu. Bu durum, ostenitik yapının tüm sıcaklıklarda dengeli olduğu % 8-10 nikel ilave edilmesine kadar sürer. I. Dünya Savaşı'ndan sonra bu çeliklerin geliştirilmesi, yalnız ev eşyaları için değil, korozyon ve ısıya karşı mukavemet ve direncin gerekli olduğu her yerdeki kullanılmalarında büyük ilerlemeler getirdi [49].

Ostenitik paslanmaz çelikler krom, nikel ve mangan içerirler. Ostenitik paslanmaz çelikler, % 16-26 arasındaki oranlarda Cr, % 10-24 arasındaki oranlarda Ni+Mn içerirler ve içerdikleri krom ve nikel oranlarının toplamı en az % 23 düzeyindedir. Korozyonu önlemek üzere gerekli olan kromun ferrit yapıcı etkisi, ostenit yapıcı alaşım elementleri katılarak giderilir. Ancak bu amaçla, kuvvetli bir ostenit yapıcı olmasına karşın karbür meydana getirerek korozyon davranışını zayıflatan karbon oranını yükseltmek yerine, aynı zamanda oksitleyici ve redükleyici asitlere de dayanıklı olan nikelden yararlanır. Molipten katılmasıyla çukurcuk korozyon direnci, organik ve çeşitli asitlere (örneğin H₂SO₄) karşı direnç artar. Kükürtsüz olan korozif ortamlarda, ostenitik çelikler ferritiklerden genelde daha iyi

sonuç verirler. Tümüyle γ katı çözeltilisinden oluşan ostenitik paslanmaz çelikler ısıya ve asitlere dayanıklı, yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri iyi olan malzemelerdir. Ancak sıcak çatlama eğilimi gösterirler. Manyetik olmayan bu çeliklere, ostenitik içyapıları dönüşüm göstermediği için normalleştirme ve sertleştirme ısı işlemleri uygulanamaz. Sonuç olarak, her ne kadar ostenitik paslanmaz çelikler ısı işleme sertleştirilemezlerse de, soğuk deformasyon ile sertleştirilebilirler. Bu nedenle haddelenebilirlikte, toklukta ve mukavemette geniş bir değişkenlik sunarlar [42,44,s.495-531,46-48].

Ostenitik paslanmaz çeliklerde en büyük sorun krom karbür çökmesidir. Kritik sıcaklıklar olarak nitelenen 450-850 °C arasında yüksek enerjili tane sınırları boyunca ayrışarak yan yana dizilen kromca zengin karbürler, malzemenin korozif ortamda bulunması halinde taneler arası korozyona ve tane ayrılmasına yol açarlar. Söz konusu bu olayda katı çözeltideki krom miktarının korozyona dayanıklılık sınırının altına düşmesi önemli rol oynar [9,46].

Taneler arası korozyon aşağıdaki önlemlerle engellenebilir:

1. Çeliğe stabilizatörlerin katılması. Stabilizatörlerin karbona ilgileri kromunkinden fazla olduğu için, karbonu yüksek işletme sıcaklıklarında dahi krom karbür oluşturmayacak şekilde bağlayan elementlerdir. Bu amaçla bileşiminde uygun miktarda titan, tantal veya niyobyum içeren çelikler stabilize edilmiş olarak nitelenir.

2. Düşük karbonlu çeliklerin kullanılması. Ostenitik çeliklerde 650 °C sıcaklıkta karbon çözünlülüğü % 0.05' tir. Dolayısıyla daha düşük orandaki karbon bu sıcaklıklarda pratik olarak tümüyle ostenitte çözüneceğinden, anılan çeliklerde krom karbür çökmesi söz konusu değildir.

3. Çözme tavlama. Stabilize edilmemiş çeliklerde meydana gelen karbürler 1050 °C ile 1150 °C arasında yapılan bir tavlama ile çözündürülür. Bunu izleyen hızlı soğutma tekrar çökelmeyi engeller. Ancak bu yöntem kritik sıcaklık bölgesine yeniden ısınma durumunda karbür oluşmasını önleyemez.

Ostenitik çelikler, süneklikle birlikte yüksek tokluğa (ymk kafes) sahip oldukları ve ısıdan etkilenen bölgede herhangi bir sertleşme göstermedikleri için kaynağa çok elverişlidirler. Yalnız kaynak dikişi yanında kritik sıcaklığa ısınan ve yavaş soğuyan dar bir şerit boyunca karbürler ayrışabilir. Kaynak sıcaklığının 450 °C 'nin üzerine çıkması ile karbonun difüzyon hızı, karbonu tane sınırlarından dışarıya çıkartacak derecede zamana bağlı olarak artar. Tane sınırlarında biriken karbon, kroma karşı olan yüksek ilgisinden dolayı bu bölgede krom ile birleşerek krom karbür oluşturur (Fe, Cr₂₃C₆). Oluşan krom karbürün ağırlık olarak % 90 'ını krom oluşturduğundan, tane sınırlarında bulunan çok az karbon bile ostenit tanelerin çevresindeki krom miktarını aşırı derecede azaltır. Bunun sonucu olarak malzeme krozif bir ortamda bulunduğu, kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon oluşur. Bu şekilde ortaya çıkan taneler arası korozyon tüm malzemeyi çok kısa zamanda kullanılmaz hale getirir ve karbon içeriği arttıkça bu olay şiddetlenir. Belli bir karbon içeriği için karbür çökmesi olayının şiddeti, sıcaklık ve zamana bağlıdır (Tablo 1.2). Karbon içeriğine göre en kısa sürede çökmenin başladığı bir sıcaklık vardır ki, bu sıcaklığa “kritik sıcaklık” adı verilir. Ostenitik çeliklerin ısı iletim katsayıları oda sıcaklığında az alışımlı ve sade karbonlu çeliklerin 1/3 'ü kadar ve ısıl genleşme katsayıları ise % 50 daha fazladır. Bu durum kaynak bölgesinde ısının uzun süre kalacağını gösterir. Isıl genleşme katsayısının büyük olması ve ısı iletim katsayısının düşük olması, kaynak sırasında malzemenin daha fazla kendini çekmesine ve çarpılmasına neden olabilir [48,50-52]. *Bu sebeplerden dolayı, ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak süresinin kısa ve ısı girdisinin düşük tutulması gerektiği düşünülmektedir.* Sürtünme kaynak yöntemi; basınç altında, kısa sürede ısıtma ve soğutma nedeniyle bu olumsuzlukları ortadan kaldırır.

Tablo 1.2 Krom karbür çökmesinin karbon içeriği, zaman ve sıcaklığa bağlılığı [51,52]

Karbon içeriği (%)	Kuluçka Periyodu (s)	Kritik Sıcaklık (°C)
0,03	660	650
0,05	420	650
0,06	150	670
0,08	18	750

1.4.1.1 AISI 316 Paslanmaz Çeliği

AISI 316 çeliği paslanmaz çelik ailesinde ikinci en popüler kalitedir. Tüm üretilen paslanmaz çelik ürünleri arasında % 20 'lik bir tüketim oranına sahiptir. Manyetik değildir ve soğuk haddeleme ile çok düşük oranda manyetik geçirgenlik oluşabilir. Yapısındaki karbon oranı, krom karpit oluşumu ve taneler arası korozyonu gidermek için azaltılmıştır. 12 gün boyunca 675 dereceye maruz kalan AISI 316 paslanmaz çeliğinin ostenit tane sınırları zenginleştirilmiş krom karbürlerle bezenmiştir. Aynı AISI 316 paslanmaz çeliği 2 ay boyunca 730 dereceye maruz kaldığı zaman daha fazla tane sınırında krom karbür oluştuğu gibi tavlama ikizleri üzerinde de krom karbürler görülmüştür. Uzun süreli ısıya maruz kalma nedeniyle büyük krom karbürler oluşmuştur. 870 Derecenin üzerindeki sıcaklıklarda (bu sıcaklıklarda ostenit içerisindeki tüm karbürler çözünür) başka bir ısıl işlem seçeneğinin krom karbürleri ortadan kaldıracabileceğini bilmek önemlidir. Örneğin tipik bir ısıl işlem, duyarlılaşmış paslanmaz çeliği 980 derecede 4 saat ısıtma ve ardından hızlı bir soğutmadır. Kolayca dövülebilir, 1150 ila 1250 °C arasında yekpare ısıtılarak sıcak şekillendirilebilir ve bitirme sıcaklığı 900 °C 'nin altında olmamalıdır. Dövme işlemi sonrasında hava ile soğutulmalıdır. Bütün sıcak ve şiddetli soğuk işleme çalışmalarını su verme işlemi takip etmelidir [44,s.495-531,47,s.74,53-55].

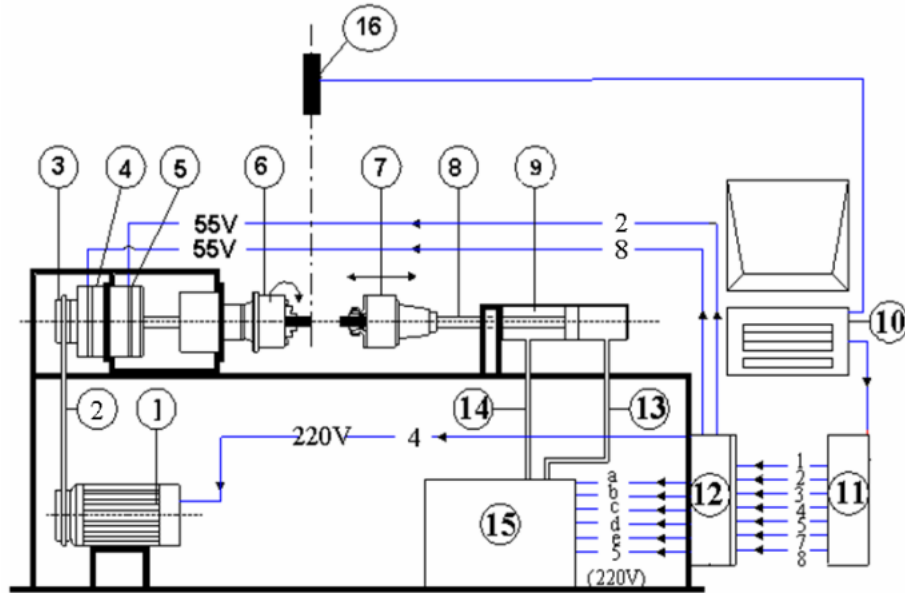
AISI 316 çeliği aralıklı hizmet altında 870 °C 'ye kadar, sürekli hizmette ise 925 °C 'ye kadar iyi bir oksidasyon direncine sahiptir. Gerilme korozyonu 60 °C 'yi aşan sıcaklıklarda kloridli ortamlar içinde ve çekme gerilimine maruz kaldıkları zaman oluşabilir. Sıvılaştırılmış gazların düşük sıcaklıklarında mükemmel bir tokluğa sahiptirler. Karbit terlemesine karşı makul dirençleri vardır. Endüstride ve mimari uygulamalarda birçok parça çeşidi üretiminde kolayca bükülerek ve haddelenerek kullanılabilir. Tavlama, 1010 -1120 °C sıcaklığa ısıtarak hızlı soğutmayla (genelde suya daldırarak) gerçekleştirilir. Genelde azami 400 °C gerilim alma sıcaklığı ve daha uzun süre suya daldırma işlemi kullanılmalıdır. Bünyesinde bulunan molibdenden dolayı çukurcuk (karıncalanma) korozyonu ve yırtıklar gibi lokal korozyonlara, fosforik ve asetik asitlere karşı da iyi bir dirence sahiptir. Kâğıt ve meyve hamuru işleyen sanayilerde bulunan en karmaşık sülfür bileşkeklerine ve

atmosferik şartlarda deniz ortamına karşı da mükemmel dirence gösterirler. Eğer yavaş bir besleme yapılırsa, düşük hızlarda ve soğutma sıvısı kullanarak, sert ve keskin uçlarla kolayca işlenebilir. Uygun bir kaynaklanabilme özelliği vardır. Kaynak sonrası tavlama, korozyon dayanımını korumak için gerekli olmasa da, bazen ağır ölçülü üretimlerde malzemeyi daha uygun kılar [44,s.495-531,53-55].

2. ARAÇ VE YÖNTEMLER

2.1 Denejde Kullanılan Sürtünme Kaynak Makinesi

Deneyisel çalışmalar için BAÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Laboratuvarında bulunan ve bilgisayar kontrollü çalışan sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi kullanılmıştır (Şekil 2.1).



- | | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| 1. Ana tahrik motoru | 9. Çift etkili hidrolik silindir |
| 2. "V" Kayış | 10. Bilgisayar |
| 3. Kasnak | 11. Elektronik kontrol ünitesi |
| 4. Elektromanyetik kavrama | 12. Elektrik-kumanda devresi |
| 5. Elektromanyetik fren | 13. Basınç hattı |
| 6. Ayna | 14. Dönüş hattı |
| 7. Pens | 15. Hidrolik ünite |
| 8. Piston kolu | 16. Kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı |

Şekil 2.1 Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinin şematik şekli

2.2 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneylerde AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliği ile Ck 45 alaşımsız asal çeliği kullanılmıştır.

2.2.1 AISI 316 Paslanmaz Çeliğin Kullanıldığı Yerler

Tüm mimari uygulamalarda oluşabilecek paslanmalara karşı dirençlidir. Deniz suyuna karşı ve hatta deniz gören yapılar, köprü bağlantı ve kirişleri gibi çok zor şartlar içinde bazen kullanılır. En yaygın kullanılan implant malzemesidir. Organik ve geniş bir inorganik kimyasal grubuna dayanım gösterir. Özellikle kloridli ortamlarda yiyecek hazırlama ekipmanlarında, laboratuvar tezgahları ve ekipmanları, tekne parçaları, eşanjörler, diş bağlantı elemanları, su filtresi cihazları, kimya, petrokimya ve boya endüstrisi, buhar kazanları, meyve suyu, içki, ilaç ve vernik üretim tesisleri, tekstil makineleri ve et işleme ünitelerinde kullanılmaktadır [53-56].

2.2.2 Ck 45 Çeliğin Kullanıldığı Yerler

Ck 45 Alaşımsız asal çeliği, taşıtlar için, mil, kovan (burç), krank mili, biyel kolu gibi bileşen parçaları ve makine parçaları, inşaat sanayi, balta, çekiç ve bıçak gibi malzemelerin yapımında kullanılmaktadır. Daha fazla güç ve sertlik istendiğinde haddelenmiş olarak kullanılır [42,57].

2.2.3 AISI 316 ve Ck 45 Çeliklerin Özellikleri

Kaynak işleminde kullanılan AISI 316 ve Ck 45 çeliklerinin literatüre göre mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 2.1 'de verilmiştir [47,48,53,57]. Malzemelerin mevcut durumunu belirlemek için çekme, sertlik ve kimyasal analiz testleri yapılmış ve mikro yapıları incelenmiştir. Malzemelerin Balıkesir 1012 Ana Tamir Fabrikası Laboratuvarında bulunan BAIRD marka spektrum analiz cihazı ile

kimyasal analizleri yapılmıştır. AISI 316 çeliğine ait kimyasal değerler Tablo 2.2 'de ve Ck 45 çeliğine ait kimyasal değerler Tablo 2.3 'de görülmektedir.

Tablo 2.1 Numunelerin standart mekanik ve kimyasal özellikler

	Mekanik Özellikler		% Kimyasal Özellikler	
	AISI 316	Ck 45	AISI 316	Ck 45
Çekme Dayanımı (MPa)	515	520-700	C=0,08	C=0,40-0,50
Sertlik (HB)	217	218	Cr=16-18	Cr=0,40 max.
			Ni=10-14	Ni=0,40 max.
			Si=0,75	Si=0,40 max.
			P= 0,045	P=0,035
			S= 0,03	S=0,035
Mn=2	Mn=0,50-0,80			
Mo=2,0-3,0	Mo=0,10			
Sıcak Şekil Verme Sıcaklığı (°C)	1150-850	1050-850		
Isı iletim katsayısı (W/mmK)	0.0163	0.0519		
Yoğunluk (g/mm ³)	0.008	0.008		
Özgül Isı (J/g-K)	0.5	0.486		

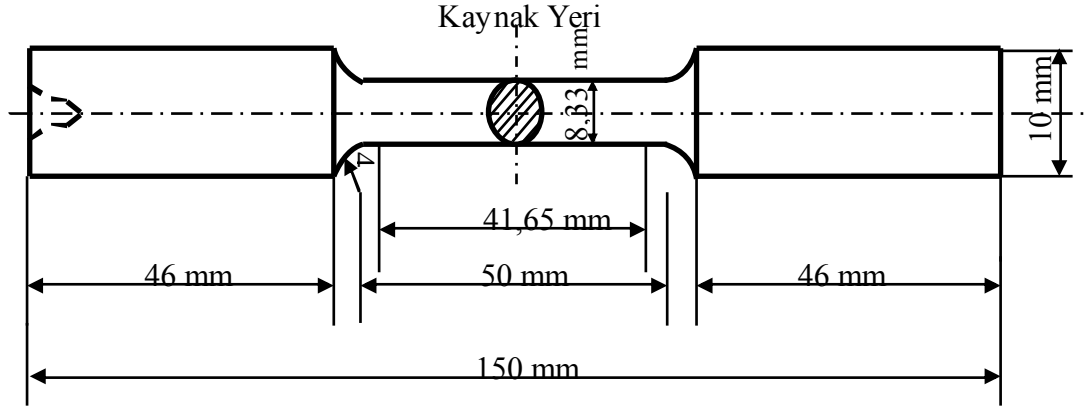
Tablo 2.2 AISI 316 Çeliğinin spektrum analiz değerleri

Element	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Sn	S
%Ağırlık	67,561	0,032	17,060	10,630	1,464	2,098	0,378	0,011	0,018
Element	Co	Nb	Ti	Al	Cu	V	B	W	Pb
%Ağırlık	0,222	0,002	0,001	0,011	0,392	0,084	0,002	0,033	

Tablo 2.3 Ck 45 Çeliğinin spektrum analiz değerleri

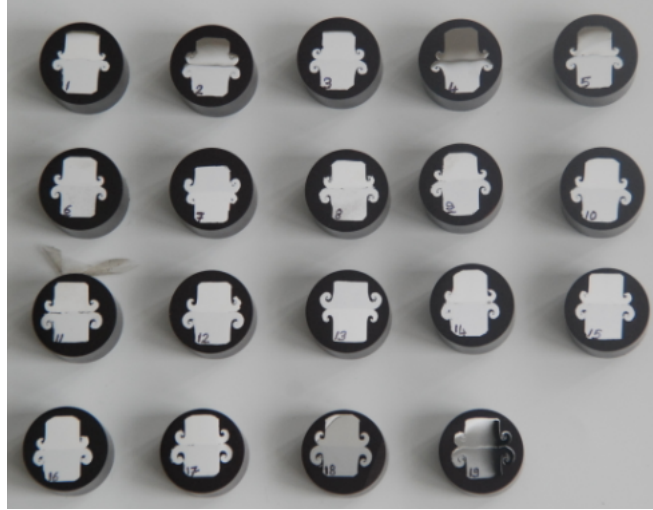
Element	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	P	S
%Ağırlık	98,073	0,390	0,213	0,113	0,646	0,033	0,212	0,026	0,009
Element	Co	Nb	Ti	Al	Cu	V	B	W	Pb
%Ağırlık	0,009	0,003	0,001	0,019	0,231	0,005	0,001	0,014	0,001

Ana malzemeler ve kaynaklı numuneler TS 287 EN 895 ölçülerine göre universal torna tezgâhında Şekil 2.2 'deki boyutlarda çekme testi için hazırlanmıştır [42]. Çekme testi Ankara ROKETSAN A.Ş. laboratuvarında bulunan bilgisayar kontrollü “Instron Corporation” marka çekme cihazında 2 mm/dk hızında yapılmıştır.



Şekil 2.2 Çekme numune boyutu

Sertlik ölçümü için ana malzemeler ve kaynaklı numuneler yarıçapa kadar yatay olarak freze ile sıvı soğutma yapılarak işlenmiştir. Bu şekilde numunelerin fazla ısınmasına izin verilmeyerek, malzeme yapısında doğabilecek olası değişikliklerin önüne geçilmiştir. Daha sonra numuneler 20 mm boyunda kesilip bakalite alınmıştır. Bakalite alınmış numuneler mikro sertlik ölçümü için GÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metalürji Bölümü Laboratuvarında bulunan “METKON” marka zımpara ve parlatma cihazlarıyla sırasıyla P220, P400, P800 ve P1200’ lük zımpara ile sulu zımpara yapılmıştır. Sulu zımpara işleminden sonra sırasıyla 6µm, 3µm pasta ve keçe ile parlatılmıştır. Sulu zımpara ve parlatma işleminden sonra numune yüzeyleri metil alkol ile temizlenerek olası oksitlenmenin önüne geçilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Bakalite alınmış kaynaklı numuneler

Mikrosertlik testi Balıkesir Astsubay Meslek Yüksek Okulu laboratuvarındaki “METKON” marka sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Deneyde 50 gr’lık yük 5 saniye süre ile uygulanmış ve HV (Vickers) cinsinden sertliği okunmuştur.

Malzemelere ait ortalama çekme dayanımları ve sertlik değerleri Tablo 2.4’de, AISI 316 çeliğinin kırılma resmi Şekil 2.4’de ve Ck 45 çeliğinin kırılma resmi Şekil 2.5’de görülmektedir.

Tablo 2.4 AISI 316 ve Ck 45 Çeliklerine ait mekanik özellikler

	Mekanik Özellikler	
	AISI 316	Ck 45
Çekme Dayanımı (MPa)	663,55	715,2
Sertlik(HV)	218	222



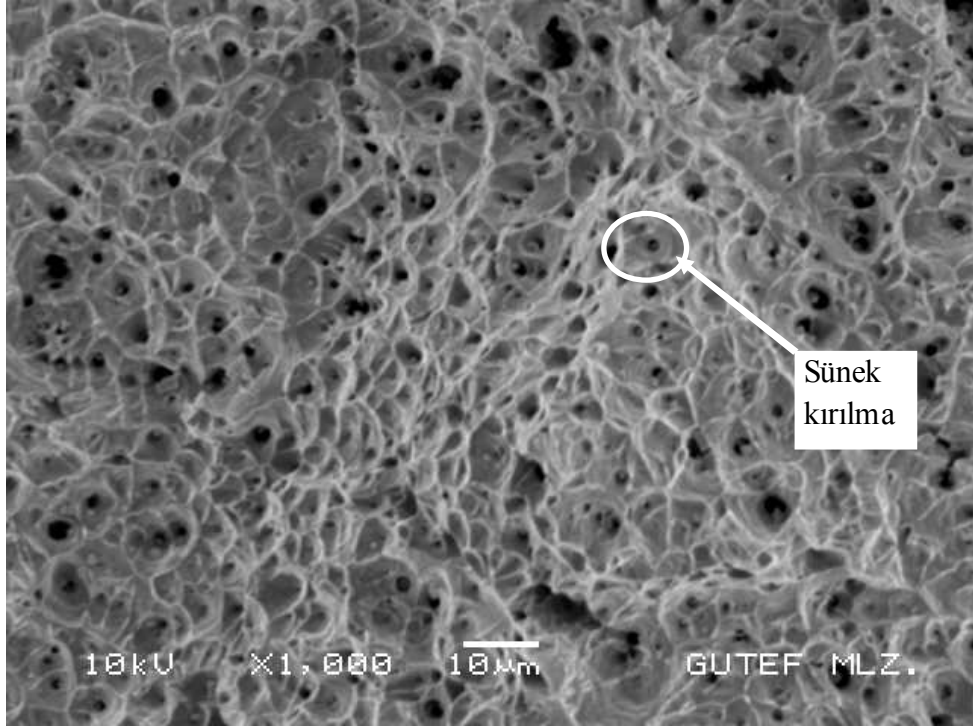
Şekil 2.4 AISI 316 Çeliğinin kırılma resmi



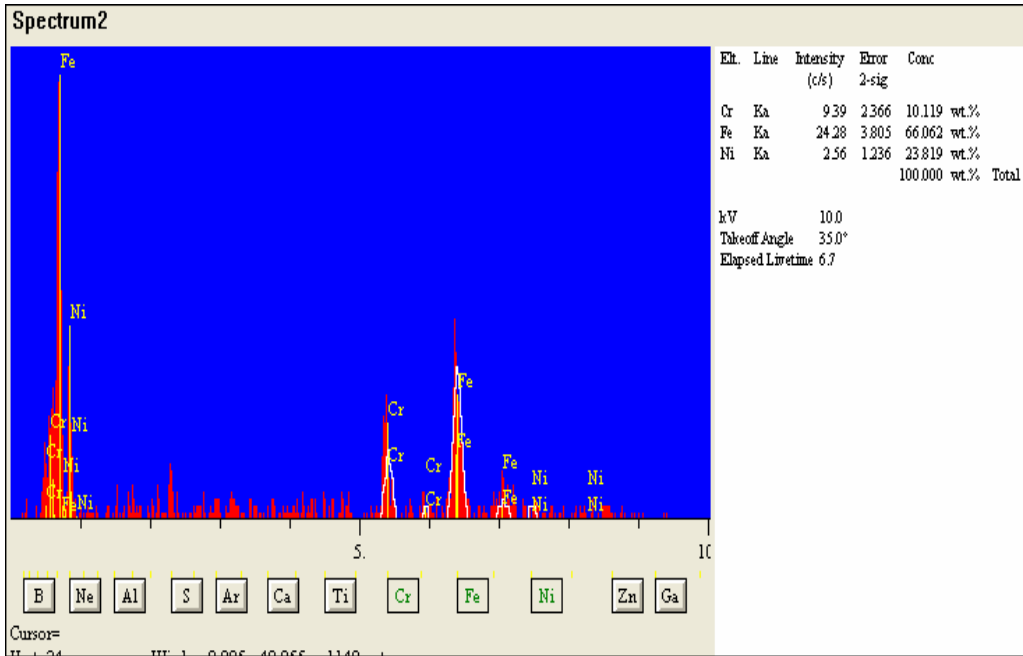
Şekil 2.5 Ck 45 Çeliğinin kırılma resmi

Ana malzemelerin ve kaynaklı numunelerin SEM ve EDS analizleri GÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metalürji Bölümü Laboratuvarında bulunan “JEOL JSM-6060LV” marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.

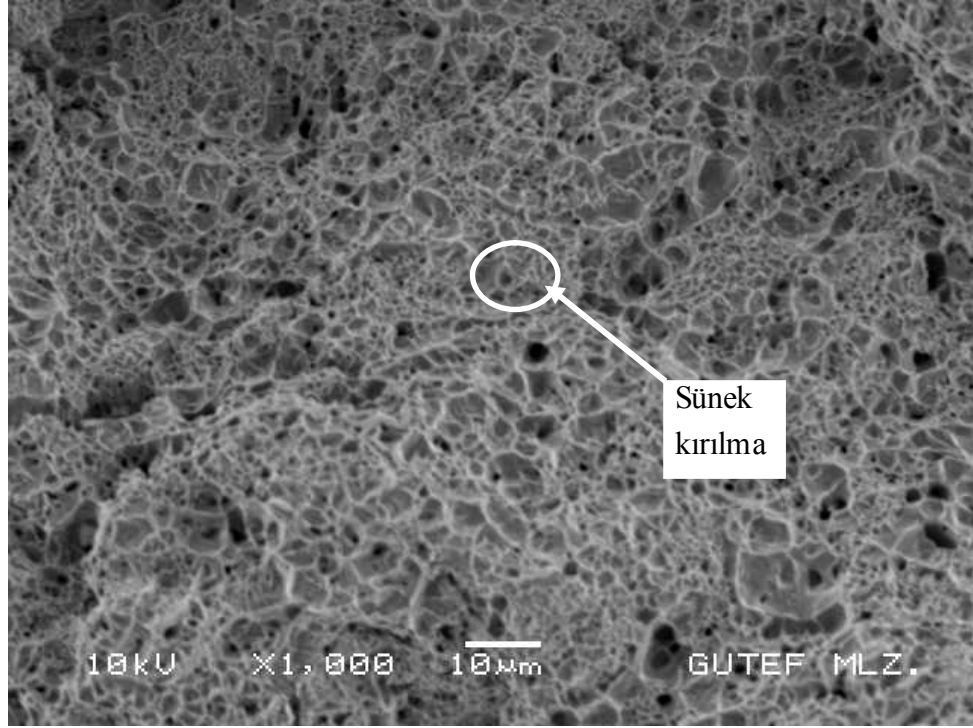
Çekme testi sonrası ana malzemelerin kırılma yüzeyi SEM incelemesi ve EDS analizleri yapılmıştır. AISI 316 çeliğine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü Şekil 2.6 ‘da ve EDS analizi Şekil 2.7 ‘de görülmektedir. Ck 45 çeliğine ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü Şekil 2.8 ‘de ve EDS analizi Şekil 2.9 ‘da görülmektedir. Her iki çeliğin kırılma yüzeyinin EDS analizi element dağılımı Tablo 2.5 ‘de görülmektedir. AISI 316 ve Ck 45 çeliklerinde kırılma sünek olmuştur (Şekil 2.4, Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.8).



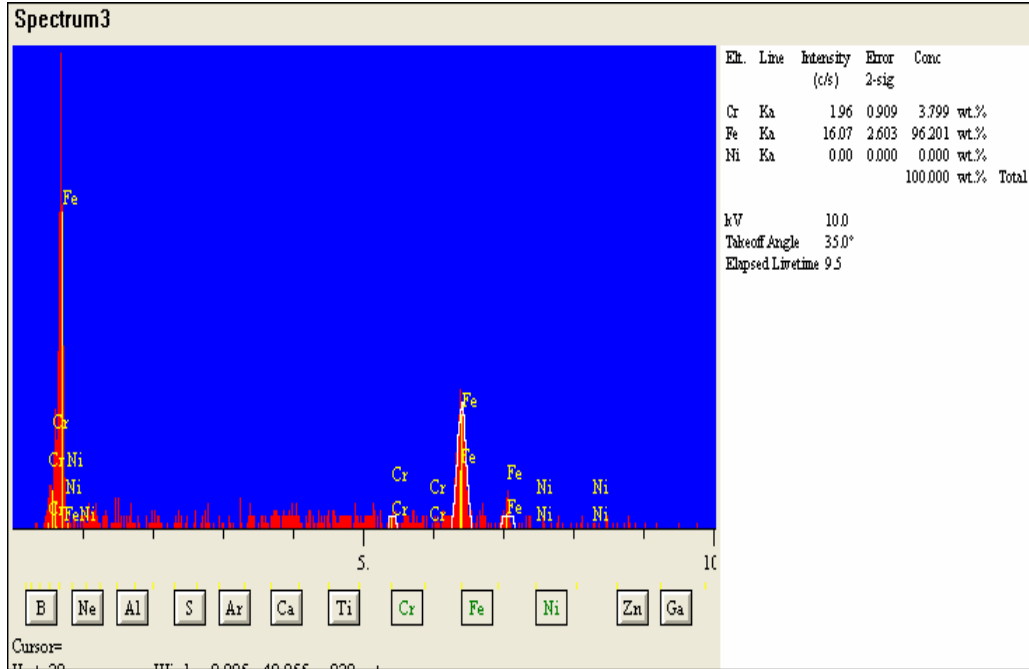
Şekil 2.6 AISI 316 Çeliğinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 2.7 AISI 316 Çeliğinin kırılma yüzeyinin EDS analizi



Şekil 2.8 Ck 45 Çeliğinin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 2.9 Ck 45 Çeliğinin kırılma yüzeyinin EDS analizi

Tablo 2.5 AISI 316 ve Ck 45 Çeliklerinin kırılma yüzeyinin EDS analizi

Element %	AISI 316	Ck 45
Cr	10,119	3,799
Ni	23,819	0
Fe	66,062	96,201

Ana malzemelerin ve kaynaklı numunelerin mikroyapı incelemesi GÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metalürji Bölümü Laboratuvarında bulunan “Leica” marka optik mikroskop ile yapılmıştır.

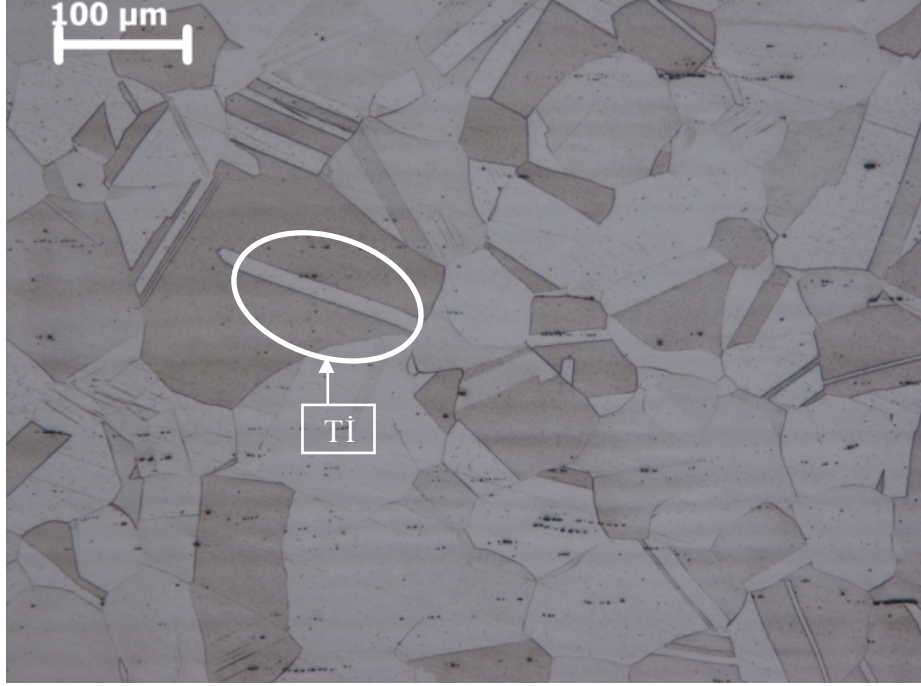
Mikro yapı incelemesi için numuneler yarıçapa kadar yatay olarak freze ile işlendikten sonra GÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metalürji Bölümü Laboratuvarındaki “METKON” marka zımpara ve parlatma cihazlarıyla sırasıyla P220, P400, P800 ve P1200’ lük zımpara ile sulu zımpara yapılmıştır. Daha sonra sırasıyla 6µm, 3µm, 1µm pasta ve keçe ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra numune yüzeyleri metil alkol ile temizlenerek olası oksitlenmenin önüne geçilmiştir.

Ck 45 çeliği, % 2 HNO₃ (nitrik asit) + % 98 metil alkol dağlayıcıda 10 saniye tutularak dağlanmıştır. AISI 316 çeliği, 10 gr H₂C₂O₄ (oxalic asit) + 100 mL H₂O (su) çözeltisi ile 15 volt, 1,5 amper akım 120 saniye uygulanarak elektrolitik dağlama ile dağlanmıştır [47,s.236-244]. Elektrolitik dağlama için GÜ Teknik Eğitim Fakültesi Metalürji Bölümü Laboratuvarındaki “Struers” marka cihaz kullanılmıştır.

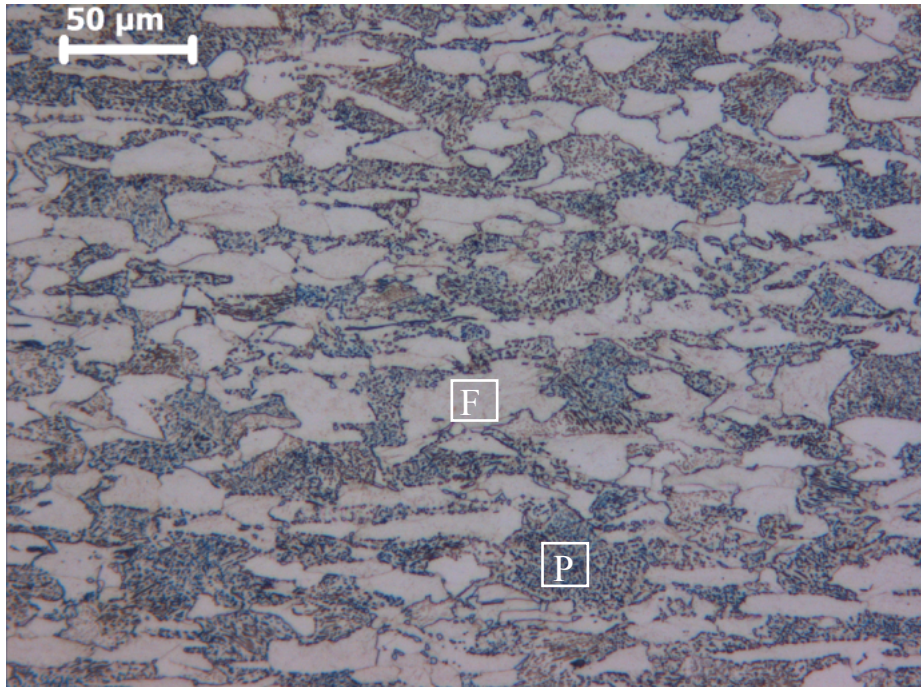
Kaynaklı numunelerin ilk önce Ck 45 çeliği tarafı dağlanmış, mikroyapıları incelenmiş ve EDS analizleri yapılmıştır. Daha sonra kaynaklı numuneler tekrar parlatılma işlemine tabii tutulduktan sonra AISI 316 çeliği tarafı dağlanarak mikroyapıları incelenmiş ve EDS analizleri yapılmıştır.

AISI 316 çeliğine ait mikro yapı resmi Şekil 2.10 ’da ve Ck 45 çeliğine ait mikro yapı resmi de Şekil 2.11 ’de görülmektedir. AISI 316 çeliğinin

mikroyapısında tavlama ikizleri görülmektedir [47]. Mikro yapı incelemesi ile malzemelerin kaynak öncesi tane yapısı belirlenmiştir.



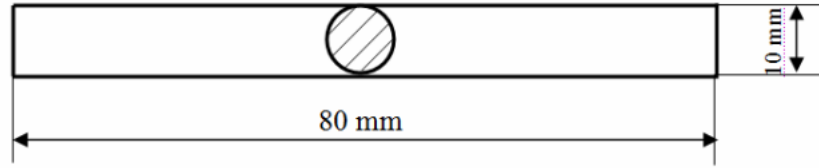
Şekil 2.10 AISI 316 Çeliği mikro yapı resmi (ostenit yapı, Tİ: tavlama ikizi)



Şekil 2.11 Ck 45 Çeliği mikro yapı resmi (F: ferrit yapı, P: perrit yapı)

2.3 Numune Boyutları

Deney numune çiftleri üniversal torna tezgâhında silindirik çubuklar şeklinde 80 mm uzunlukta (sürtünme kaynak makinesinin ayna ve pensinin kaynak ısısından etkilenmemesi için) ve 10 mm çapta imal edilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Deney numune boyutu

2.4 AISI 316 Çeliğin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmesi

Literatür çalışmasından AISI 316 çeliğine yakın AISI 304 çeliğinin sürtünme kaynağı parametreleri tespit edilmiştir [3,5,9]. Literatür çalışmasından elde edilen sürtünme kaynağı parametreleri ve AISI 316 çeliğinin özellikleri dikkate alınarak Tablo 2.6 'da belirlenen kaynak parametreleri ile AISI 316 çeliğinin sürtünme kaynağıyla birleştirme işlemi ön çalışma olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.13).

Tablo 2.6 AISI 316 Çeliğinin sürtünme kaynağı parametreleri ve çekme dayanımı

Numune No	Kaynak Parametreleri				Toplam Boyda Kısılma (mm)	Çekme Gerilmesi (MPa)	AÇIKLAMA
	Sürtünme Zamanı (s)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Yığılma Zamanı (s)	Yığılma Basıncı (MPa)			
AISI 316						663,55	Sünek kırılma
N 1	5	81,00	10	162,00	1,6	178,88	Gevrek kırılma
N 2	5	121,5	10	162,00	3,2	333,3	Gevrek kırılma
N 3	5	162,00	10	162,00	7,7	388,86	Gevrek kırılma
N 4	8	81,00	10	162,00	4,5	584,11	Gevrek-sünek kırılma
N 5	8	121,5	10	162,00	6,4	531,02	Gevrek kırılma
N 6	8	162,00	10	162,00	12,8	460,62	Gevrek kırılma



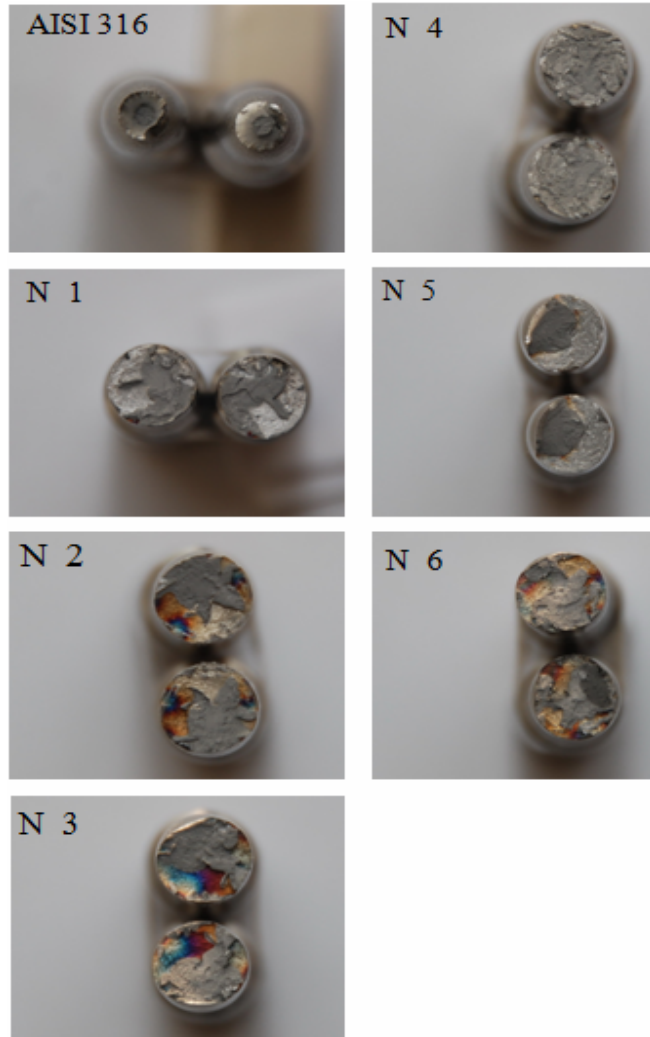
Şekil 2.13 Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 316 çeliği resimleri

Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 316 çeliği numunelerine çekme testi uygulanmıştır (Tablo 2.6). Çekme testleri sonunda en düşük çekme gerilmesi 178.88 MPa ile numune 1 'de ve en yüksek çekme gerilmesi 584,11 MPa ile numune 4 'de görülmüştür. En düşük çekme dayanımı değerine göre bakıldığında ana malzemeden (AISI 316: 663.51 MPa) % 78.70 daha az çekme dayanımı, en yüksek çekme gerilmesi değerine göre bakıldığında % 12.90 daha az çekme dayanımı elde edilmiştir. Deneyler esnasında sürtünme devri 3000 dev/dk, yığma zamanı 10 s ve yığma basıncı 162 MPa olarak sabit alınmıştır. Sürtünme basıncı 81 MPa 'da sabit tutulup, sürtünme süresi 5 s 'den 8 s 'ye çıkartıldığında dayanımın 405.23 MPa arttığı, sürtünme basıncı 121.5 MPa 'da sabit tutulup, sürtünme süresi 5 s 'den 8 s 'ye çıkartıldığında dayanımın 197.71 MPa arttığı ve sürtünme basıncı 162 MPa 'da sabit tutulup, sürtünme süresi 5 s 'den 8 s 'ye çıkartıldığında dayanımın 71.4 MPa arttığı görülmüştür. AISI 316 çeliğinin sürtünme kaynağında sürtünme süresi ve basıncının kaynak dayanımı üzerinde çok etkili olduğu tespit edilmiştir.

Kaynaklı numunelere uygulanan çekme testi sonucunda kırılma; numune 1, 2, 3, 5 ve 6 'da gevrek, numune 4 'de ise hem gevrek hem de kesit daralması ile kısmi olarak sünek olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.14 ve Şekil 2.15).



Şekil 2.14 Kaynaklı AISI 316 çeliği kırılma resimleri



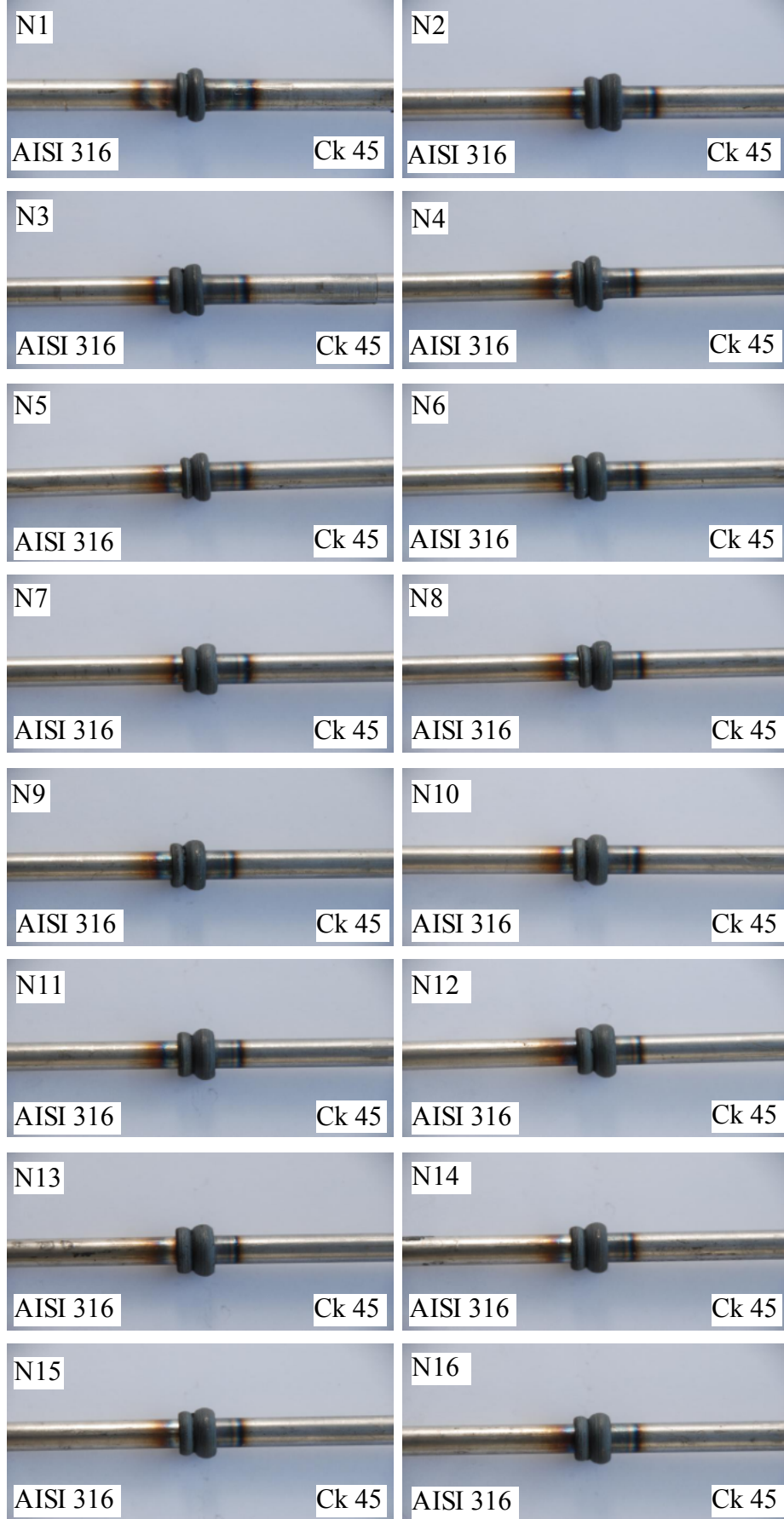
Şekil 2.15 Kaynaklı AISI 316 çeliği kırılma yüzeyi resimleri

2.5 AISI 316 ile Ck 45 Çeliklerin Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmesi

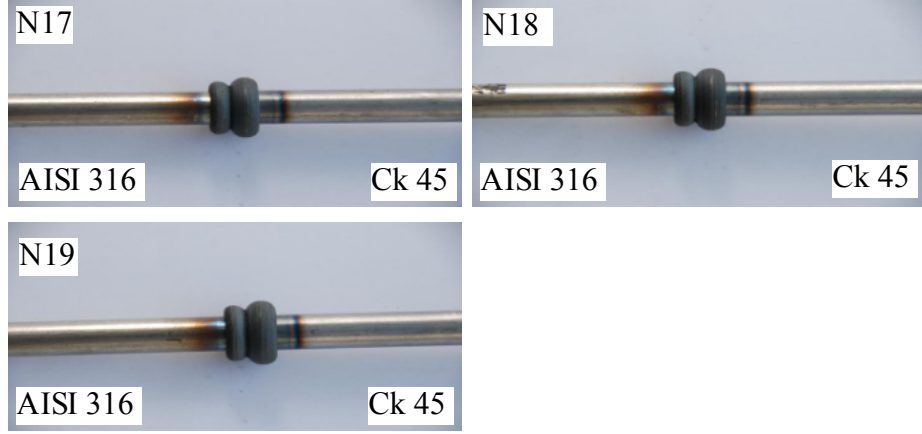
Literatür çalışmasından elde edilen sürtünme kaynağı parametreleri ve ön çalışma olarak yapılan AISI 316 çeliğinin sürtünme kaynağı sonuçları dikkate alınarak Tablo 2.7 'de belirlenen 19 adet kaynak parametresi ile AISI 316 çeliği ile Ck 45 çeliği sürtünme kaynağıyla birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.16). Her parametre için 5 adet numune kaynak edilmiştir. Deneyler esnasında devir sayısı 3000 dev/dk ve AISI 316 çeliğinin soğuması esnasında kritik alt sıcaklık değeri olan 450 °C 'ye düşüş zamanı dikkate alınarak yığılma süresi 20 s olarak sabit tutulmuştur.

Tablo 2.7 AISI 316 ile Ck 45 çeliklerinin sürtünme kaynağı parametreleri

Numune No	KAYNAK PAREMETRELERİ				
	Devir (dev/dk)	t _s (s)	Ps (MPa)	Pu (MPa)	t _u (s)
1	3000	8	80	160	20
2		8	80	200	20
3		10	80	160	20
4		10	80	200	20
5		6	100	120	20
6		6	100	160	20
7		6	100	200	20
8		8	100	120	20
9		8	100	160	20
10		8	100	200	20
11		10	100	120	20
12		10	100	160	20
13		10	100	200	20
14		6	120	120	20
15		6	120	160	20
16		6	120	200	20
17		8	120	120	20
18		8	120	160	20
19		8	120	200	20



Şekil 2.16 Kaynaklı numune resimleri



“Şekil 2.16 ‘nın devamı”

3. BULGULAR

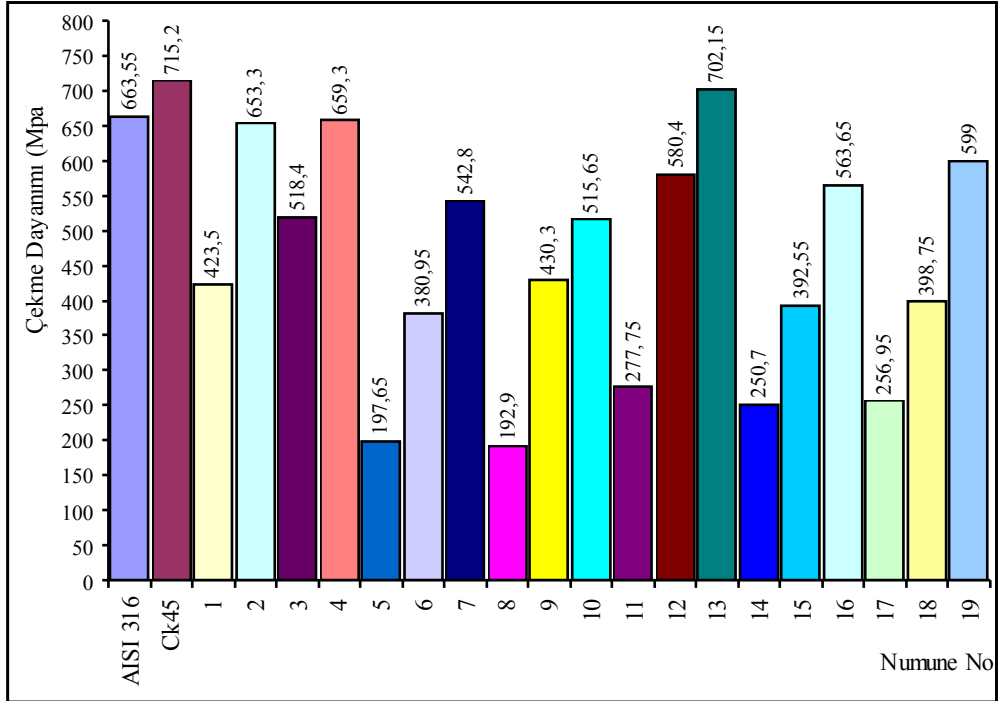
Kaynak işleminden sonra, AISI 316 ve Ck 45 çeliklerinde gerçekleşen boyda kısalma miktarları, her iki malzeme tarafında oluşan flaşların çapı ve genişliği tespit edilmiş ve ortalama değerleri Tablo 3.1 'de verilmiştir. Boyda kısalma miktarı, Ck 45 çeliğinde AISI 316 çeliğine göre daha fazla olmuştur.

Tablo 3.1 Kaynaklı numunelerin boyda kısalma miktarı, flaş çapı ve genişliği

NUMUNE NO	t_s (s)	Ps (Mpa)	Pu (Mpa)	t_u (s)	Ck45			AISI 316		
					BOYDA KISALMA (mm)	FLASH ÇAPI (mm)	FLASH GENİŞLİĞİ (mm)	BOYDA KISALMA (mm)	FLASH ÇAPI (mm)	FLASH GENİŞLİĞİ (mm)
1	8	80	160	20	4,21	17,03	3,55	2,34	14,55	2,3
2	8	80	200	20	5,58	17,51	4,14	3,86	15,56	2,98
3	10	80	160	20	5,11	17,58	3,98	3,53	15,21	2,8
4	10	80	200	20	6,25	18,21	4,36	4,40	15,93	2,95
5	6	100	120	20	4,30	16,63	4,16	2,29	14,46	2,49
6	6	100	160	20	4,50	16,64	4,23	2,58	14,68	2,6
7	6	100	200	20	4,76	16,78	4,15	2,75	15,00	2,64
8	8	100	120	20	6,10	17,49	4,95	3,81	15,48	3,58
9	8	100	160	20	6,23	17,55	5,03	3,64	15,46	3,35
10	8	100	200	20	6,51	17,89	5,03	4,35	15,60	3,48
11	10	100	120	20	7,15	18,04	5,48	4,23	15,84	3,71
12	10	100	160	20	7,70	18,31	5,44	4,50	16,24	3,66
13	10	100	200	20	8,13	18,56	5,30	4,83	16,51	3,75
14	6	120	120	20	6,00	17,26	5,14	3,18	15,11	3,43
15	6	120	160	20	6,01	17,26	5,19	3,41	15,09	3,24
16	6	120	200	20	6,18	17,39	4,98	3,45	15,19	3,34
17	8	120	120	20	7,78	18,18	5,84	4,21	15,89	4,05
18	8	120	160	20	7,98	18,25	5,83	4,65	15,96	4,1
19	8	120	200	20	8,31	18,39	6,00	4,75	15,86	4,04

3.1 Çekme Testi

Kaynaklı numunelere yapılan çekme testi sonuçları Şekil 3.1’de ve çekme testi sonrası kopan numunelerin resimleri Şekil 3.2-4 ‘de görülmektedir. Her bir kaynak numunesi için üç adet çekme testi yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır.



Şekil 3.1 Kaynaklı numunelerin çekme dayanımı



Şekil 3.2 Numune 4 kopma resmi

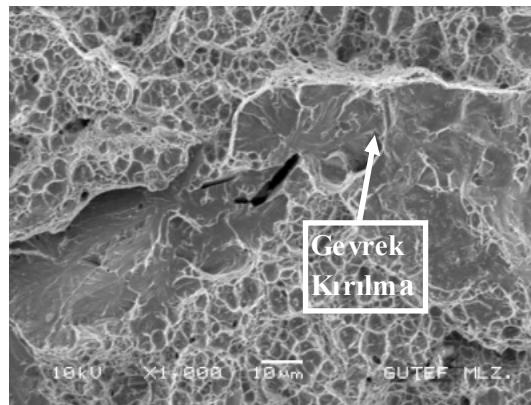


Şekil 3.3 Numune 8 kırılma resmi

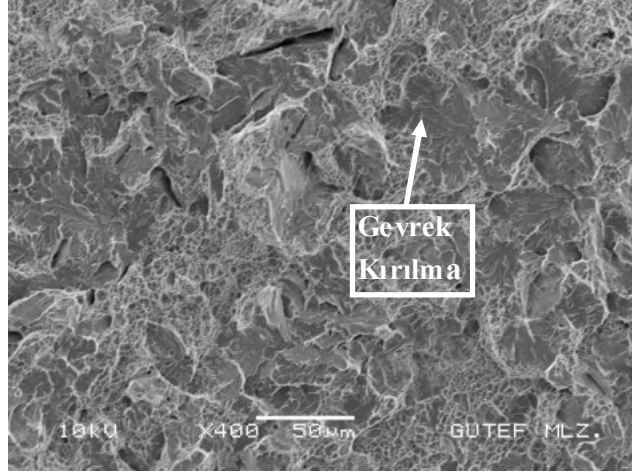


Şekil 3.4 Numune 13 kırılma resmi

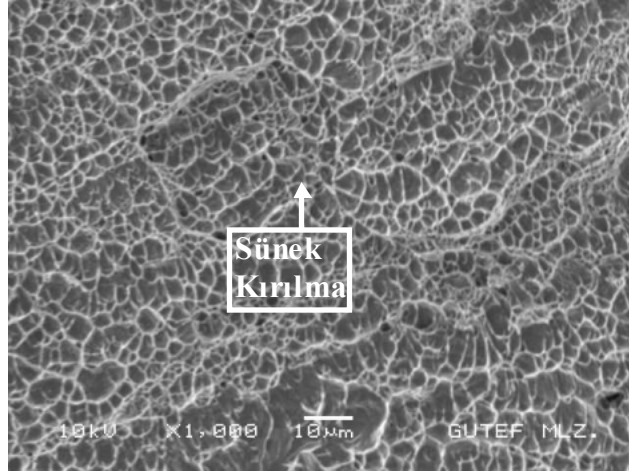
Çekme testinden sonra; en düşük, orta ve en yüksek dayanım değerine sahip numune 8, 9 ve 13 'ün kırılma yüzeyinin SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Numune 8 'in kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Şekil 3.5 'de, numune 9 'un kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Şekil 3.6 'da ve numune 13 'ün kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Şekil 3.7 'de görülmektedir.



Şekil 3.5 Numune 8 kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

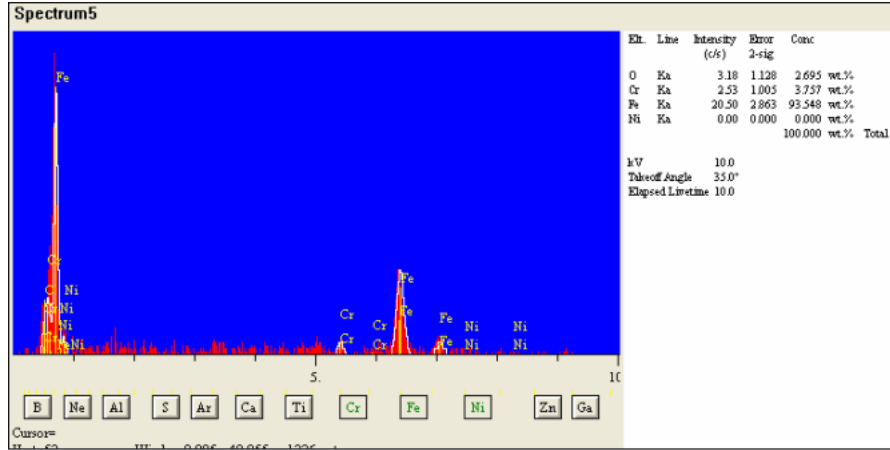


Şekil 3.6 Numune 9 kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

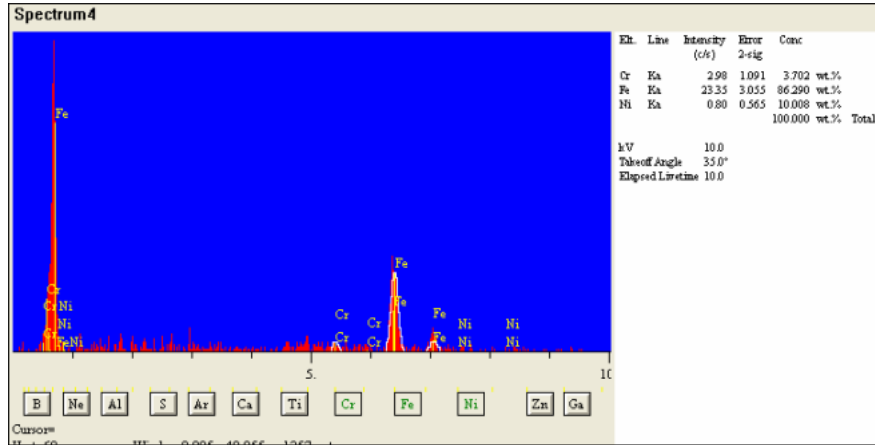


Şekil 3.7 Numune 13 kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

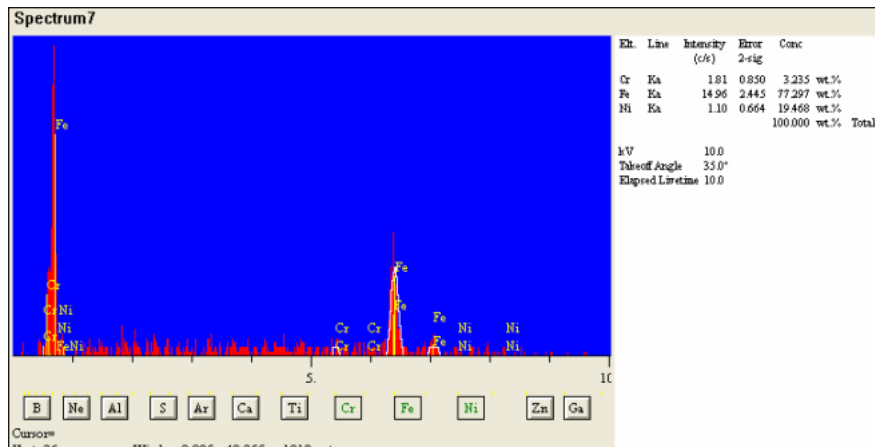
Numune 8 'in kırılma yüzeyi EDS analizi Şekil 3.8 'de, numune 9 'un kırılma yüzeyi EDS analizi Şekil 3.9 'da ve numune 13 'ün kırılma yüzeyi EDS analizi Şekil 3.10 'da görülmektedir. Numune 8, 9 ve 13'e ait kırılma yüzeyi element dağılımı Tablo 3.2 'de görülmektedir.



Şekil 3.8 Numune 8 kırılma yüzeyi EDS analizi



Şekil 3.9 Numune 9 kırılma yüzeyi EDS analizi



Şekil 3.10 Numune 13 kırılma yüzeyi EDS analizi

Tablo 3.2 Numune 8, 9 ve 13 kırılma yüzeyi element dağılımı

Element %	AISI 316	Ck45	N 8	N 9	N 13
Cr	10,119	3,799	3,757	3,702	3,235
Ni	23,819	0	0	10,00	19,468
Fe	66,062	96,201	93,548	86,290	77,297
O			2,695		

Çekme testi sonrası kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyi makro olarak incelendiğinde 5, 8 (Şekil 3.3) ve 11 numaralı numunelerde çevreden merkeze doğru daha derin, 6, 9, 14, 15, 17 ve 18 numaralı numunelerde çevreye yakın olarak, kısmen farklı renklemelerin olduğu bölgeler görülmektedir. Numune 8 'in EDS analizinde koyu renkli bölgede oksijene (% 2.695) rastlanması (Şekil 3.8) (Tablo 3.2), bu bölgelerde korozif bir yapının oluştuğunu göstermektedir. Renklemelerin görüldüğü numunelerin çekme dayanımları 192.9 – 398.75 MPa arasında çok düşük çıkmıştır. En düşük dayanımlar numune 5, 8 ve 11 'de görülmüştür (Şekil 3.1). Bu numunelerin kaynak parametreleri incelendiğinde, yığma basıncı 120 MPa olarak en düşük alınmıştır. Çekme dayanımı düşük çıkan diğer numuneler 6, 9, 14, 15, 17 ve 18 'de de yığma basınçları 120 MPa ile 160 MPa alınmıştır. Yığma basınçları 200 MPa alınan numunelerin çekme dayanımları yüksek çıkmıştır.

Kaynaklı numunelere uygulanan çekme deneyleri sonunda en düşük çekme gerilmesi 192.9 MPa ile numune 8 'de, en yüksek çekme gerilmesi 702,15 MPa ile numune 13 'de görülmüştür. En düşük çekme dayanımı değerine göre bakıldığında ana malzemedan (AISI 316: 663.53 MPa) % 64.4 daha az çekme dayanımı, en yüksek çekme gerilmesi değerine göre bakıldığında % 5,8 daha fazla çekme dayanımı elde edilmiştir. Numune 13 'ün kaynak parametreleri; 3000 dev/dk dönme hızında, 100 MPa sürtünme basıncı, 10 s sürtünme süresi, 200 MPa yığma basıncı ve 20 s yığma süresi optimum kaynak parametreleri olmuştur.

Kırılma yüzeylerinin makro incelemesinden ve SEM görüntülerinden numunelerin çoğunda kırılmanın gevrek olduğu görülmüştür. Numune 4 ve 13 'de kısmi olarak kesit daralması gözlenmiştir (Şekil 3.2-4). Numune 13 'ün kırılma yüzeyinin SEM incelenmesinde kırılmanın genel olarak sünek olduğu, fakat çok az

miktarda yer yer gevrek kırılmanında gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 3.7). Kırılma yüzeylerinin yapısı, kaynak parametrelerine göre değişim göstermiştir.

Ana malzemelerin ve kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyinin EDS analizinde, Cr oranı Ck 45 ana malzemesinin kırılma yüzeyinin Cr oranına çok yakın çıkmıştır. Yine bu numunelerin kırılma yüzeyinde Ni oranının değişim miktarı kadar, Fe oranı değişim göstermiştir. Numune 8 'in kırılma yüzeyinde oksijen elementi görülmüştür. Bu sonuçlar kırılmanın kaynak bölgesinin Ck 45 çeliği tarafında olduğunu göstermektedir.

3.2 Mikrosertlik Testi

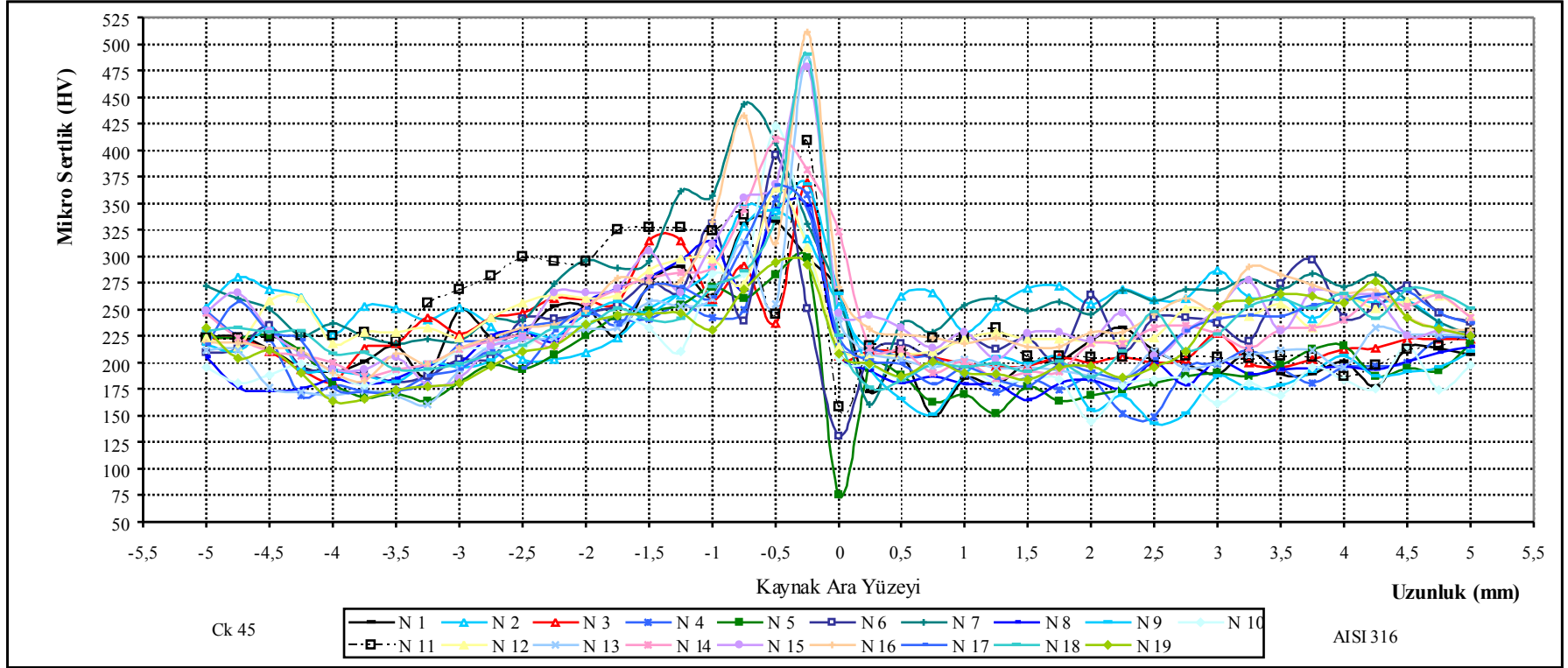
Kaynaklı numunelerin mikrosertlik değeri yatay ve dikey doğrultuda yapılmıştır (Şekil 3.11). Yatay doğrultuda kaynak ara yüzeyinden her iki malzeme tarafına doğru 0.25 mm mesafe aralıklarla 40 noktadan yapılmıştır. Kaynak ara yüzeyinin merkezinden dışa doğru dikey doğrultuda 0.5 mm mesafe aralıklarla 10 noktadan yapılmıştır.



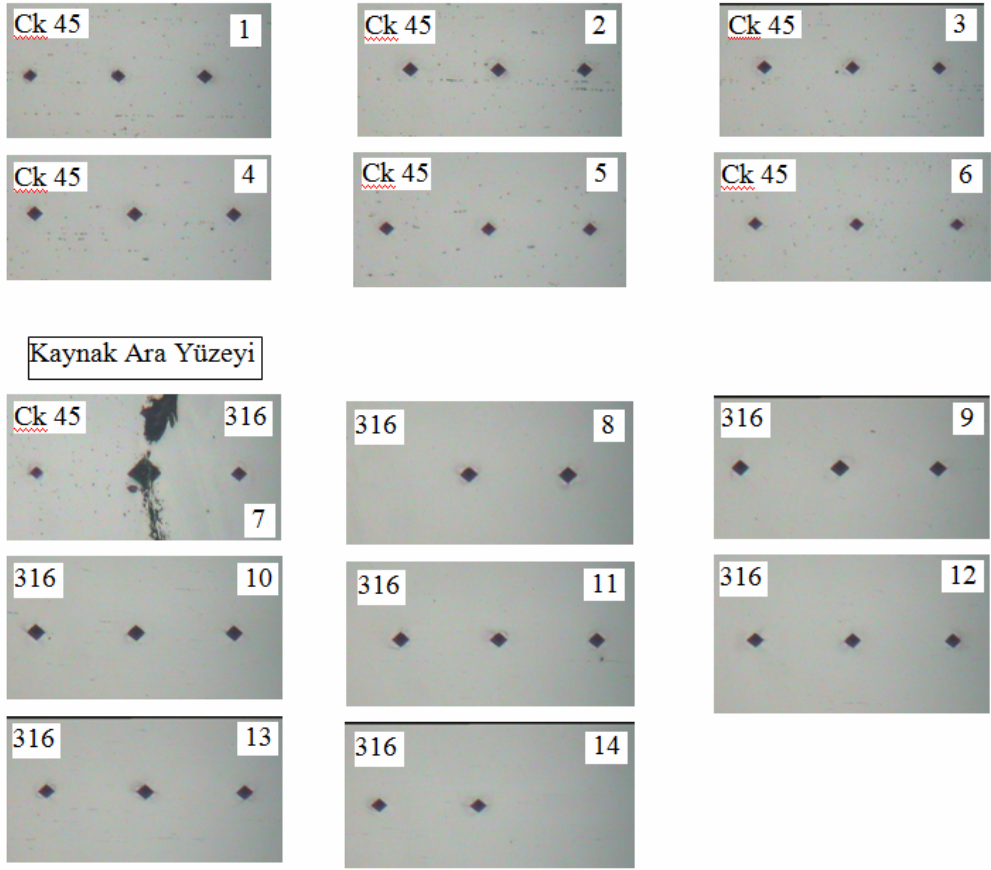
Şekil 3.11 Sertlik ölçümünün yapıldığı doğrultu ve yerler

3.2.1 Yatay Doğrultuda Mikrosertlik Dağılımı

Kaynak ara yüzeyinden yatay doğrultuda her iki ana malzeme tarafına doğru elde edilen sertlik değerleri Şekil 3.12 'de grafik olarak verilmiştir. Numune 5' in sertlik ölçüm izleri Ck 45 ana malzemesinden AISI 316 ana malzemesine doğru yan yana sırasıyla Şekil 3.13 'de verilmiştir. Numune 6 ve numune 11 'in kaynak ara yüzeyindeki sertlik ölçüm izleri resmi Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 'de görülmektedir.



Şekil 3.12 Yatay eksenle sertlik dağılımı (x eksenini doğrultusunda)



Şekil 3.13 Numune 5 sertlik ölçüm izleri



Şekil 3.14 Numune 6 sertlik ölçüm izleri



Şekil 3.15 Numune 11 sertlik ölçüm izleri ve çatlak yeri

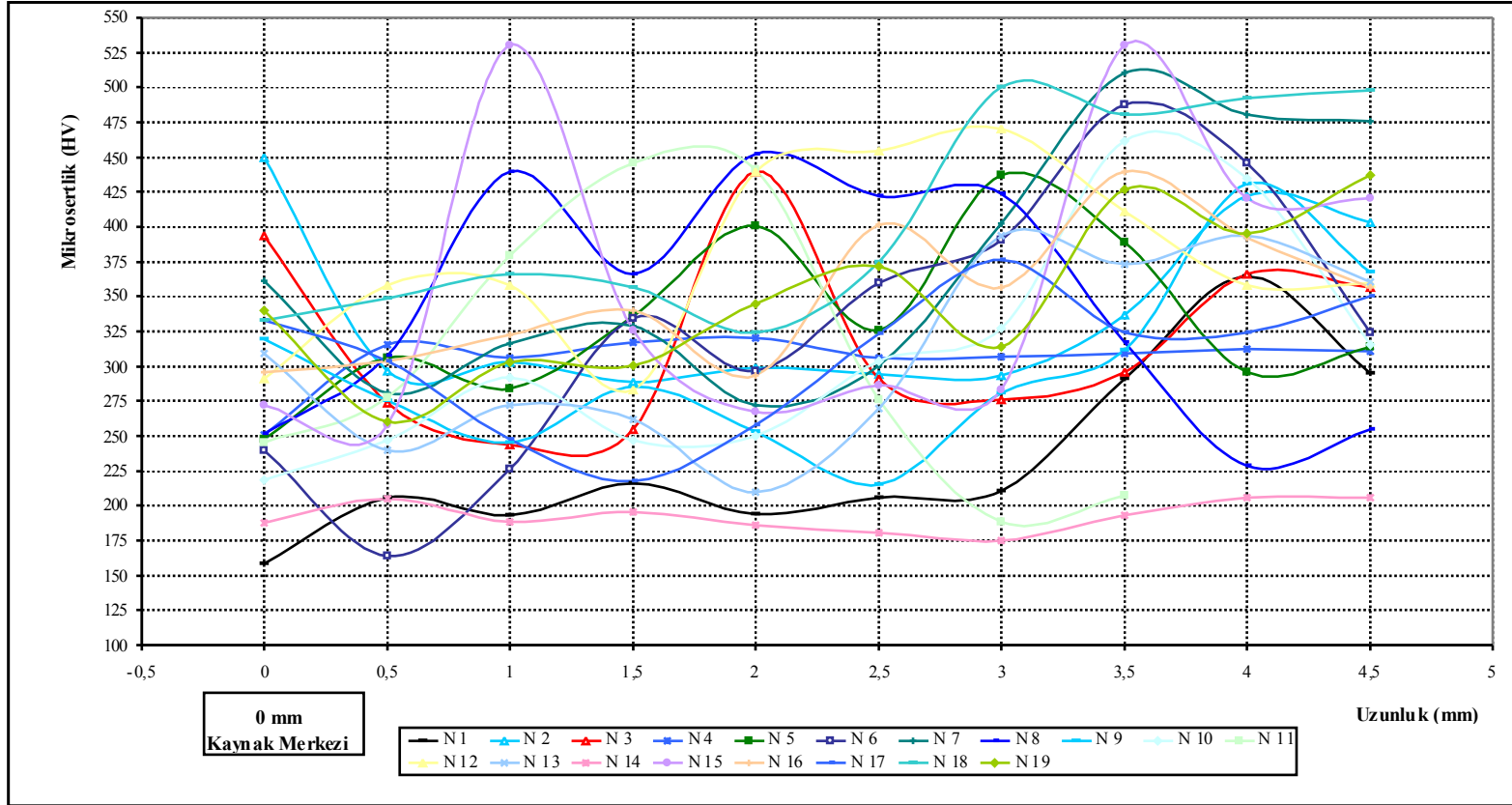
Şekil 3.12 incelendiğinde kaynak ara yüzeyindeki sertlik değeri bazı numunelerde (numune 3, 4, 8, 10, 12, 17, 18 ve 19) ana malzemelerin sertlik değerine çok yakın, bazı numunelerde (numune 1, 2, 7, 9, 13, 14, 15 ve 16) ana malzemelerin sertlik değerinden yüksek ve numune 5, 6 ve 11 'de ana malzemelerin sertlik değerinden çok düşük çıkmıştır. Sertlik değerinin çok düşük çıktığı numune 5, 6 ve 11 'de sertlik ölçüm yerlerinin çatlığa denk geldiği gözlenmiştir (Şekil 3.13, 3,19 ve Şekil 3.15).

Kaynak ara yüzeyinden Ck 45 çeliği tarafına gidildikçe, ilk 1 mm 'lik mesafe boyunca sertlik değeri ani olarak yükselme göstermiş, 1-2.5 mm arasında bu artış giderek azalan bir eğilim göstererek Ck 45 çeliği sertlik değerine ulaşmış, 2.5-3 mm arasında yatay olarak seyretmiş, 3-4 mm arasında az miktarda düşüş göstermiş ve 4 mm 'den sonra ana malzemenin sertlik değerine ulaşmıştır. Ck 45 çeliğinin mikroyapı incelemesinde, kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde martenzit yapının oluştuğu, ana malzemeye doğru gidildikçe; önce kaba taneli yapı, sonra ince taneli yapı, belli bir mesafeden sonra ana malzemenin tane boyutuna tekrar ulaştığı görülmüştür. Bu durum, sertlik dağılımı ile paralellik göstermiştir.

Kaynak ara yüzeyinden AISI 316 çeliği tarafına gidildikçe, sertlik değerinin genelde değişmediği gözlenmiştir. Ostenitik paslanmaz çelikte sıcaklık değişimi ile faz dönüşümü gerçekleşmediği için sertlik değişiminin çok fazla gerçekleşmediği düşünülmektedir.

3.2.2 Dikey Doğrultuda Mikrosertlik Dağılımı

Kaynak ara yüzeyinin merkezinden çevreye doğru dikey doğrultuda elde edilen sertlik değerleri Şekil 3.16 'da grafik olarak verilmiştir. Numune 11 'in son iki ölçüm yeri çatlığa denk geldiğinden sertlik değeri ölçülemediği (Şekil 3.15). Grafik incelendiğinde dikey doğrultuda, numune 14' de sertlik değeri değişmemiştir. Numune 1 'in kaynak merkezinde, numune 6 'nın 0.5 mm mesafedeki sertlik değeri düşük çıkmıştır. Numune 1 ve 6 'da bu noktalardaki sertlik değerinin düşük çıkmasının, ölçümün çatlığa gelmiş olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Diğer numunelerin sertlik değeri dikey doğrultuda bazı noktalarda yüksek, bazı noktalarda ise ana malzemelerin sertlik değerine yakın çıkmıştır. Bu durumun, kaynak ara yüzeyinde malzemelerin biri birine geçiş yapmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Şekil 3.17-29). Çünkü bazı ölçümler bu malzeme geçişinden kaynaklanan martenzit yapının oluştuğu Ck 45 çeliğine rastlayarak yüksek çıkmıştır. Bazı ölçümler de AISI 316 çeliğine rastlayarak ana malzemelerin sertlik değerine yakın çıkmıştır (Şekil 3.14-15). Belirtilen sertlik değişimlerini mikroyapı görüntüleri de desteklemektedir.



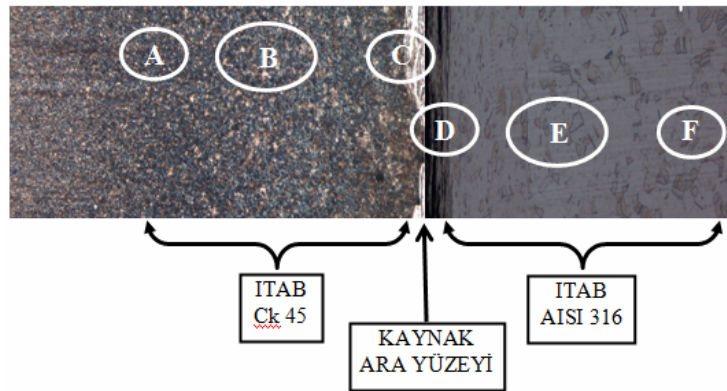
Şekil 3.16 Dikey ekseninde sertlik dağılımı (y eksenini doğrultusu)

3.3 Mikroyapı İncelemesi

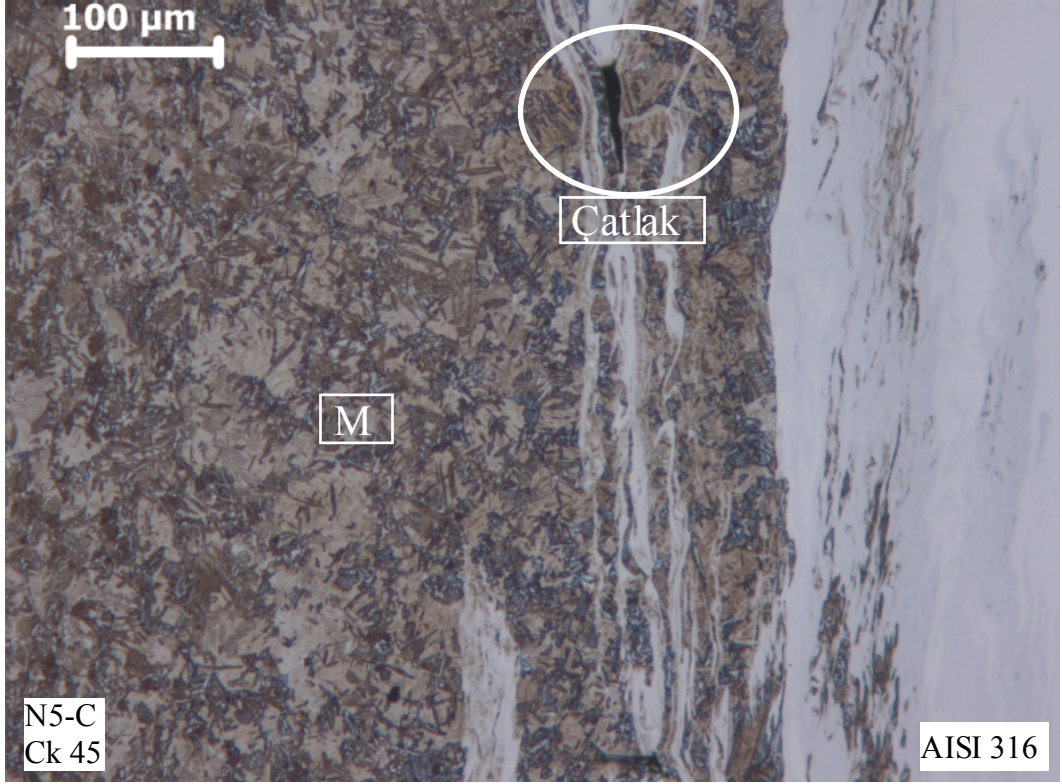
Kaynaklı numunelerin tamamında optik mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Optik mikroyapı incelemesi sonucunda uygun görülen kaynaklı numunelere SEM incelemesi ve EDS analizleri yapılmıştır.

3.3.1 Optik Mikroyapı İncelemesi

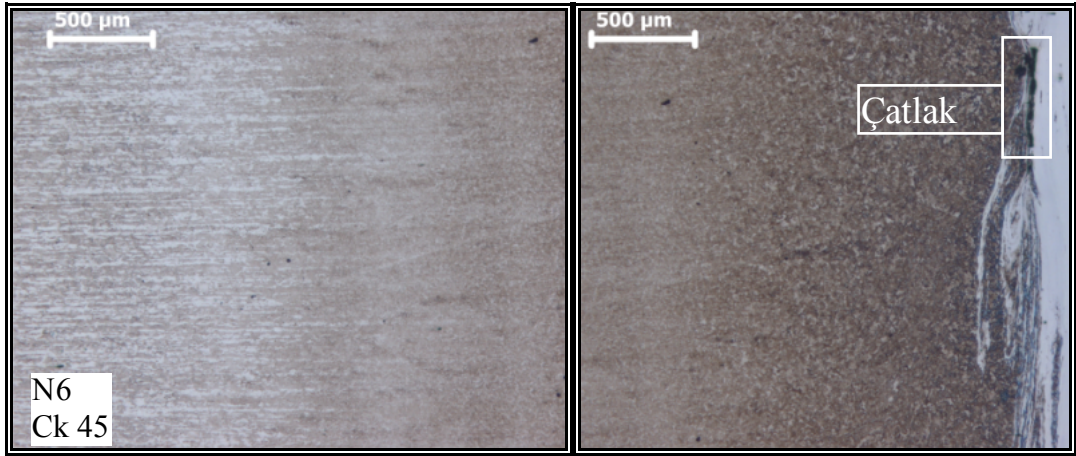
Kaynaklı numunelerin tamamında her iki malzeme tarafında genel mikroyapı görüntüsü (25X) alınarak mikroyapıları hakkında bilgi edinilmiştir. Bu bilgilerin doğrultusunda daha sonra çekme dayanımı değerlerine göre ihtiyaç duyulan kaynaklı numuneler için Ck 45 çeliği ana malzemesi tarafından başlayıp, AISI 316 çeliği ana malzemesine kadar sırasıyla Şekil 3.17 'de görülen 6 bölgeden (A, B, C, D, E ve F bölgeleri) daha ayrıntılı optik mikroyapı incelemesi yapılmıştır (Şekil 3.18-27). AISI 316 çeliğinin dağlama çözeltisi, kaynak bölgesindeki malzeme geçişlerinin olduğu Ck 45 çeliğini olumsuz etkilemiştir ve bu durum D bölgesindeki mikroyapı görüntülerinde kararmalar şeklinde görülmektedir. Mikroyapı incelemesi sırasında her iki malzemenin ITAB genişliği de ölçülmüştür (Tablo 3.3).



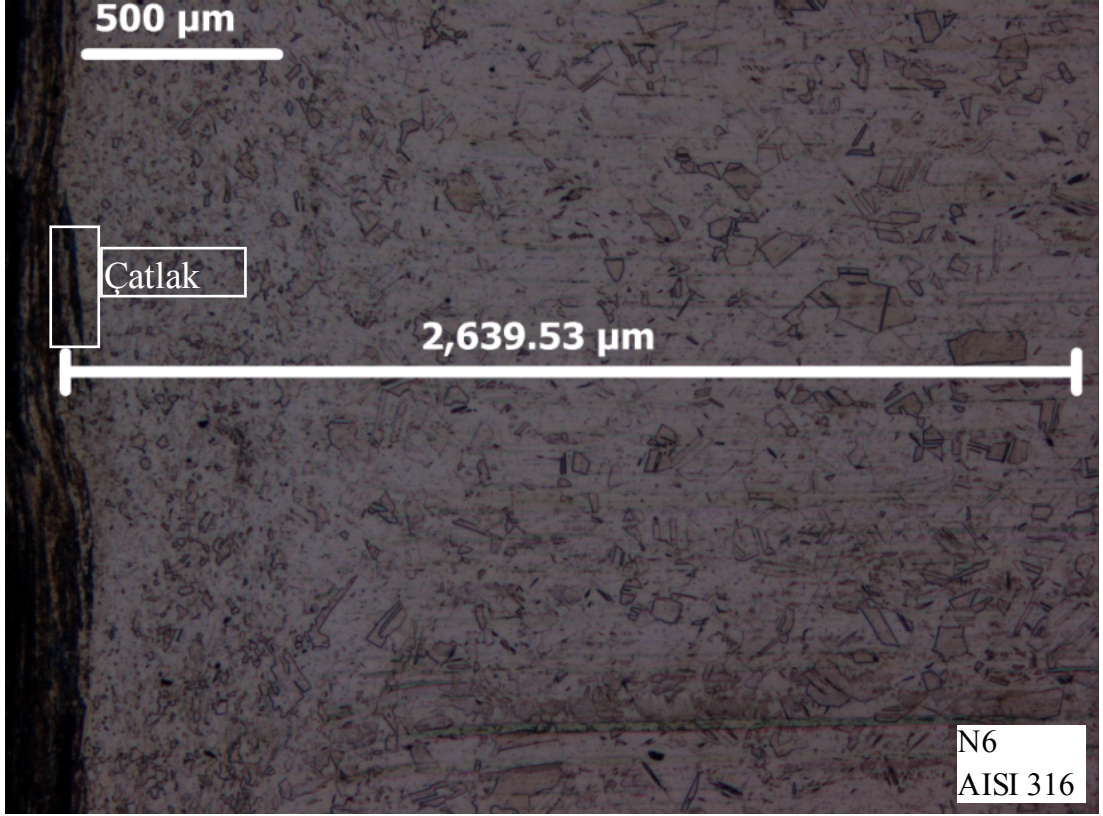
Şekil 3.17 Optik mikroyapı inceleme bölgeleri (A: Ck 45 çeliği ve Ck 45 ITAB, B: Ck 45 çeliği ITAB, C: Ck 45 çeliği ITAB ve kaynak ara yüzeyi, D: Kaynak ara yüzeyi ve AISI 316 çeliği ITAB, E: AISI 316 çeliği ITAB ve F: AISI 316 ITAB ve AISI 316 çeliği)



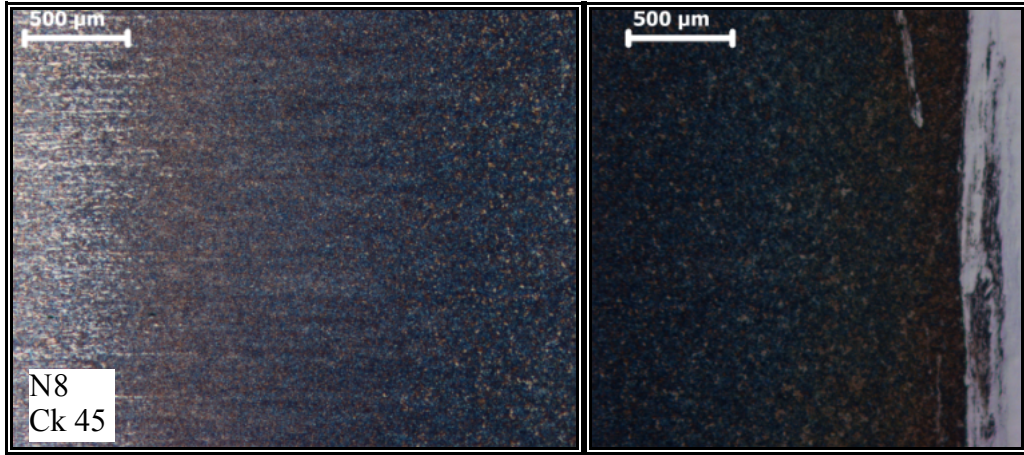
Şekil 3. 18 Numune 5 mikroyapı görüntüsü



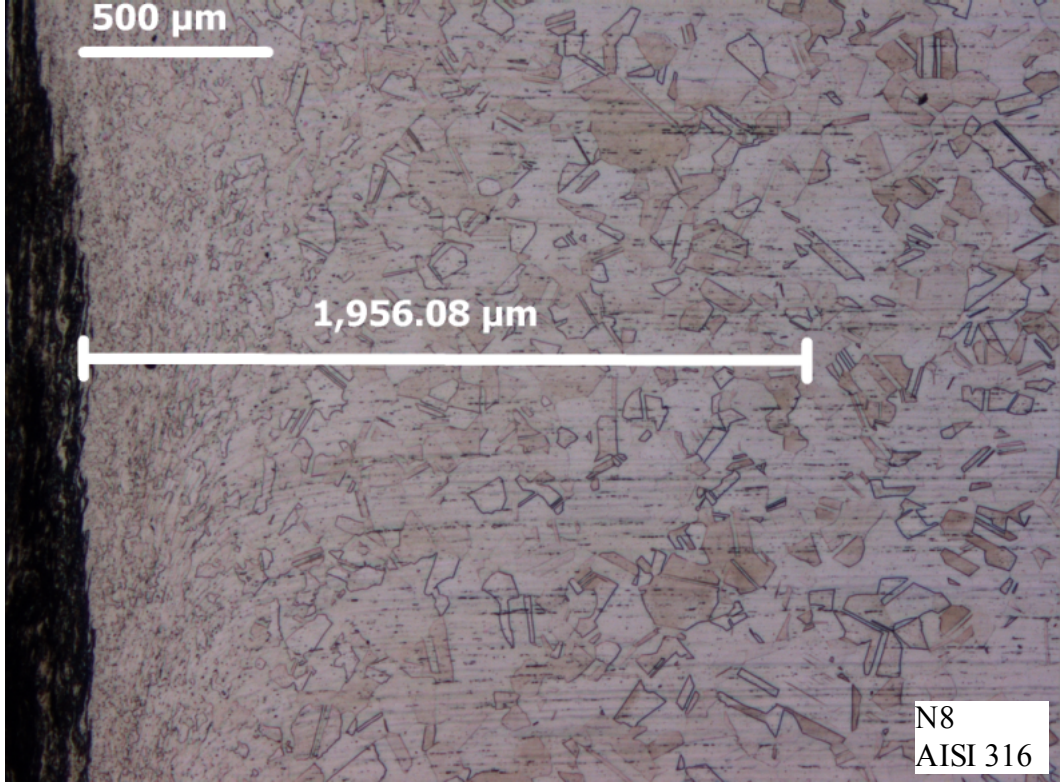
Şekil 3. 19 Numune 6 genel mikroyapı görüntüsü



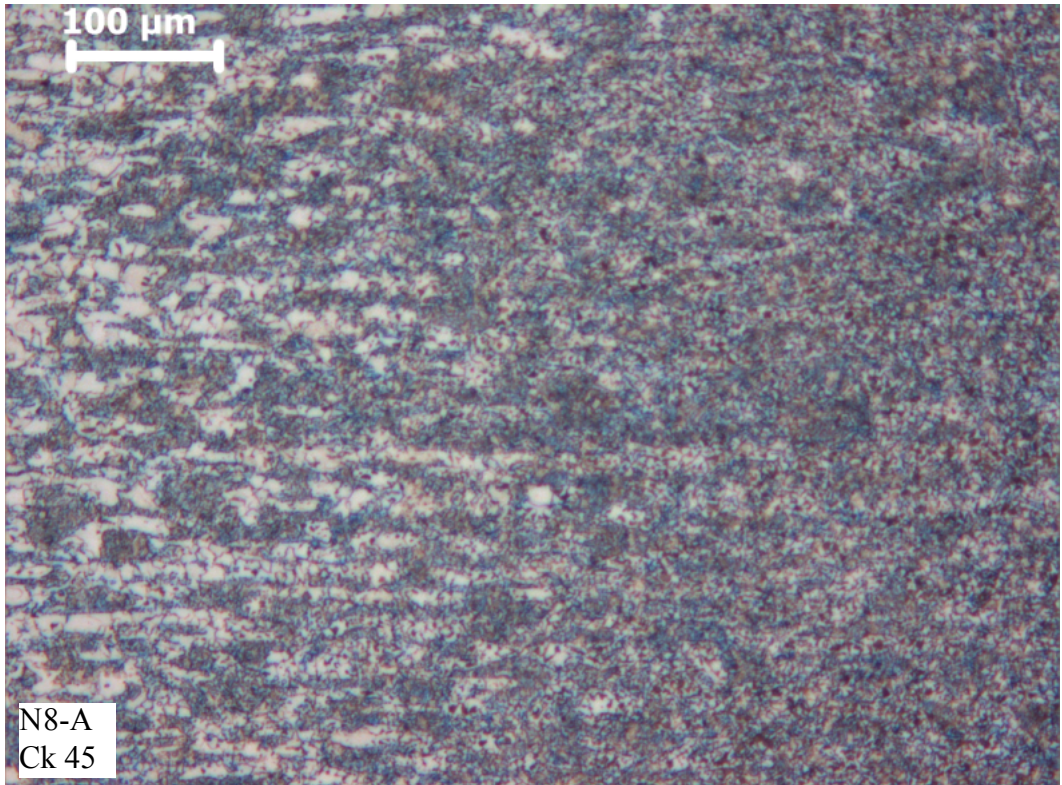
“Şekil 3. 19 ‘un devamı”



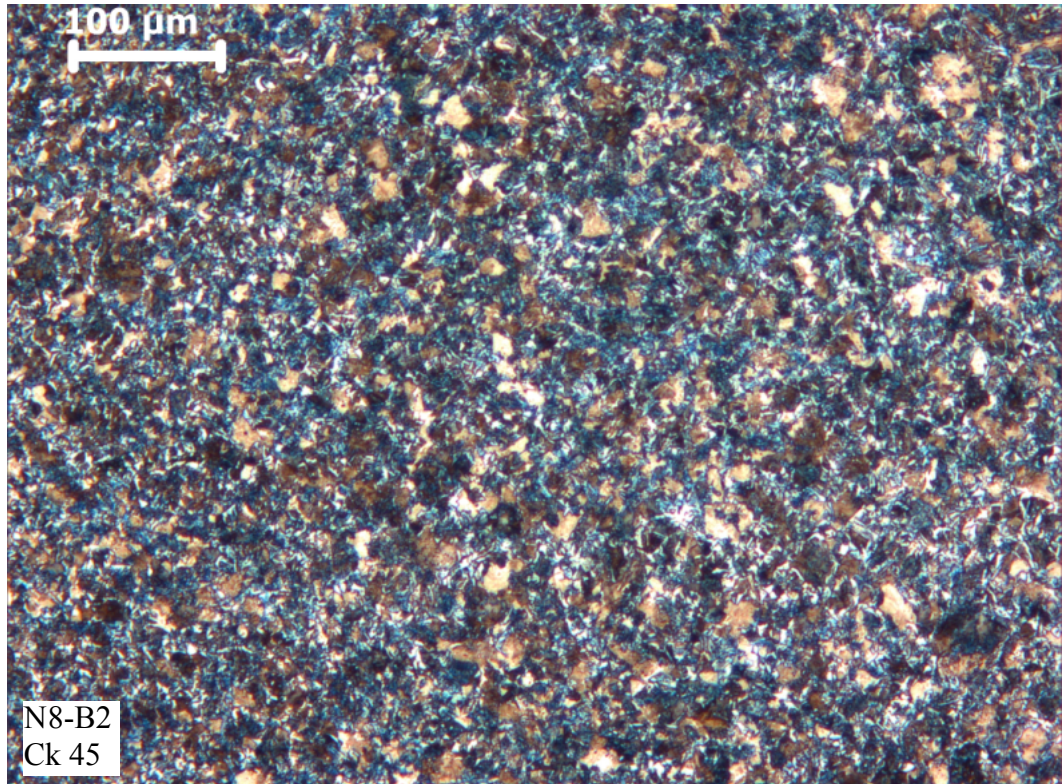
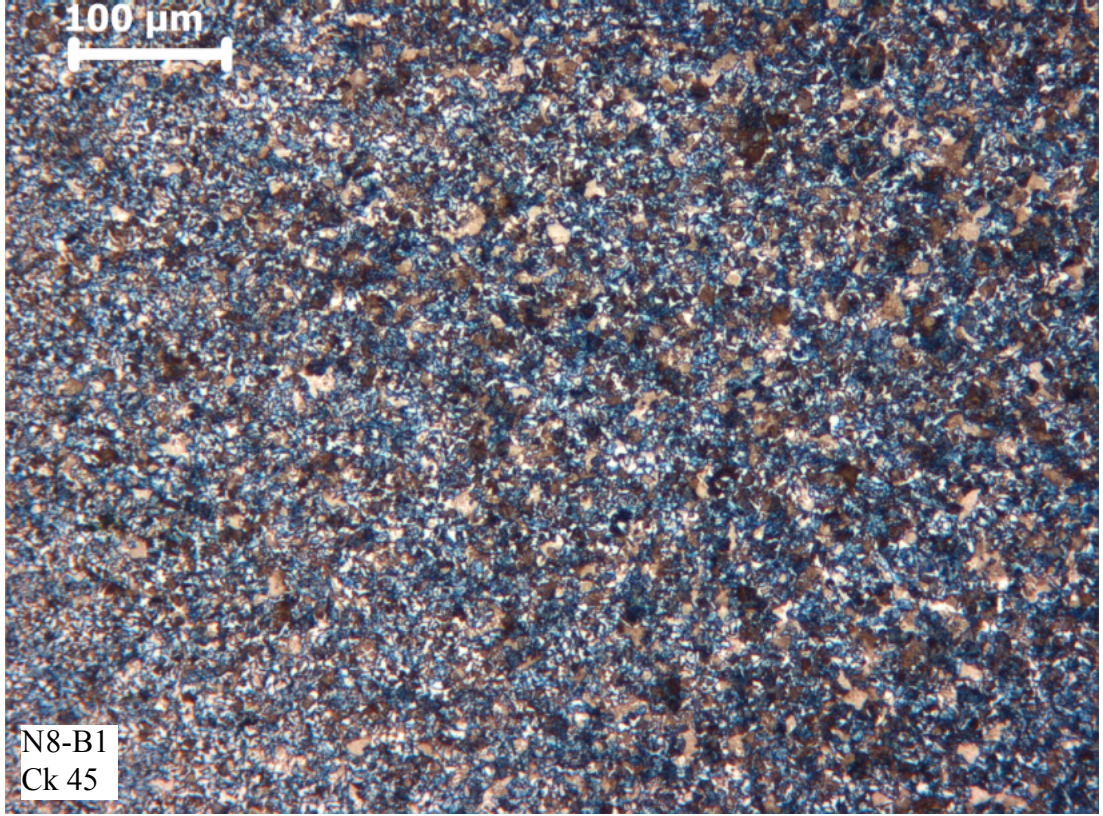
Şekil 3. 20 Numune 8 genel mikroyapı görüntüsü



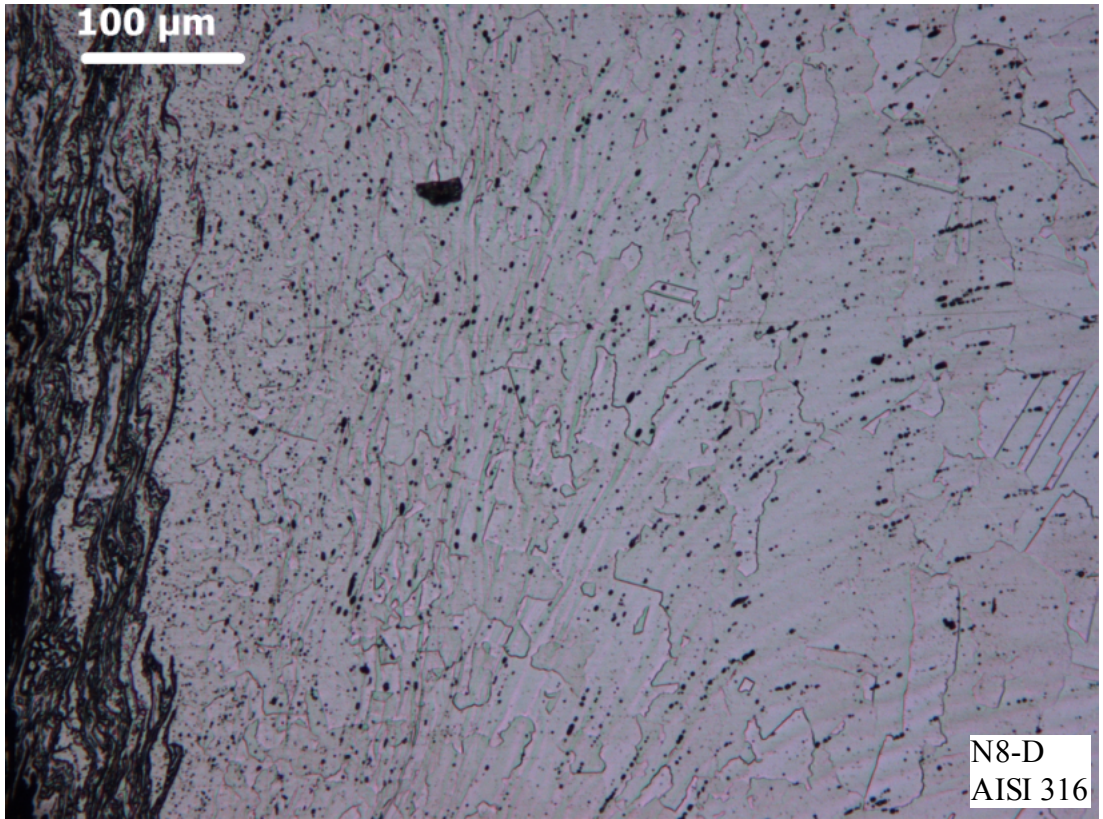
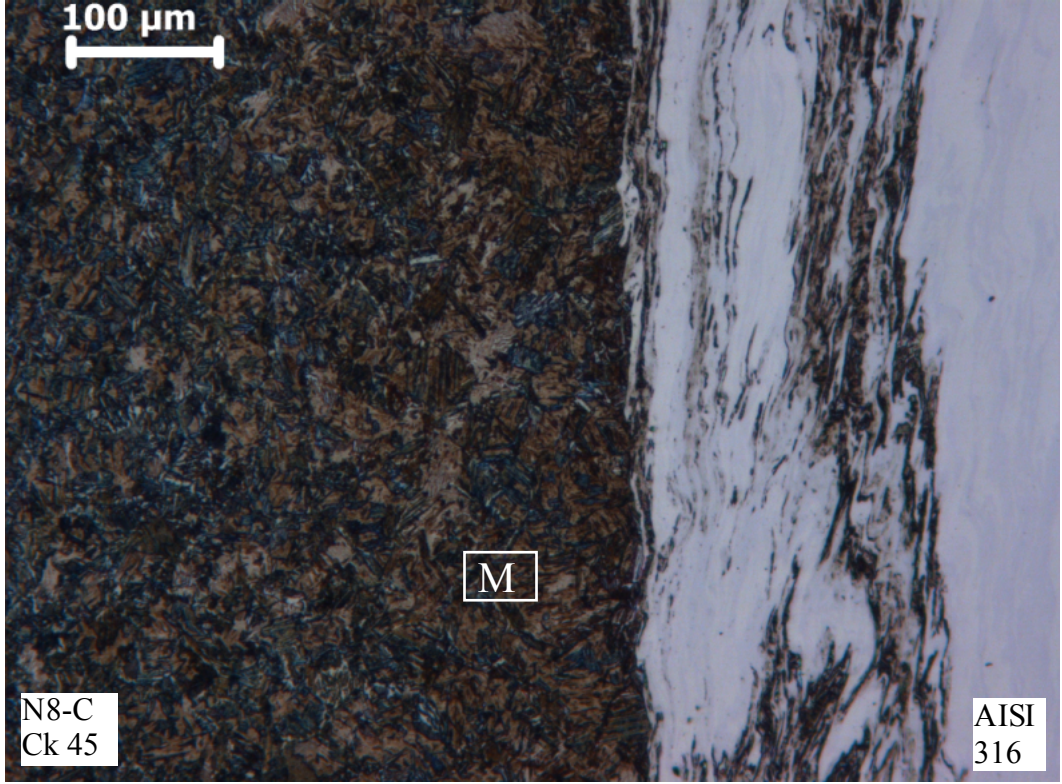
“Şekil 3. 20 ‘nin devamı”



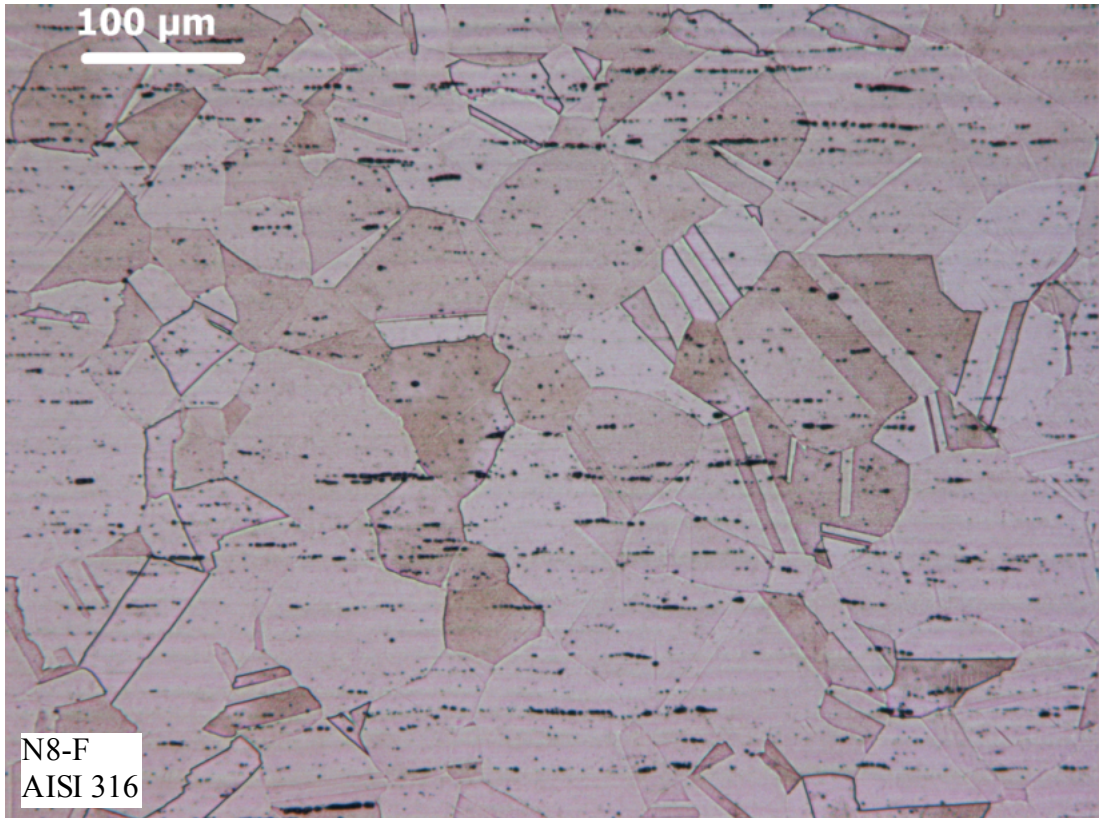
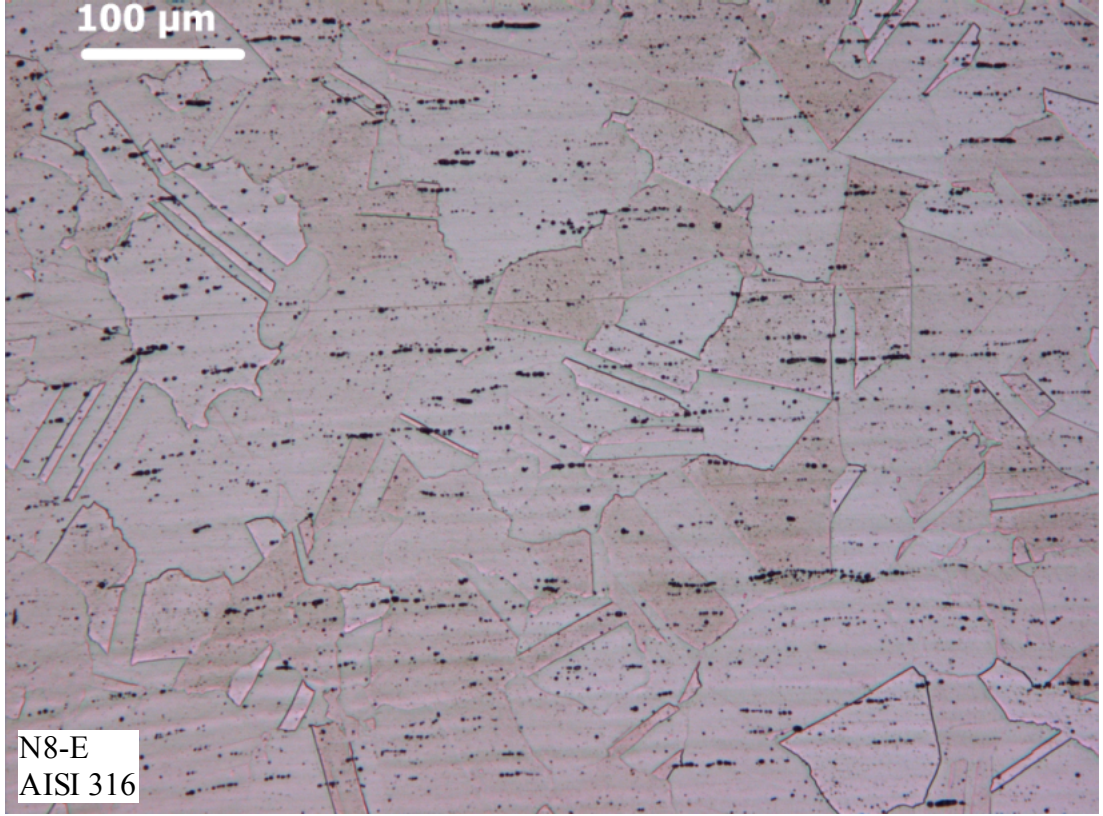
Şekil 3. 21 Numune 8 mikroyapı görüntüsü



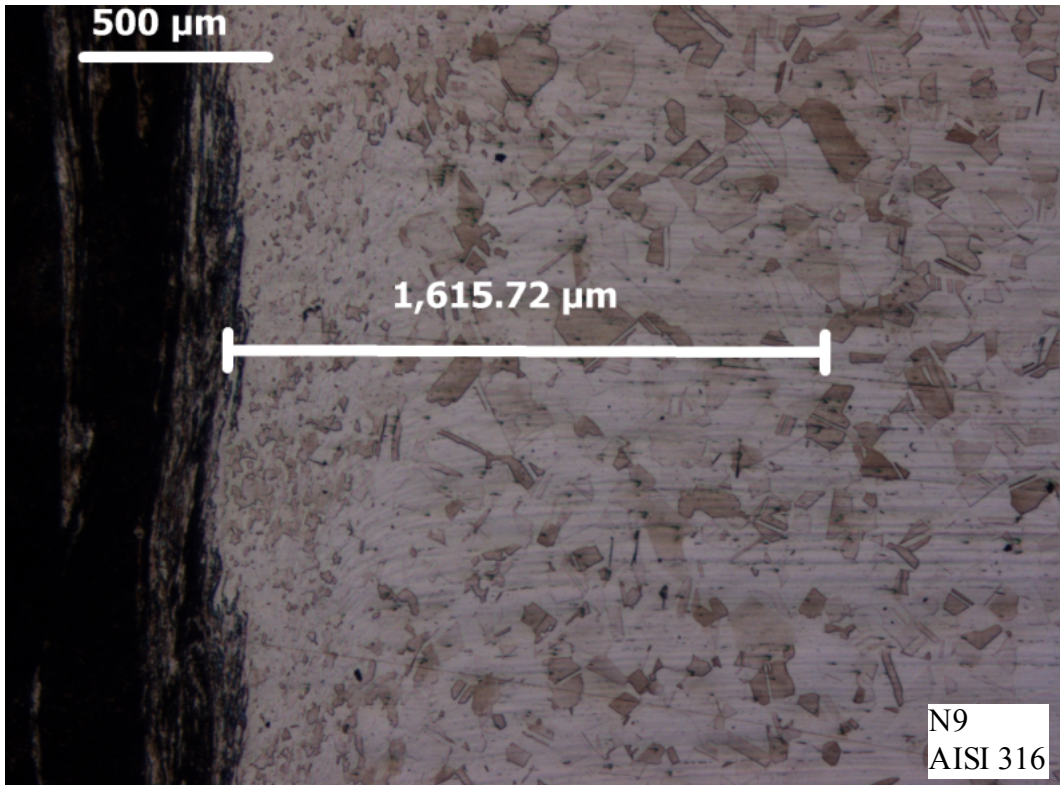
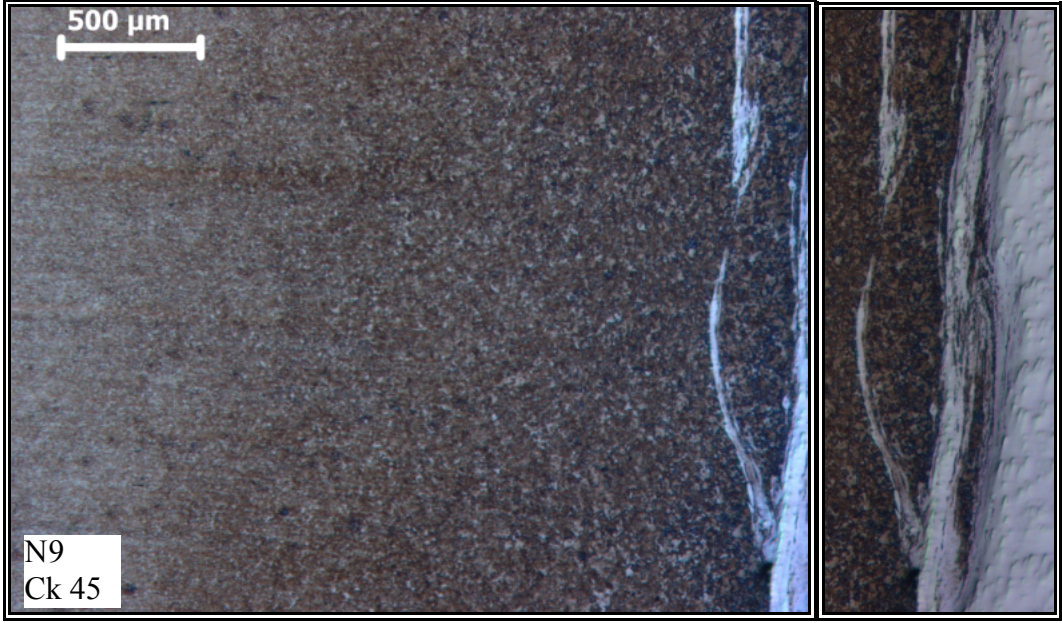
“Şekil 3. 21 ‘in devamı”



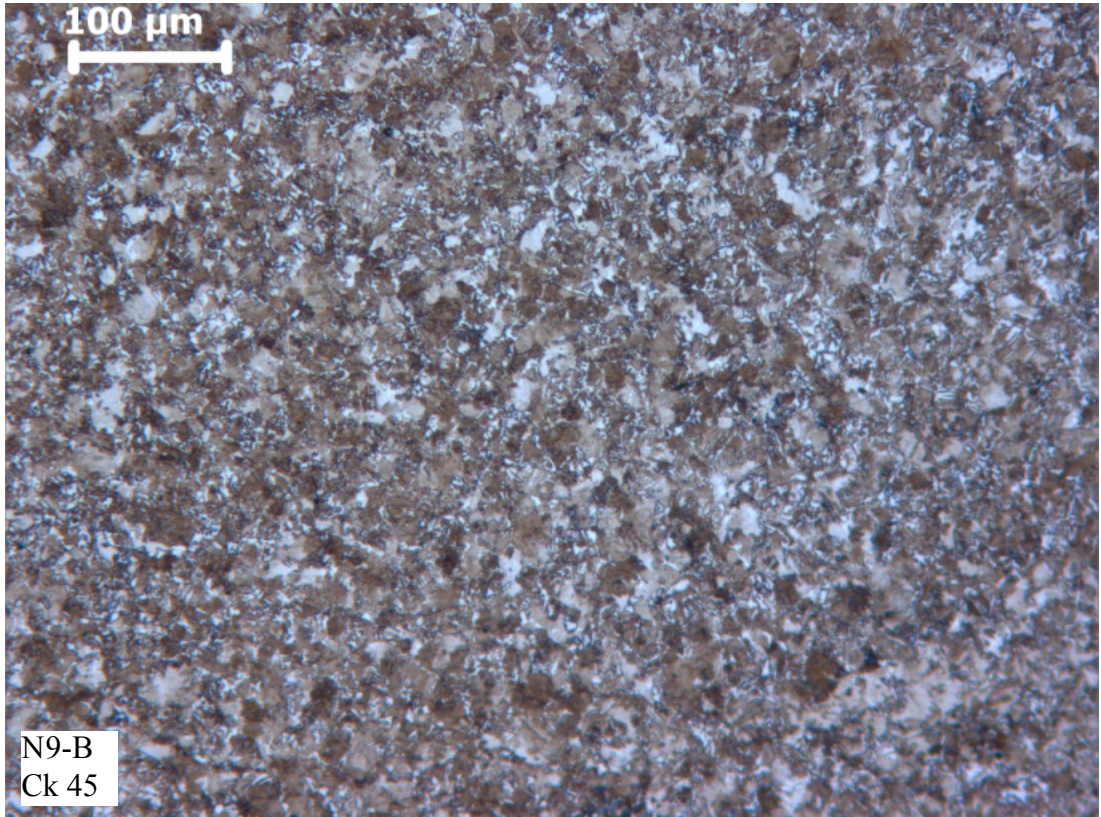
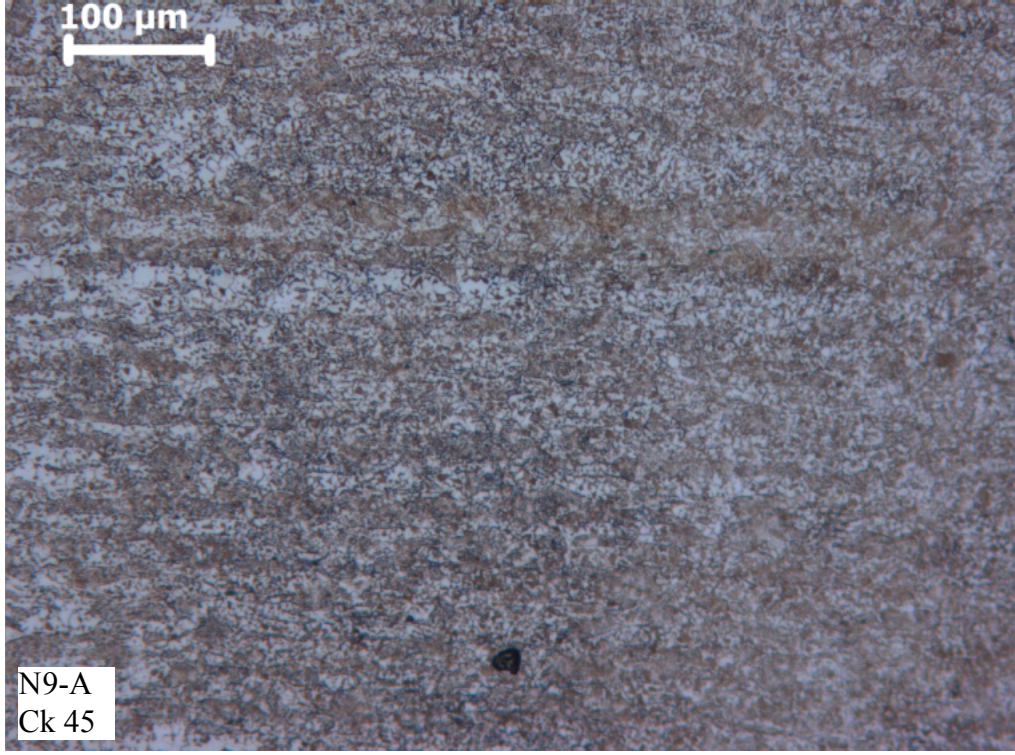
“Şekil 3. 21 ‘in devamı”



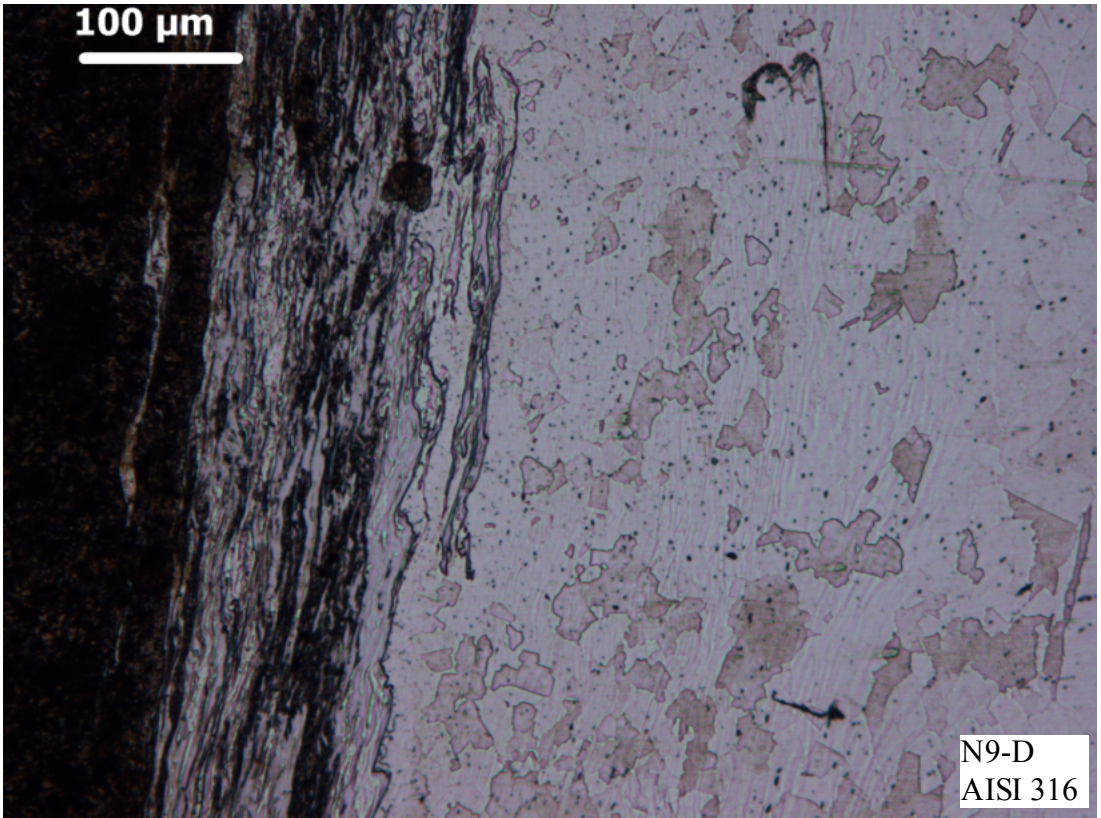
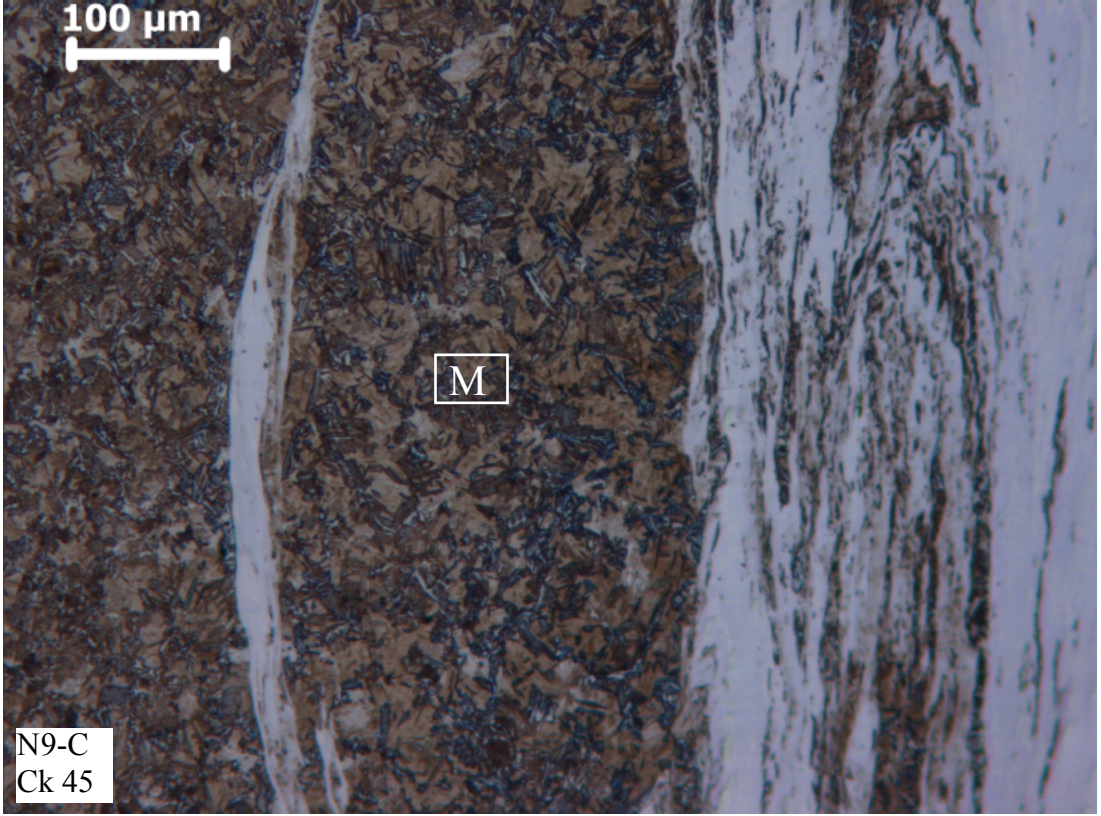
“Şekil 3. 21 ‘in devamı”



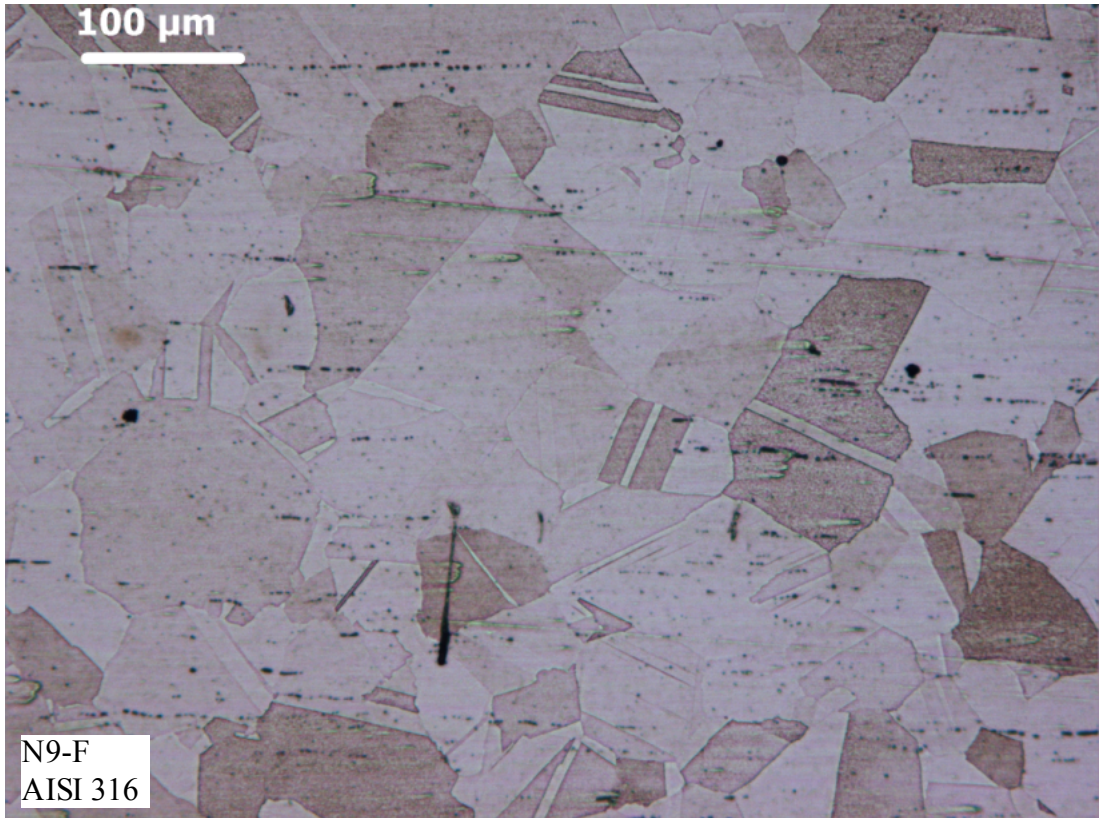
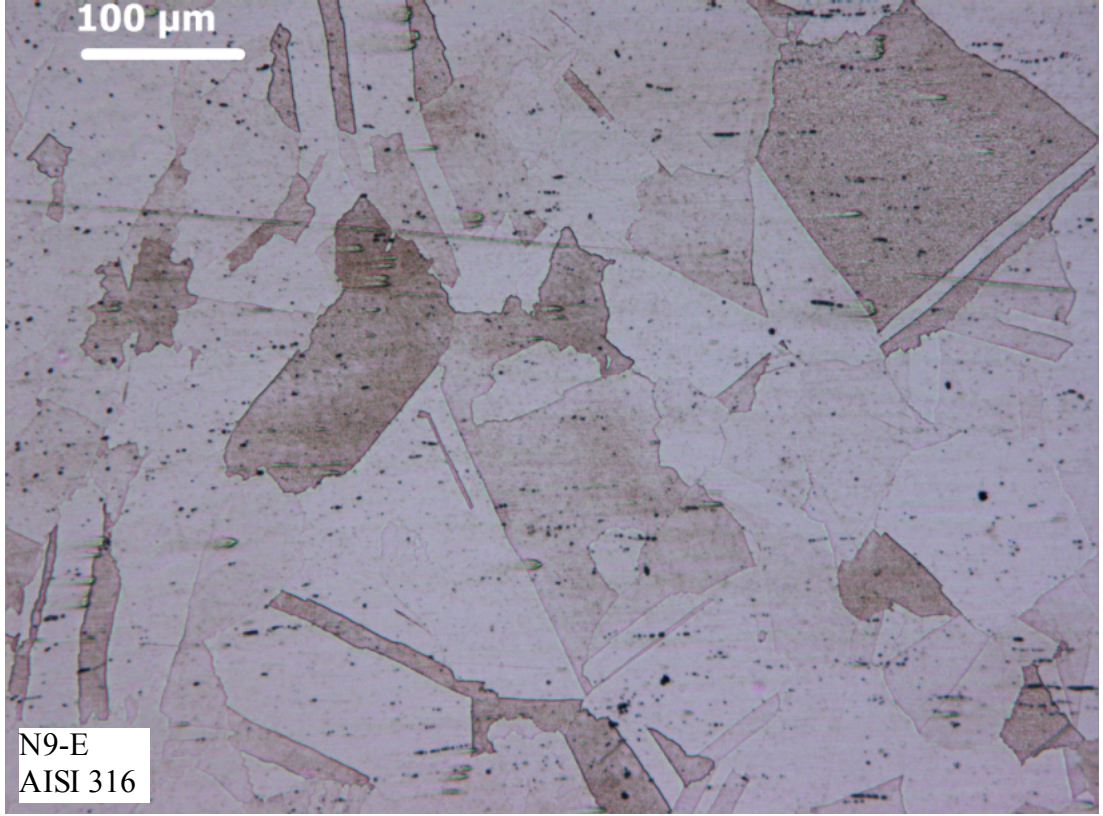
Şekil 3. 22 Numune 9 genel mikroyapı görüntüsü



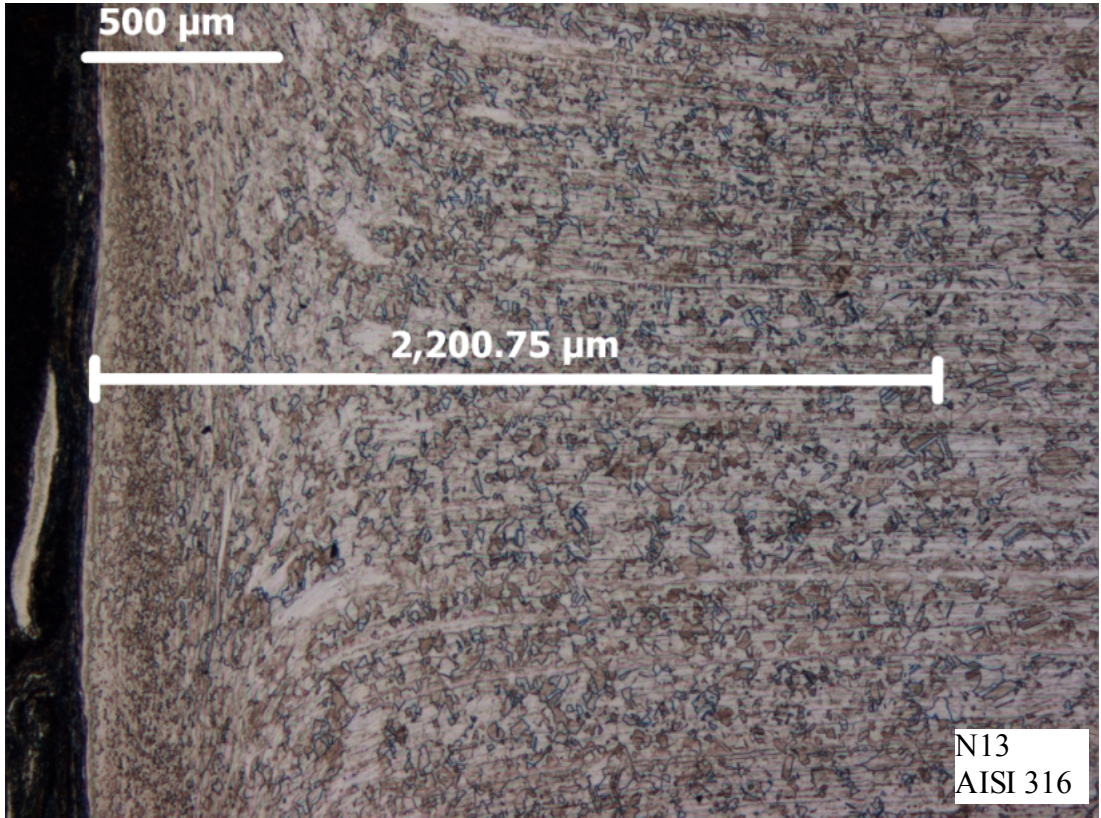
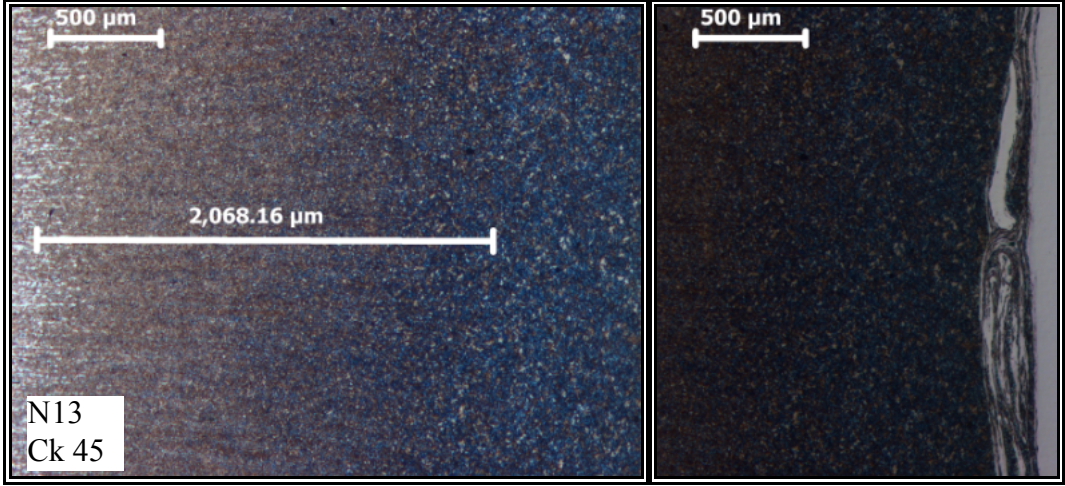
Şekil 3. 23 Numune 9 mikroyapı görüntüsü



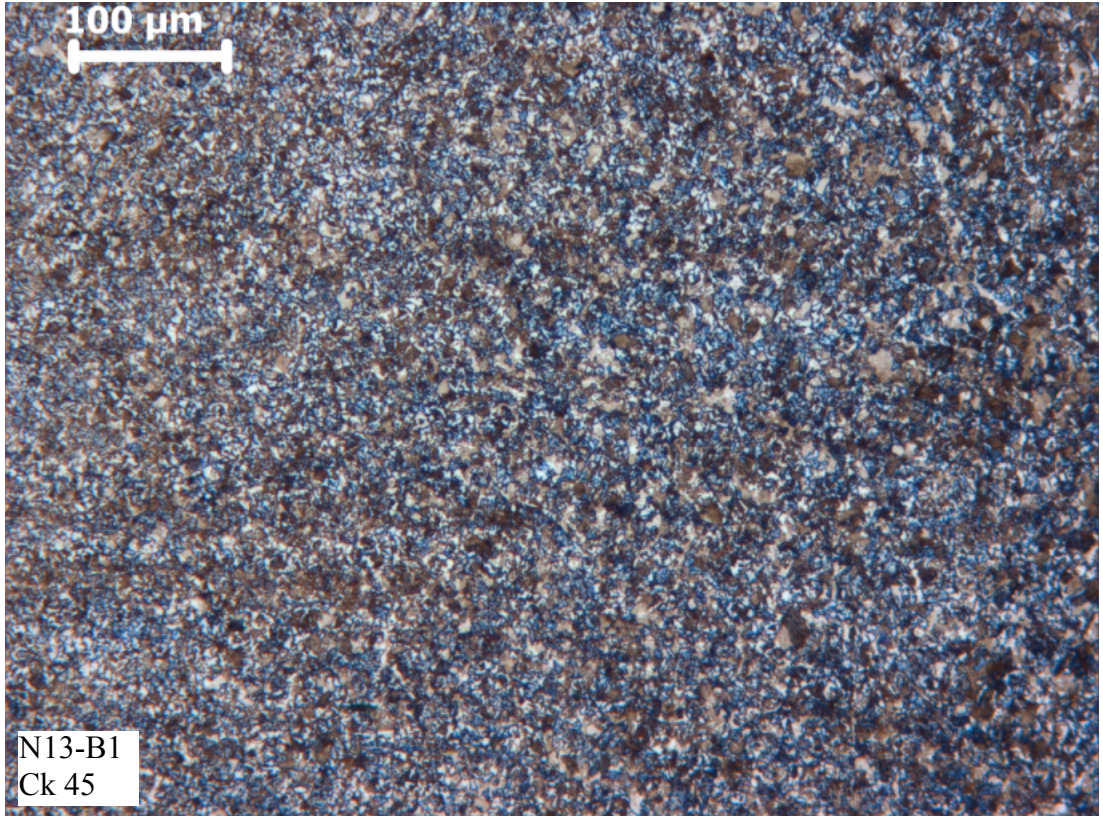
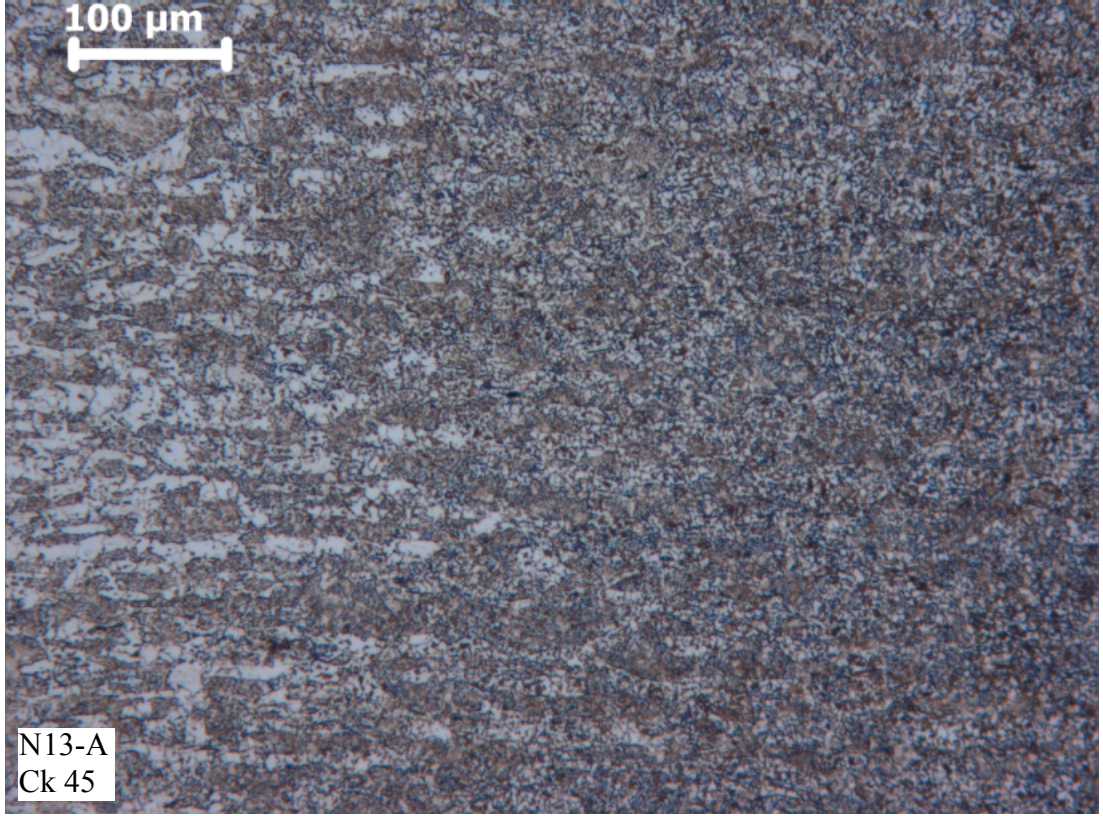
“Şekil 3. 23 ‘ün devamı”



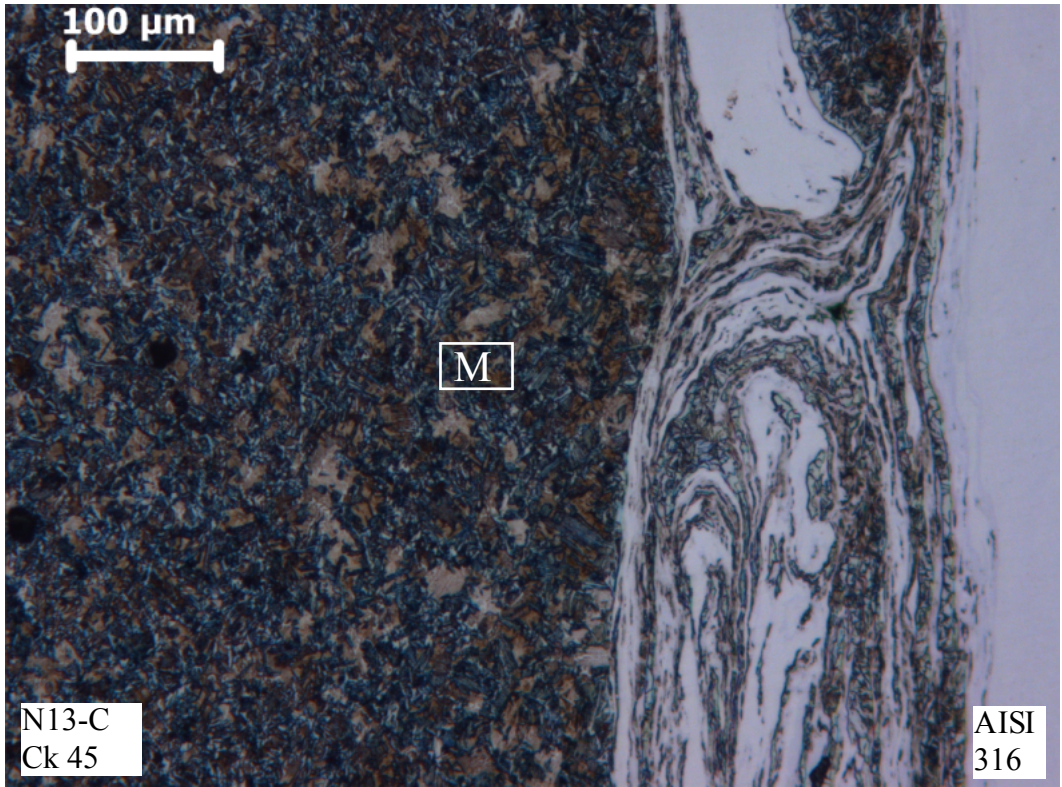
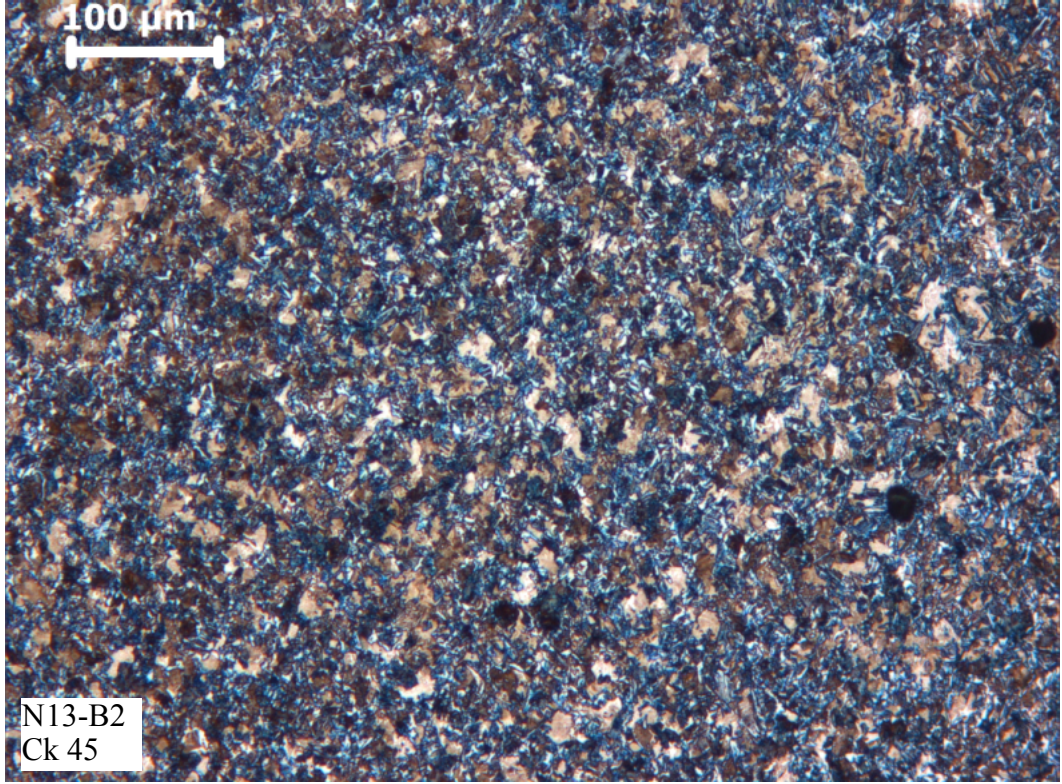
“Şekil 3. 23 ‘ün devamı”



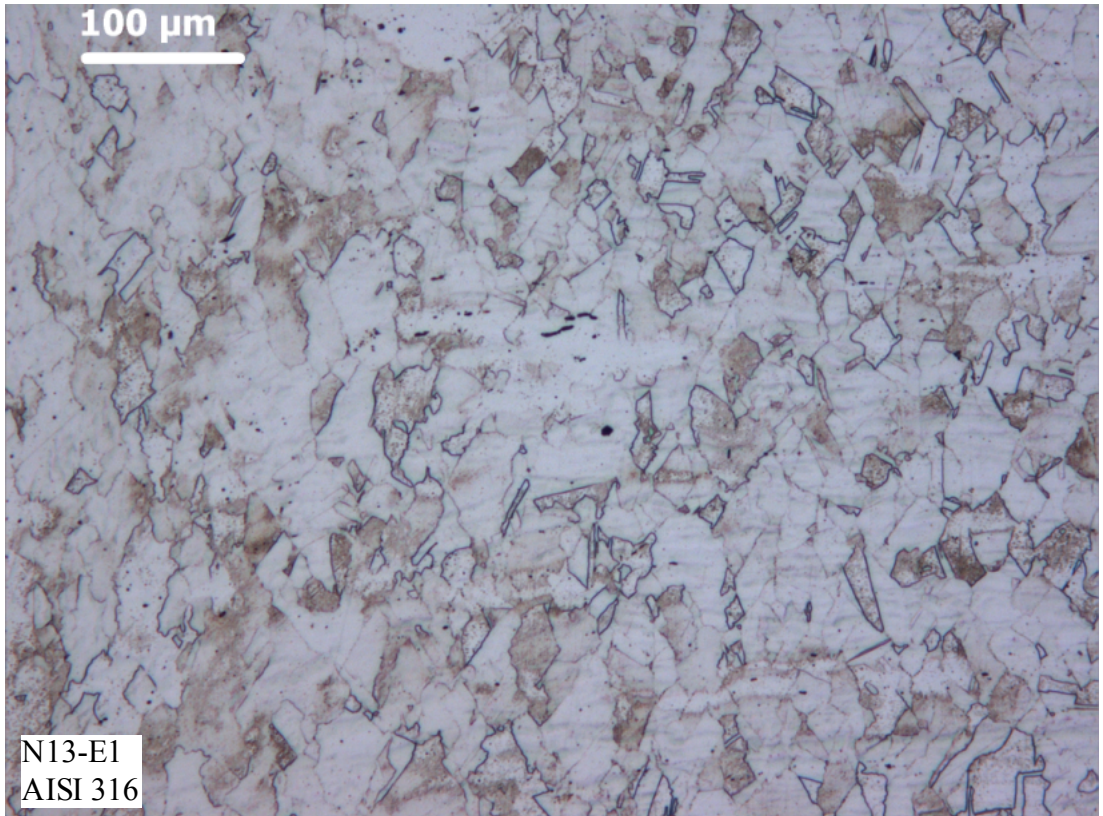
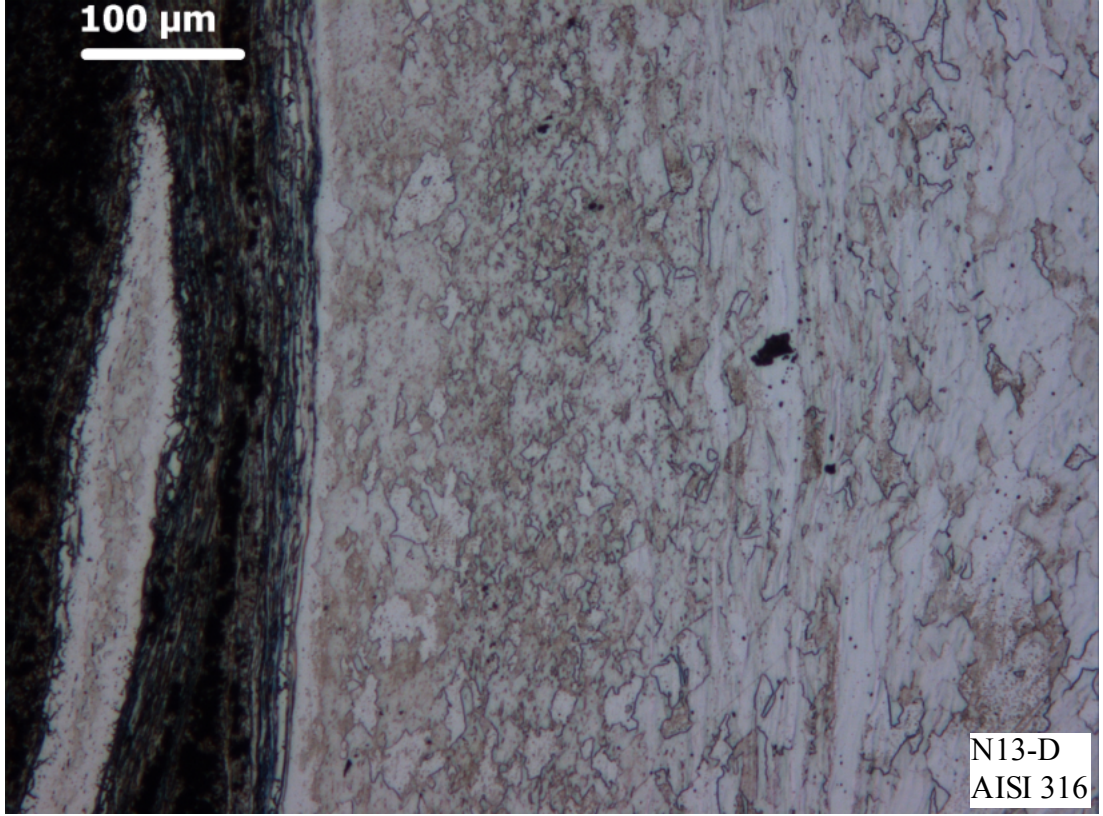
Şekil 3. 24 Numune 13 genel mikroyapı görüntüsü



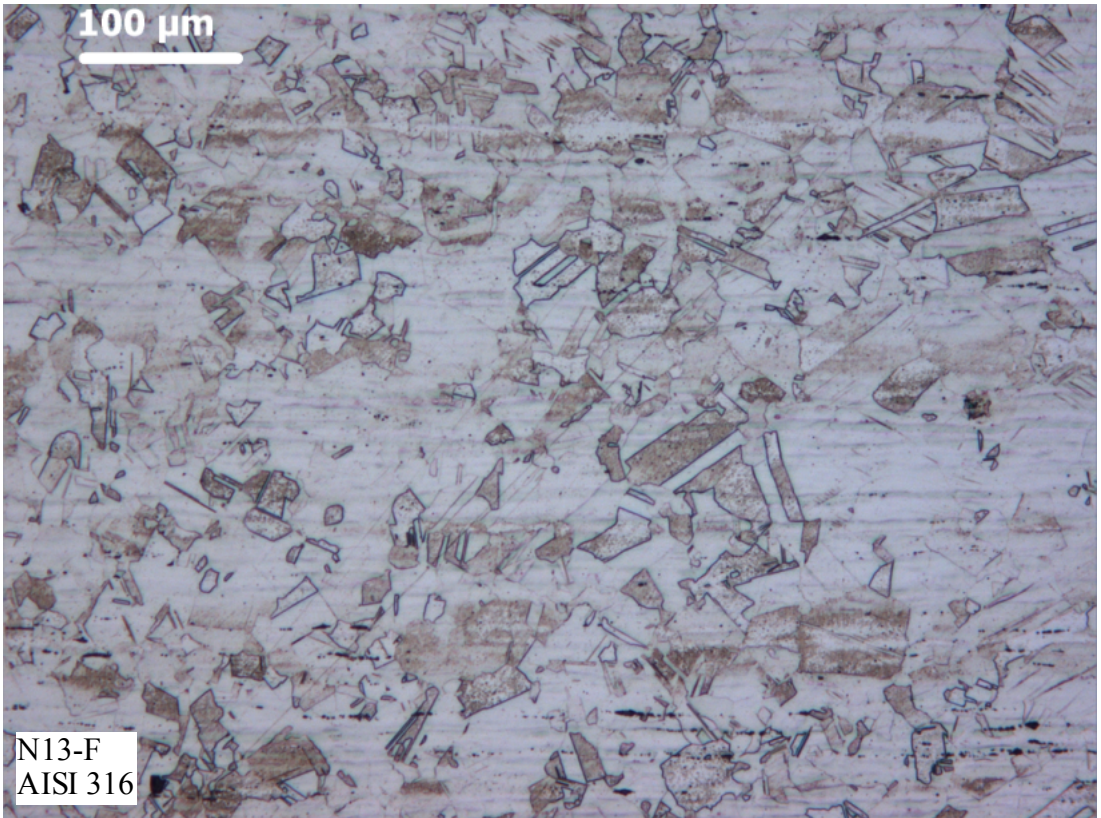
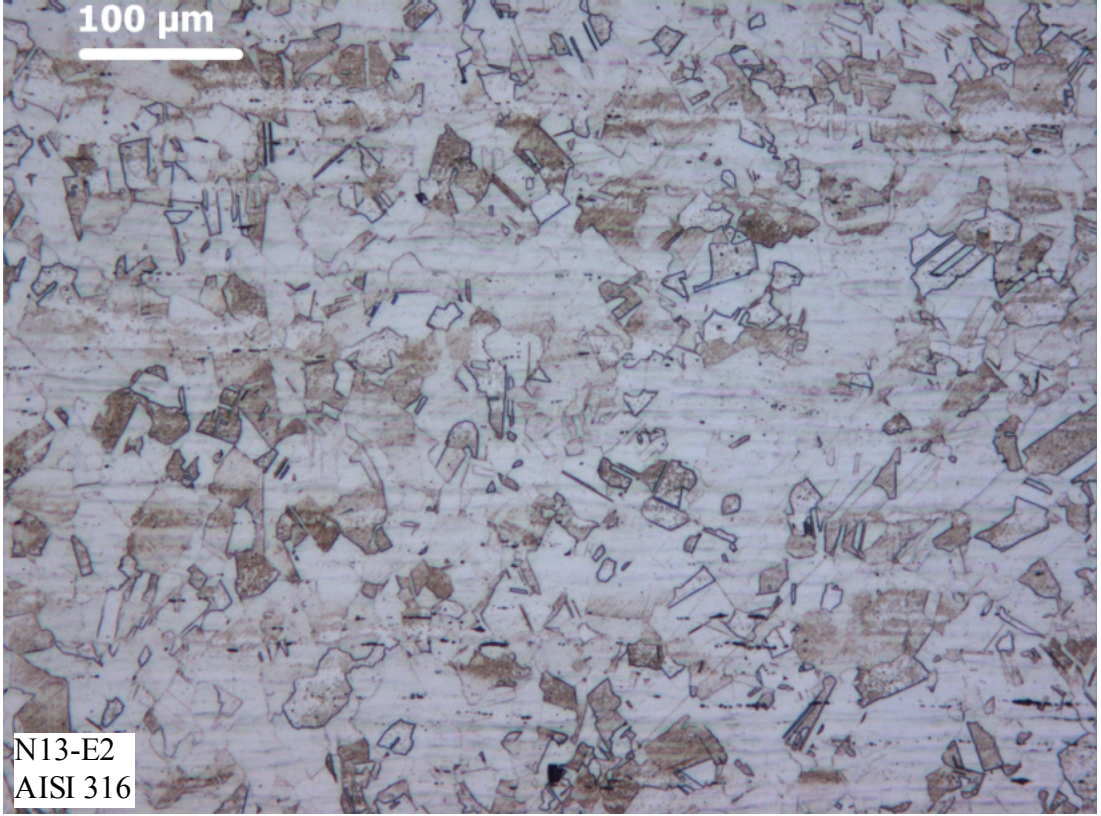
Şekil 3. 25 Numune 13 mikroyapı görüntüsü



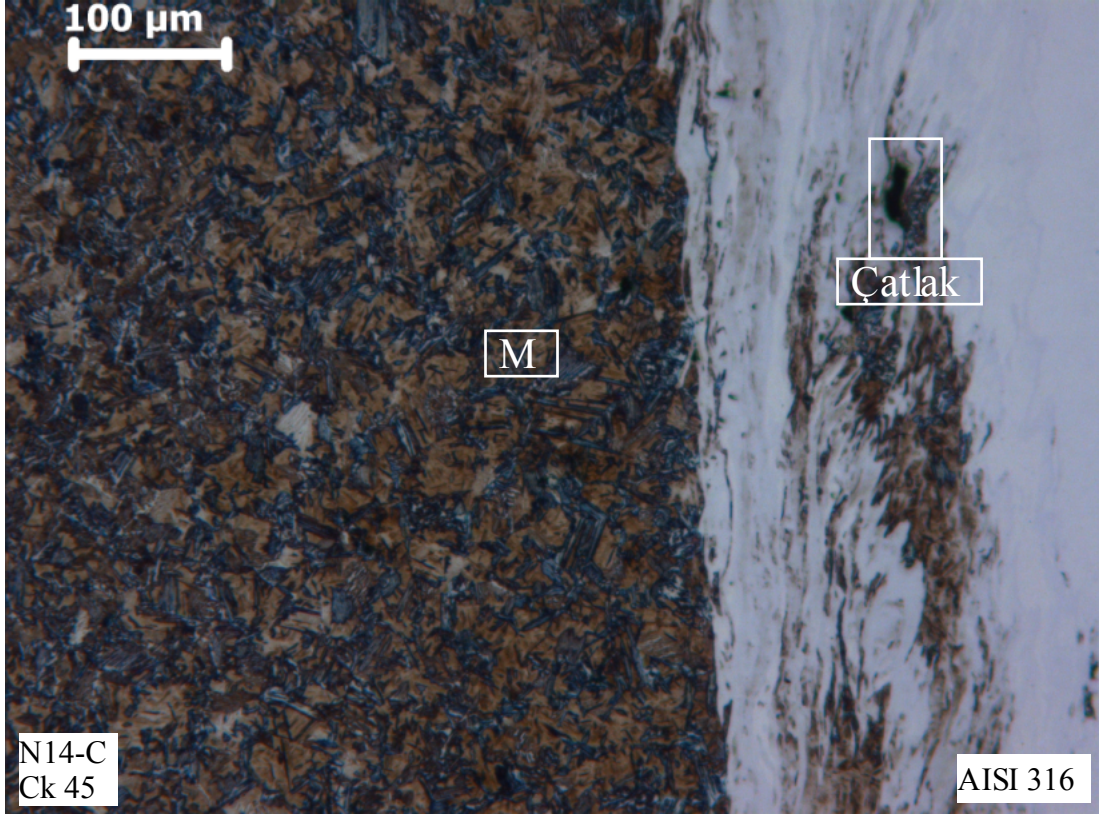
“Şekil 3. 25 ‘in devamı”



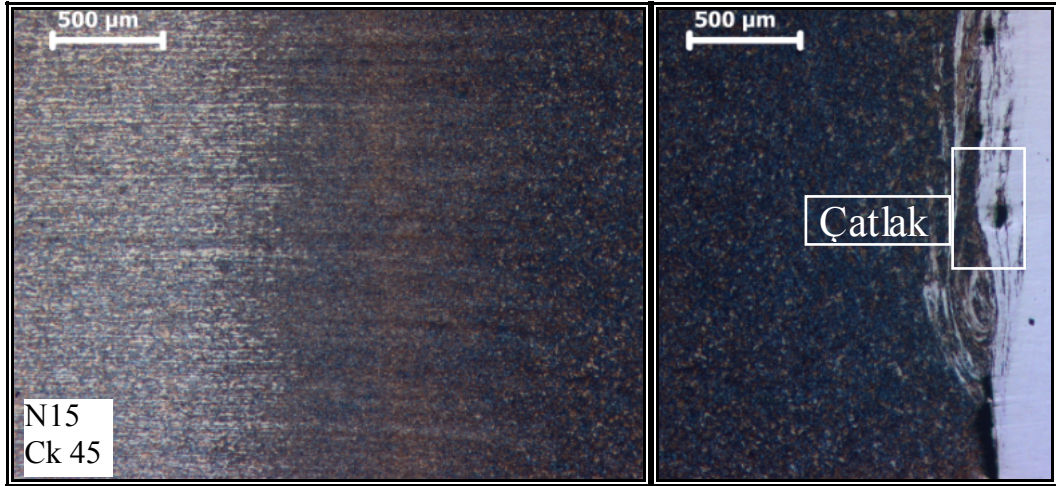
“Şekil 3. 25 ‘in devamı”



“Şekil 3. 25 ‘in devamı”



Şekil 3. 26 Numune 14 mikroyapı görüntüsü



Şekil 3. 27 Numune 15 genel mikroyapı görüntüsü

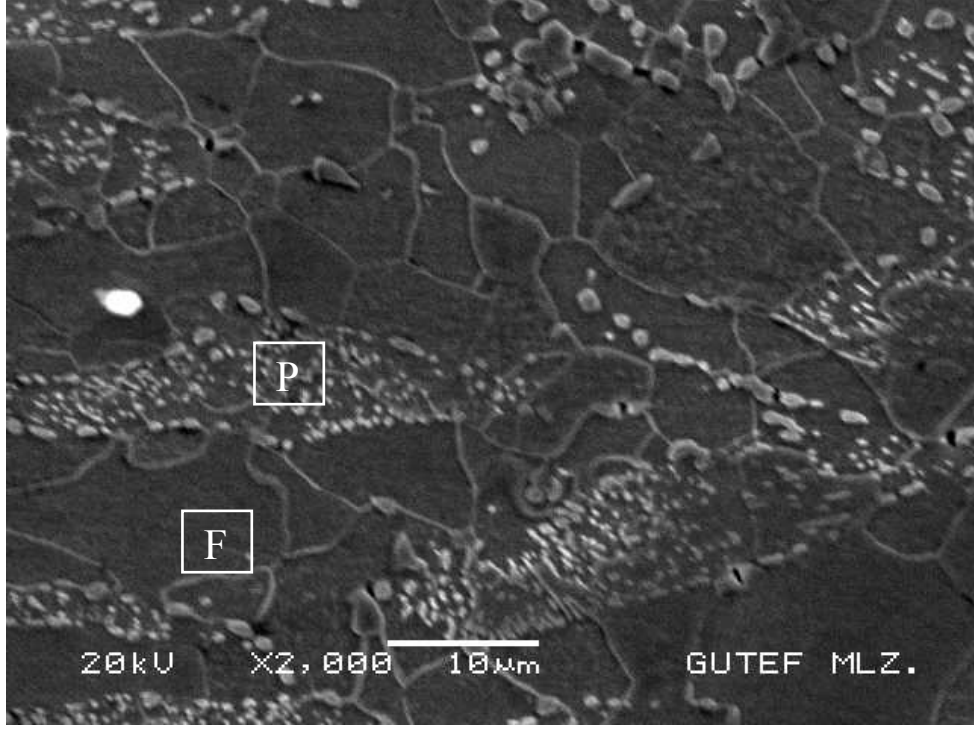
Tablo 3.3 Kaynaklı numunelerin ITAB genişliği

Numune No	AISI 316 Çeliği ITAB Genişliği (µm)	Ck 45 ITAB Genişliği (µm)
1	2873	4000
2	1945	2900
3	2005	3914
4	2571	3245
5	1990	3475
6	2639	2969
7	2215	2618
8	1956	3574
9	1615	3587
10	1853	3000
11	1682	4065
12	1223	3420
13	2200	3032
14	2476	2938
15	2031	2960
16	1518	2842
17	1682	3480
18	2143	2933
19	1312	3356

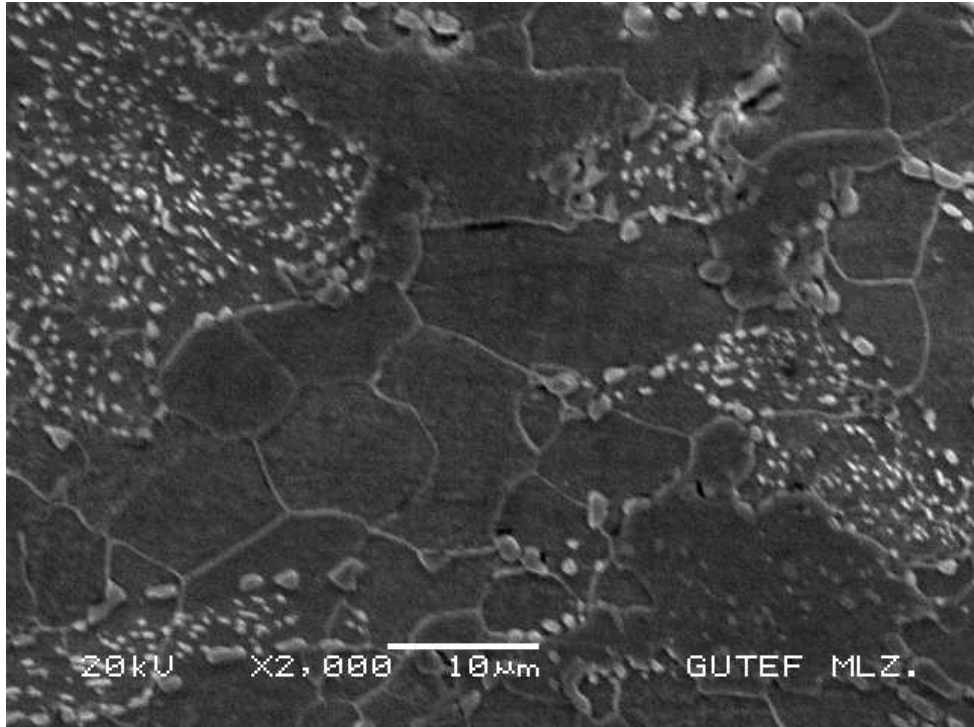
3.3.2 SEM Mikroyapı İncelemesi

Kaynaklı numunelerin optik mikroyapı incelemesi sonucunda uygun görülen kaynaklı numuneler 8, 9 ve 13 'e SEM incelemesi yapılmıştır. Optik mikroyapı incelemesi doğrultusunda bu numunelere, Ck 45 çeliği ana malzemesinden başlayıp, Ck 45 çeliği ITAB 'ı, kaynak ara yüzeyi, AISI 316 çeliği ITAB 'ı ve AISI 316 çeliği ana malzemesine sırasıyla SEM incelemesi yapılmıştır (Şekil 3.28-64).

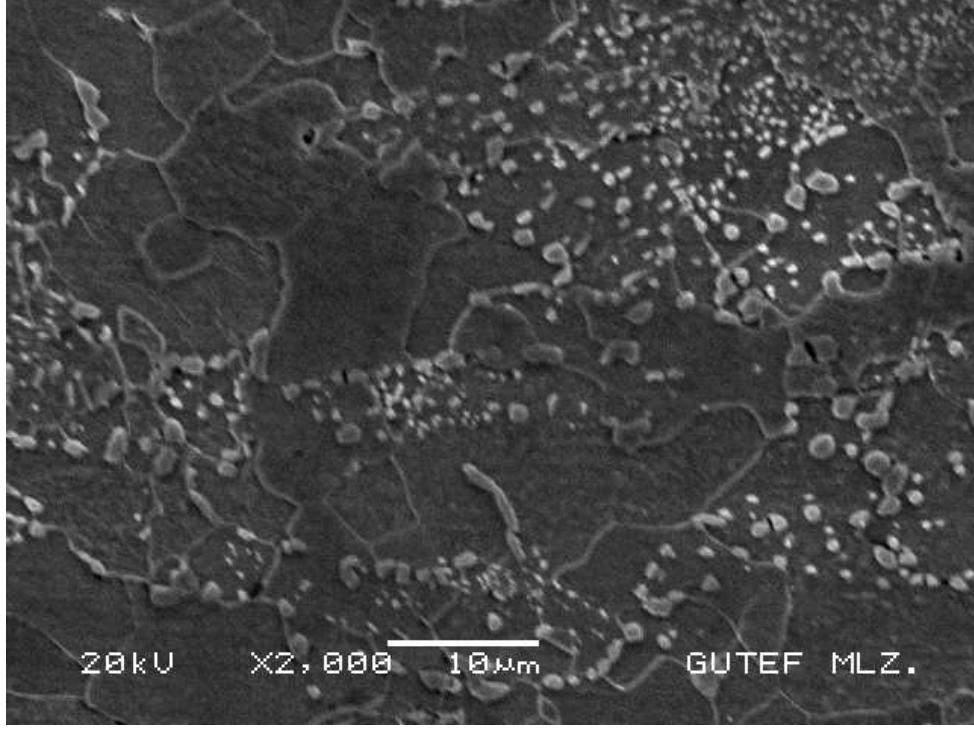
Kaynaklı numunelere yapılan optik mikroyapı incelemesi (Şekil 3.18-27) ve SEM mikroyapı incelemesinde; kaynak ara yüzeyi, Ck 45 çeliği ana malzeme ve ITAB, AISI 316 çeliği ana malzeme ve ITAB incelenmiştir. Kaynak ara yüzeyinde malzemelerin bir birine geçiş yaparak karıştığı görülmüştür. Bu karışımın şekli ve derinliği kaynak parametrelerine göre değişim göstermiştir. Numune 5, 6, 8, 11, 14 ve 15 'de çatlak görülmüştür (Şekil 3.18, 3.19, 3.3, 3.15, 3.26 ve 3.27).



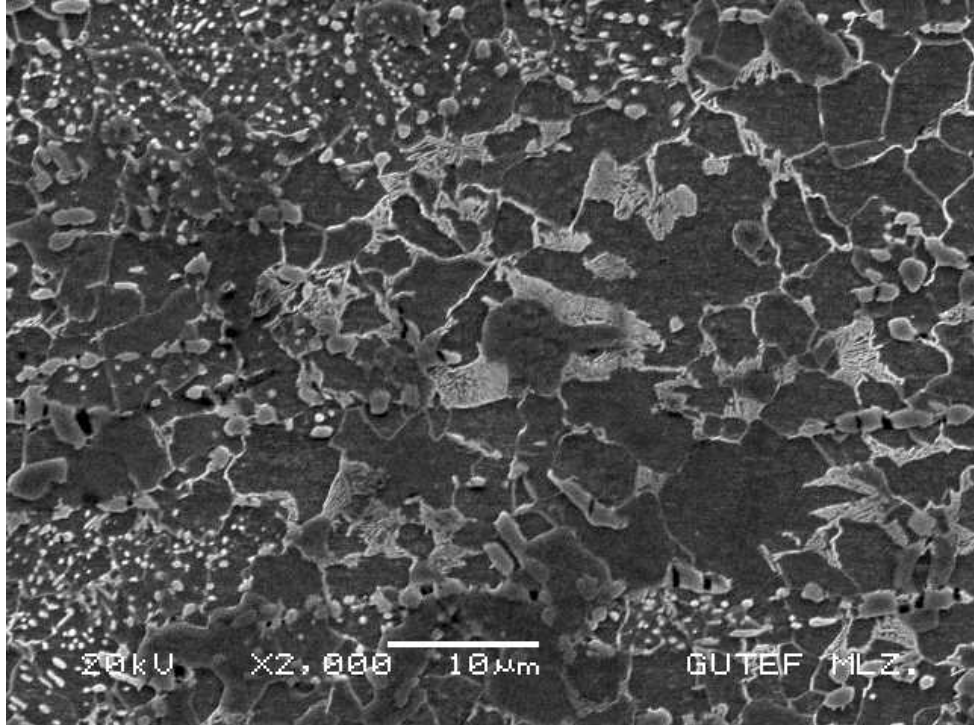
Şekil 3.28 Numune 8 Ck 45 çeliği SEM görüntüsü (F: ferrit, P: perlit)



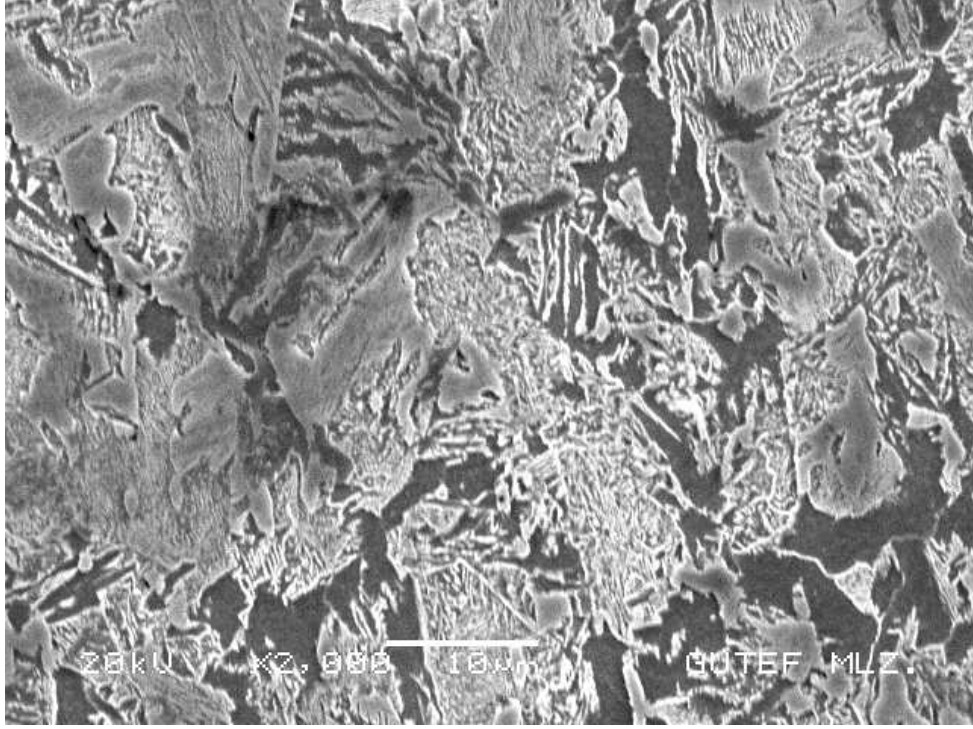
Şekil 3.29 Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü



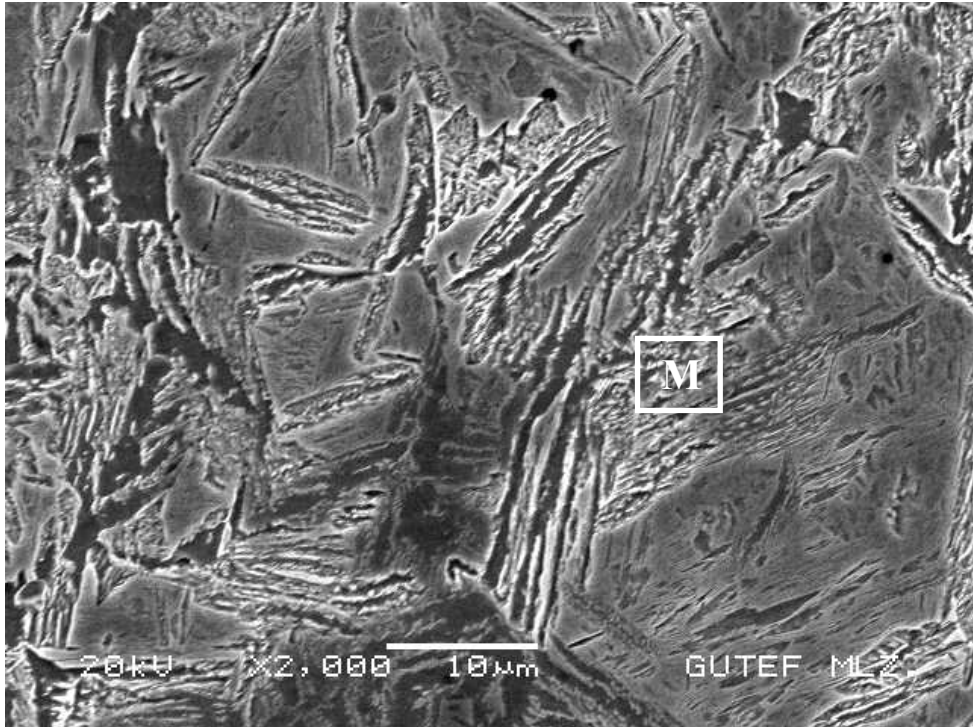
Şekil 3.30 Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü



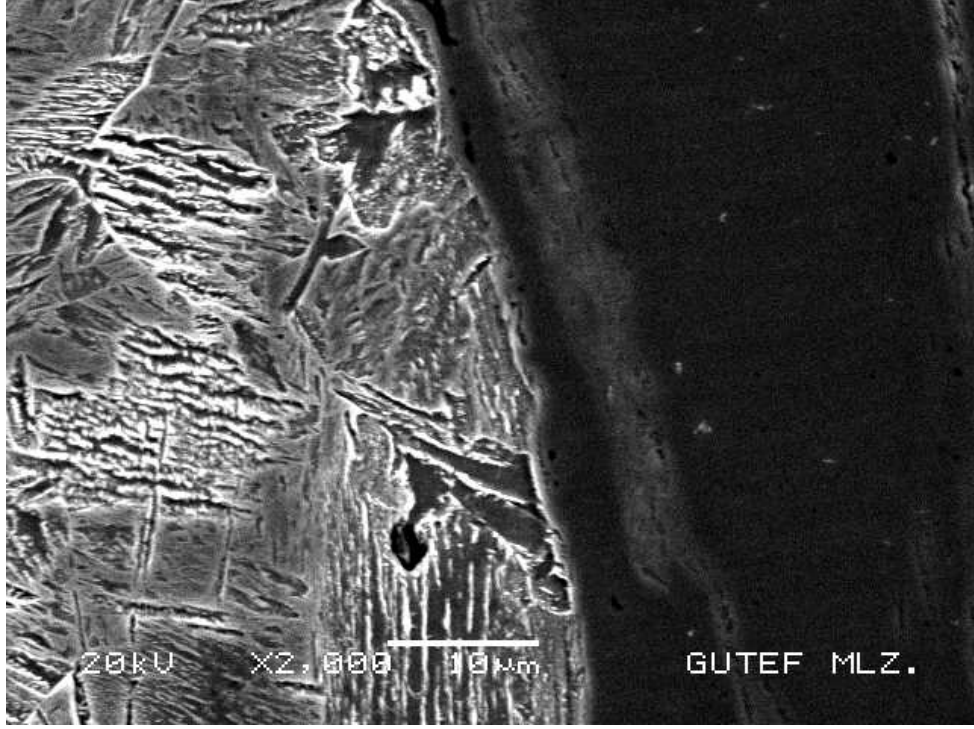
Şekil 3.31 Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 3SEM görüntüsü



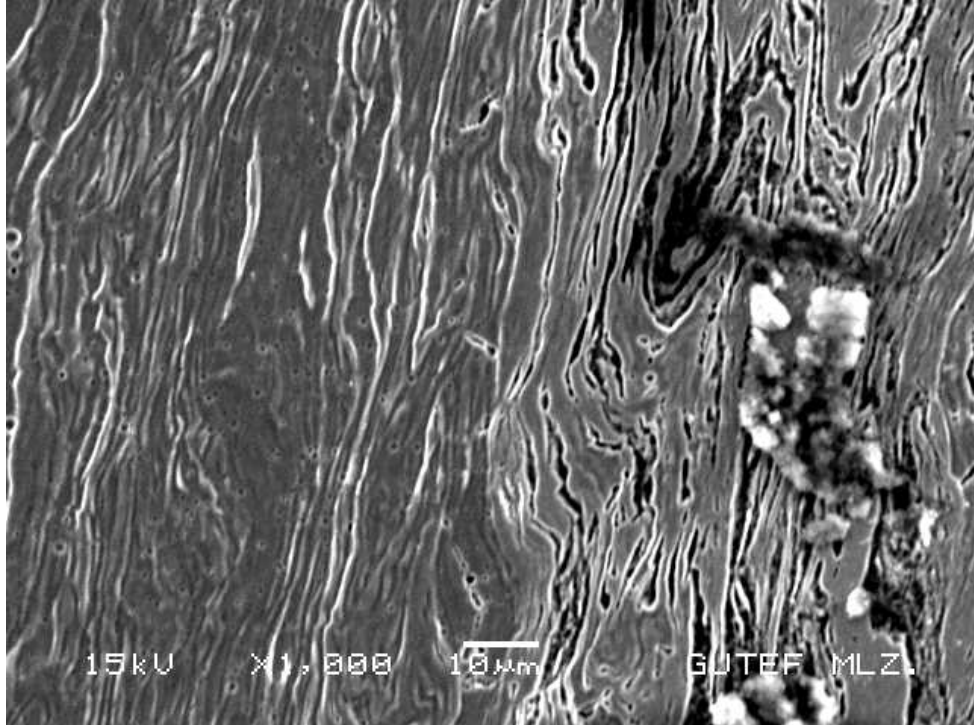
Şekil 3.32 Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 4 SEM görüntüsü



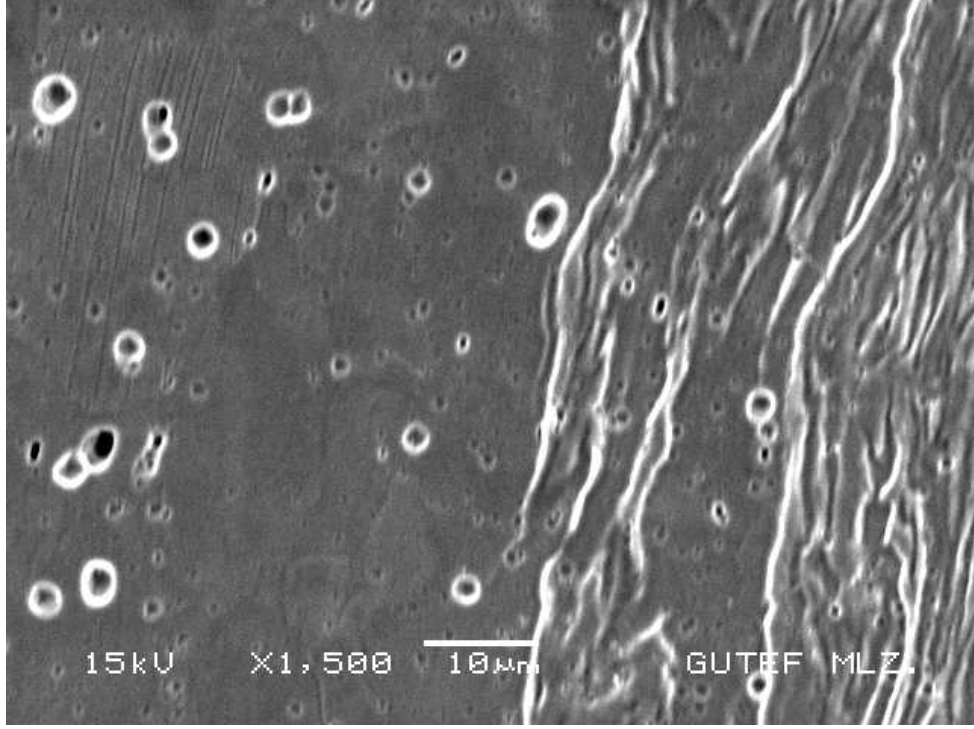
Şekil 3.33 Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 5 SEM görüntüsü(M: martenzit)



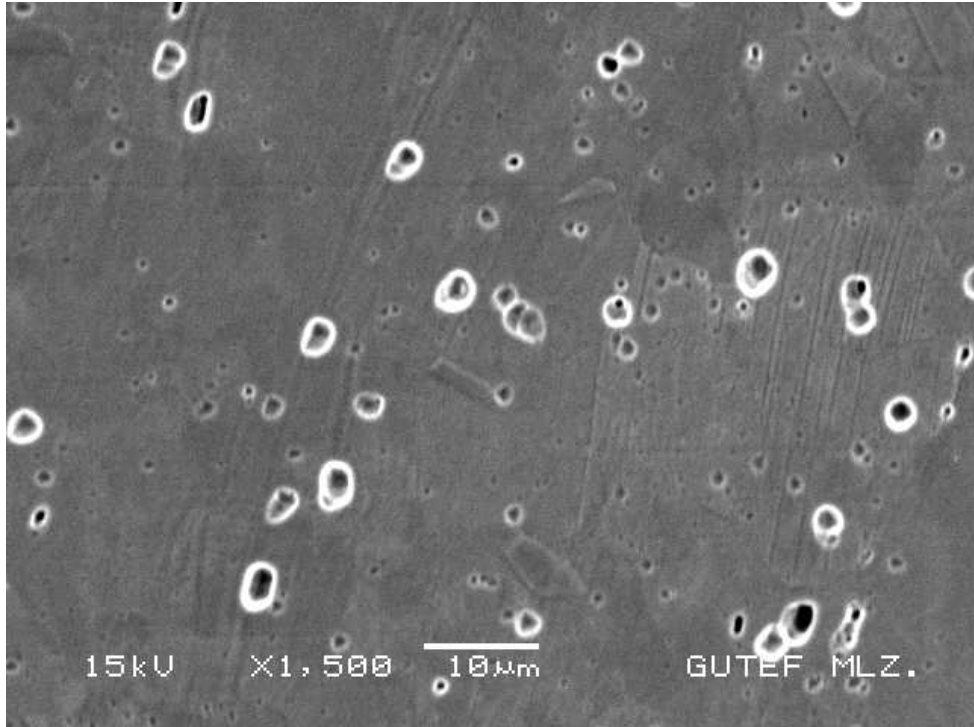
Şekil 3.34 Numune 8 Ck 45 çeliği ITAB 6 ve kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü



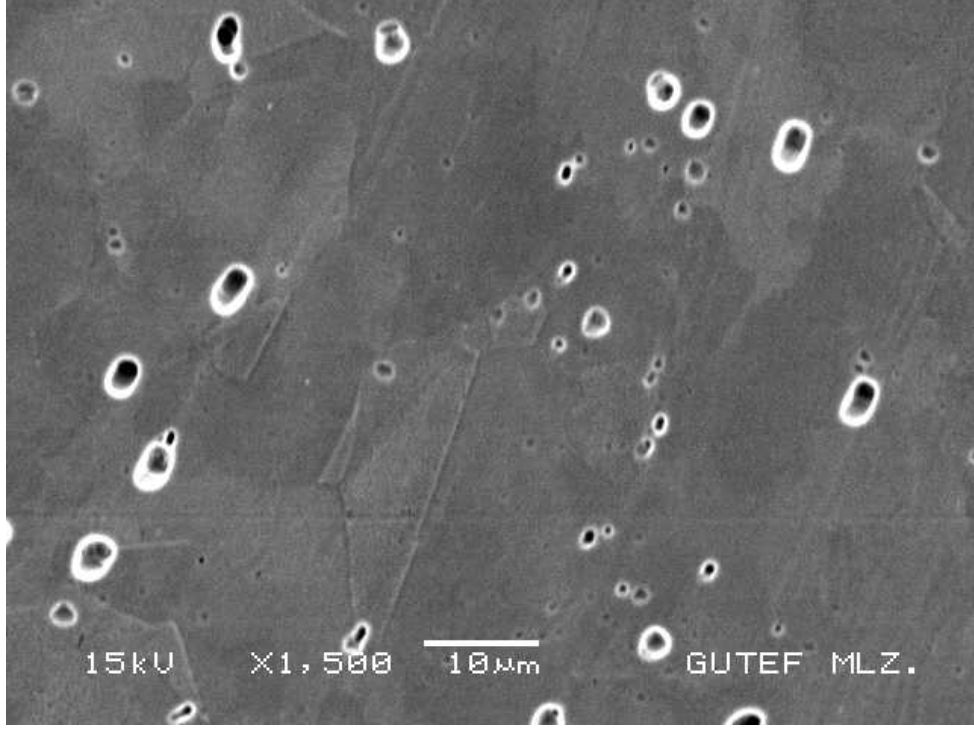
Şekil 3.35 Numune 8 kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü



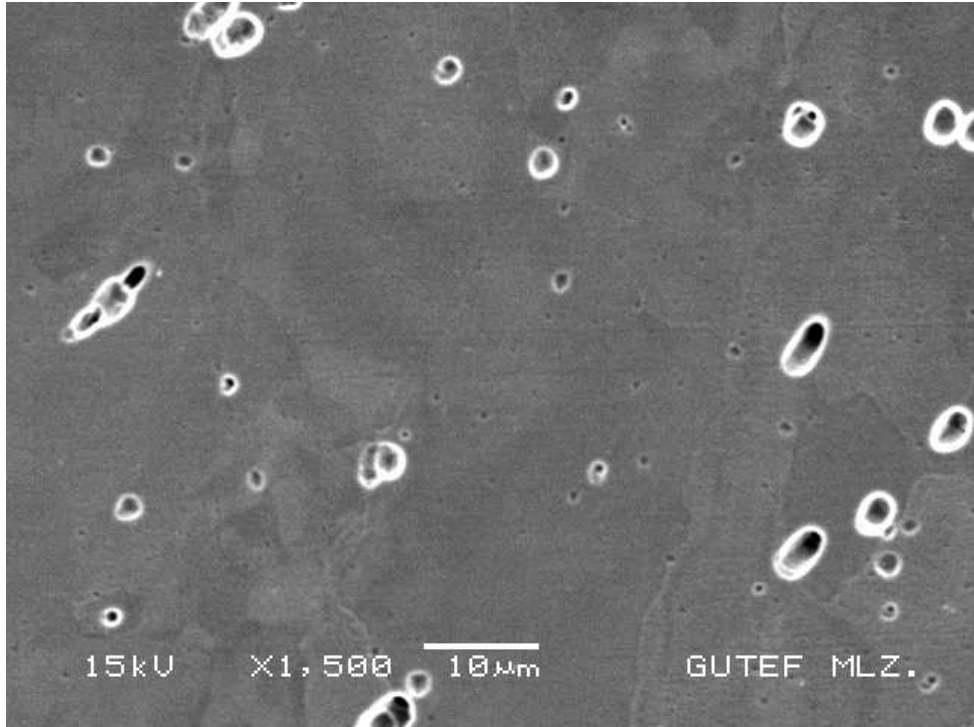
Şekil 3.36 Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü



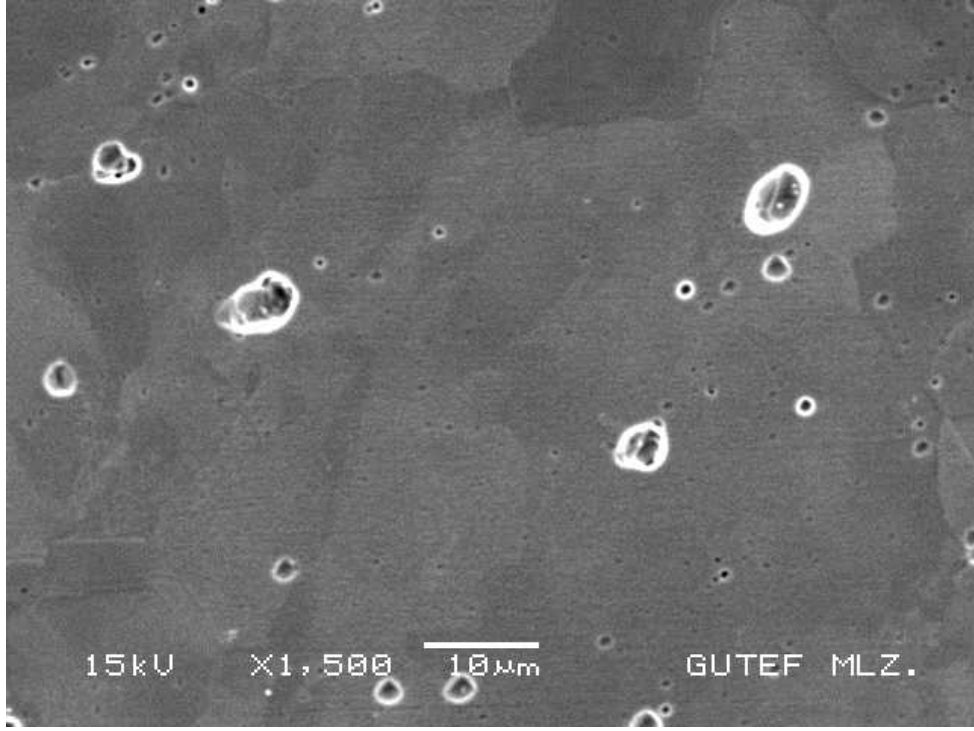
Şekil 3.37 Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü



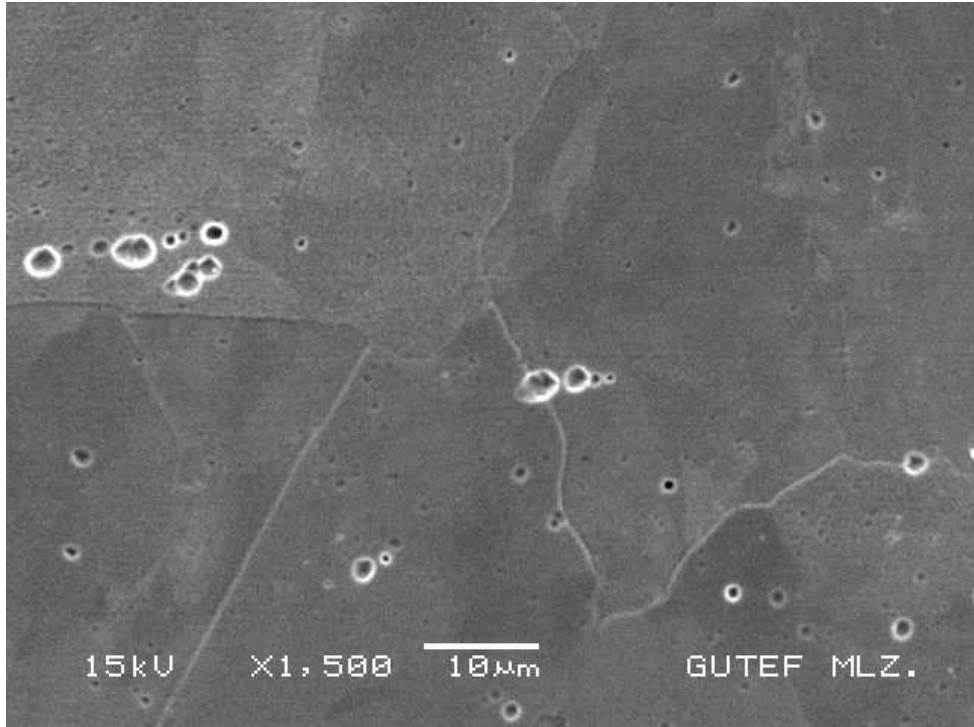
Şekil 3.38 Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü



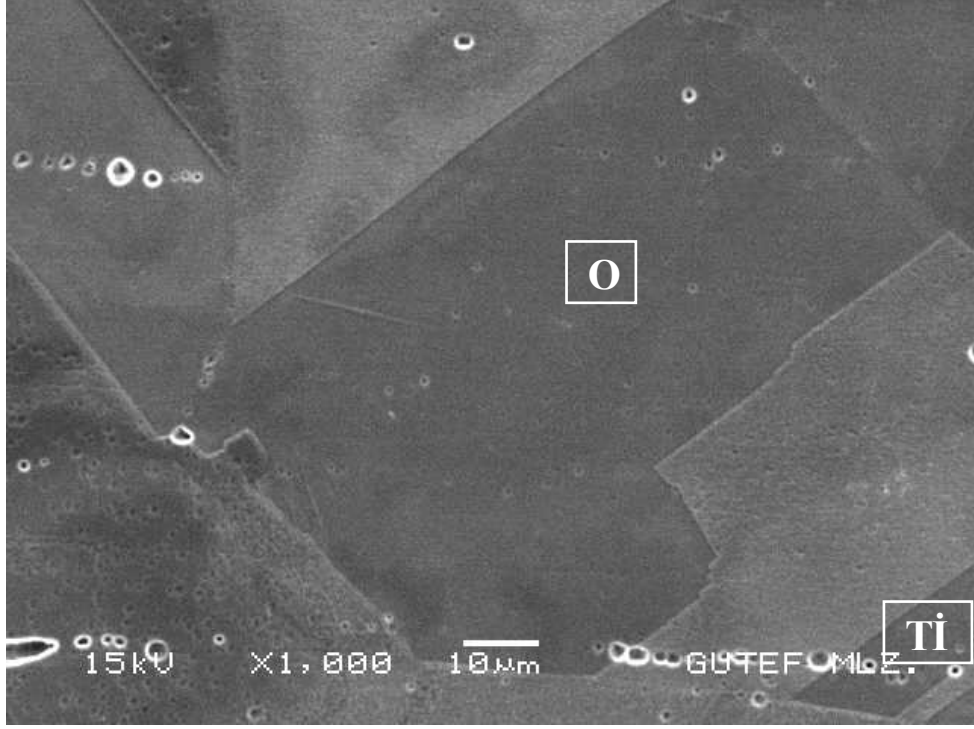
Şekil 3.39 Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 4 SEM görüntüsü



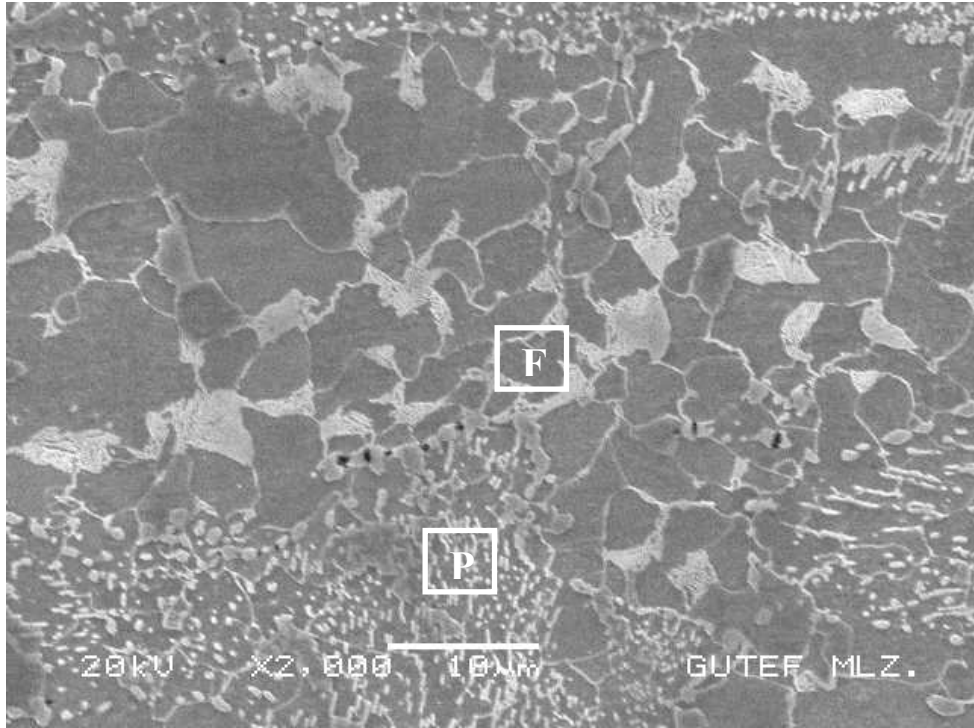
Şekil 3.40 Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 5 SEM görüntüsü



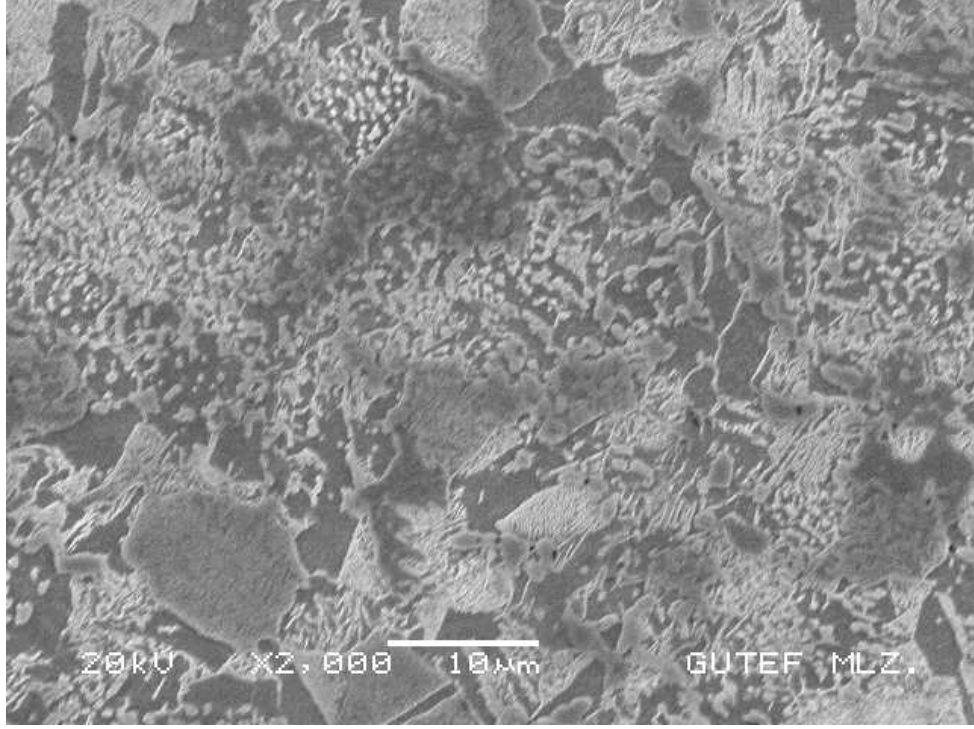
Şekil 3.41 Numune 8 AISI 316 çeliği ITAB 6 SEM görüntüsü



Şekil 3.42 Numune 8 AISI 316 çeliği SEM görüntüsü
(O: ostenit, Tİ: tavlama ikizleri)



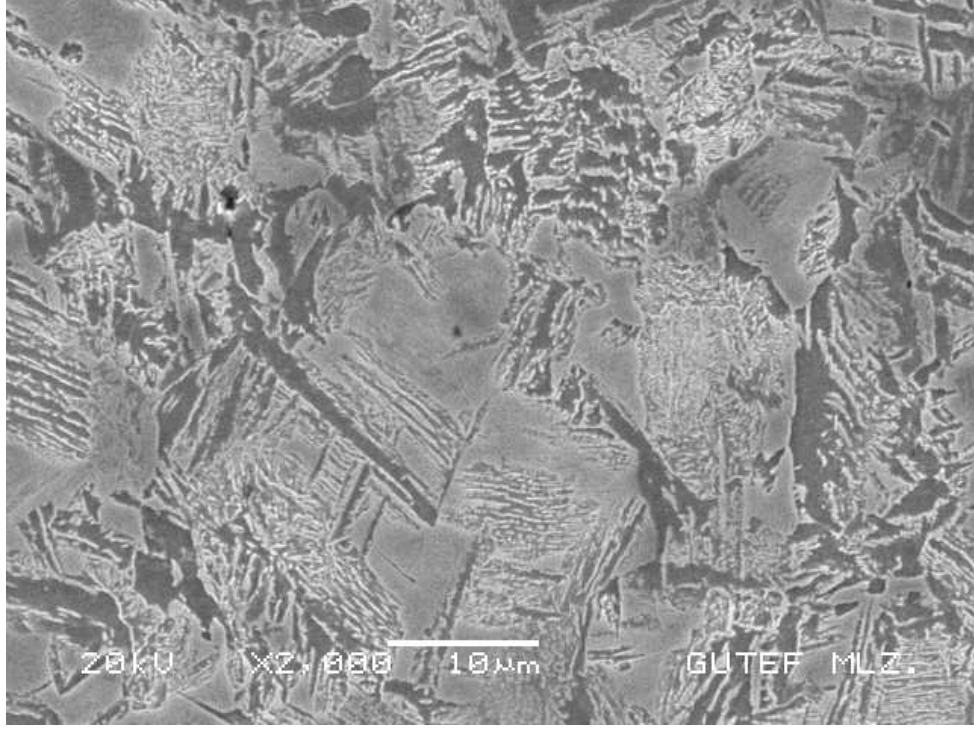
Şekil 3.43 Numune 9 Ck 45 çeliği SEM görüntüsü (F: ferrit, P: perlit)



Şekil 3.44 Numune 9 Ck 45 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü



Şekil 3.45 Numune 9 Ck 45 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü

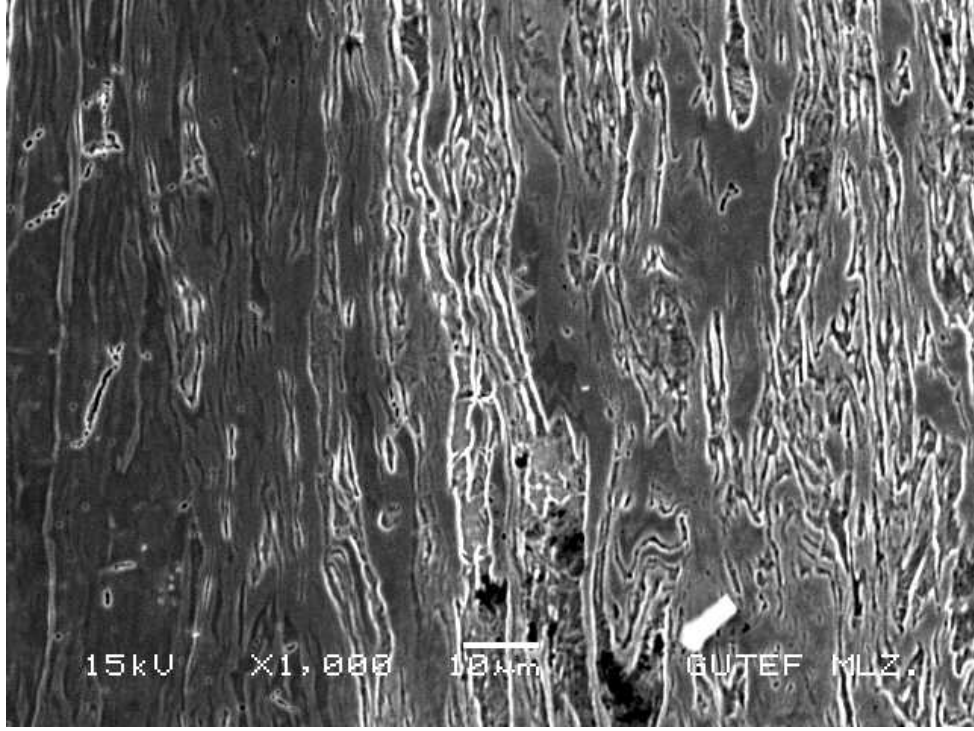


Şekil 3.46 Numune 9 Ck 45 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü

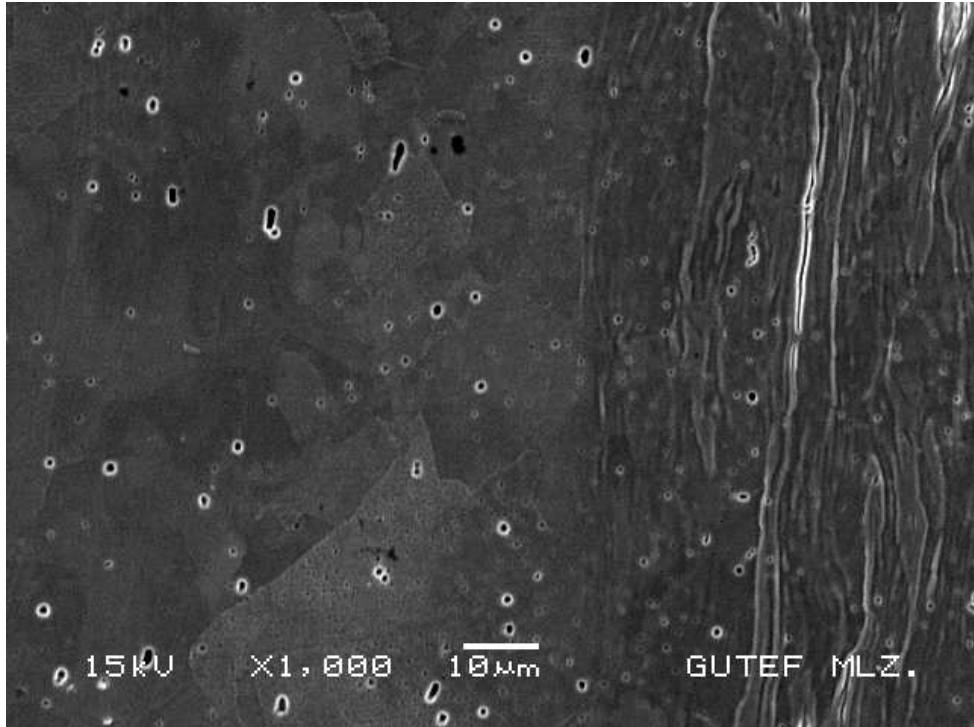


Şekil 3.47 Numune 9 Ck 45 çeliği ITAB 4 ve kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü

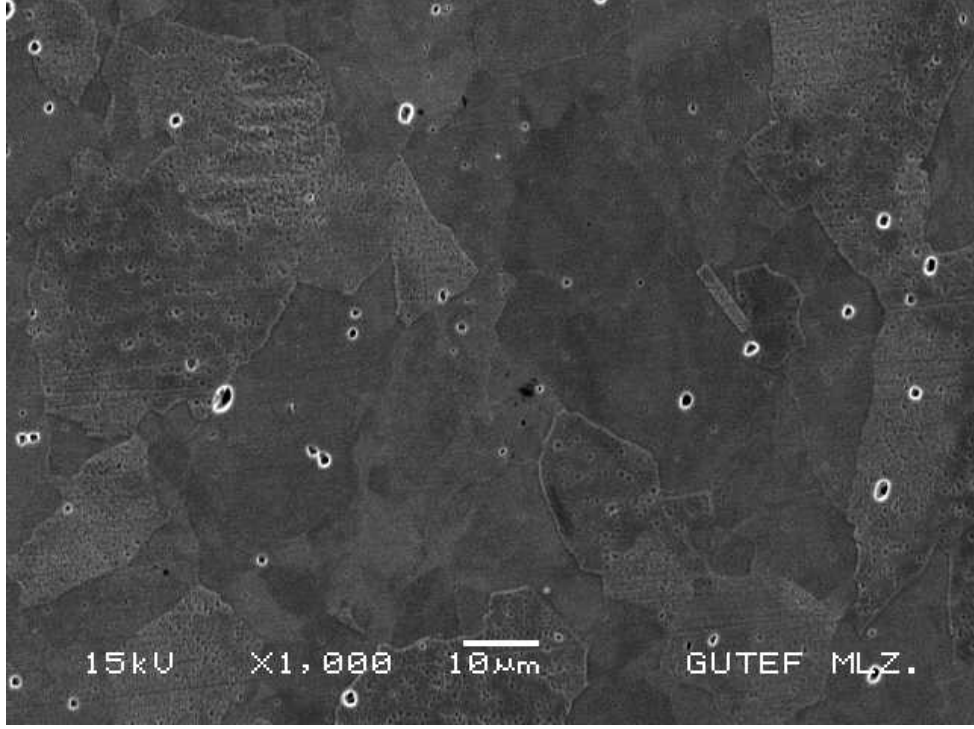
(M: martenzit)



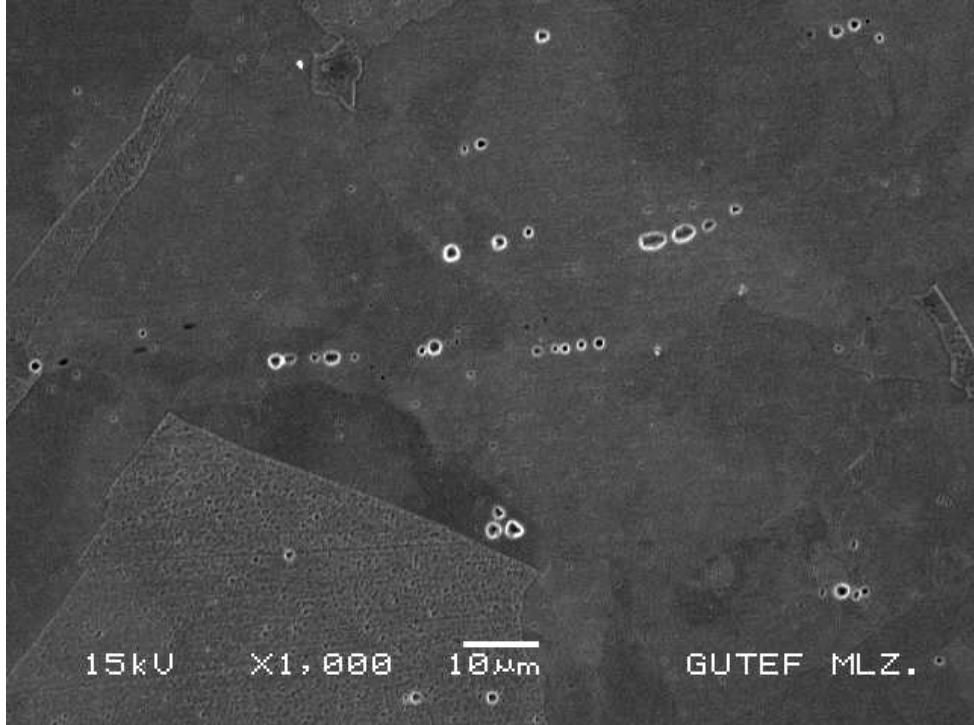
Şekil 3.48 Numune 9 kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü



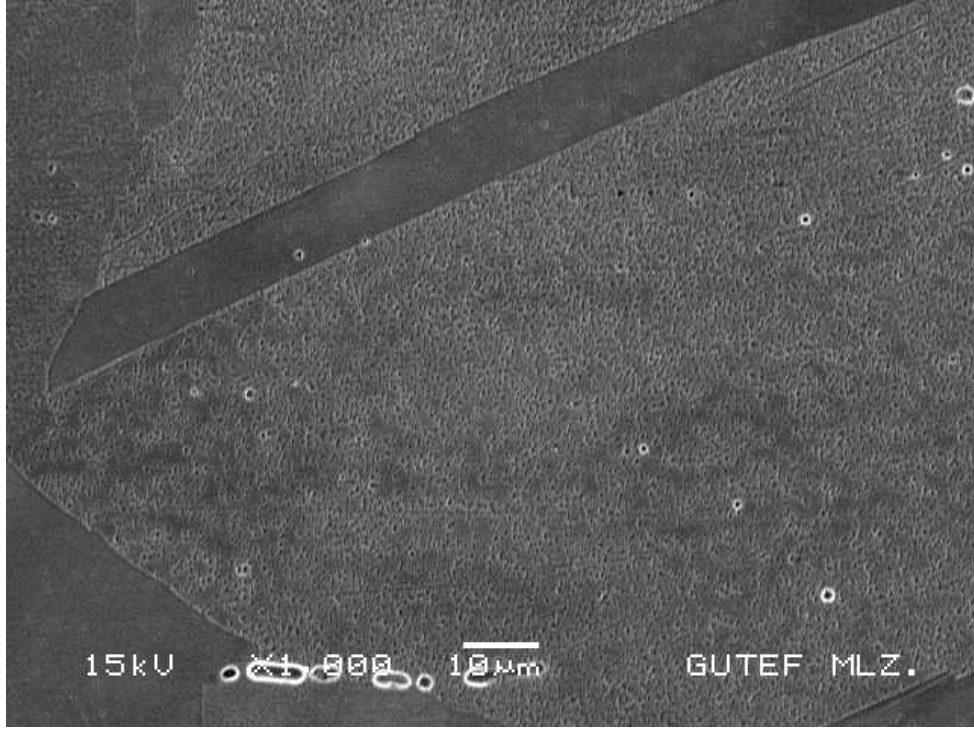
Şekil 3.49 Numune 9 AISI 316 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü



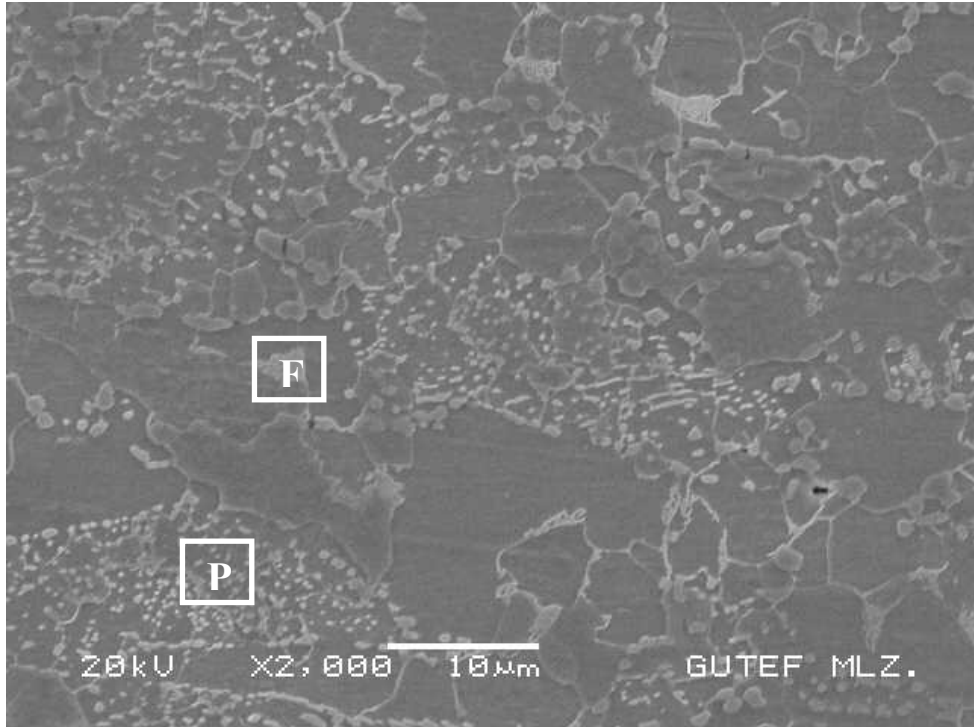
Şekil 3.50 Numune 9 AISI 316 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü



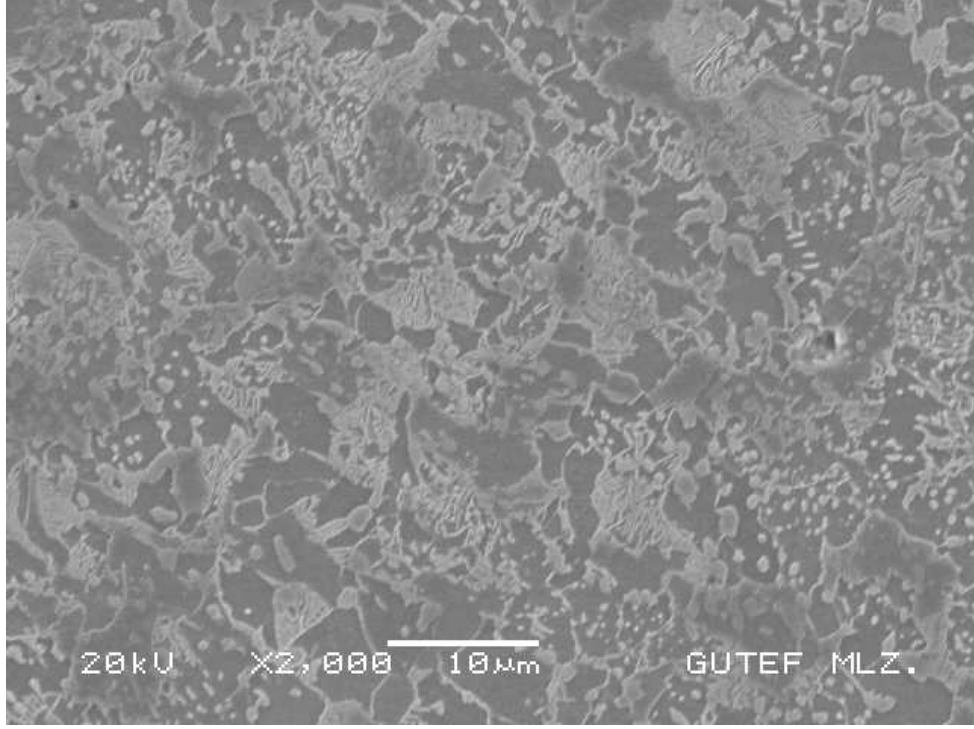
Şekil 3.51 Numune 9 AISI 316 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü



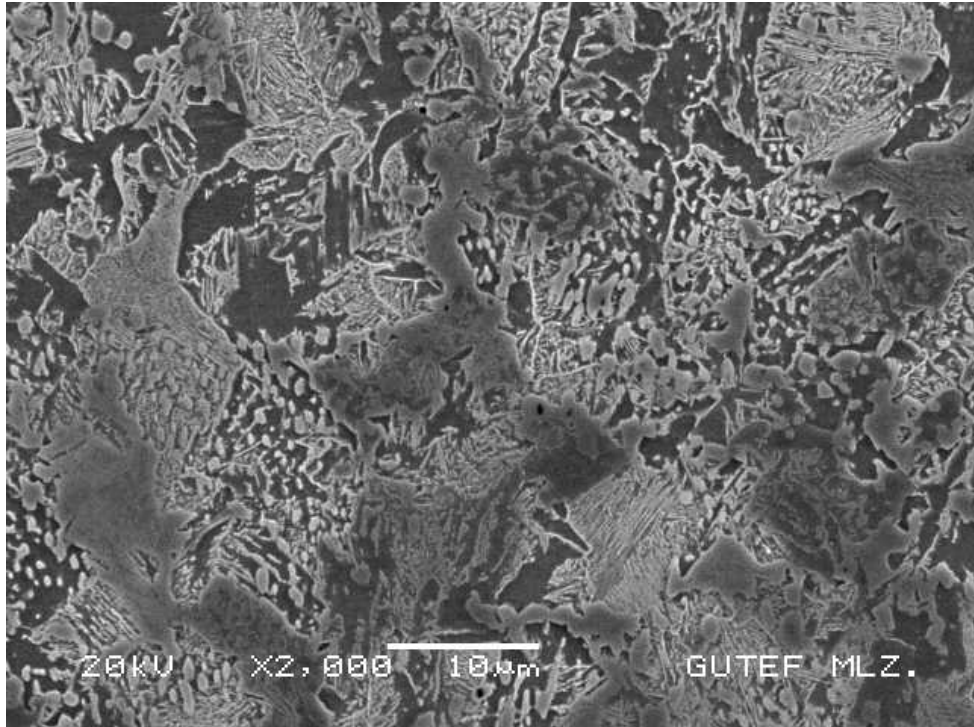
Şekil 3.52 Numune 9 AISI 316 çeliği SEM görüntüsü



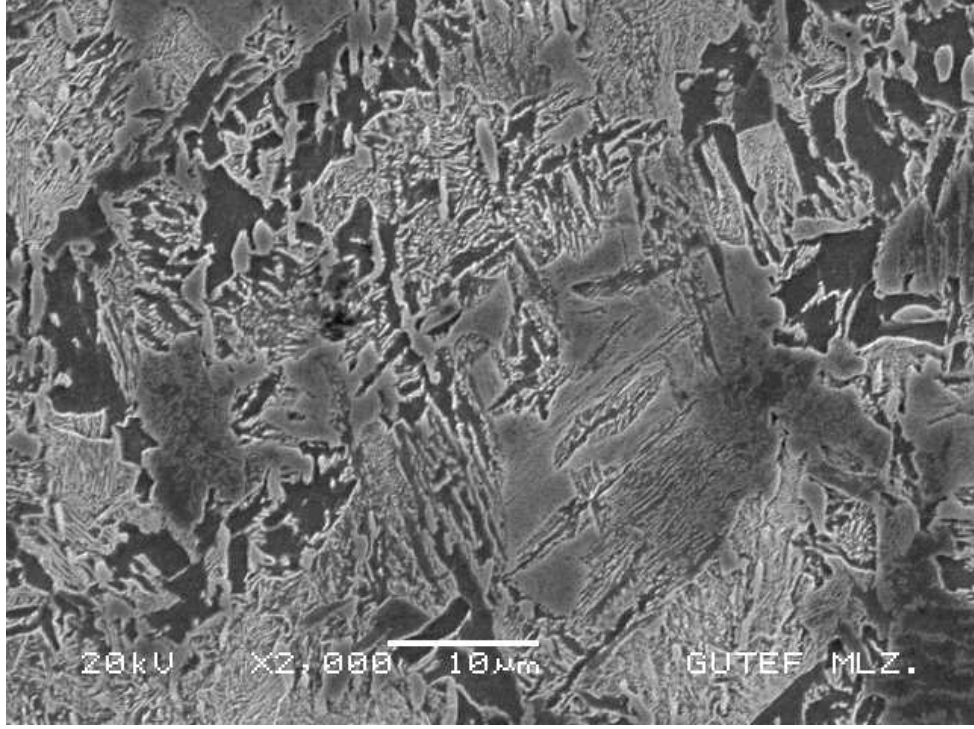
Şekil 3.53 Numune 13 Ck 45 çeliği SEM görüntüsü (F: ferrit, P: perlit)



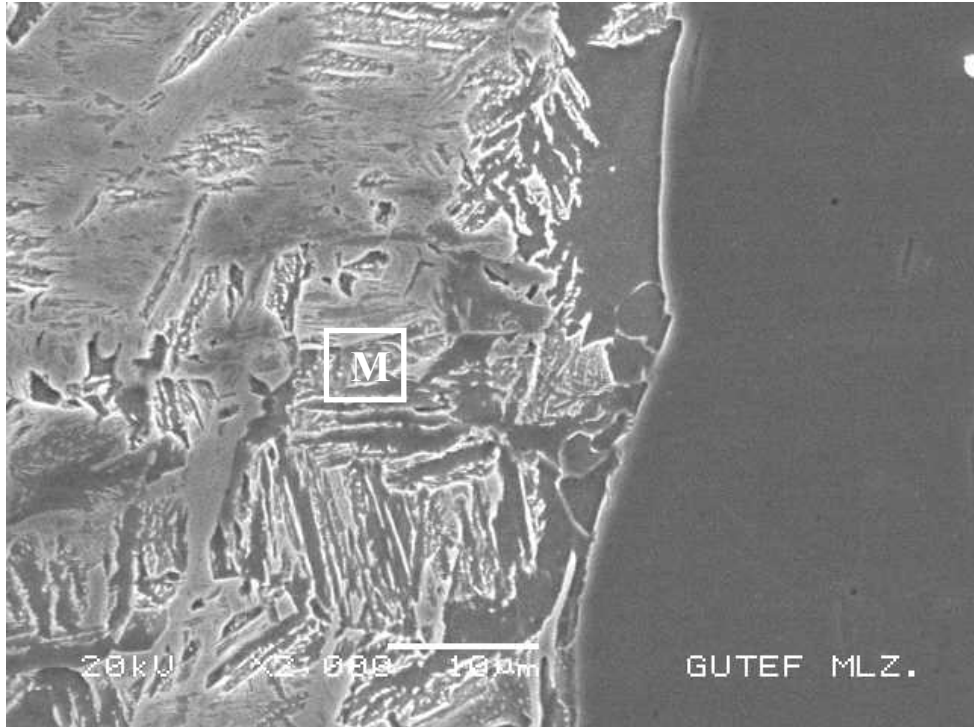
Şekil 3.54 Numune 13 Ck 45 çeliği ITAB 1 SEM görüntüsü



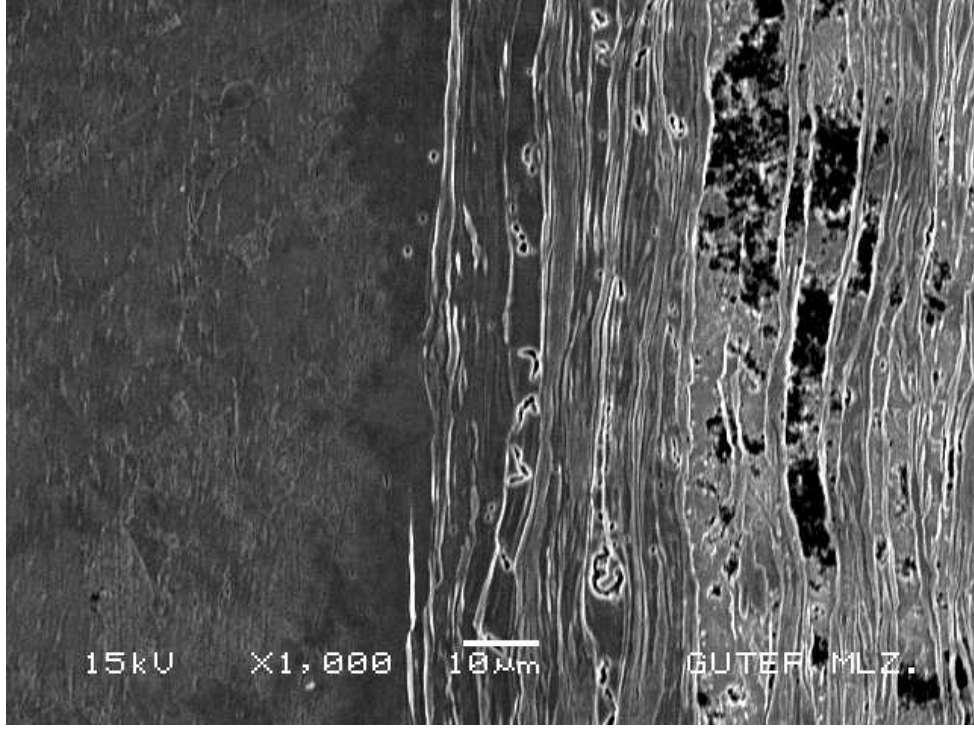
Şekil 3.55 Numune 13 Ck 45 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü



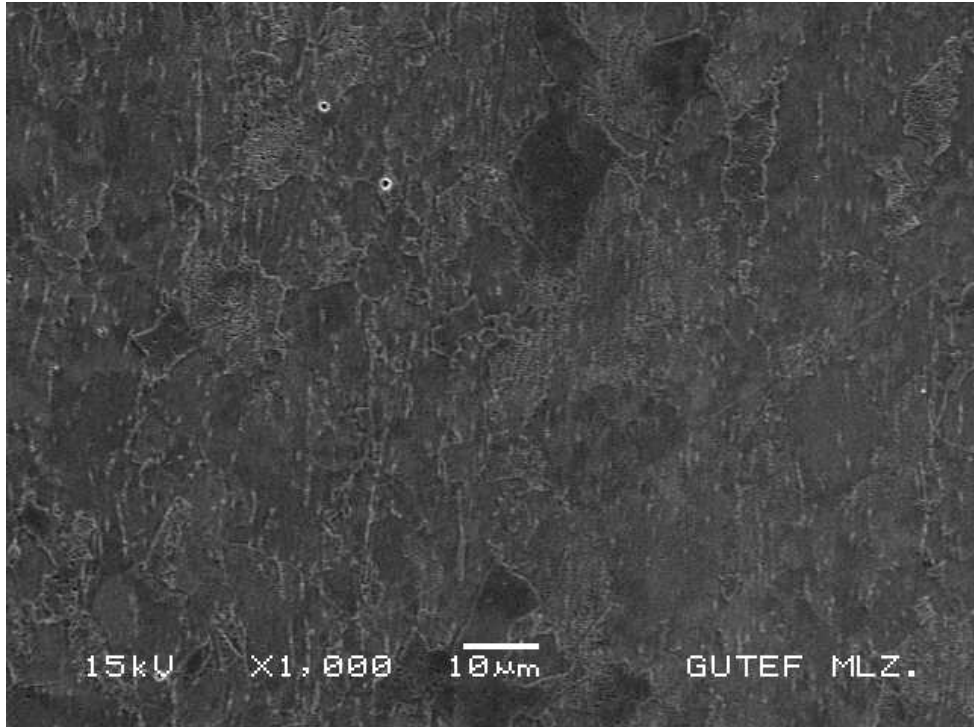
Şekil 3.56 Numune 13 Ck 45 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü



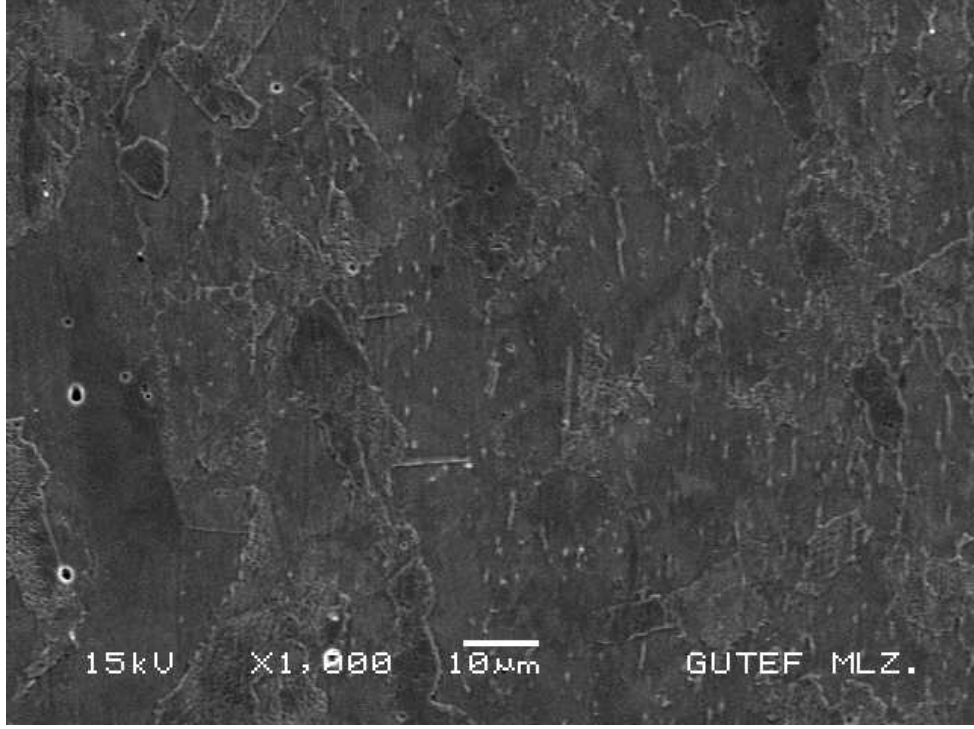
Şekil 3.57 Numune 13 Ck 45 çeliği ITAB 4 ve kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü
(M: martenzit)



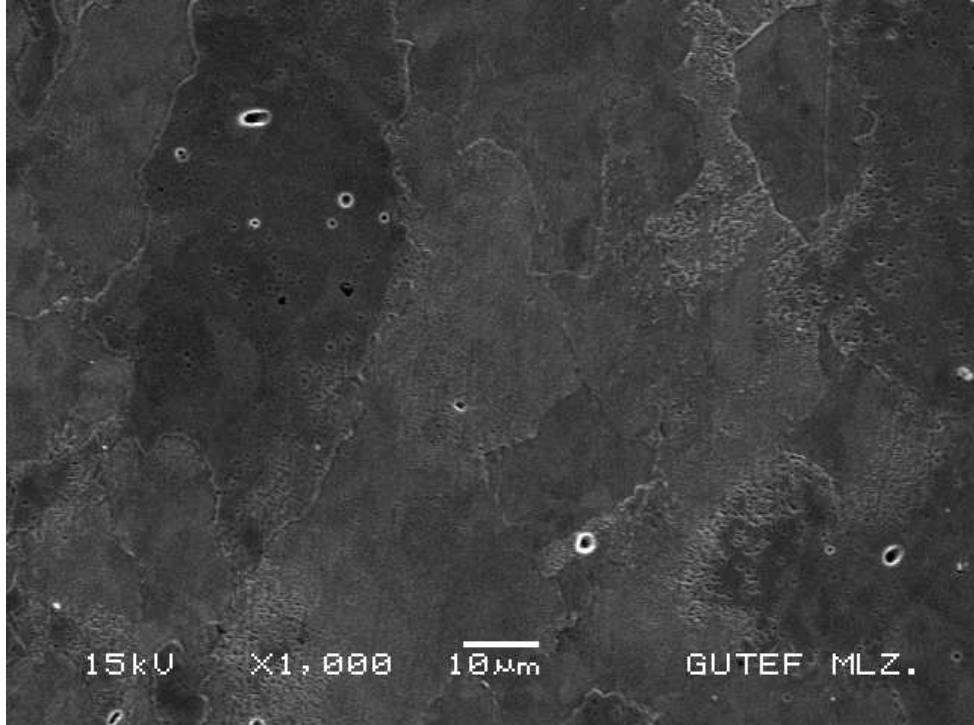
Şekil 3.58 Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 1 ve kaynak ara yüzeyi SEM görüntüsü



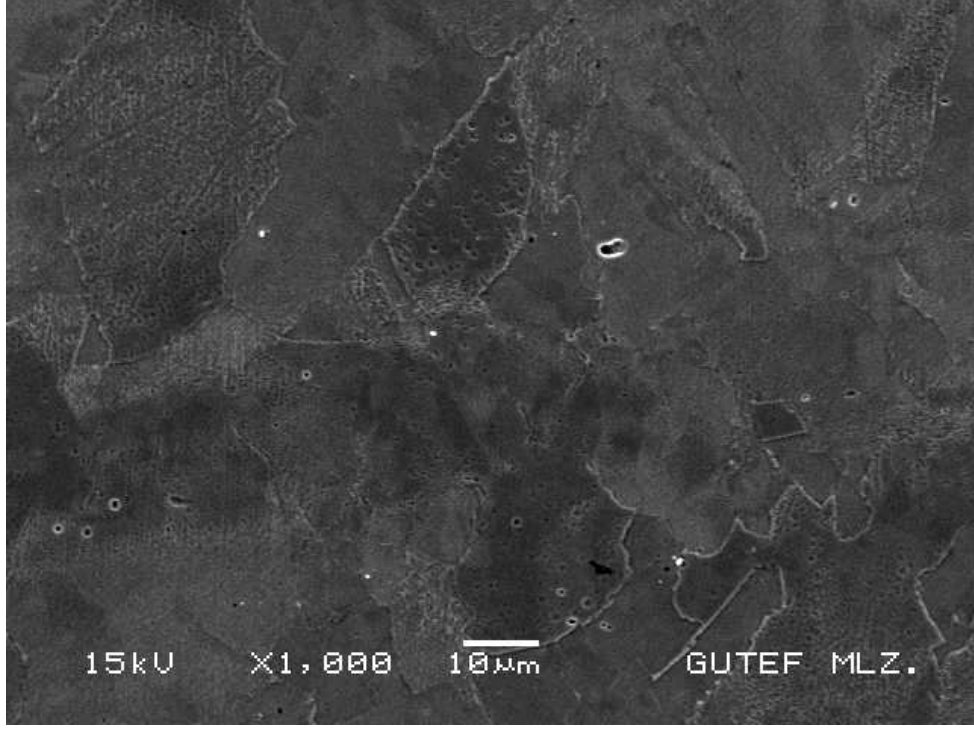
Şekil 3.59 Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 2 SEM görüntüsü



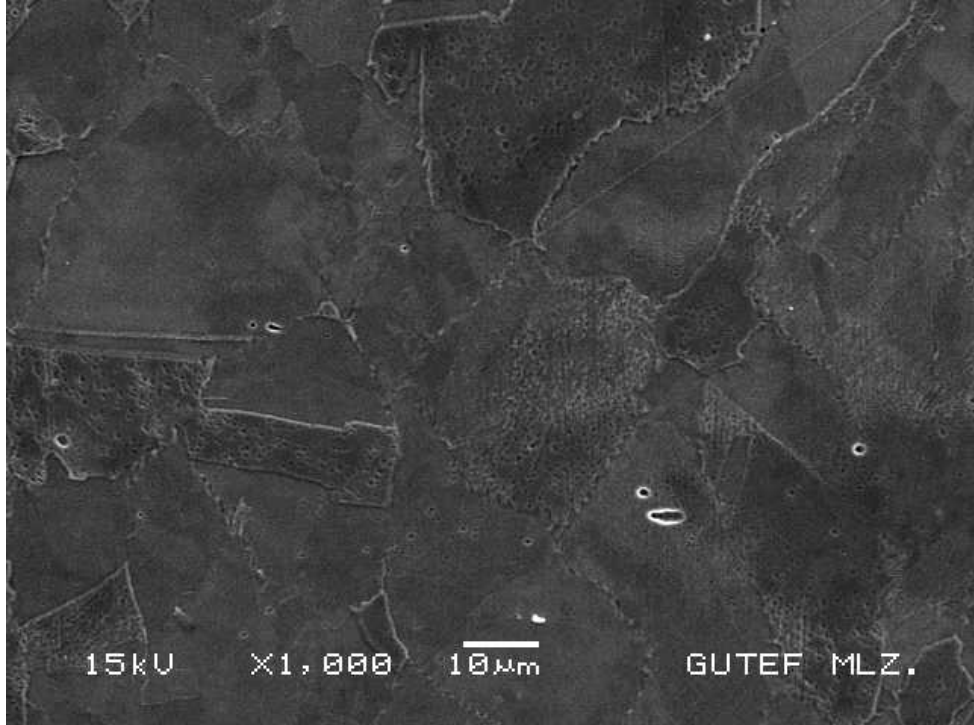
Şekil 3.60 Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 3 SEM görüntüsü



Şekil 3.61 Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 4 SEM görüntüsü



Şekil 3.62 Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 5 SEM görüntüsü



Şekil 3.63 Numune 13 AISI 316 çeliği ITAB 6 SEM görüntüsü



Şekil 3.64 Numune 13 AISI 316 çeliği SEM görüntüsü

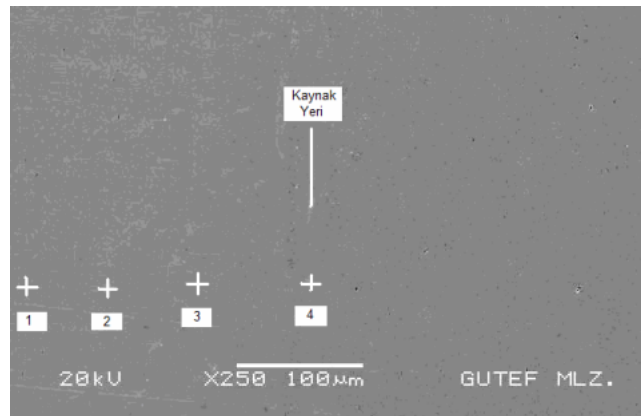
Ck 45 çeliği tarafına yapılan mikroyapı incelemesinde, kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde (Şekil 3.17(C) bölgesi) martenzit yapının oluştuğu görülmüştür. Ana malzemeye doğru gidildikçe; önce kaba taneli yapı, sonra ince taneli yapı görülmüştür (Şekil 3.17(B) bölgesi), belli bir mesafeden sonra ana malzemenin tane boyutuna tekrar ulaştığı görülmüştür (Şekil 3.17(A) bölgesi). Bu bölgenin mikro yapısı, sertlik dağılımı ile paralellik göstermiştir (Şekil 3.12).

AISI 316 çeliğine yapılan mikroyapı incelemesinde ITAB 'da dinamik yeniden kristalleşme ile yeni tane yapılarının gerçekleştiği görülmüştür. Kaynak ara yüzeyinden AISI 316 çeliğine doğru gidildikçe, oluşan yeni tanelerin boyutu deformasyon (eksenel basınç ve dönme hareketi) ve sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermiştir. Kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde (Şekil 3.17(D) bölgesi), sıcaklık ve deformasyon miktarının fazla olması ve basınç altında gerçekleşen sıcak torsiyon etkisi ile tane yapısında küçülme ve merkezden çevreye doğru yönelmenin gerçekleştiği görülmüştür. Bu bölgeden ana malzemeye doğru gidildikçe (Şekil 3.17(E) bölgesi) azalan sıcaklık ve deformasyon miktarına bağlı olarak tane yapısı

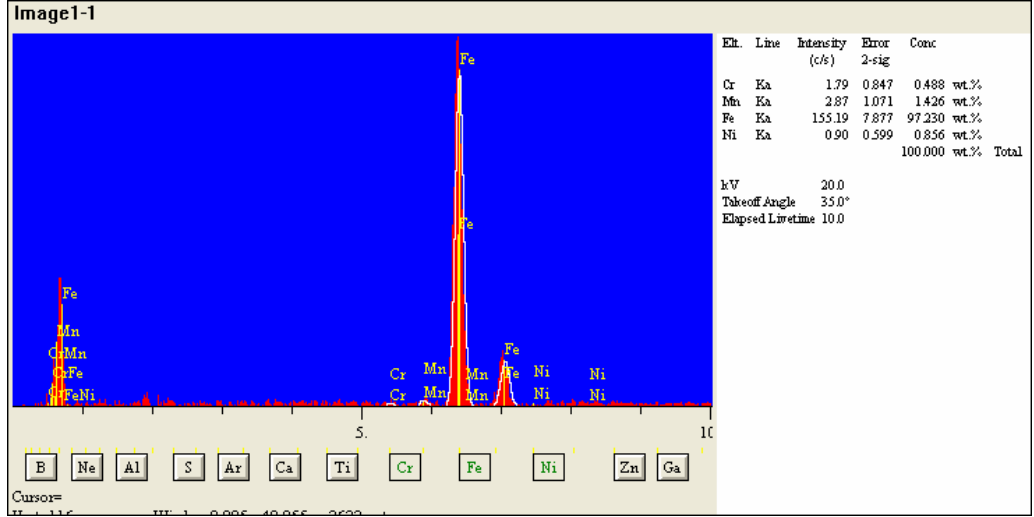
büyümüş, belli bir mesafeden sonra ana malzemenin tane yapısına ve boyutuna ulaştığı görülmüştür (Şekil 3.17(F) bölgesi) [43,44,s.141-145,45]. Her iki malzemenin ITAB genişliği kaynak parametrelerine göre değişim göstermiştir (Tablo 3.3). Kaynaklı numunelerin Ck 45 çeliği tarafında oluşan ITAB genişliği AISI 316 çeliğinin ITAB genişliğinden ortalama olarak 1.73 kat daha fazla oluşmuştur. Ck 45 çeliğinde ITAB genişliğinin, AISI 316 çeliğinin ITAB genişliğine göre artış oranı, Ck 45 çeliğinde gerçekleşen boyda kısalma miktarının AISI 316 çeliğinden fazla olması nedeniyle azalmıştır (Tablo 3.1). Çünkü Ck 45 çeliğinde, ısınan malzeme miktarı, AISI 316 çeliğinden daha fazla kaynak ara yüzeyinin dışına flaş olarak çıkmıştır.

3.3.3 EDS Analizi

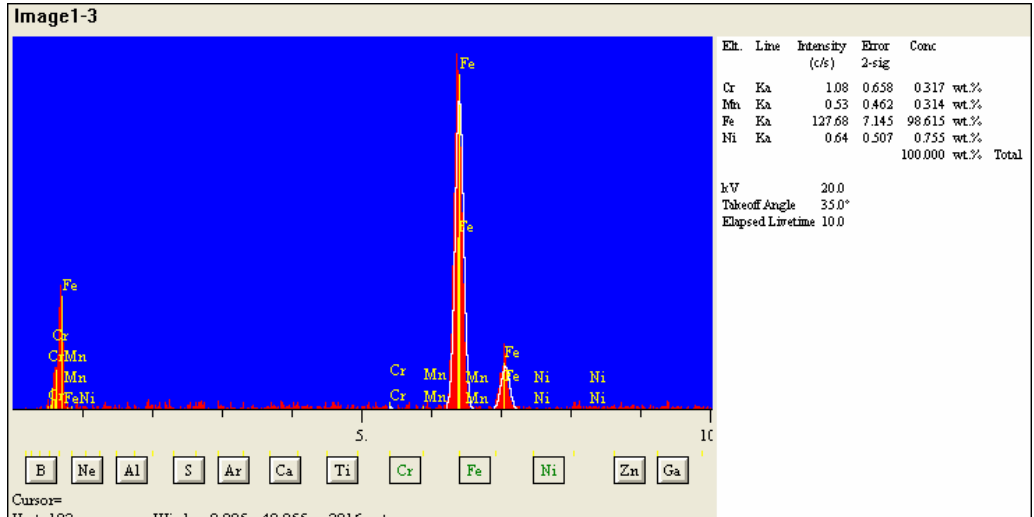
Kaynaklı numuneler 8, 9 ve 13 'e yapılan SEM incelemesinin ardından EDS analizi yapılmıştır. Optik ve SEM mikroyapı incelemesi doğrultusunda bu numunelere, ana malzemedan kaynak ara yüzeyine doğru sırasıyla uygun görülen nokta ve bölgelerden EDS analizleri yapılmıştır (Şekil 3.65-114). EDS analiz sonuçları tablo şeklinde verilmiştir (Tablo 3.4-9)



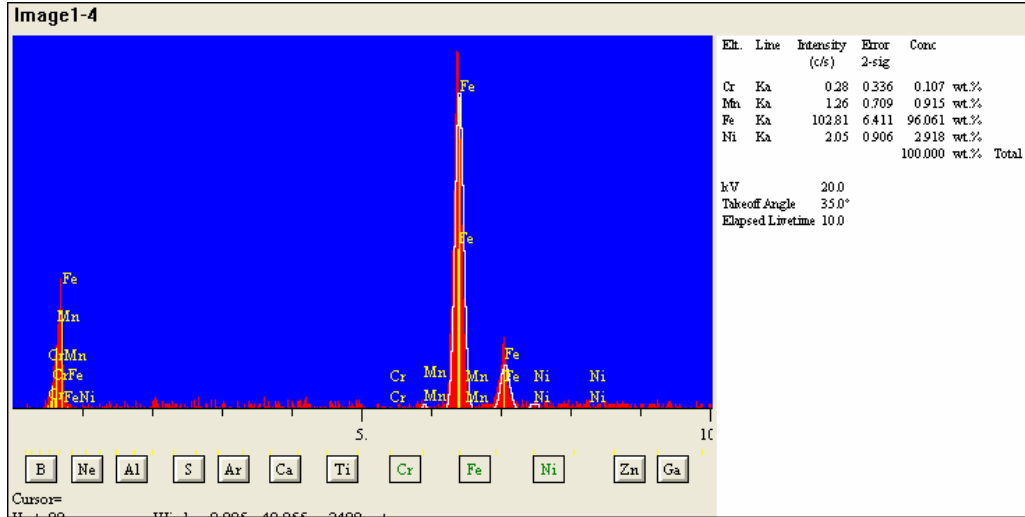
Şekil 3.65 Numune 8 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktaları



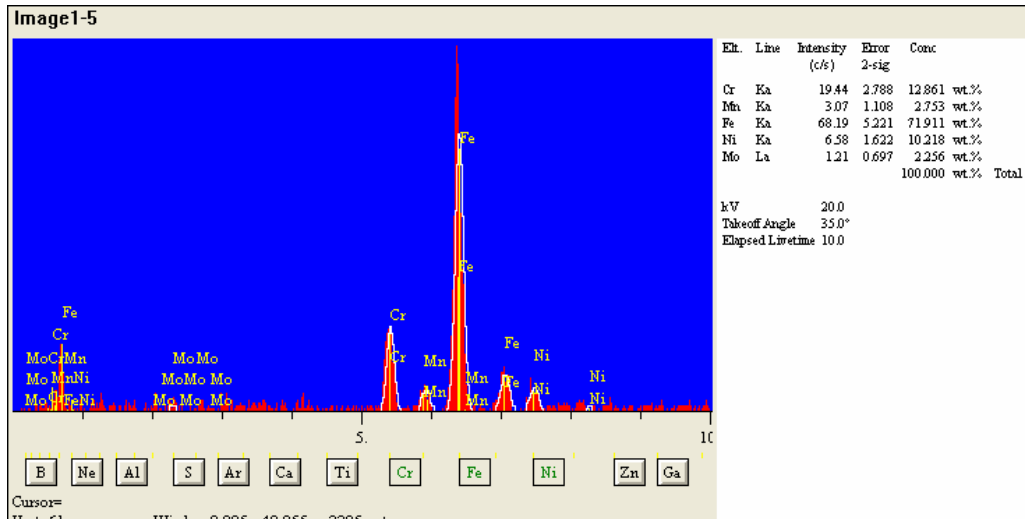
Şekil 3.66 Numune 8 Ck 45 çeliği 1. noktanın EDS analiz sonuçları



Şekil 3.67 Numune 8 Ck 45 çeliği 2. noktanın EDS analiz sonuçları



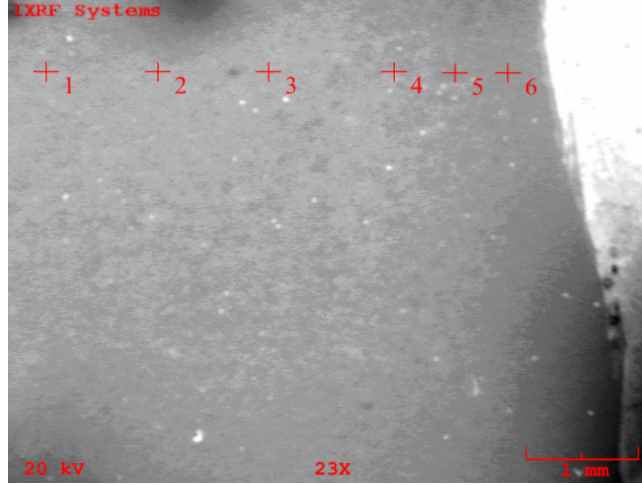
Şekil 3.68 Numune 8 Ck 45 çeliği 3. noktanın EDS analiz sonuçları



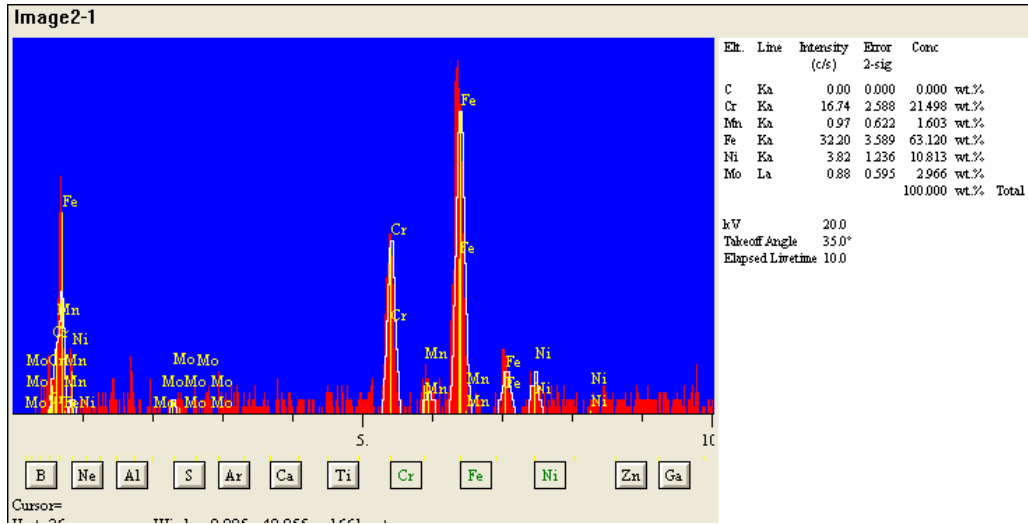
Şekil 3.69 Numune 8 Ck 45 çeliği 4. noktanın EDS analiz sonuçları

Tablo 3.4 Numune 8 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktalarının element dağılımı

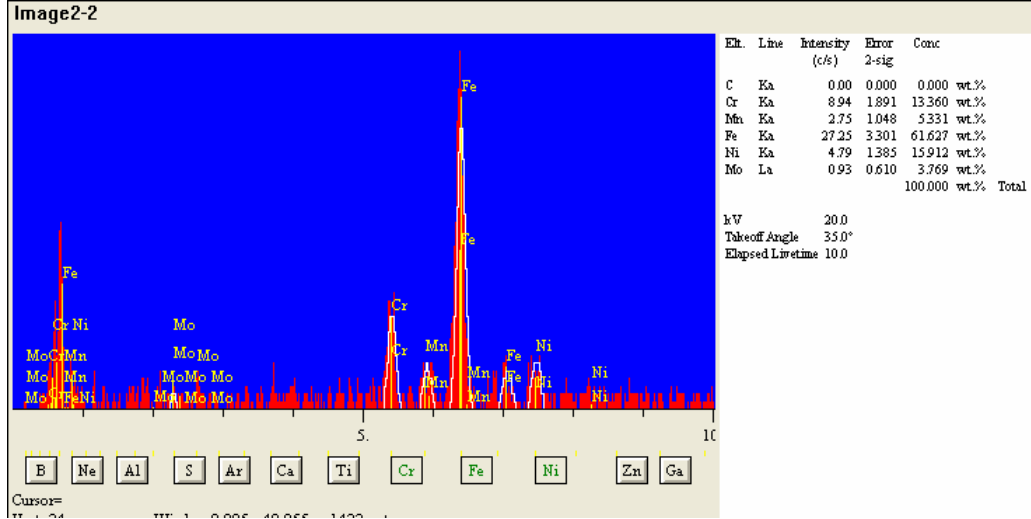
Element %	1	2	3	4
Cr	0,488	0,317	0,107	12,861
Mn	1,426	0,314	0,915	2,753
Fe	97,23	98,615	96,061	71,911
Ni	0,856	0,755	2,918	10,218
Mo				2,256



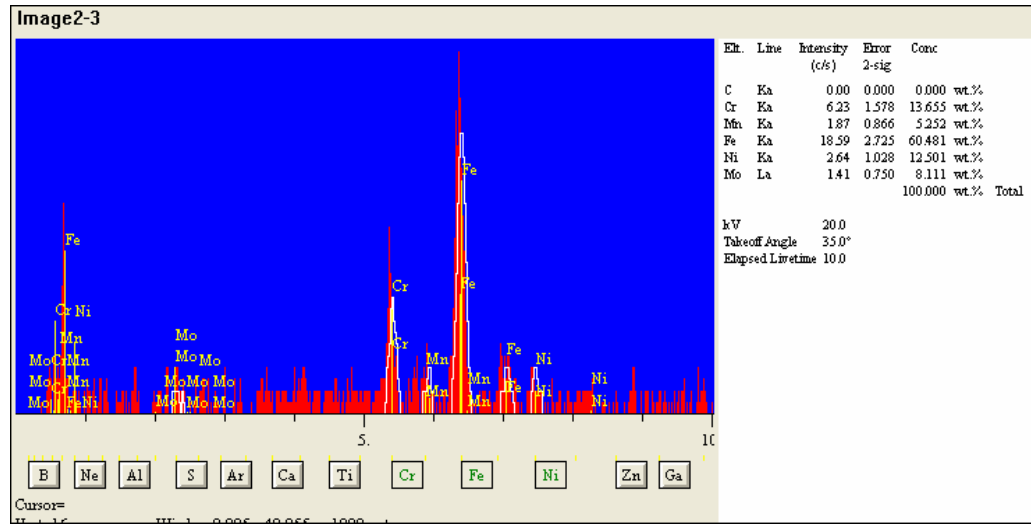
Şekil 3.70 Numune 8 AISI 316 çeliği tarafı EDS analiz noktaları



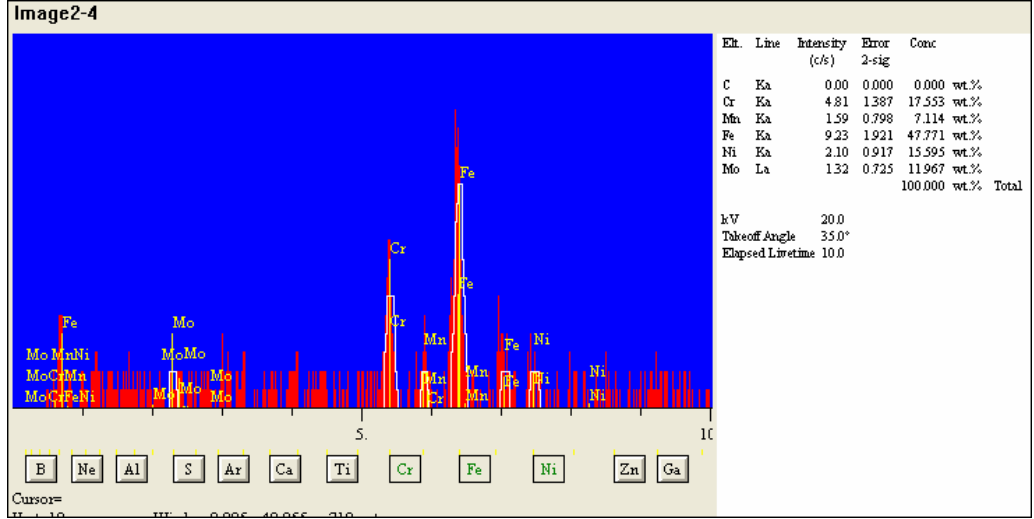
Şekil 3.71 Numune 8 AISI 316 çeliği 1. noktanın EDS analiz sonuçları



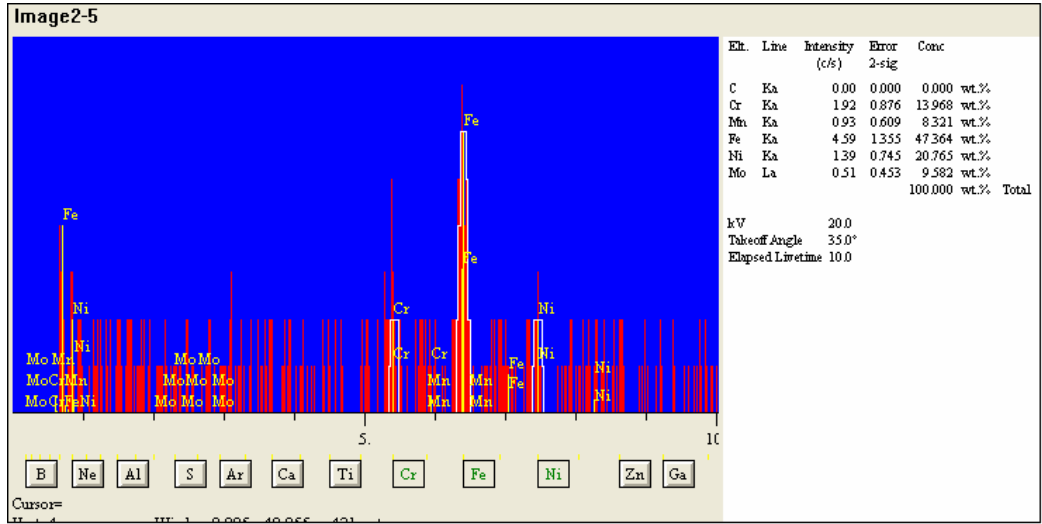
Şekil 3.72 Numune 8 AISI 316 çeliği 2. noktanın EDS analiz sonuçları



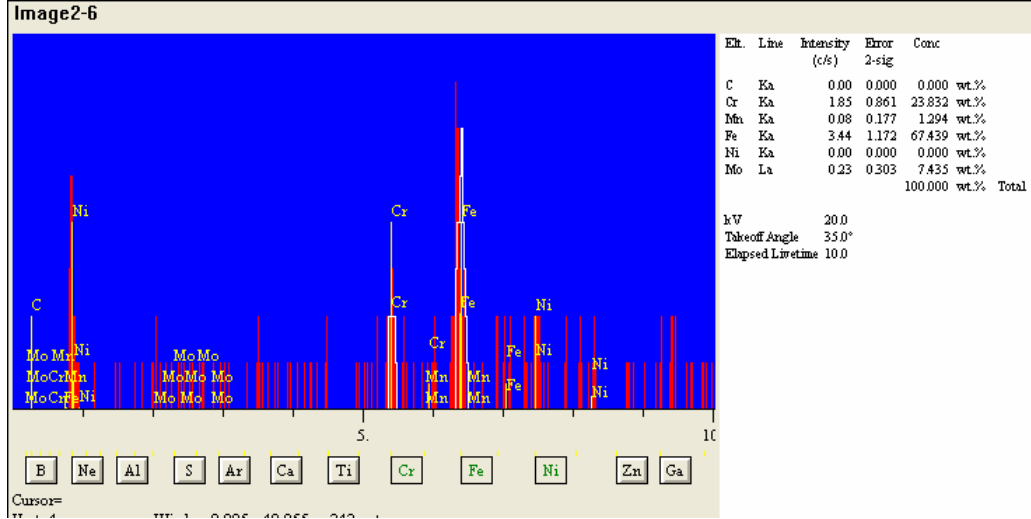
Şekil 3.73 Numune 8 AISI 316 çeliği 3. noktanın EDS analiz sonuçları



Şekil 3.74 Numune 8 AISI 316 çeliği 4. noktanın EDS analiz sonuçları



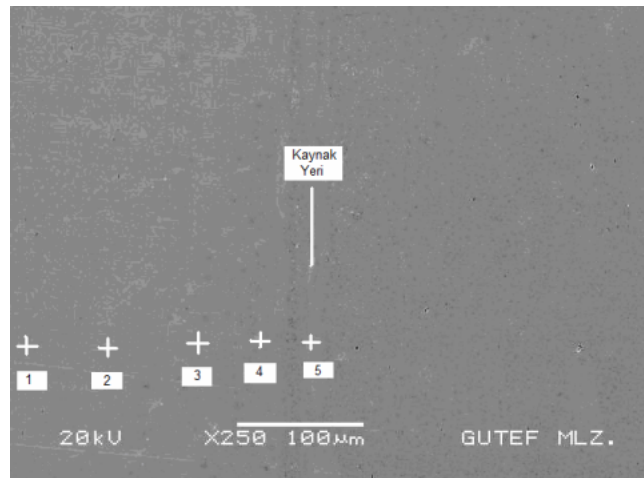
Şekil 3.75 Numune 8 AISI 316 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları



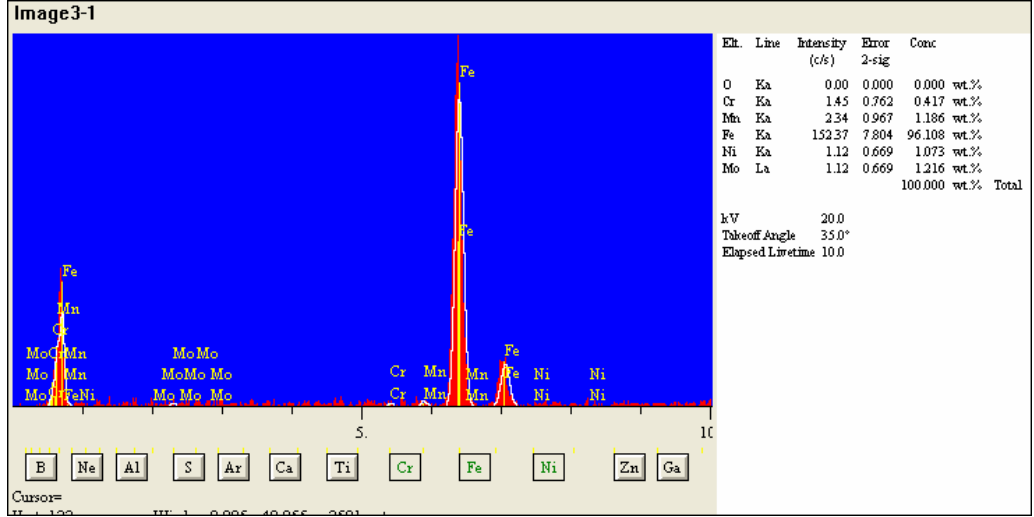
Şekil 3.76 Numune 8 AISI 316 çeliği 6. noktanın EDS analiz sonuçları

Tablo 3.5 Numune 8 AISI 316 çeliği tarafı EDS analiz noktalarının element dağılımı

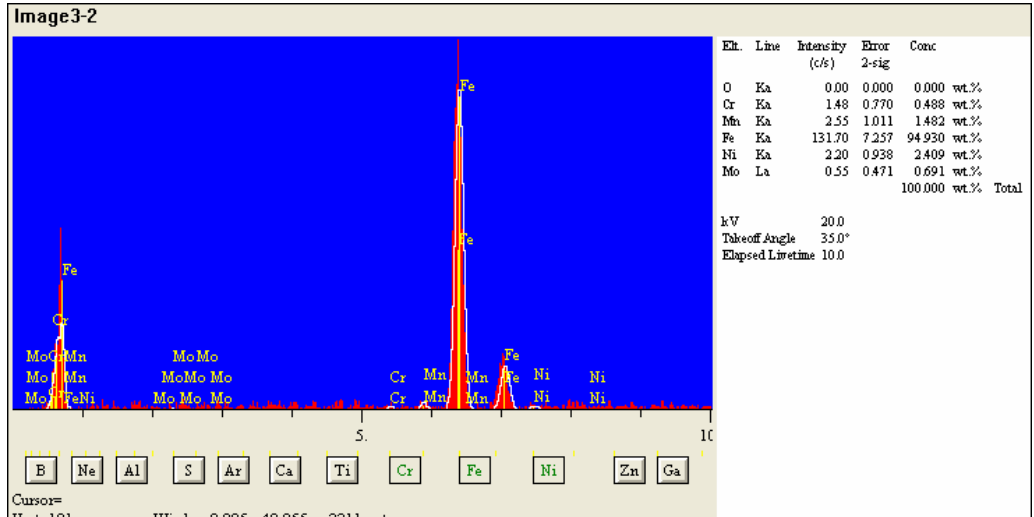
Element %	1	2	3	4	5	6
Cr	21,498	13,360	13,655	17,553	13,968	23,832
Mn	1,603	5,331	5,252	7,114	8,321	1,294
Fe	63,120	61,627	60,481	47,771	47,364	67,439
Ni	10,813	15,912	12,501	15,595	20,765	0,000
Mo	2,966	3,769	8,111	11,967	9,582	7,435



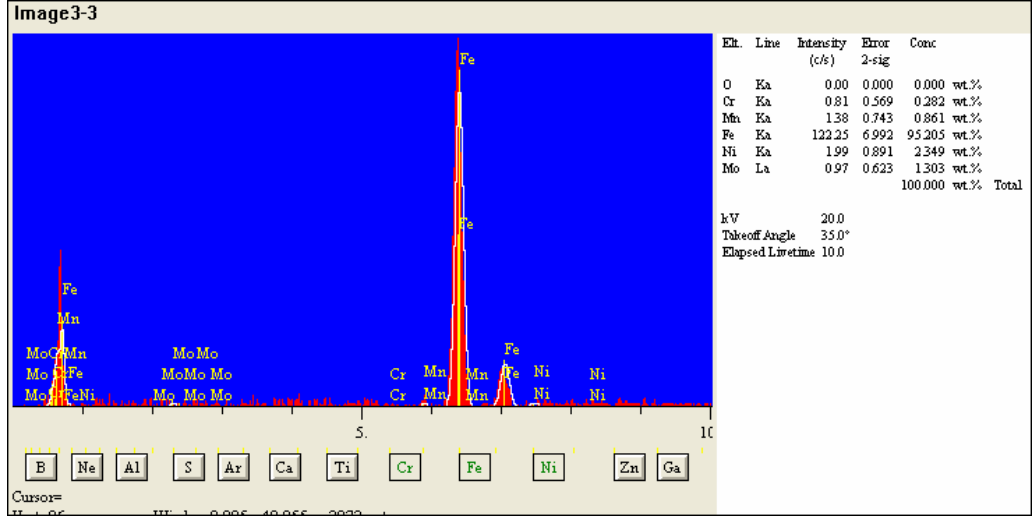
Şekil 3.77 Numune 9 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktaları



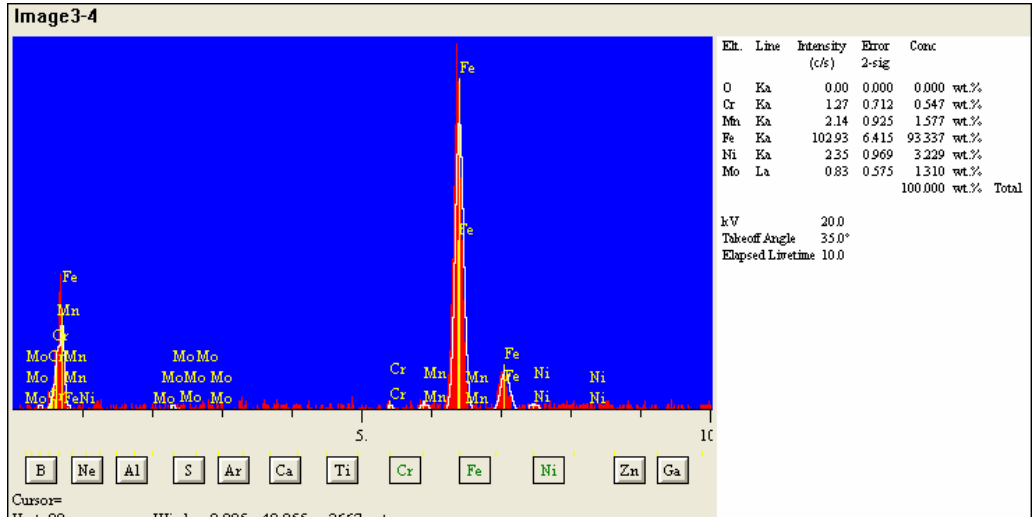
Şekil 3.78 Numune 9 Ck 45 çeliği 1. noktanın EDS analiz sonuçları



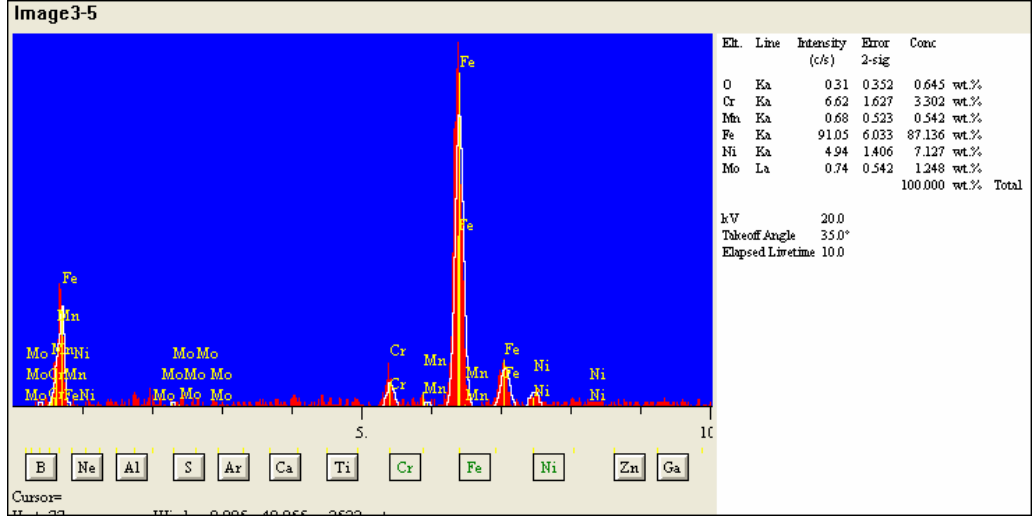
Şekil 3.79 Numune 9 Ck 45 çeliği 2. noktanın EDS analiz sonuçları



Şekil 3.80 Numune 9 Ck 45 çeliği 3. noktanın EDS analiz sonuçları



Şekil 3.81 Numune 9 Ck 45 çeliği 4. noktanın EDS analiz sonuçları

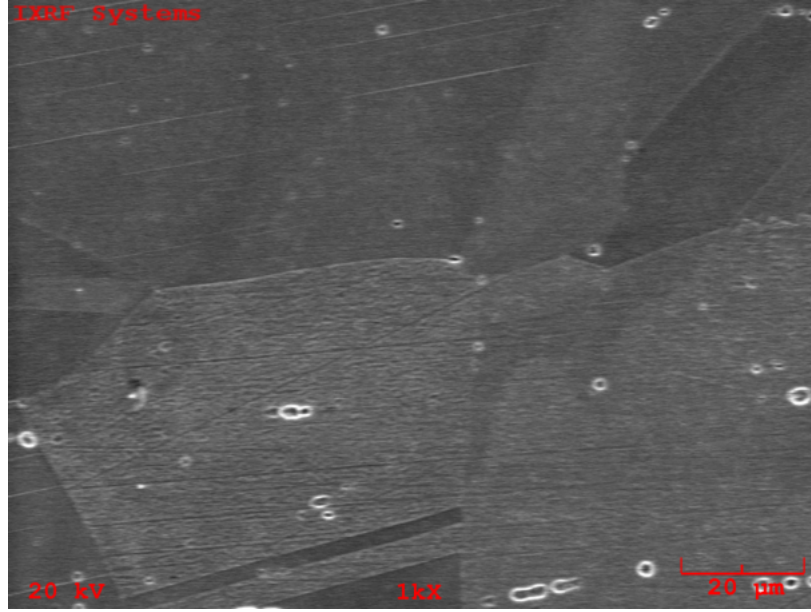


Şekil 3.82 Numune 9 Ck 45 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları

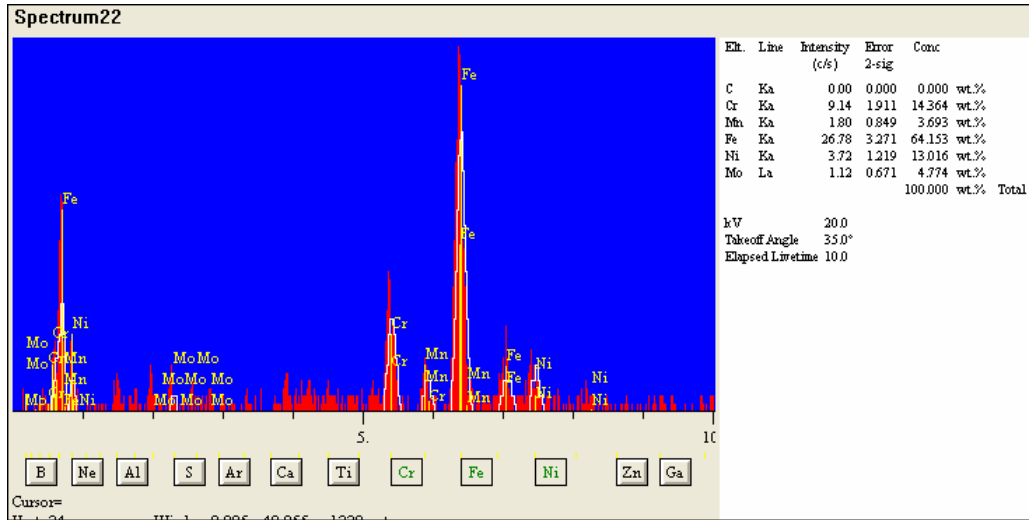
Tablo 3.6 Numune 9 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktalarının element dağılımı

Element %	1	2	3	4	5
Cr	0,417	0,488	0,282	0,547	3,302
Mn	1,186	1,482	0,861	1,577	0,542
Fe	96,108	94,930	95,205	93,337	87,136
Ni	1,073	2,409	2,349	3,229	7,127
Mo	1,216	0,691	1,303	1,310	1,248

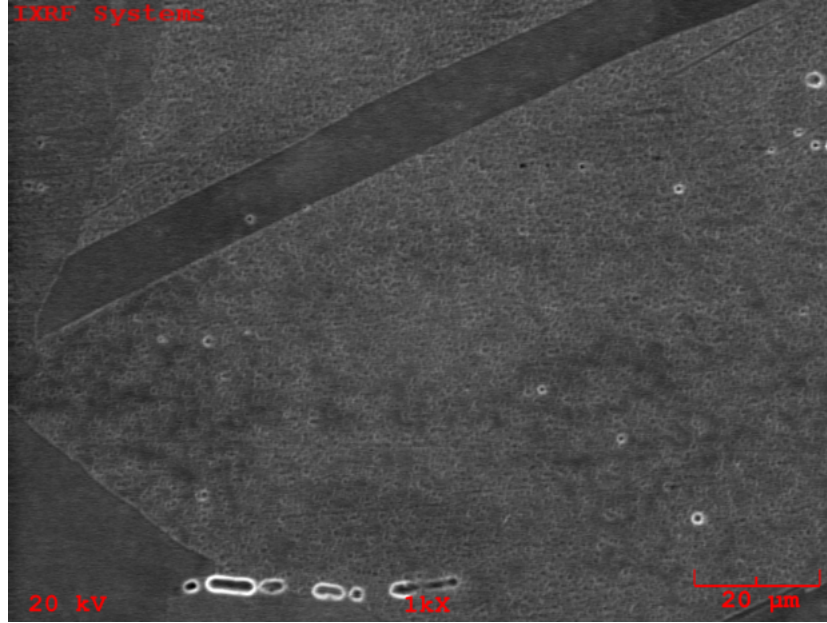
Kaynaklı numune 9 'un AISI 316 çeliği tarafında EDS analizinin alındığı SEM görüntüleri, ana malzeme, ITAB bölgesi ve kaynak ara yüzeyi sıralamasıyla bölgeler ve noktalar şeklinde belirtilmiştir (Şekil 3.83, 3.85, 3.87, 3.89, 3.91 ve 3.94).



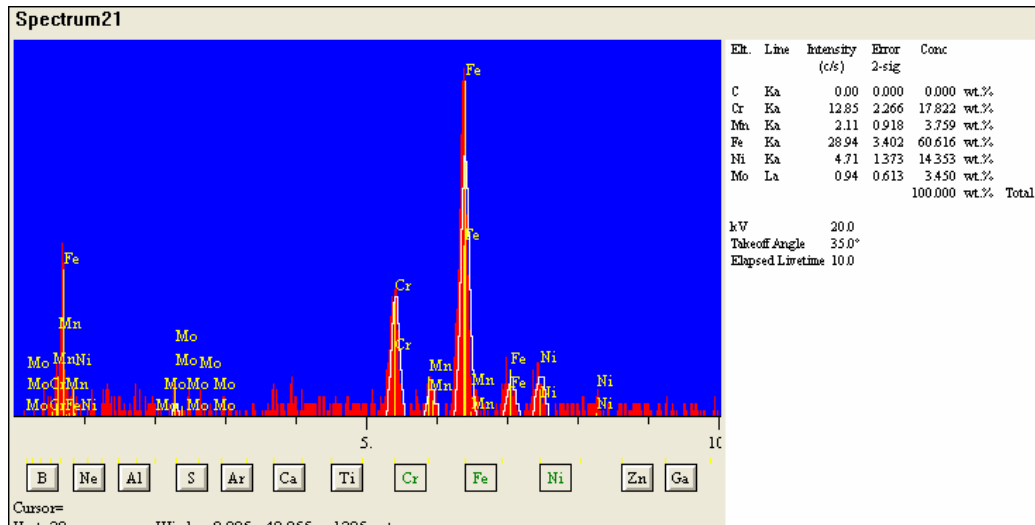
Şekil 3.83 Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 1. bölge



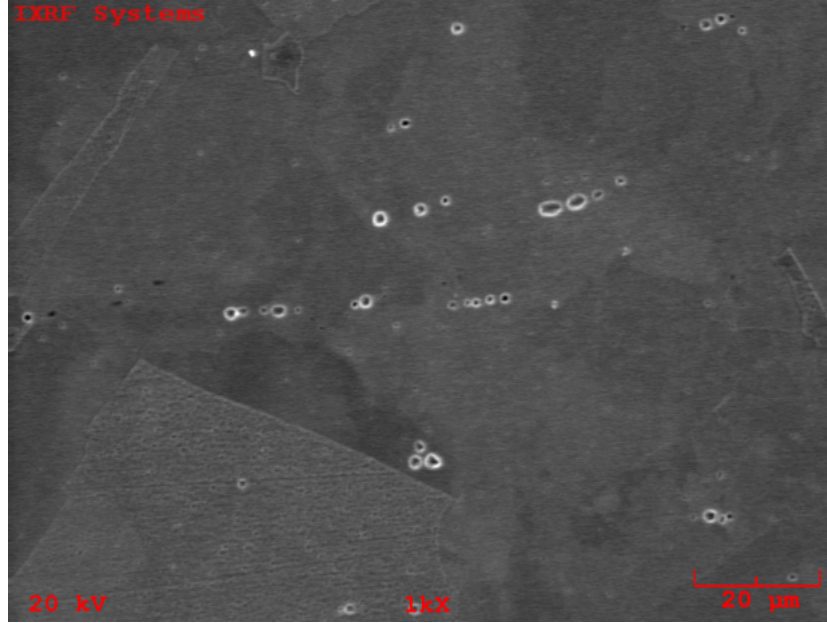
Şekil 3.84 Numune 9 AISI 316 çeliği 1. bölgenin EDS analiz sonuçları



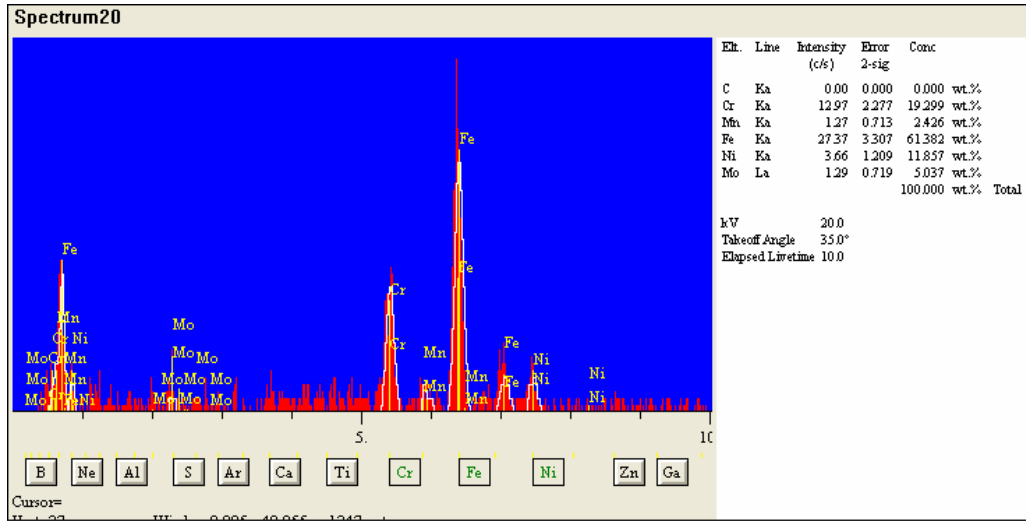
Şekil 3.85 Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 2. bölge



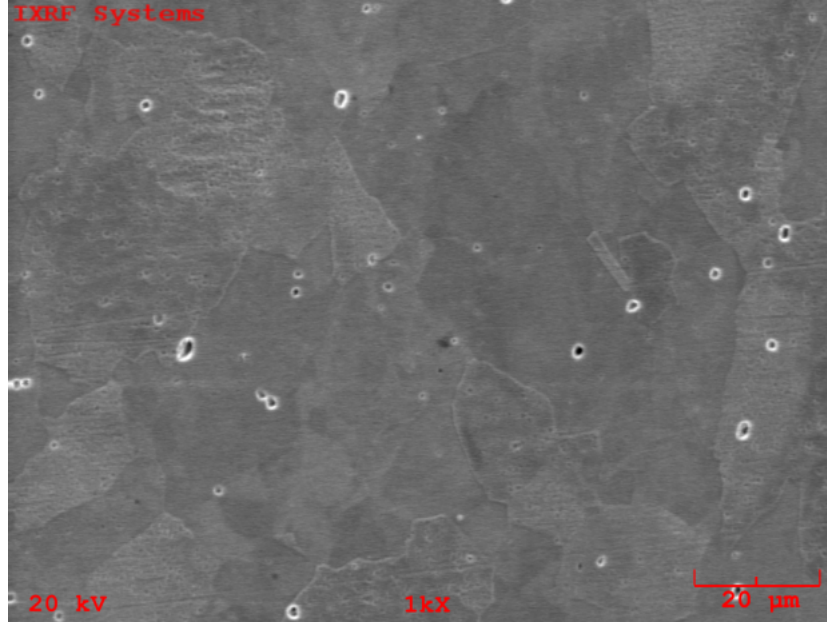
Şekil 3.86 Numune 9 AISI 316 çeliği 2. bölgenin EDS analiz sonuçları



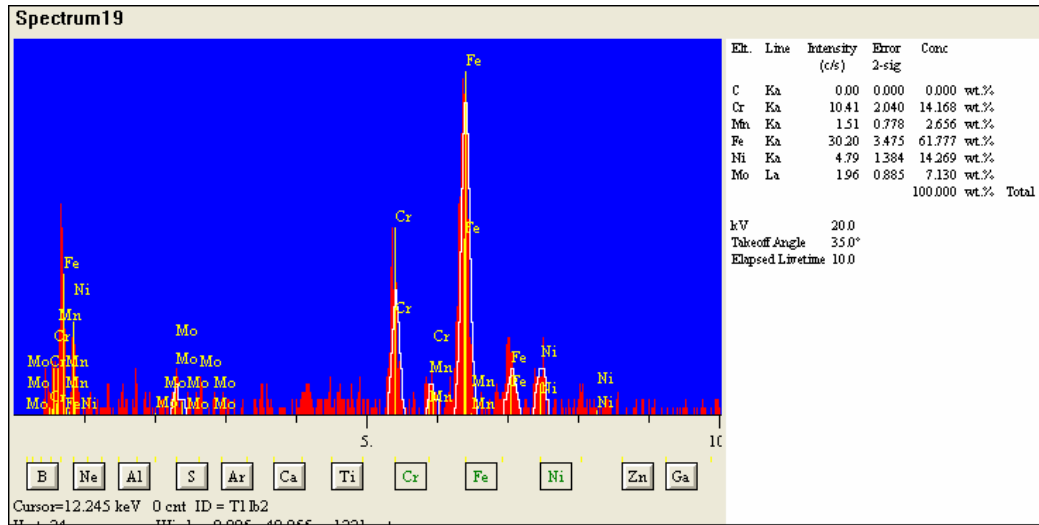
Şekil 3.87 Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 3. bölge



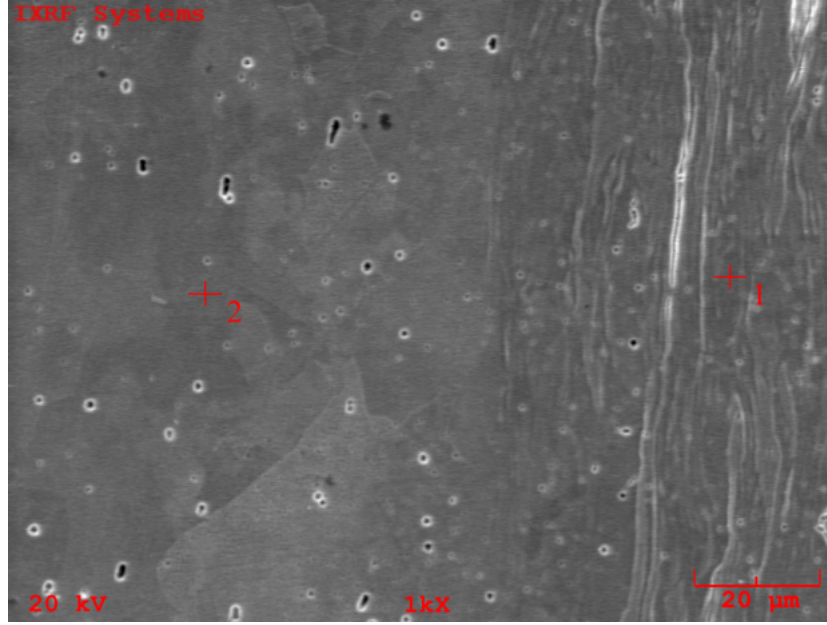
Şekil 3.88 Numune 9 AISI 316 çeliği 3. bölgenin EDS analiz sonuçları



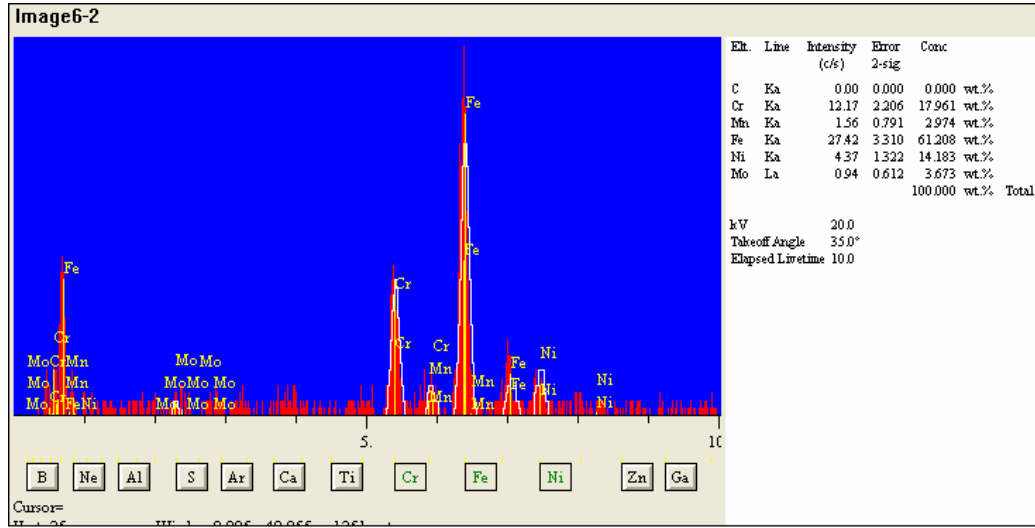
Şekil 3.89 Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 4. bölge



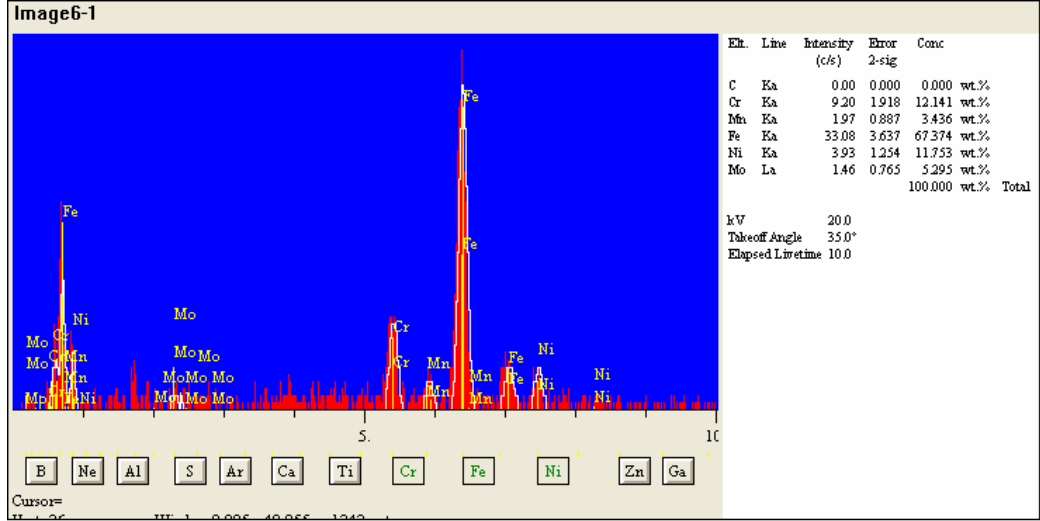
Şekil 3.90 Numune 9 AISI 316 çeliği 4. bölgenin EDS analiz sonuçları



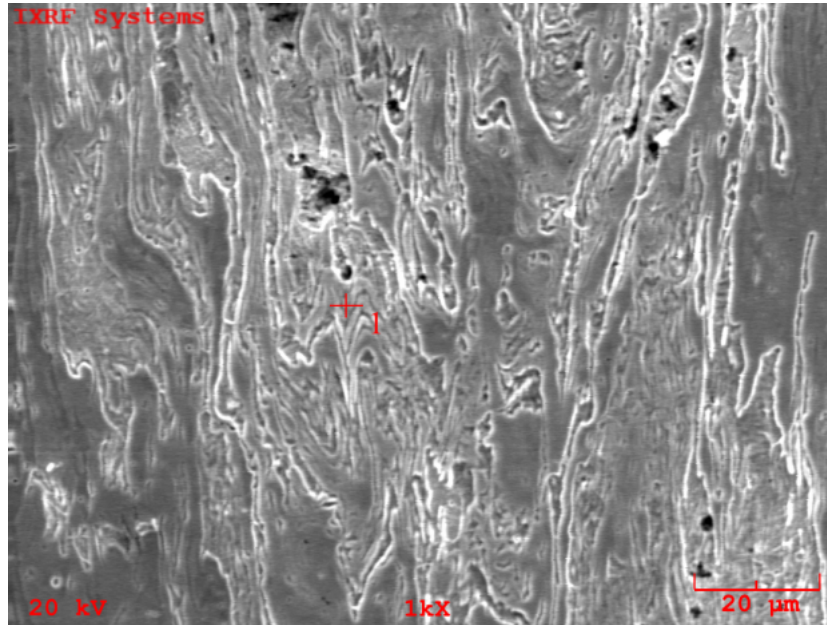
Şekil 3.91 Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 5 (+2 noktası) ve 6 (+1 noktası) noktalar



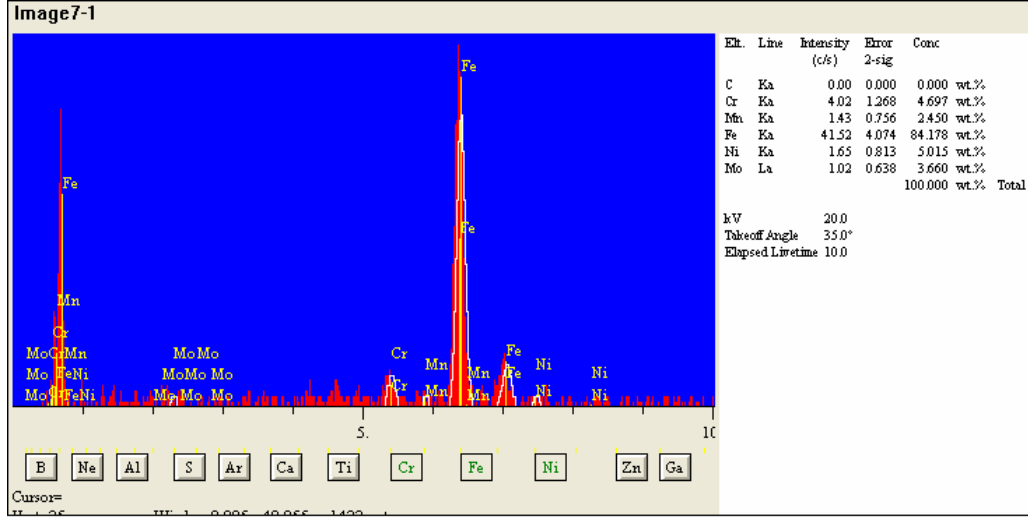
Şekil 3.92 Numune 9 AISI 316 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları



Şekil 3.93 Numune 9 AISI 316 çeliği 6. noktanın EDS analiz sonuçları



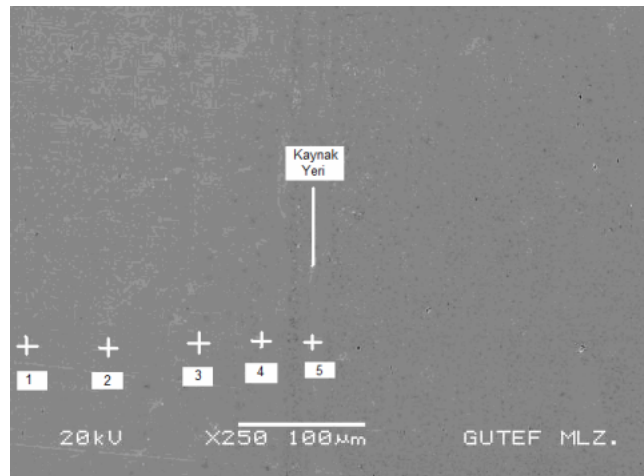
Şekil 3.94 Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 7. nokta (+1 noktası)



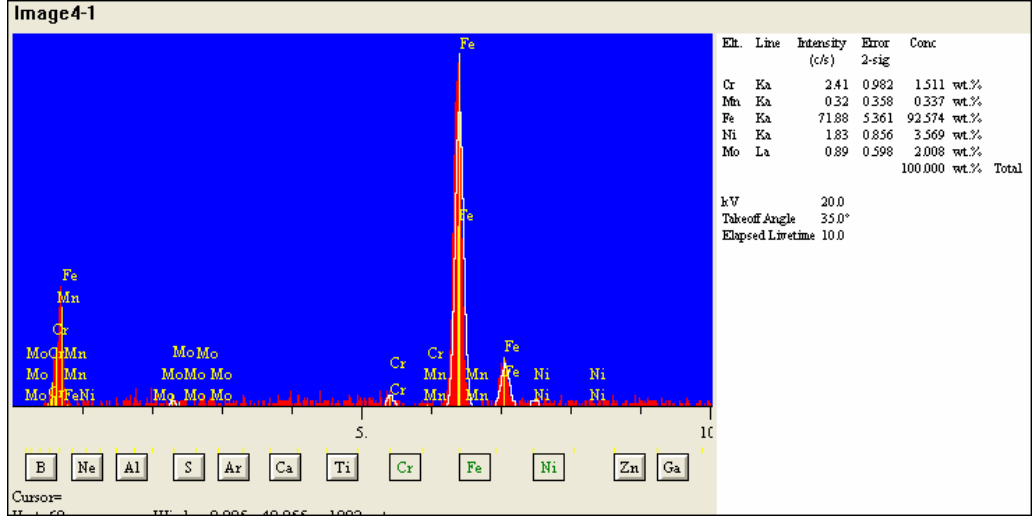
Şekil 3.95 Numune 9 AISI 316 çeliği 7. noktanın EDS analiz sonuçları

Tablo 3.7 Numune 9 AISI 316 çeliği tarafı EDS analiz bölge ve noktaların element dağılımı

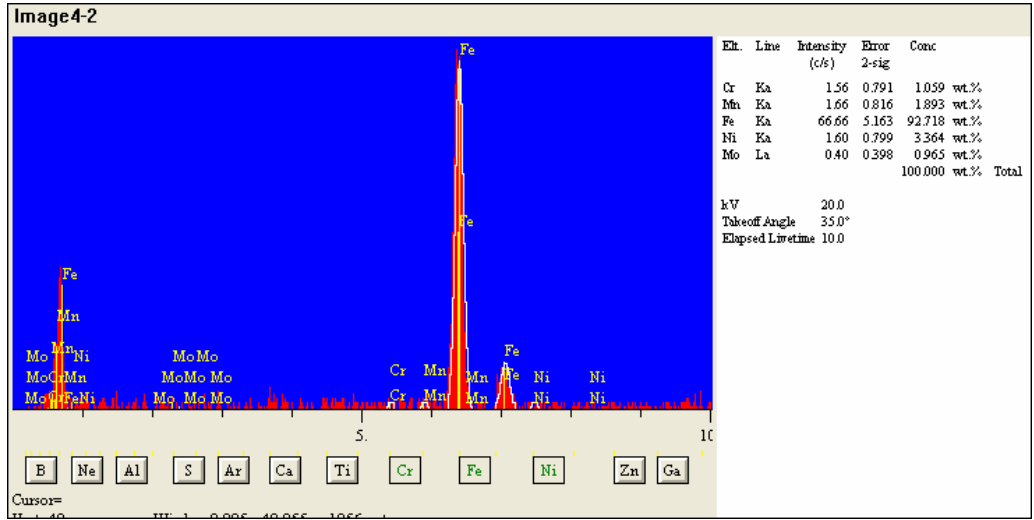
Element %	1	2	3	4	5	6	7
Cr	14,364	17,822	19,299	14,168	17,961	12,141	4,697
Mn	3,693	3,759	2,426	2,656	2,974	3,436	2,450
Fe	64,153	60,616	61,382	61,777	61,208	67,374	84,178
Ni	13,016	14,353	11,857	14,269	14,183	11,753	5,015
Mo	4,774	3,450	5,037	7,130	3,673	5,295	3,660



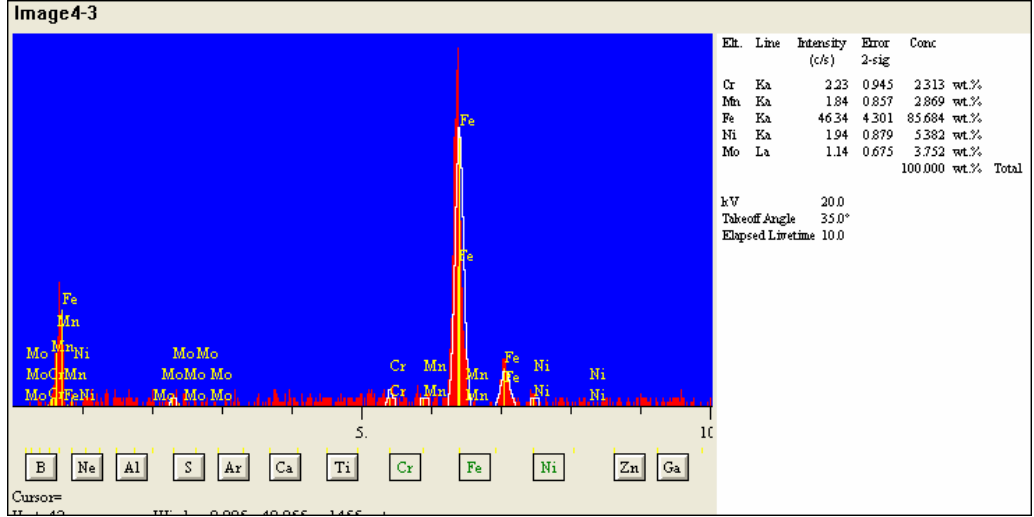
Şekil 3.96 Numune 13 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktaları



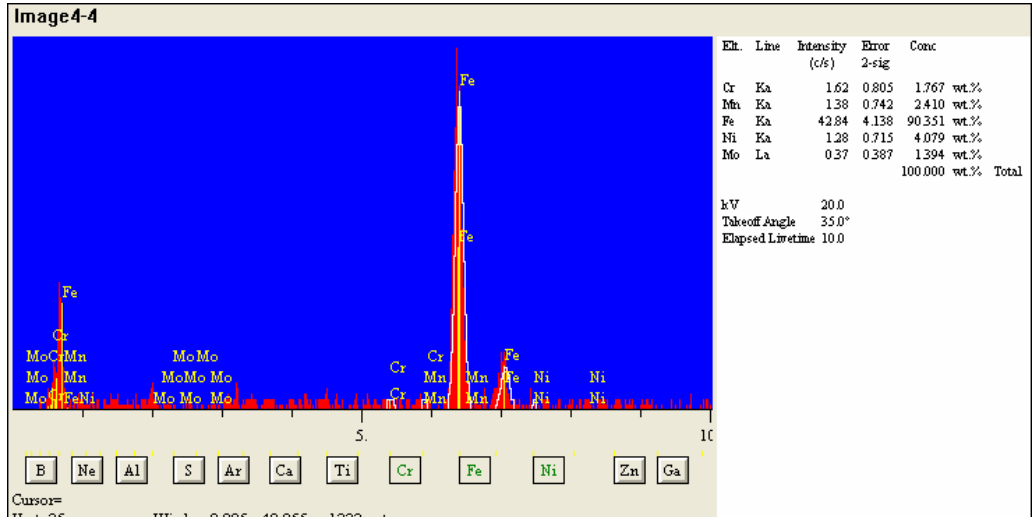
Şekil 3.97 Numune 13 Ck 45 çeliği 1. noktanın EDS analiz sonuçları



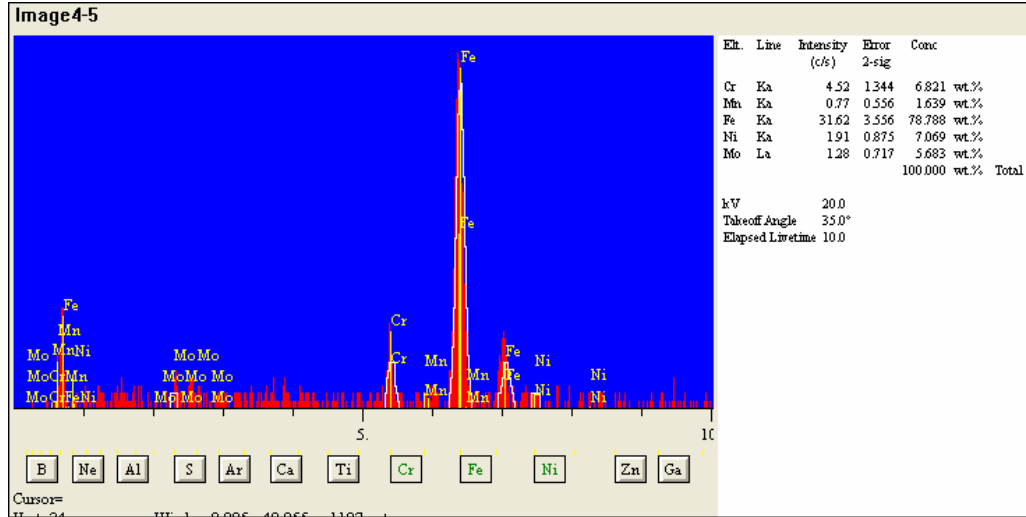
Şekil 3.98 Numune 13 Ck 45 çeliği 2. noktanın EDS analiz sonuçları



Şekil 3.99 Numune 13 Ck 45 çeliği 3. noktanın EDS analiz sonuçları



Şekil 3.100 Numune 13 Ck 45 çeliği 4. noktanın EDS analiz sonuçları

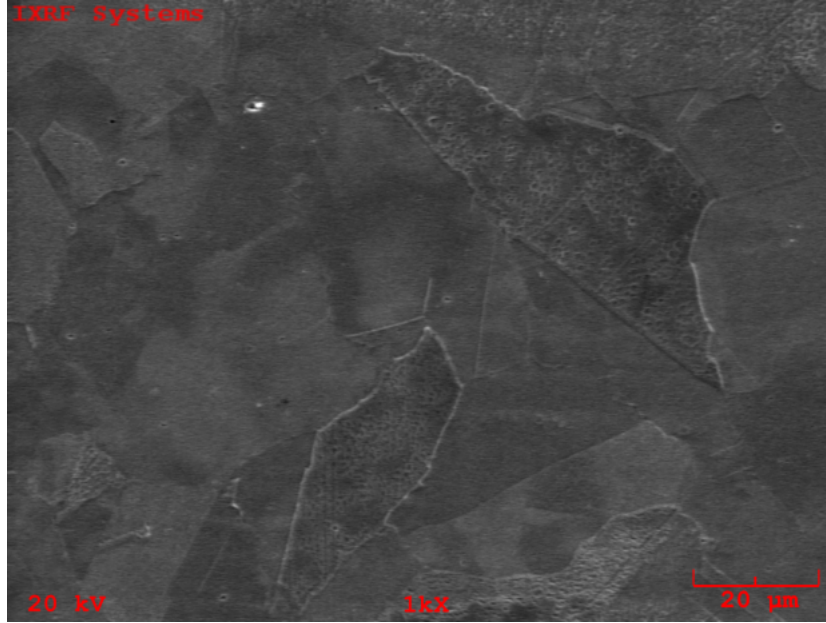


Şekil 3.101 Numune 13 Ck 45 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları

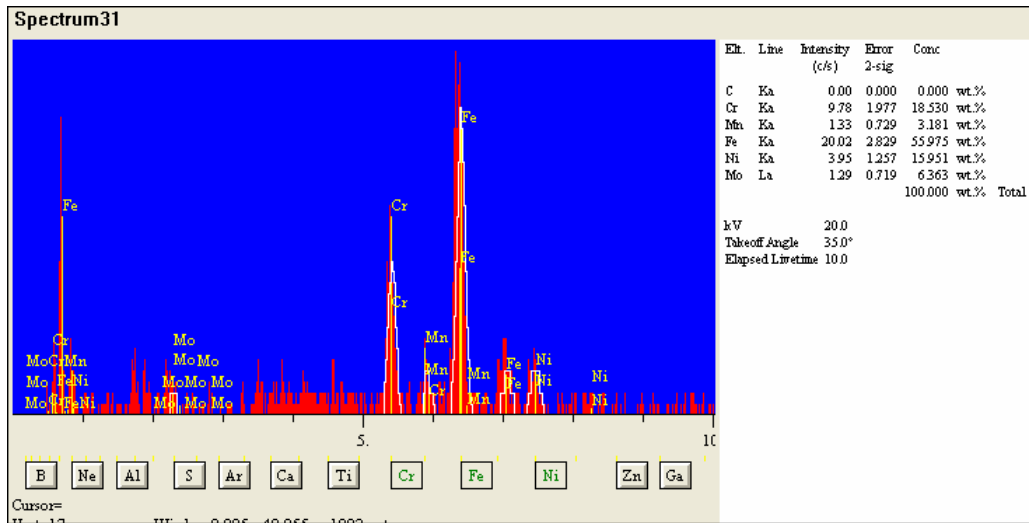
Tablo 3.8 Numune 13 Ck 45 çeliği tarafı EDS analiz noktalarının element dağılımı

Element %	1	2	3	4	5
Cr	1,511	1,059	2,313	1,767	6,821
Mn	0,337	1,893	2,869	2,410	1,639
Fe	92,574	92,718	85,684	90,351	78,788
Ni	3,569	3,364	5,382	4,079	7,069
Mo	2,008	0,965	3,752	1,394	5,683

Kaynaklı numune 13 'ün AISI 316 çeliği tarafında EDS analizinin alındığı SEM görüntüleri, ana malzeme, ITAB bölgesi ve kaynak ara yüzeyi sıralamasıyla bölgeler ve noktalar şeklinde belirtilmiştir (Şekil 3.102, 3.104, 3.106, 3.108, 3.110 ve 3.113).



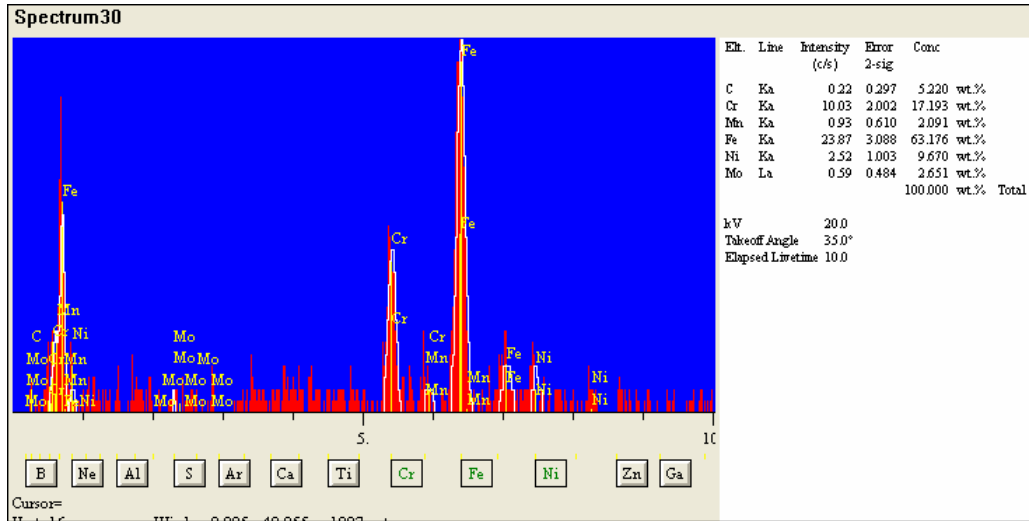
Şekil 3.102 Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 1. bölge



Şekil 3.103 Numune 13 AISI 316 çeliği 1. bölgenin EDS analiz sonuçları



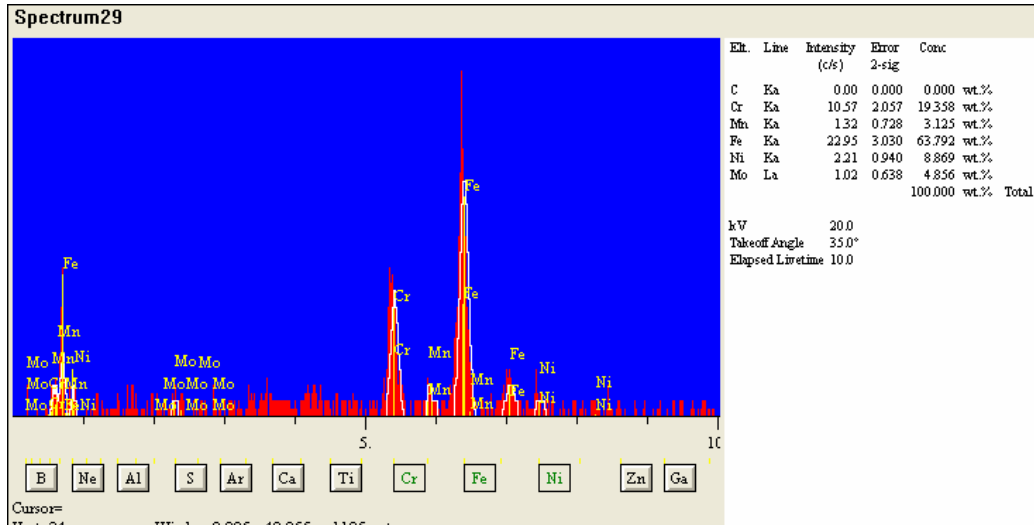
Şekil 3.104 Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 2. bölge



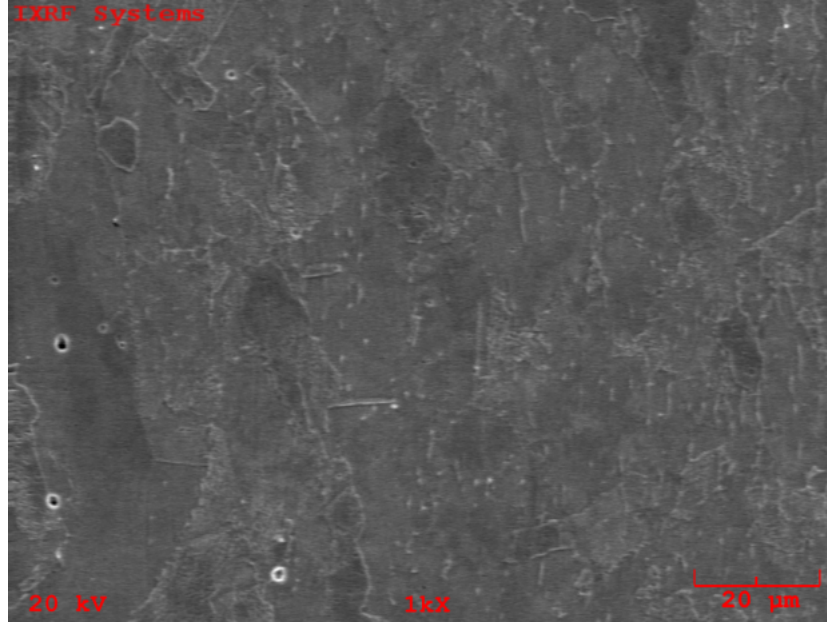
Şekil 3.105 Numune 13 AISI 316 çeliği 2. bölgenin EDS analiz sonuçları



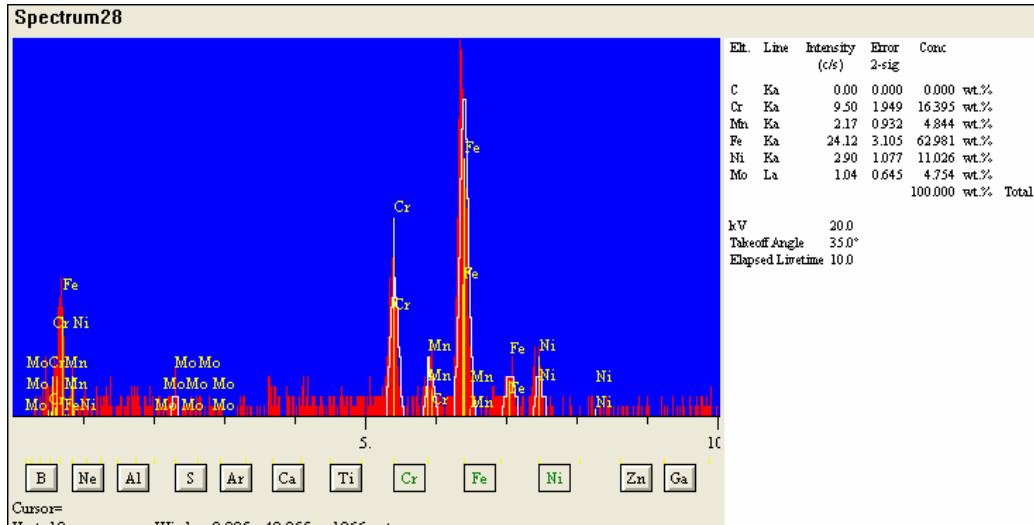
Şekil 3.106 Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 3. bölge



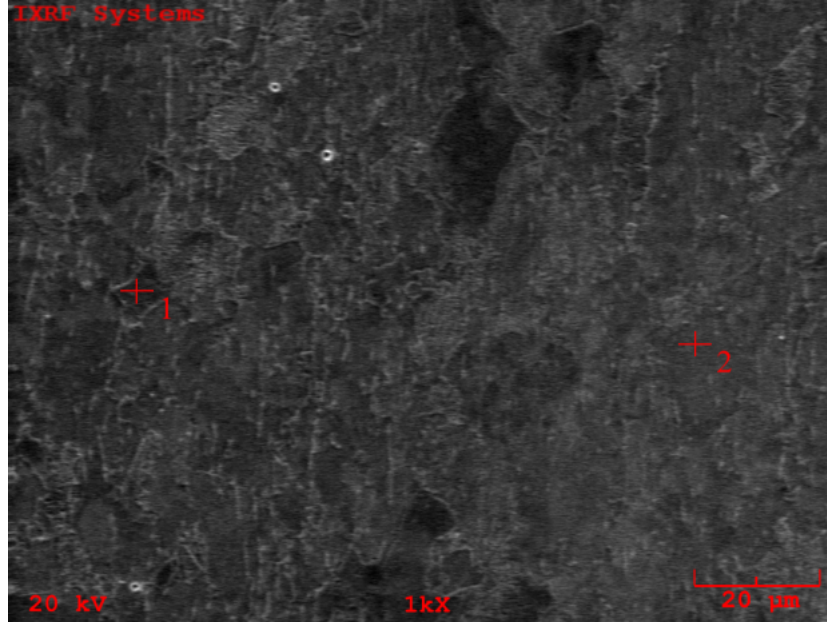
Şekil 3.107 Numune 13 AISI 316 çeliği 3. bölgenin EDS analiz sonuçları



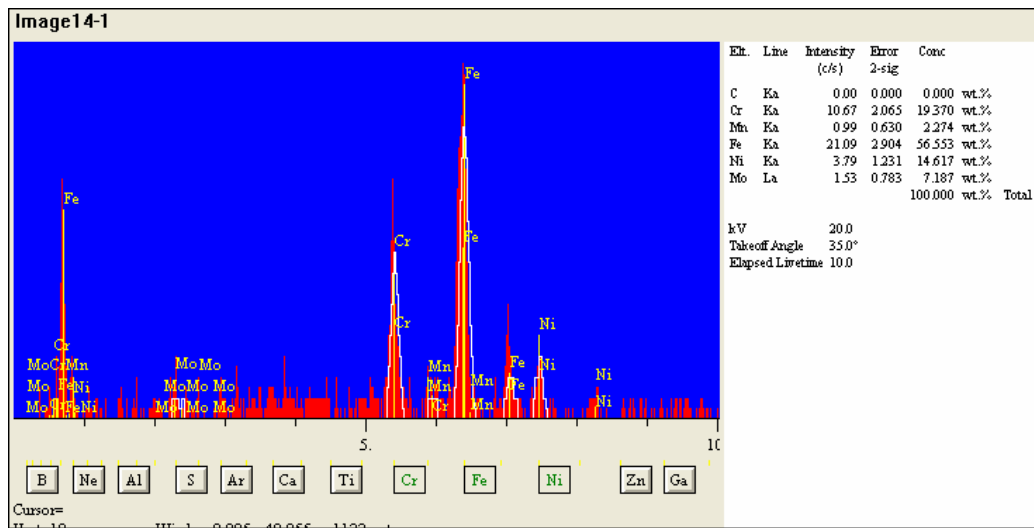
Şekil 3.108 Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 4. bölge



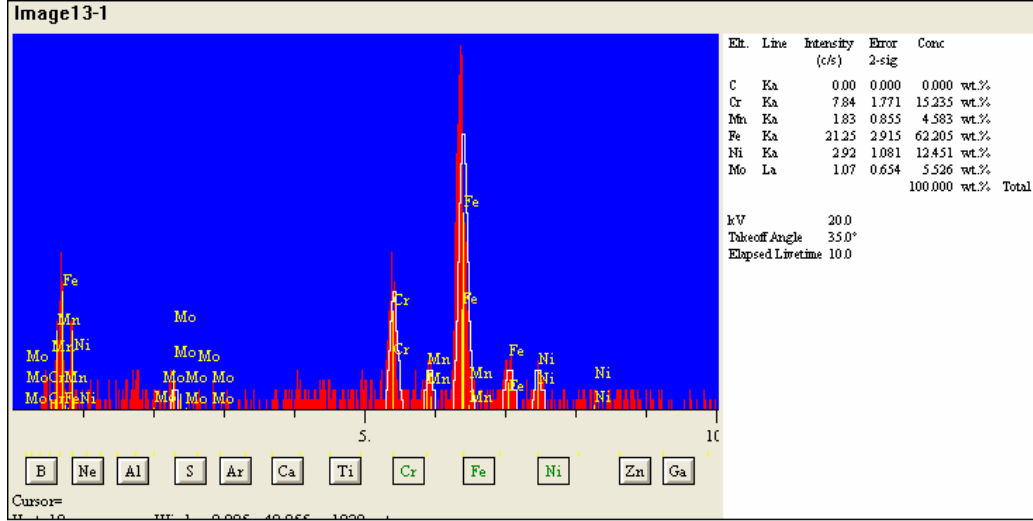
Şekil 3.109 Numune 13 AISI 316 çeliği 4. bölgenin EDS analiz sonuçları



Şekil 3.110 Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analizi alınan 5 (+1 noktası) ve 6 (+2 noktası) noktalar



Şekil 3.111 Numune 13 AISI 316 çeliği 5. noktanın EDS analiz sonuçları



Şekil 3.114 Numune 13 AISI 316 çeliği 7. noktanın EDS analiz sonuçları

Tablo 3.9 Numune 13 AISI 316 çeliği tarafı EDS analiz bölge ve noktaların element dağılımı

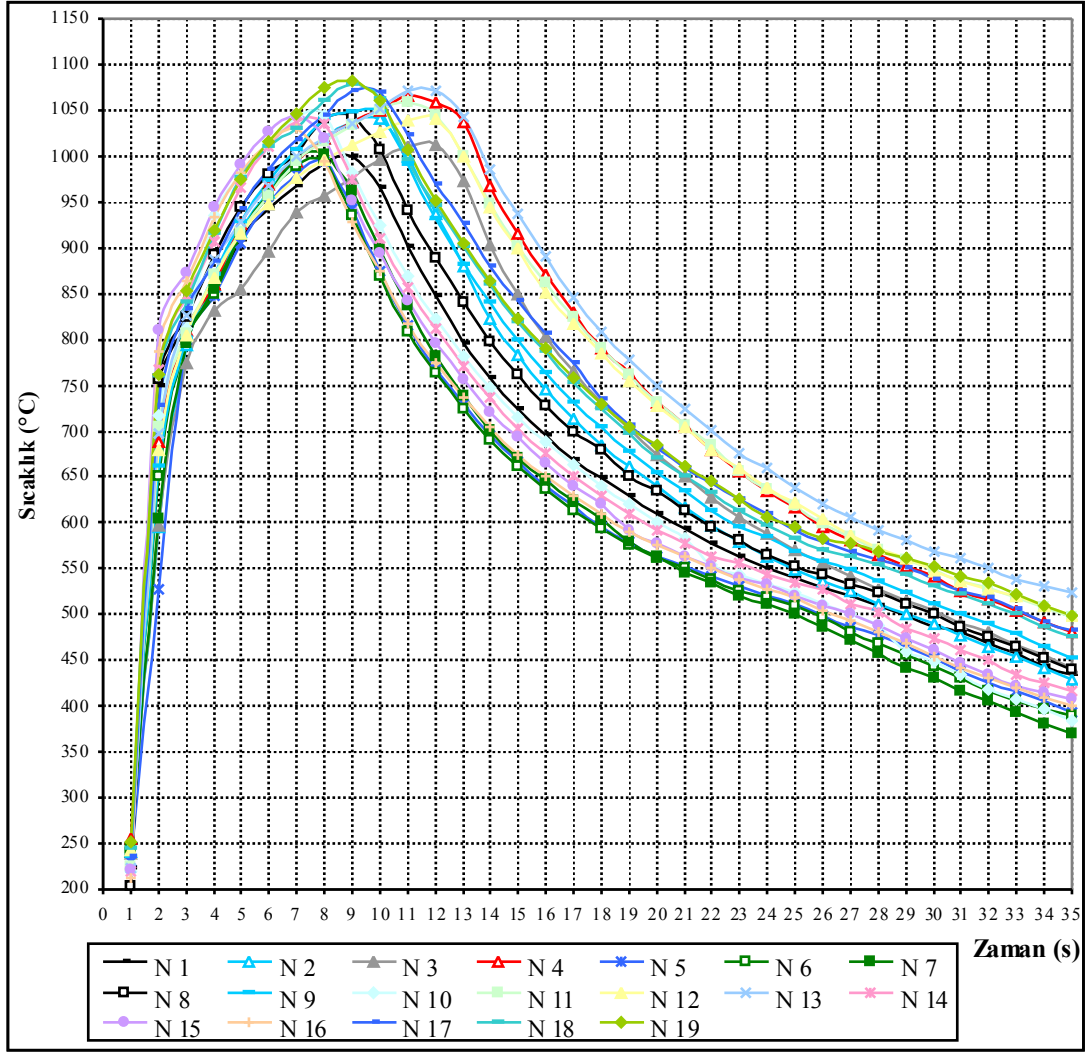
Element	1	2	3	4	5	6	7
%							
Cr	18,530	17,193	19,358	16,395	19,370	17,870	15,235
Mn	3,181	2,091	3,125	4,844	2,274	3,360	4,583
Fe	55,975	63,176	63,792	62,981	56,553	57,647	62,205
Ni	15,951	9,670	8,869	11,026	14,617	15,240	12,451
Mo	6,363	2,651	4,856	4,754	7,187	5,882	5,526

Kaynaklı numuneler 8, 9 ve 13 'e yapılan EDS analizlerinde; kaynak ara yüzeyi ve kaynak ara yüzeyine çok yakın bölgelerde element geçişlerinin olduğu gözlenmiştir. Kaynak ara yüzeyinde oluşan iki malzemedeki karışma miktarı bu element geçişini arttırmıştır [20]. Ck 45 çeliği tarafında Fe oranı azalırken, Cr, Ni ve Mo oranı artmıştır. Buna karşılık AISI 316 çeliği tarafında Fe oranı artarken, Cr, Ni ve Mo oranı azalmıştır. Numune 13 'de, element geçişi daha az olmuştur (Şekil 3.65-114) (Tablo 3.4-9).

3.3.4 Kaynak Bölgesinin Sıcaklığının Ölçülmesi

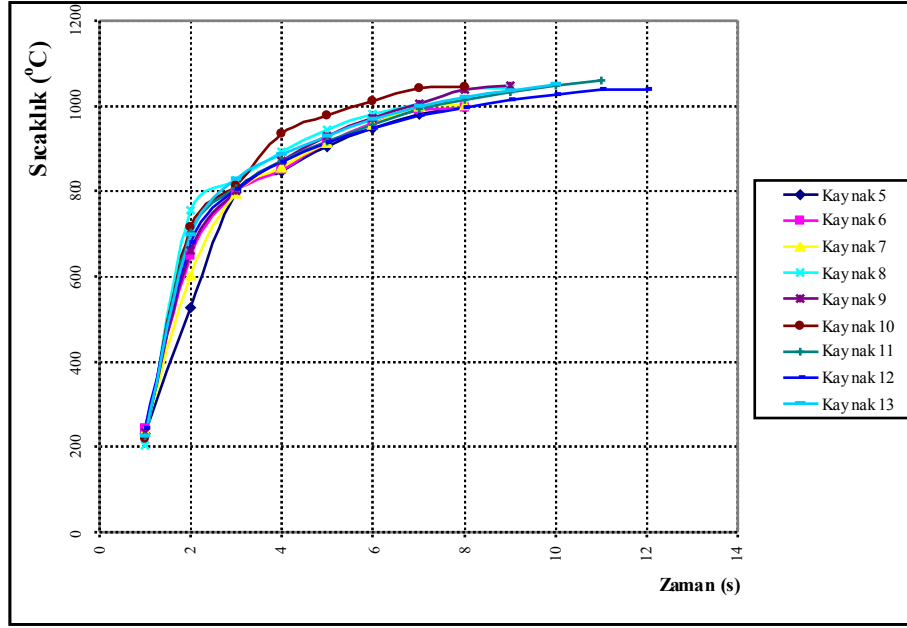
Kaynak bölgesi sıcaklığının ölçülmesinde BÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarında kullanılan taşınabilir kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı “Raynger 3 i” kullanılmıştır [58]. Cihaz, kaynak ara yüzeyine 30 cm uzaklıkta ve kızıl ötesi ışığı kaynak parçasının merkezinden geçecek şekilde sürtünme kaynak makinesinin aksenal hareket eden pensine (Şekil 2.1) özel olarak yapılmış aparat yardımıyla tespit edilmiştir. Cihazın ölçüm esnasında yayım kapasitesi değeri (emissivity, ϵ) 0,40 seçilmiştir. Yayım kapasitesi değeri cihazın kullanma talimatında yer alan metaller için yayım değeri tablosundan seçilmiştir [59]. Sıcaklık ölçümü bilgisayar programı ile doğrudan kayıt altına alınmıştır. Program saniyede bir ölçüm yapacak şekilde ayarlanmış ve ölçüm süresi toplam 35 saniye tutulmuştur.

Her kaynak numunesi için elde edilen zamana bağlı sıcaklık değerleri Şekil 3.115 ‘de verilmiştir. Şekil 3.115 incelendiğinde, sıcaklık artışının ilk 2 saniyede daha fazla olduğu görülmektedir. Daha sonra dönme hareketinin ve sürtünme basıncının devam etmesine rağmen sıcaklık artışının daha az olduğu görülmektedir. Bu duruma numunelerin ısınmasının sürtünme katsayısını düşürmesi ve gerçekleşen plastik deformasyonun sebep olduğu değerlendirilmektedir. Maksimum sıcaklıklara (995-1082 °C) 7 ile 12 saniye arasında ulaşılmıştır. Ostenitik çeliklerde en büyük sorun olan krom karbür çökelme sıcaklığı (450 °C ile 850 °C arası) [9,46] ve bu sıcaklıkta karbür oluşmadan geçen minimum süre (kuluçka periyodu) (Tablo 1.2) dikkate alındığında kaynak iki aşamadan oluşmaktadır: Birincisi 450 °C ‘den 850 °C ‘nin üzerine ulaşma süresi (ısınma), ikincisi ise 850 °C ‘den 450 °C ‘nin altına soğuma süresidir. Deneysel çalışmalar esnasında ısınma süresi 2 ile 4 saniye, soğuma süresi ise 18 ile 22 saniye sürmüştür. Her iki aşama esnasında geçen sürelerin kuluçka periyodunu aşmadığı görülmüştür.

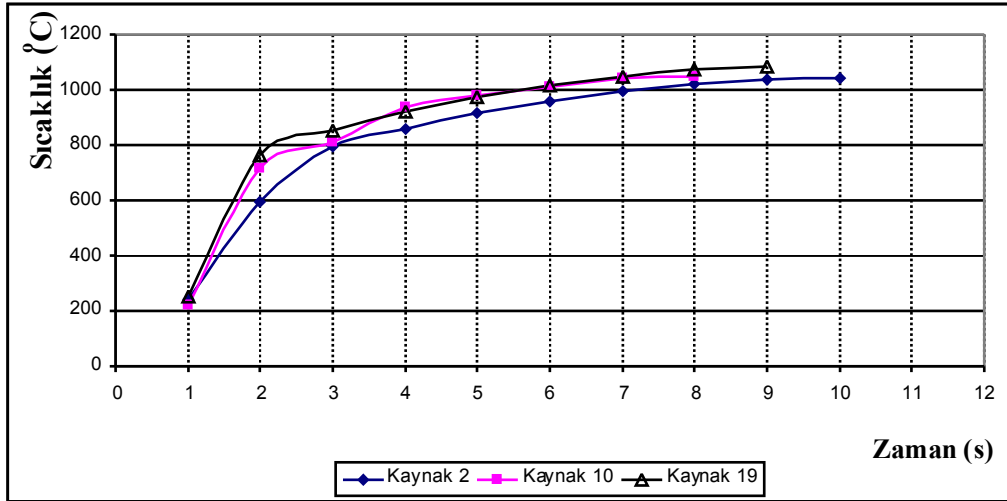


Şekil 3.115 Kaynaklı numunelerinin kaynak ara yüzeyi çevre sıcaklığı

Sürtünme kaynağı parametrelerinden, sürtünme basıncı sabit tutulup, sürtünme süresi arttıkça sıcaklığın arttığı (Şekil 3.116), sürtünme süresi sabit tutulup, sürtünme basıncı arttıkça da sıcaklığın arttığı (Şekil 3.117) görülmüştür. Sürtünme süresi ve basıncı sabit tutulup, yığma basıncı artırıldığı zaman sıcaklığın çok az arttığı, yığma basıncındaki artış oranının sıcaklık artış oranına etkisinin sürtünme süresi ve basıncı kadar çok fazla etkili olmadığı tespit edilmiştir.



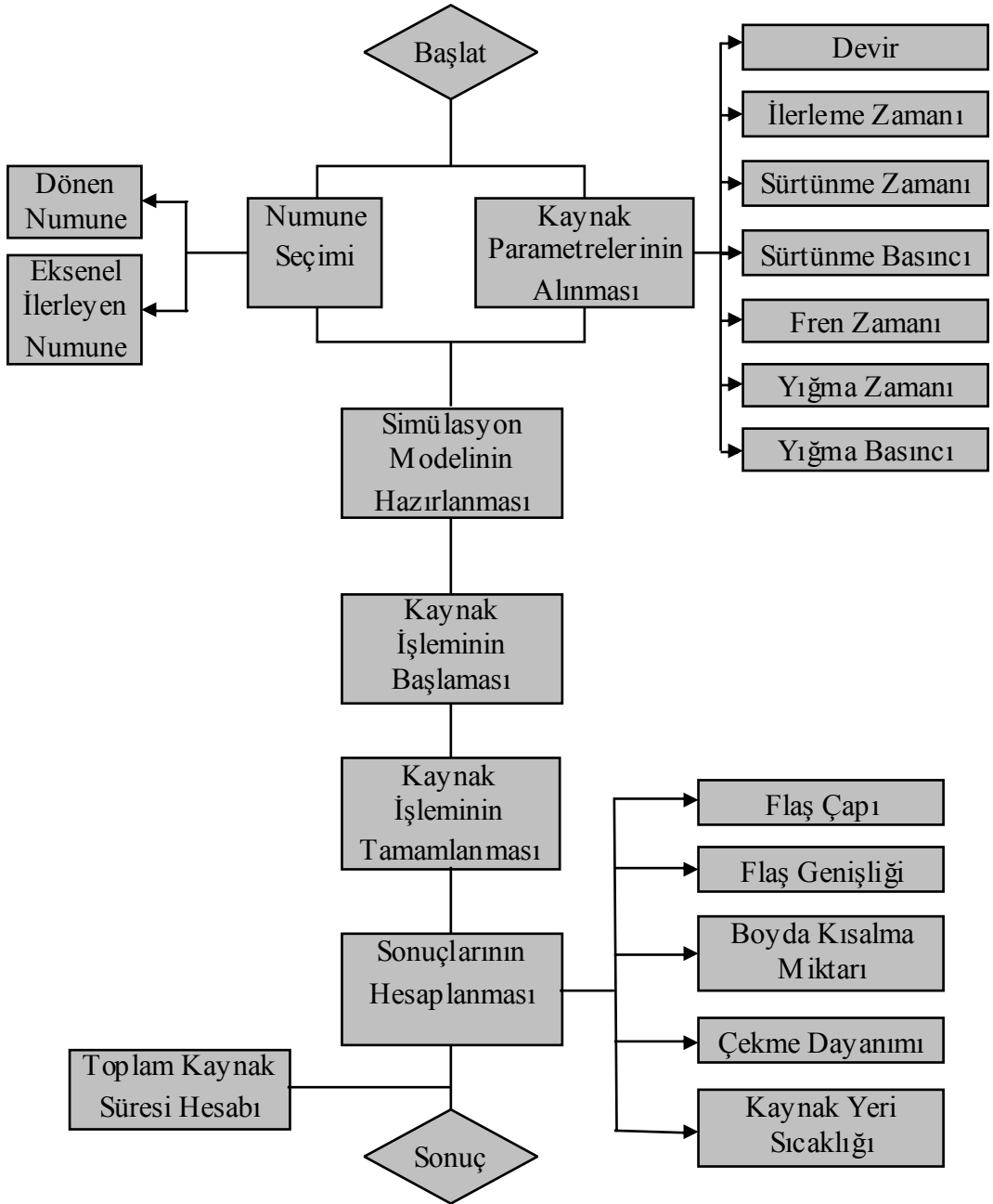
Şekil 3.116 Sürtünme basıncı sabit tutulup ($P_s = 100$ MPa), sürtünme süresi ($t_{s_5} = 6$ s, $t_{s_6} = 6$ s, $t_{s_7} = 6$ s, $t_{s_8} = 8$ s, $t_{s_9} = 8$ s, $t_{s_{10}} = 8$ s, $t_{s_{11}} = 10$ s, $t_{s_{12}} = 10$ s, $t_{s_{13}} = 10$ s) değiştirildiğinde kaynak sıcaklığının değişimi



Şekil 3.117 Sürtünme süresi sabit tutulup ($t_s = 8$ s), sürtünme basıncı ($P_{s_2} = 80$ MPa, $P_{s_{10}} = 100$ Mpa, $P_{s_{19}} = 120$ Mpa) değiştirildiğinde kaynak sıcaklığının değişimi

3.3.5 Kaynak İşleminin Simülasyonu

Şekil 3.118 'deki akış diyagramına göre çalışan, birbirine eşit çaplarda AISI 316 çeliği ile Ck 45 çeliğinin sürekli tahrikli sürtünme kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi işleminin simülasyon bilgisayar programı yapılmıştır.



Şekil 3.118 Simülasyon programının akış şeması

Kaynak çalışmasının simülasyon programı, Visual C# 3.0 programlama dili, .Net Framework 3.5 SP1 altyapısı ile “Visual Studio 2008 Express Edition” editörü kullanılarak kodlandı. Üç boyutlu modellemeler “Windows Presentation Foundation”(WPF) 3D kütüphanesi ile programın içine gömülü olarak kod tarafı geliştirildi. Nesnelere kullanılan desenler/kaplamalar “Adobe Photoshop CS2” programı kullanılarak tasarlandı.

Programın çalışabilmesi için gerekli minimum sistem:

- Microsoft Windows XP Service Pack 2 işletim sistemi veya üstü
- .Net Framework 3.5 SP1 veya üstü --
- Microsoft DirectX 9.0 veya üstü --
- Minimum 64 MB ekran kartı
- Minimum 512 MB Ram
- 5 MB boş alan

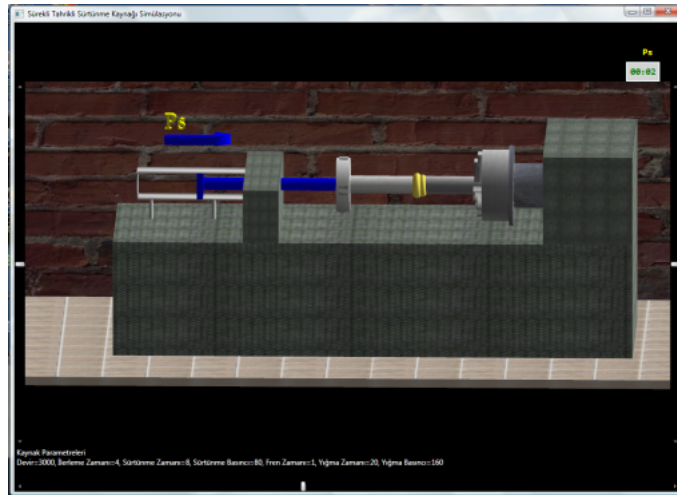
Program iki kısımdan oluşmaktadır: Birinci kısım programın ara yüzeyi (Şekil 3.119), ikinci kısım ise üç boyutlu kaynak işleminin görüntüsüdür (Şekil 3.120 ve Şekil 3.121). Ara yüzey, iki kısımdan oluşmaktadır: Birinci kısım devir, ilerleme

Şekil 3.119 Simülasyon programının ara yüzeyi

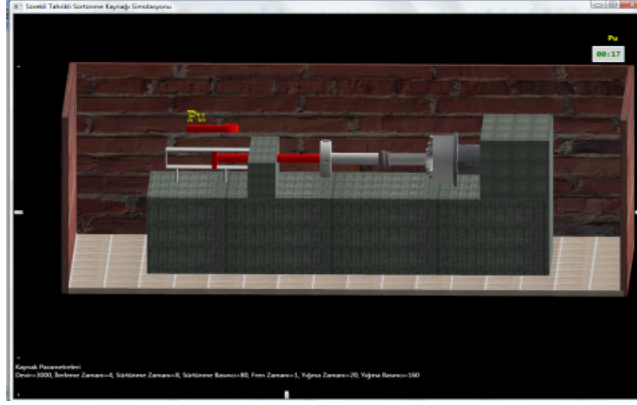
zamanı, sürtünme zamanı, sürtünme basıncı, fren zamanı, yığma zamanı ve yığma basıncı kaynak parametreleri değerlerinin girildiği pencereden oluşmaktadır. İkinci kısım ise, AISI 316 çeliğinin flaş çapı, flaş genişliği, boyda kısalma miktarı ve Ck 45 çeliğinin flaş çapı, flaş genişliği, boyda kısalma miktarı, kaynak sıcaklığı ve kaynaklı numunelerin çekme dayanımı değerlerini veren pencereden oluşmaktadır. Ekran görüntüsü kısmında ise, dönen ve eksenal hareket eden parçaların teması, sürtünme aşaması ve flaş oluşumu, durma işleminin gerçekleşmesi ve yığma aşaması üç boyutlu olarak görselleştirilmiştir.

Simülasyon programının çalışma aşamaları:

1. Kaynak parametrelerinin (devir, ilerleme zamanı, sürtünme zamanı ve basıncı, fren zamanı, yığma zamanı ve basıncı) girilmesi.
2. Simülasyon nesnelerinin ekrana çizilmesi ve ilk konumlarının atanması.
3. Girilen parametreler doğrultusunda simülasyonun çalıştırılması.
4. Kaynak bitme aşamasında verilen parametreler doğrultusunda işlem sonuçlarının (flaş çapı, flaş genişliği, boyda kısalma, çekme dayanımı ve sıcaklık değerinin) ekrana yazdırılması.



Şekil 3.120 Üç boyutlu kaynak işleminin sürtünme aşaması

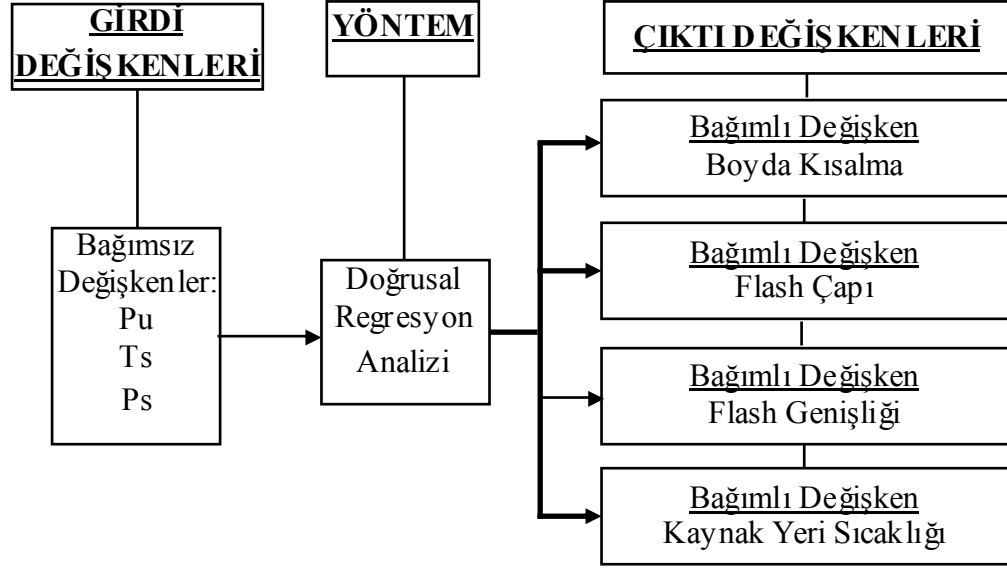


Şekil 3.121 Üç boyutlu kaynak işleminin yığma aşaması

Kaynaklı numunelerde oluşan boyda kısalma miktarı, flaş çapı, flaş genişliği ve kaynak yeri sıcaklığını veren istatistiksel tahmin modelleri “Regrasyon Analizi ve SPSS 16.0 İstatistiksel Paket Programı” ile elde edilmiştir. Çekme dayanımı veren amaç fonksiyonu ise “Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Phytia 1.6 Programı” ile sistemin analitik modellemesi gerçekleştirilerek elde edilmiştir.

3.3.5.1 İstatistiksel Tahmin Modeli

Şekil 3.122 'de akış şeması verilen istatistik tahmin modeli deney kaynak parametreleri (Tablo 2.7); sürtünme süresi (t_s), sürtünme basıncı (P_s) ve yığma basıncı (P_u) ve kaynaklı numunelerden elde edilen; boyda kısalma miktarı, flaş çapı, flaş genişliği (Tablo 3.1) ve kaynak ara yüzeyi çevresinden ölçülen sıcaklık verilerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Bu modelde, doğrusal ilişkilerden yola çıkılarak bağımsız değişkenler yardımıyla bağımlı değişken tahmin edilebilmektedir [60]. Bağımsız değişkenler yardımıyla bağımlı değişkeni veren denklemler “doğrusal regresyon analizi” ile elde edilmiştir (Tablo 3.10-16) (Denklem (3.1-7)). Analiz için “SPSS 16.0 İstatistiksel Paket Programı” kullanılmıştır. Kaynak parametreleri; t_s , P_s ve P_u bağımsız değişkenler olarak, kaynaklı numunelerde oluşan; boyda kısalma miktarı, flaş çapı, flaş genişliği ve kaynak yeri sıcaklığı bağımlı değişkenler olarak belirlenmiştir. Kaynak işlemi esnasında yığma süresi ($t_u=20$ s) sabit alındığından, bağımsız değişken olarak modelde kullanılmamıştır.



Şekil 3.122 İstatistiksel tahmin modeli şematik şekli

Kaynaklı numunelerde oluşan boyda kısılma miktarı denklemi; Ck 45 çeliği için denklem (3.1) 'de 0.935 belirlilik katsayısıyla (R^2), AISI 316 çeliği için denklem (3.2) 'de 0.872 belirlilik katsayısıyla (R^2), flaş çapı denklemi; Ck 45 çeliği için denklem (3.3) 'de 0.939 belirlilik katsayısıyla (R^2), AISI 316 çeliği için denklem (3.4) 'de 0.857 belirlilik katsayısıyla (R^2), flaş genişliği denklemi; Ck 45 çeliği için denklem (3.5) 'de 0.935 belirlilik katsayısıyla (R^2), AISI 316 çeliği için denklem (3.6) 'da 0.893 belirlilik katsayısıyla (R^2) ve kaynak yeri sıcaklığı denklemi (3.7) 'de 0.736 belirlilik katsayısıyla (R^2) elde edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen değerler ile istatistik tahmin modellerinden elde edilen değerler belirlilik katsayılarından da anlaşıldığı gibi birbirine uyumlu çıkmıştır.

Tablo 3.10 Ck 45 çeliği boyda kısılma miktarı istatistiksel tahmin modeli

Modele Dahil Edilen/Çıkarılan Değişkenler^b

Model	Dahil Edilen Değişkenler	Çıkarılan Değişkenler	Yöntem
1	Pu, Ts, Ps ^a		Enter

a. Talep edilen tüm değişkenleri girdi.

b. Bağımlı Değişken: Ck 45 Boyda Kısılma (mm)

“Tablo 3.10 ‘un devamı”

Model Özeti^b

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Tahminin Standart Hatası	Değişim İstatistikleri					Durbin-Watson
					R ² Değişim	F Değişim	df1	df2	Anlamlılık (P)	
1	,967 ^a	,935	,922	,36903	,935	71,453	3	15	,000	2,754

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: Ck 45 Boyda Kısılma (mm)

ANOVA^b

Model		Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık
1	Regresyon	29,192	3	9,731	71,453	,000 ^a
	Artık	2,043	15	,136		
	Toplam	31,235	18			

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: Ck 45 Boyda Kısılma (mm)

Katsayılar^a

Model		Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar	t	Anlamlılık	Çoklu İlişki İstatistik	
		B	Std. Hata				Beta	Tolerance
1	Sabit	-10,071	1,175		-8,573	,000		
	Ts	,773	,063	,916	12,218	,000	,776	1,288
	Ps	,086	,007	,968	12,700	,000	,751	1,332
	Pu	,008	,003	,208	3,088	,007	,958	1,044

a. Bağımlı Değişken: Ck 45 Boyda Kısılma (mm)

Ck 45 çeliğinde boyda kısılma denklemi (mm)=

$$-10,071+0,773Ts+0,086Ps+0,008Pu \quad (3.1)$$

Burada R kolerasyon katsayısı, R square (R²) belirlilik katsayısı, df serbestlik derecesi, Std standart, P anlamlılık değeri, B foksionun sabit sayısı ve bağımsız değişkenlerin katsayısıdır. P< 0,05 olursa R², sabit sayı ve katsayılar anlamlıdır.

Tablo 3.11 AISI 316 çeliği boyda kısalma miktarı istatistiksel tahmin modeli

Modele Dahil Edilen/Çıkarılan Değişkenler^b

Model	Dahil Edilen Değişkenler	Çıkarılan Değişkenler	Yöntem
1	Pu, Ts, Ps ^a		Enter

a. Talep edilen tüm değişkenleri girdi.

b. Bağımlı Değişken: AISI 316 Boyda Kısalma (mm)

Model Özeti^b

Mo del	R	R ²	Düzeltil- miş R ²	Tahminin Standart Hatası	Değişim İstatistikleri					Durbin- Watson
					R ² Değişim	F Deği- şim	df1	df2	Anlamlı- lık	
1	,934 ^a	,872	,846	,31845	,872	33,938	3	15	,000	2,837

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: AISI 316 Boyda Kısalma (mm)

Katsayılar^a

Model		Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaş- tırılmış Katsayılar	t	Anlam- lılık	Çoklu İlişki İstatistik	
		B	Std. Hata	Beta			Tolerance	VIF
1	(Sabit)	-5,643	1,014		-5,566	,000		
	Ts	,505	,055	,971	9,252	,000	,776	1,288
	Ps	,040	,006	,719	6,731	,000	,751	1,332
	Pu	,008	,002	,326	3,448	,004	,958	1,044

a. Bağımlı Değişken: AISI 316 Boyda Kısalma (mm)

AISI 316 çeliği boyda kısalma denklemi (mm)=

$$-5,643+0,505Ts+0,040Ps+0,008Pu \quad (3.2)$$

Tablo 3.12 Ck 45 çeliği flaş çapı istatistiksel tahmin modeli

Modele Dahil Edilen/Çıkanlan Değişkenler^b

Model	Dahil Edilen Değişkenler	Çıkanlan Değişkenler	Yöntem
1	Pu, Ts, Ps ^a	.	Enter

a. Talep edilen tüm değişkenleri girdi.

b. Bağımlı Değişken: Ck 45 Flaş Çapı (mm)

Model Özeti^b

R	R ²	Düzeltilmiş R ²	R ²	Değişim İstatistikleri					Durbin-Watson
				R ² Değişim	F Değişim	df1	df2	Anlamlılık	
,969 ^a	,939	,927	,16317	,939	77,636	3	15	,000	2,628

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: Ck 45 Flaş Çapı (mm)

ANOVA^b

Model		Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık
1	Regression	6,201	3	2,067	77,636	,000 ^a
	Artık	,399	15	,027		
	Toplam	6,601	18			

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: Ck45 Flaş Çapı (mm)

Katsayılar^a

Model		Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar t	Anlamlılık	Çoklu İlişki İstatistik		
		B	Std. Hata			Beta	Tolerance	VIF
1	(Sabit)	10,734	,519		20,664	,000		
	Ts	,408	,028	1,051	14,588	,000	,776	1,288
	Ps	,028	,003	,691	9,428	,000	,751	1,332
	Pu	,005	,001	,252	3,885	,001	,958	1,044

a. Bağımlı Değişken: Ck 45 Flaş Çapı (mm)

Ck 45 çeliği flaş çapı denklemi (mm)=

$$10,734+0,408Ts+0,028Ps+0,005Pu \quad (3.3)$$

Tablo 3.13 AISI 316 çeliği flaş çapı istatistiksel tahmin modeli

Modele Dahil Edilen/Çıkarılan Değişkenler^b

Model	Dahil Edilen Değişkenler	Çıkarılan Değişkenler	Yöntem
1	Pu, Ts, Ps ^a	.	Enter

a. Talep edilen tüm değişkenleri girdi.

b. Bağımlı değişken: AISI 316 Flaş Çapı (mm)

Model Özeti^b

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	R ²	Değişim İstatistikleri					Durbin-Watson
					R ² Değişim	F Değişim	df1	df2	Anlamlılık	
1	,926 ^a	,857	,829	,23376	,857	30,033	3	15	,000	2,653

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: AISI 316 Flaş Çapı (mm)

Katsayılar^a

Model		Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar	t	Anlamlılık	Çoklu İlişki İstatistik	
		B	Std. Hata	Beta			Tolerance	VIF
1	(Sabit)	9,265	,744		12,450	,000		
	Ts	,360	,040	,995	8,987	,000	,776	1,288
	Ps	,025	,004	,653	5,799	,000	,751	1,332
	Pu	,005	,002	,276	2,770	,014	,958	1,044

a. Bağımlı Değişken: AISI 316 Flaş Çapı (mm)

AISI 316 çeliği flaş çapı denklemi (mm)=

$$9,265+0,360Ts+0,025Ps+0,005Pu \quad (3.4)$$

Tablo 3.14 Ck 45 çeliği flaş genişliği istatistiksel tahmin modeli

Modele Dahil Edilen/Çıkarılan Değişkenler^b

Model	Dahil Edilen Değişkenler	Çıkarılan Değişkenler	Yöntem
1	Pu, Ts, Ps ^a	.	Enter

a. Talep edilen tüm değişkenleri girdi.

b. Bağımlı Değişken: Ck 45 Flaş Genişliği (mm)

Model Özeti^b

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	R ²	Değişim İstatistikleri					Dubin-Watson
					R ² Değişim	F Değişim	df1	df2	Anlamlılık	
1	,967 ^a	,935	,922	,19713	,935	72,394	3	15	,000	2,219

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: Ck 45 Flaş Genişliği (mm)

ANOVA^b

Model		Kareler Toplam	df	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık
1	Regression	8,440	3	2,813	72,394	,000 ^a
	Artık	,583	15	,039		
	Toplam	9,023	18			

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: Ck 45 Flaş Genişliği (mm)

Katsayılar^a

Model		Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmamış Katsayılar	t	Anlamlılık	Çoklu İlişki İstatistik	
		B	Std. Hata	Beta			Tolerance	VIF
1	(Sabit)	-2,943	,628		-4,689	,000		
	Ts	,305	,034	,672	9,022	,000	,776	1,288
	Ps	,052	,004	1,087	14,353	,000	,751	1,332
	Pu	,001	,001	,025	,371	,716	,958	1,044

a. Dependent Variable: Ck 45 Flaş Genişliği (mm)

$$Ck\ 45\ \text{çeliği}\ \text{flaş}\ \text{genişliği}\ \text{denklemleri}\ (mm)= -2,943+0,305Ts+0,052Ps+0,001Pu \quad (3.5)$$

Tablo 3.15 AISI 316 çeliği flaş genişliği istatistiksel tahmin modeli

Modele Dahil Edilen/Çıkarılan Değişkenler^b

Model	Dahil Edilen Değişkenler	Çıkarılan Değişkenler	Yöntem
1	Pu, Ts, Ps ^a	.	Enter

a. Talep edilen tüm değişkenleri girdi.

b. Bağımlı Değişken: AISI 316 Flaş Genişliği (mm)

Model Özeti^b

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	R ²	Değişim İstatistikleri					Durbin-Watson
					R ² Değişim	F Değişim	df1	df2	Anlamlılık	
1	,945 ^a	,893	,872	,19595	,893	41,943	3	15	,000	2,042

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: AISI 316 Flaş Genişliği (mm)

Katsayılar^a

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar	Standartlaştırılmış Katsayılar		t	Anlamlılık	Çoklu İlişki İstatistik		
		B	Std. Hata			Beta	Tolerance	VIF
1	(Sabit)	-2,947	,624		-4,725	,000		
	Ts	,279	,034	,795	8,315	,000	,776	1,288
	Ps	,038	,004	1,018	10,469	,000	,751	1,332
	Pu	,001	,001	,045	,524	,608	,958	1,044

a. Dependent Variable: AISI 316 Flaş Genişliği (mm)

$$\text{AISI 316 çeliği flaş genişliği denklemleri (mm)}= -2,947+0,279Ts+0,038Ps+0,001Pu \quad (3.6)$$

Tablo 3.16 Kaynak yeri sıcaklığı istatistiksel tahmin modeli

Modele Dahil Edilen/Çıkanlan Değişkenler^b

Model	Dahil Edilen Değişkenler	Çıkanlan Değişkenler	Yöntem
1	Pu, Ts, Ps ^a	.	Enter

a. Talep edilen tüm değişkenleri girdi.

b. Bağımlı Değişken: Sıcaklık (°C)

Model Özeti^b

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	R ²	Değişim İstatistikleri					Durbin-Watson
					R ² Değişim	F Değişim	df1	df2	Anlamlılık	
1	,858 ^a	,736	,683	15,984	,736	13,940	3	15	,000	2,622

a. Belirleyicileri: (Sabit), Pu, Ts, Ps

b. Bağımlı Değişken: Sıcaklık

Katsayılar^a

Model		Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standartlaştırılmış Katsayılar	t	Anlamlılık	Çoklu İlişki İstatistik	
		B	Std. Hata	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	727,032	50,883		14,288	,000		
	Ts	15,235	2,741	,837	5,558	,000	,776	1,288
	Ps	1,590	,295	,826	5,394	,000	,751	1,332
	Pu	,185	,119	,211	1,559	,140	,958	1,044

a. Bağımlı Değişken: Sıcaklık (°C)

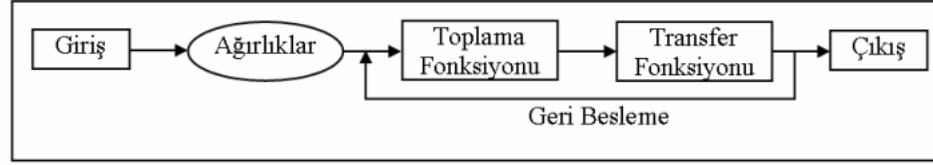
Kaynak Yeri Sıcaklığı Denklemi (°C)=

$$727,032+15,235Ts+1,590Ps+0,185Pu \quad (3.7)$$

3.3.5.2 Çekme Dayanımı Amaç Fonksiyonu

Şekil 3.123 'de akış şeması verilen sistemin analitik modellemesi “yapay sinir ağları” ile gerçekleştirilmiştir. Bu modelde, yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak sürtünme kaynak parametrelerine bağlı kaynaklı numunelerin çekme dayanımları

tahmin edilmiştir [61,62]. Model için “Phytia 1.6” yazılımından yararlanılmış, çalışmada geri yayımlı (back propagation) algoritma ve toplama fonksiyonu için “Fermi Fonksiyonu” kullanılmıştır.



Şekil 3.123 Çekme dayanımı amaç fonksiyonu akış şeması

Toplama fonksiyonu, girdi parametrelerine bağlı gelen bilgileri (girdi) ilgili bağlantı ağırlıkları ile işleme tabi tutar ve NET girdi elde edilir. Transfer fonksiyonunda ise toplama (birleşme) fonksiyonu tarafından belirlenen net girdiyi işlem elemanının çıktısını belirler. Genel olarak türevi alınabilen bir fonksiyon olması tercih edilir. Toplama ve transfer fonksiyonlarında problemin yapısına göre tercih edilebilecek birçok fonksiyon (eşik, sigmoid, hiperbolik tanjant vb.) vardır. Bu çalışmada fermi fonksiyonu tercih edilmiştir. Fermi fonksiyonu;

$$F = \frac{1}{1 + e^{NET}} \quad (3.8)$$

$$NET = \sum_{j=0}^n W_j * X_i + W_{b_j} \quad (3.9)$$

dur. Burada;

W: Girdinin nörona etki eden ağırlığı

X: Girdinin normalizasyon değeri (I) veya nöron (N)

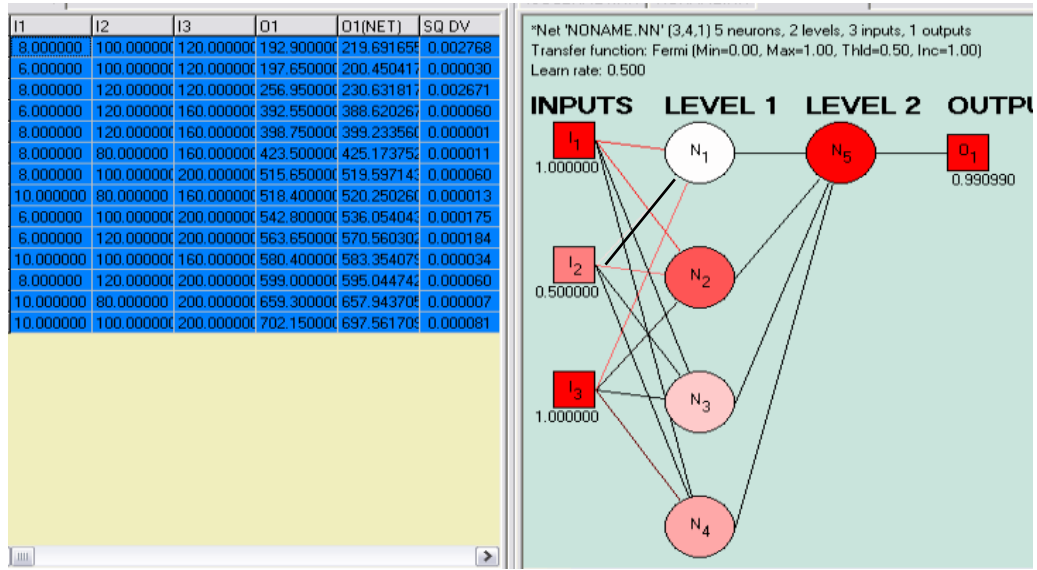
W_b : Bias ağırlığı

n: Bir önceki katmandaki işlem elemanı sayısı

i: Normalizasyon değeri veya nöron sayısı

j: Ağırlık sayısıdır.

Yapılan modellemede deney kaynak parametreleri (Tablo 2.7); sürtünme zamanı (t_s), sürtünme basıncı (P_s) ve yığılma basıncı (P_u) bağımsız değişkenler olarak ele alınmış ve modelin girdi parametrelerini oluşturmuştur. Modellemede bağımlı değişken olarak çekme dayanımı değerleri (Şekil 3.1) kabul edilmiş ve programda kullanılan geri yayımlı algoritma sayesinde çekme dayanımını veren amaç fonksiyonu elde edilmiştir. Öğrenme işlevi için oluşturulan YSA modeli Şekil 3.124 'de verilmiştir.



Şekil 3.124 Yapay sinir ağı modeli yapısı

Deney kaynak parametrelerinin 14 'ü öğrenme işlemi için, geri kalan 5 kaynak parametresi ise test işlemi için kullanılmıştır. Öğrenme işleminde amaç fonksiyonuna bağlı çıktı çekme dayanımı değerleri 0.9954 belirlilik katsayısıyla (R^2), çekme dayanımı amaç fonksiyonu sonuçları 0.9711 belirlilik katsayısı ile bulunmuştur (Şekil 3.125). Öğrenme sürecinde girdi parametrelerinin her gizli katman nöron üzerindeki ağırlık etkileri incelenmiş ve ağırlıklar Tablo 3.17'de verilmiştir.

Tablo 3.17 Çekme dayanımı amaç fonksiyonu normalizasyon değerleri ve ağırlıklar

Normalizasyon değerleri				
$I_{1i}=(t_{s_i}-t_{s_{min}})/(t_{s_{max}}-t_{s_{min}})$		$I_{2i}=(P_{s_i}-P_{s_{min}})/(P_{s_{max}}-P_{s_{min}})$		$I_{3i}=(P_{u_i}-P_{u_{min}})/(P_{u_{max}}-P_{u_{min}})$
Ağırlık değerleri				
Ağırlıklar	N1	N2	N3	N4
W_{1j}	-0,459658	-0,441753	1,058723	1,860639
W_{2j}	-0,061782	0,281935	-7,557796	-4,645057
W_{3j}	-0,300184	0,972644	2,885313	0,797364

Gizli nöronlar, her bir nöron için ağırlık değerlerine bağlı fermi fonksiyonu ayrı ayrı oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlar aşağıda verilmiştir.

$$f(N1_i)=1/(1 + \text{Exp}(-4*(I_{1i}*W_{(1j)} + I_{2i}*W_{(2j)} + I_{3i}*W_{(3j)} -0,5))) \quad (3.10)$$

$$f(N2_i)=1/(1 + \text{Exp}(-4*(I_{1i}*W_{(1j)} + I_{2i}*W_{(2j)} + I_{3i}*W_{(3j)} -0,5))) \quad (3.11)$$

$$f(N3_i)=1/(1 + \text{Exp}(-4*(I_{1i}*W_{(1j)} + I_{2i}*W_{(2j)} + I_{3i}*W_{(3j)} -0,5))) \quad (3.12)$$

$$f(N4_i)=1/(1 + \text{Exp}(-4*(I_{1i}*W_{(1j)} + I_{2i}*W_{(2j)} + I_{3i}*W_{(3j)} -0,5))) \quad (3.13)$$

Yapılan YSA modellemesinde toplama (birleşme) fonksiyonu tarafından belirlenen net girdiyi alarak işlem elemanının çıktısını belirleyen çekme dayanımı için amaç fonksiyonun çıkış ağırlıkları da tespit edilmiştir. Bu ağırlıklara ilişkin değerler Tablo 3.18’de verilmiştir.

Tablo 3.18 Çekme dayanımı amaç fonksiyonu çıkış ağırlıkları

WC_1	WC_2	WC_3	WC_4
-6,987864	1,026890	-6,218046	6,807418

Bu ağırlıklar ve net girdilere bağlı olarak YSA modelinin transfer fonksiyonu;

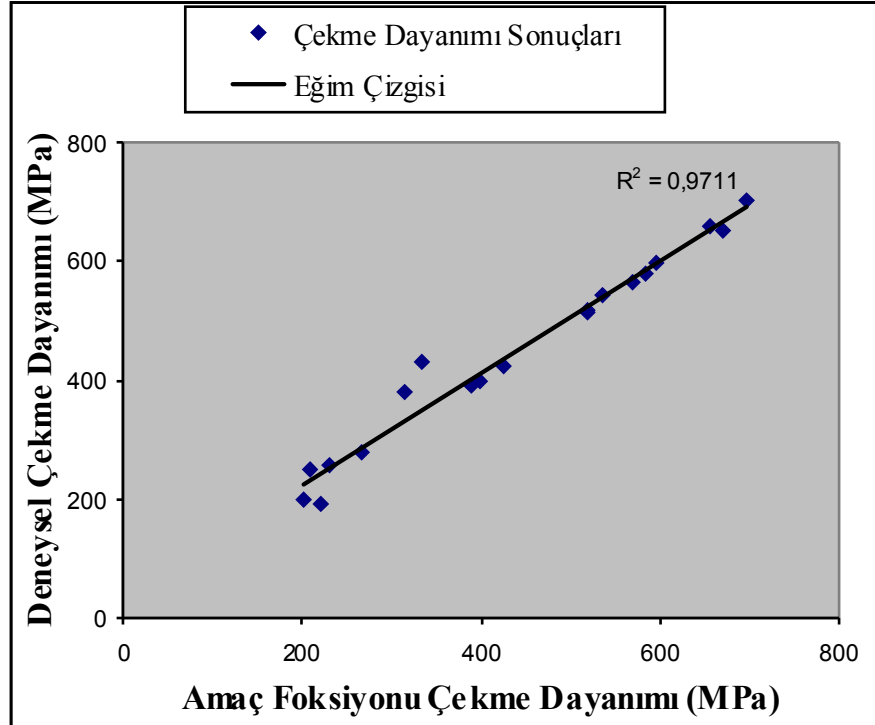
$$F(N5_i)=1/(1+\text{Exp}(-4*(N1_i*WC_1 + N2_i*WC_2 + N3_i*WC_3 + N4_i*WC_4 - 0,5))) \quad (3.14)$$

dur. Burada N gizli nöron, WC çıkış ağırlığı, 1-4 sayıları nöron ve çıkış ağırlıkları sayısını, 0,5 sabiti bias ağırlığını tanımlamaktadır. Bu verilere bağlı olarak YSA modelinde çekme dayanımını veren amaç fonksiyonu;

$$F=(N5_i)*(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) + \sigma_{\max} \quad (\text{MPa}) \quad (3.15)$$

Burada N_5 çıkış nöronun değerini, σ_{\max} maksimum gerilmeyi, σ_{\min} minimum gerilmeyi tanımlamaktadır.

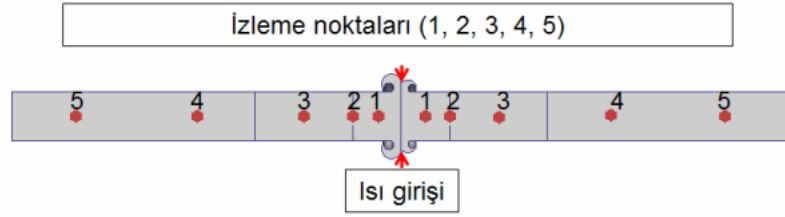
Çekme deneyi sonuçlarından elde edilen çekme dayanımı değerler ile çekme dayanımı amaç fonksiyonundan elde edilen değerler Şekil 3.125 'de görüldüğü gibi birbirine yakın çıkmıştır. Denklemler (3.1-15) ve Tablo 3.1 incelendiğinde AISI 316 çeliği ile Ck 45 çeliğinin kaynağında en etkili kaynak parametrelerinin, sürtünme süresi (ts) ve yığılma basıncı (Pu) olduğu görülmüştür.



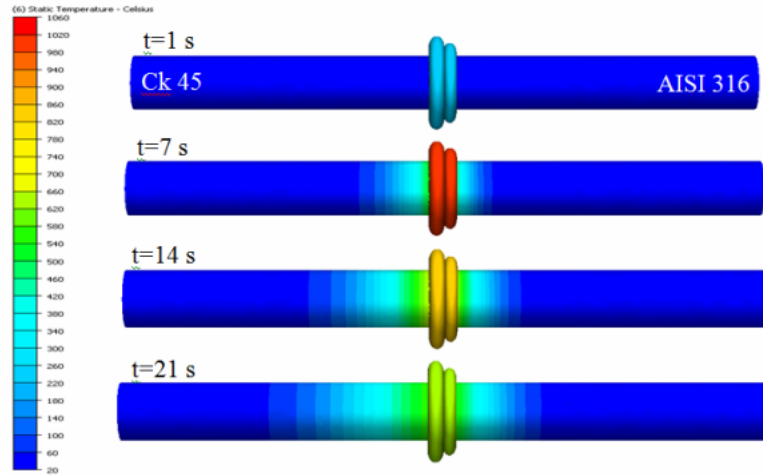
Şekil 3.125 Çekme dayanımı amaç fonksiyonu belirlilik katsayısı grafiği

3.3.6 Zamana Bağlı Sıcaklık Değişim Analizi

Sürtünme kaynağı esnasında numuneler üzerindeki zamana bağlı üç boyutlu sıcaklık dağılımının analizi “cfdesign” programı ile gerçekleştirilmiştir. Analizde, numunelerin dairesel enine kesit alanı tetrahedral elementlere bölünerek, sonlu elemanlar tekniği kullanılmıştır. Kaynak yüzeyi sınır şartı için, deneyler sırasında kaynak ara yüzeyinden ölçülen zamana bağlı sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Bu sıcaklıklar zamana bağlı olarak kaynak ara yüzeyinin en dış tarafından (iki flaşın birleştiği çevre noktası) çevresel olarak girilmiştir (Şekil 3.126) ve numuneler üzerinde zamana bağlı sıcaklık değişimini gösteren animasyon elde edilmiştir (Şekil 3.127). İzleme noktaları kaynak yüzeyinden 5 mm, 10 mm, 20 mm, 40 mm ve 70 mm uzaklıklarında seçilmiştir.



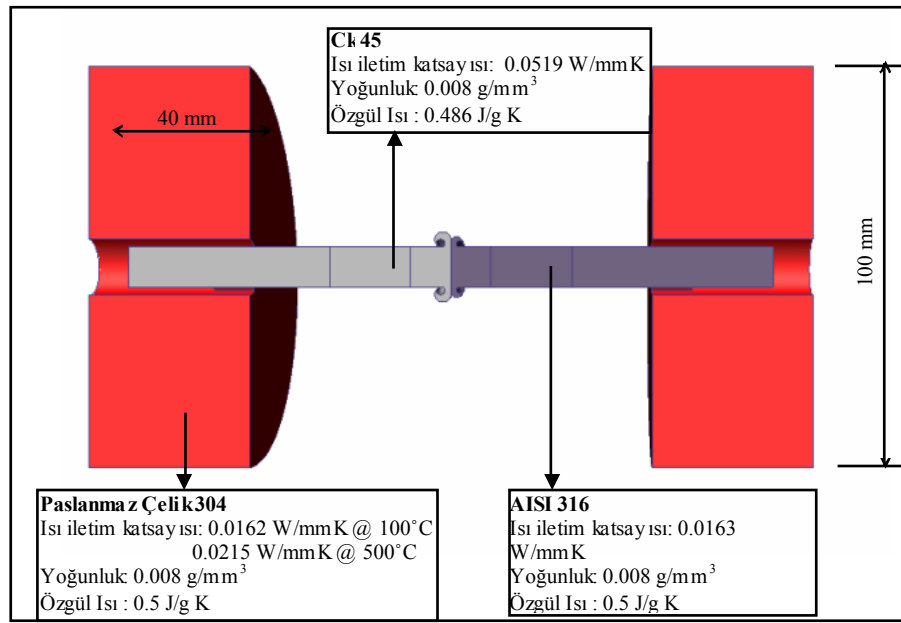
Şekil 3.126 Analiz için ısı girişi noktası ve sıcaklık izleme noktaları (1, 2, 3, 4 ve 5)



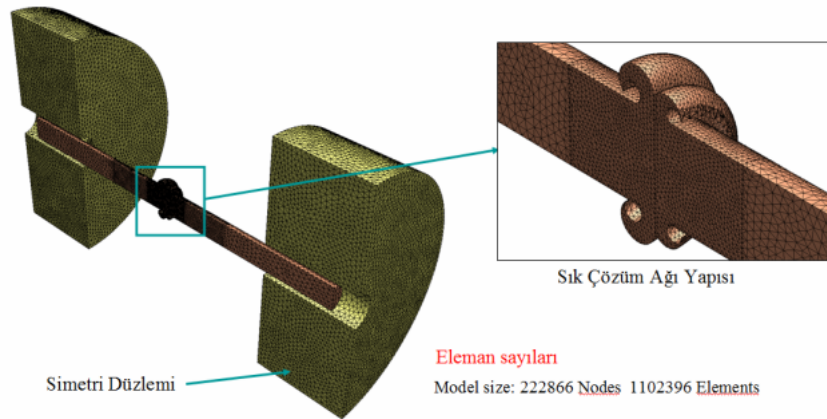
Şekil 3.127 Zamana bağlı üç boyutlu sıcaklık değişimini gösteren animasyon görüntüsü

Isı analizi için;

1. Dış ortama olan ısı transferi ihmal edilmiştir.
2. Numuneleri tutan aynalar; çapı 100 mm, derinliği 40 mm olan silindirik paslanmaz çelik (AISI 304) ile modellenmiştir (Şekil 3.128).
3. Sıcaklık değişiminin yoğun olacağı bölgelerde daha sık çözüm ağı kullanılmıştır (Şekil 3.129).



Şekil 3.128 Analiz için numuneler ve bağlantı şekli

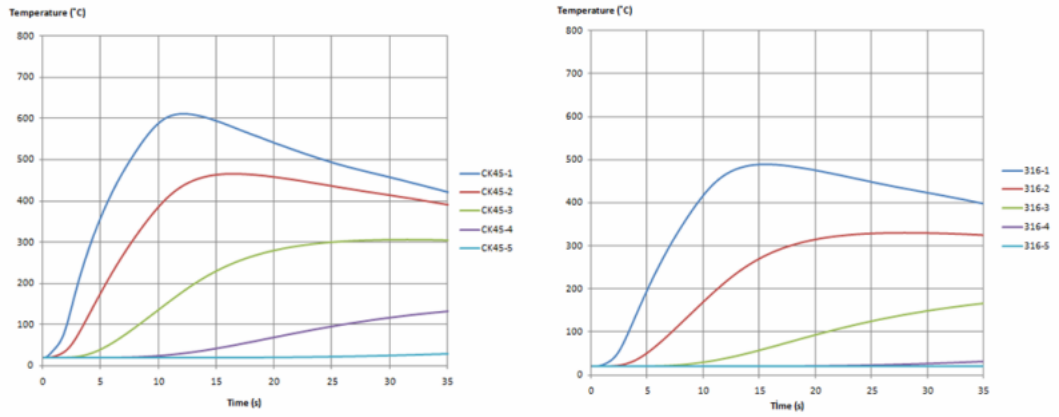


Şekil 3.129 Analiz için kullanılan çözüm ağı bölgeleri

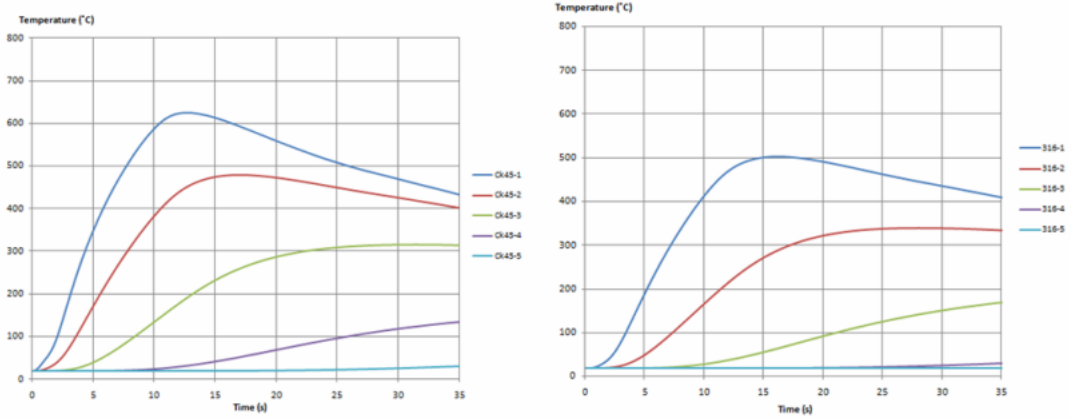
4. Kaynak yüzeyindeki sıcaklık sınır şartları, deneysel olarak her saniye sonunda ölçülen değerlerin parçalı fonksiyonu olarak verilmiştir.

5. Çözüm zamanını kısaltmak için $\frac{1}{2}$ simetrik model kullanılmıştır.

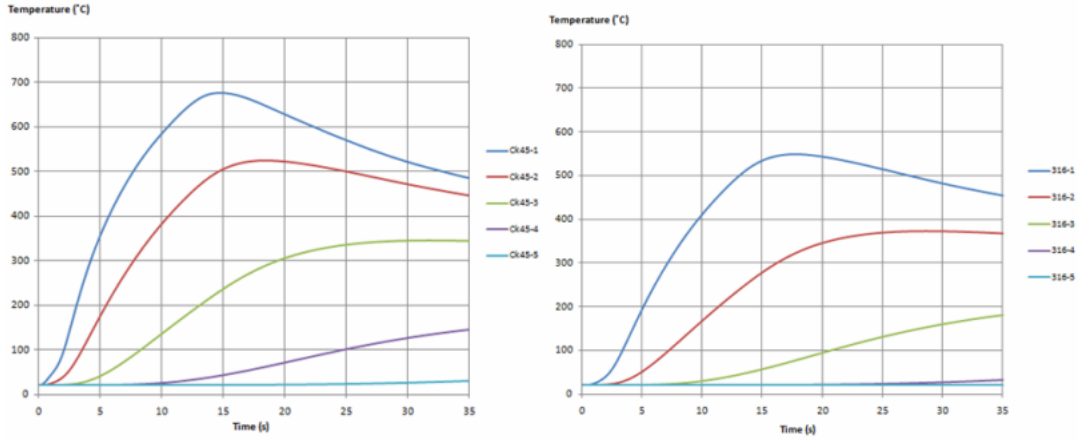
Şekil 3.130-132 'de ısı analizi ile numune 8, 9 ve 13 'ün Şekil 3.126 'da belirtilen izleme noktalarından elde edilen zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri görülmektedir.



Şekil 3.130 Numune 8 için izleme noktalarındaki sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 3.131 Numune 9 için izleme noktalarındaki sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 3.132 Numune 13 için izleme noktalarındaki sıcaklık-zaman grafiği

Analiz sonucunda elde edilen grafik resimlerde (Şekil 3.130-132) görüldüğü gibi Ck 45 çeliğinde ısı, AISI 316 çeliğinden daha çabuk yayılmaktadır. Örneğin, numune 13 'ün her iki malzeme için 3. izleme noktalarındaki sıcaklıkların 100 °C 'ye ulaşması için Ck 45 çeliği için 8 s geçmesi gerekirken, AISI 316 çeliği tarafı için 21 s geçmesi gerektiği görülmektedir. Ck 45 çeliğinin ısı iletim katsayısı AISI 316 çeliğinin ısı iletim katsayısından büyük olduğu için ısı, Ck 45 çeliği üzerinde daha hızlı yayılmıştır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, su pompası imalatında kullanılması düşünülen, AISI 316 ostenitik paslanmaz çeliği ile Ck 45 alaşımsız asal çeliğin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi, sürtünme kaynak işleminin simülasyonu ve ısı analiz programının yapılması araştırılmıştır. Kaynaklı numunenin manyetik özelliği olmayan ostenitik paslanmaz çelik tarafı pompa pervanesinin imalatında, manyetik geçirgenlik özelliği olan alaşımsız asal çelik tarafı ise elektrik motoru milinin imalatında kullanılması düşünülmektedir. Bu sayede, daha az elektrik enerjisi tüketen, korozyona dayanıklı, uzun süre çalışma ömrü olan ve üretiminde ekonomikliği sağlayacak bir su pompası imalatı gerçekleştirilebilecektir.

Numunelerin birleştirilmesinde bilgisayar kontrollü sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi kullanılmıştır. Sürtünme kaynağı işlemi 19 farklı kaynak parametresi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak sırasında, kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı ile kaynak ara yüzeyinin zamana bağlı sıcaklık değişimleri ölçülmüştür.

Kaynak işlemi sonrası numunelerden elde edilen, boyda kısalma miktarı, flaş çapı ve genişliği verileri ile kaynaklı numunelere uygulanan çekme testinden elde edilen çekme dayanımı değerlerinden yararlanılarak kaynak işleminin simülasyonu “Visual Studio 2008 C# Express Edition” programıyla yapılmıştır.

Deneyler esnasında kaynak ara yüzeyinden ölçülen zamana bağlı sıcaklık değerleri kullanılarak, kaynak esnasında numuneler üzerindeki zamana bağlı üç boyutlu sıcaklık dağılımını veren ısı analizi “cfdesign” programı ile gerçekleştirilmiştir.

Kaynak sonrası numunelere çekme ve mikrosertlik testleri uygulanmış, mikroyapıları optik mikroskop ve SEM ile incelenmiş ve EDS analizi ile element

dağılımı tespit edilerek bağlantı özellikleri tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Kaynaklı numunelerdeki boyda kılma miktarı, Ck 45 çeliğinde AISI 316 çeliğinden daha fazla gerçekleşmiştir (Tablo 3.1).

Çekme deneyleri sonunda en düşük çekme gerilmesi 192.9 MPa, en yüksek çekme gerilmesi 702,15 MPa değerinde çıkmıştır. En düşük çekme dayanımı değerine göre bakıldığında AISI 316 çeliğinden (çekme dayanımı= 663.53 MPa) % 64.4 daha az çekme dayanımı, en yüksek çekme gerilmesi değerine göre bakıldığında % 5,8 daha fazla çekme dayanımı elde edilmiştir (Şekil 3.1).

Kırılma yüzeylerinin makro incelemesinden ve SEM görüntülerinden numunelerin çoğunda kırılmanın gevrek olduğu görülmüştür (Şekil 3.2-3.7). Numune 4 ve 13 'de kısmi olarak kesit daralması gözlenmiştir. Numune 13 'ün kırılma yüzeyinin SEM incelenmesinde kırılmanın, hem sünek hem de gevrek gerçekleştiği görülmektedir. Kırılma yüzeylerinin yapısı, kaynak parametrelerine göre değişim göstermiştir.

Ana malzemelerin ve kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyinin EDS analizinde, Cr oranı Ck 45 ana malzemesinin kırılma yüzeyinin Cr oranına çok yakın çıkmıştır. Yine bu numunelerin kırılma yüzeyinde Ni oranının değişim miktarı kadar, Fe oranı değişim göstermiştir. Numune 8 'in kırılma yüzeyinde oksijen elementi görülmüştür. Bu sonuçlar kırılmanın kaynak bölgesinin Ck 45 çeliği tarafında olduğunu göstermektedir (Tablo 3.2).

Yatay doğrultuda yapılan sertlik testinde kaynak ara yüzeyindeki sertlik değeri bazı numunelerde ana malzemelerin sertlik değerine çok yakın, bazı numunelerde ana malzemelerin sertlik değerinden yüksek ve bazı numunelerde ana malzemelerin sertlik değerinden çok düşük çıkmıştır (Şekil 3.12). Sertlik değerinin çok düşük çıktığı numunelerde sertlik ölçüm yerlerinin çatlağa denk geldiği gözlenmiştir. Bu numunelerde yığılma basıncının düşük tutulması kaynak ara yüzeyinde çatlağa sebep olmuştur.

Kaynak ara yüzeyinden Ck 45 çeliği tarafına gidildikçe, ilk 1 mm 'lik mesafe boyunca sertlik değeri ani olarak yükselme göstermiş, 1-2.5 mm arasında bu artış giderek azalan bir eğilim göstererek Ck 45 çeliği sertlik değerine ulaşmış, 2.5-3 mm arasında yatay olarak seyretmiş, 3-4 mm arasında az miktarda düşüş göstermiş ve 4 mm 'den sonra ana malzemenin sertlik değerine ulaşmıştır.

Kaynak ara yüzeyinden AISI 316 çeliği tarafına gidildikçe, sertlik değerinin genelde değişmediği gözlenmektedir. AISI 316 ostenitik paslanmaz çelikte, sıcaklık değişimi ile faz dönüşümü gerçekleşmediği için sertlik değişiminin çok fazla gerçekleşmediği düşünülmektedir.

Kaynak ara yüzeyinin merkezinden çevreye doğru dikey doğrultuda sertlik değeri, bazı noktalarda ana malzemelerin sertlik değerinden yüksek, bazı noktalarda ise ana malzemelerin sertlik değerine yakın çıkmıştır (Şekil 3.16). Bu durum, kaynak ara yüzeyinde malzemelerin biri birine geçiş yapmasından kaynaklanmıştır. Çünkü bazı ölçümler bu malzeme geçişinden kaynaklanan martenzit yapının oluştuğu Ck 45 çeliğine rastlayarak yüksek çıkmış, bazı ölçümler de AISI 316 çeliğine rastlayarak ana malzemelerin sertlik değerine yakın çıkmıştır.

Optik ve SEM mikro yapı incelemesi sonucunda, AISI 316 çeliği ITAB'ında dinamik yeniden kristalleşme ile yeni tane yapısının oluştuğu görülmüştür. Bu tane yapısının boyutu sıcaklık ve deformasyon (eksenel basınç ve sıcak torsiyon) miktarına bağlı olarak değişim göstermiştir. Kaynak ara yüzeyine yakın olan bölgelerde küçük tane boyutu, ana malzemeye doğru olan bölgelerde tane boyutu büyümüştür. Ck 45 çeliği ITAB 'ında ise, kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde martenzit yapının oluştuğu gözlenmiştir. Bu bölgeden ana malzemeye doğru gidildikçe; önce kaba taneli yapı, sonra ince taneli yapı oluşmuş ve belli bir mesafeden sonra ana malzemenin tane boyutuna tekrar ulaştığı görülmüştür (Şekil 3.17-3.64).

Kaynaklı numunelerin Ck 45 çeliği tarafında oluşan ITAB genişliği, AISI 316 çeliğinin ITAB genişliğinden fazla oluşmuştur (Tablo 3.3). Ck 45 çeliğinde ITAB

genişliğinin, AISI 316 çeliğinin ITAB genişliğine göre artış oranı, Ck 45 çeliğinde gerçekleşen boyda kısıalma miktarının AISI 316 çeliğinden fazla olması nedeniyle azalmıştır. Çünkü Ck 45 çeliğinde, ısınan malzeme miktarı, AISI 316 çeliğinden daha fazla kaynak ara yüzeyinin dışına flaş olarak çıkmıştır.

Kaynak bölgesi EDS analizinde, Ck 45 çeliği tarafında Fe oranı azalırken, Cr, Ni ve Mo oranı artmıştır. Buna karşılık AISI 316 çeliği tarafında Fe oranı artarken, Cr, Ni ve Mo oranı azalmıştır (Tablo 3.4-9).

Kaynak ara yüzeyinde sıcaklık artışının ilk 2 saniyede daha fazla olduğu, daha sonra dönme hareketinin ve sürtünme basıncının devam etmesine rağmen sıcaklık artışının daha az gerçekleştiği görülmektedir. Maksimum sıcaklıklara (995-1082 °C) 7 ile 12 saniye arasında ulaşılmıştır (Şekil 3.115). Kaynak ara yüzeyinde oluşan sıcaklık artışı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi ile doğru orantılı olmuştur.

Ostenitik çeliklerde en büyük sorun olan krom karbür çökelme sıcaklığı (450 °C ile 850 °C arası) ve bu sıcaklıkta karbür oluşmadan geçen minimum süre (kuluçka periyodu) dikkate alındığında, 450 °C ‘den 850 °C ‘nin üzerine ulaşma süresi (ısınma) 2 ile 4 saniye, 850 °C ‘den 450 °C ‘nin altına soğuma süresi 18 ile 22 saniye sürmüştür. Her iki aşama esnasında geçen sürelerin kuluçka periyodunu aşmadığı görülmüştür.

Simülasyon programı ile kaynak işlemi öncesi deneme yanılma sürecini en aza indirilmiş olacak, atık malzeme miktarı azaltılmış ve en kısa sürede, en az maliyet ile kaynak işleminin yapılması sağlanacaktır. Simülasyon programında, kaynaklı numunelerde oluşan boyda kısıalma miktarı; Ck 45 çeliği için 0.935 belirlilik katsayısıyla (R^2), AISI 316 çeliği için 0.872 belirlilik katsayısıyla (R^2), flaş çapı; Ck 45 çeliği için 0.939 belirlilik katsayısıyla (R^2), AISI 316 çeliği için 0.857 belirlilik katsayısıyla (R^2), flaş genişliği; Ck 45 çeliği için 0.935 belirlilik katsayısıyla (R^2), AISI 316 çeliği için 0.893 belirlilik katsayısıyla (R^2) ve kaynak yeri sıcaklığı 0.736 belirlilik katsayısıyla (R^2) test değerlerini açıklayan istatistiksel tahmin modelleri “Regresyon Analizi ve SPSS 16.0 İstatistiksel Paket Programı” ile elde edilmiştir. Çekme dayanımı veren fonksiyon ise, test değerlerini 0,9711 belirlilik katsayısıyla

(R²) açıklayan “Yapay Sinir Ağları ve Phytia 1.6 Programı” ile sistemin analitik modellemesi gerçekleştirilerek elde edilmiştir (Denklem (3.1-15)).

Isı analizi sonucunda, Ck 45 malzemesi üzerinde ısı, AISI 316 malzemesinden daha çabuk yayıldığı görülmüştür.

AISI 316 çeliği ile Ck 45 çeliğinin kaynağında en etkili kaynak parametrelerinin, sürtünme süresi (ts) ve yığma basıncı (Pu) olduğu görülmüştür. Yığma basıncı artışı ile çekme dayanımı artışı doğru orantılı olmuştur. Yığma basıncı düşük tutulduğu zaman kaynak ara yüzeyinde çatlakların oluşabileceği değerlendirilmektedir.

AISI 316 çeliği ile Ck 45 çeliğinin sürtünme kaynağında; 3000 dev/dk dönme hızında, 100 MPa sürtünme basıncı, 10 s sürtünme süresi, 200 MPa yığma basıncı ve 20 s yığma süresi optimum kaynak parametreleri olmuştur.

AISI 316 çeliği ile Ck 45 çeliğinin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi işleminde, kaynak dayanımına etki eden sürtünme kaynağı parametreleri değerlendirildiğinde, bu çalışma konusuyla ilgili olarak, bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutması bakımından aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- 1) Kaynak işlemi, farklı devirlerde yapılabilir.
- 2) Çekme testinden sonra numunelere yatay doğrultuda gerçekleşen çatlak oluşumu incelenebilir.
- 3) Kaynak öncesi ve sonrası numunelere ısıl işlem uygulanarak, kaynak dayanımı araştırılabilir.
- 4) Kaynaklı numunelerin yorulma dayanımları test edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Gourd, L.M., Kaynak Teknolojisinin Esasları, Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul, (1996), s. 17-21, 110-111.
- [2] Sönmez, F., Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş yüksek hız çeliği(HSS) ve AISI 1040 çeliklerinde mukavemet ve metalürjik özelliklerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Edirne, (2007).
- [3] Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S., Reddyb, G.M., “High temperature corrosion studies on friction-welded dissimilar metals”, *Materials Science and Engineering*, B 132, (2006) 222–227.
- [4] Domblesky, J., Kraft, F.F., “Metallographic evaluation of welded forging preforms”, *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (2007) 82–86.
- [5] Özdemir, N., Sarsılmaz, F., Hasçalık, A., “Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel”, *Materials and Design*, 28, (2007) 301–307.
- [6] M. El Wahabi, J.M. Cabrera, J.M. Prado, “Hot working of two AISI 304 steels: a comparative study”, *Materials Science and Engineering*, A343, (2003) 116-125.
- [7] Sahin, M., “Simulation of friction welding using a developed computer program”, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, (2004) 1011-1018.
- [8] Alvise, L. D., Masoni, E., Wallve, S. J., “Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 125-126, (2002) 387-391.
- [9] Sahin, M., “Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding”, *Materials and Design*, xxx, (2006) xxx–xxx.
- [10] Sahin, A. Z., Yibaş, B. S., Ahmed, M., Nickel, J., “Analyis of the friction welding process in relation to the welding of copper and stell bars”, *Journal of Materials Processing Technology*, 82, (1998) 127 – 136.

[11] Maalekian, M., Kozeschnik, E., Brantner, H.P., Cerjak, H., “Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars”, *Acta Materialia*, xxx, (2008) xxx–xxx.

[12] Cheng, C. J., “Transient temperature distribution during friction welding of two dissimilar materials in tubular form”, *Weld. J. (Res. Suppl.)*, 41 (12), (1962) 524-550.

[13] Cheng, C. J., “Transient temperature distribution during friction welding of two similar materials in tubular form”, *Weld. J. (Res. Suppl.)* 41 (12), (1963) 233-240.

[14] Sun, F., Li, Z., Jiang, D., Chen, B., “Adhering wear mechanism of cemented carbide cutter in the intervallic cutting of stainless steel”, *Wear*, 214, (1998) 79-82.

[15] Maki, By T., Akasaka, K., Okuno, K., Tamura, I., “Dynamic Recrystallization of Austenite in 18-8 Stainless Steel and Ni Maraging Steel”, *Transactions ISIJ*, Vol. 22, (1982) 253-261.

[16] Tekin, A., Çelik ve ısıt işem (BOFORS elkitabı), Güney, M., Hakan ofset, İstanbul, (1984).

[17] Hasui, A., Der-Ming L., Nishino, Y., Kono, T., “Friction welding of sintered steel and carbon steel”, *Transaction of the Japan Welding Society*, Vol. 17, No. 1, (1986) 65-70.

[18] Zhang, L. W., Pei, J. B., Zhang, Q. Z., Liu, C. D., Zhu, W. H., Qu, S., Wang, J. H., “The coupled fem analysis of the transient temperature field during inertia friction welding of gh4169 alloy”, *Acta Metal. Sin. (Engl. Lett.)*, Vol.20, N0.4, (2007) 301-306.

[19] Uzku, M., Ünlü, B. S., Akdağ, M., “Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş yüksek alaşımlı iki farklı çeliğin mikroyapı ve mekanik özellikleri”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, (2006) 11-17.

[20] Gül, A., “Farklı metalsel malzemelerin sürtünme kaynağında, kaynak parametrelerinin diğiş özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006).

[21] Dinç, D., AISI 1040 ve AISI 304 çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisan Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2006).

[22] Uzun, M. B., Sürtünme kaynak makinesinin imalatı ve kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta, (2007).

[23] Kumru, E., Farklı malzemelerin sıcak basınç kaynağı ile birleştirilmesinde işlem parametrelerinin etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisan Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2007).

[24] Bos, E., Ark esaslı kaynak yöntemleriyle kaynak işleminde ısı tüketimi ile malzeme/kalınlık ilişkisinin incelenmesi, Yüksek Lisan Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2007).

[25] Welding handbook, Welding processes, Volume five, Seventh edition, Copyright by the American Welding Society Inc., Miami, (1997), s.303, 411.

[26] Linnert, G. E., Welding metallurgy, Carbon and alloy steels, Volume I, Fourth Edition, Fundamentals, Published by the American Welding Society, USA, (2003), p. 444, 593-607.

[27] Welding handbook, welding processes, Volume 2, Eighth edition, Copyright by the American Welding Society Inc., Miami, (1997), s. 739-761.

[28] Gürleyik, M. Y., ‘‘Sürtünme kaynağı’’, 1. Ulusal kaynak sempozyumu tebliği özetleri, İstanbul, (1984), 13-15.

[29] Timings, R., Fabrication and welding engineering, Published by Elsevier Ltd. All rights reserved, (2008), p.536-537.

[30] Özdemir, N., Orhan, N., Yeni tasarlanmış bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinasının imalatı’’, *Mühendis ve Makine*, (2002) 31-35.

[31] Çelik, İ., Alüminyum ve bakır çubukların sürtünme kaynağı üzerine bir araştırma, Yüksek Lisan Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (1997).

[32] Ateş, H., Türker, M., ‘‘Laboratuar boyutlu sürtünme kaynak makinesi tasarımı ve imalatı’’, 3. Uluslararası ileri teknolojiler sempozyumu, (2003), 146-153.

[33] Dabak, S., Sürtünme kaynak tezgahı imali SAE 8620-1040 malzemelerin kaynağı ile metalik ve metalografik incelenmesi, Yüksek Lisan Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (1995).

[34] Otmanbölük, A. N., ‘‘Sürtünme Kaynağı Prosesleri Üzerine Bir Araştırma’’, 7nci Denizli malzeme sempozyumu, Denizli, (1997), 507-511.

[35] Robert, W., Messler, Jr., Joining of materials and structures from pragmatic process to enabling technology, Published by elsevier ltd. all rights reserved, (2004), s. 334-337.

[36] Welding handbook, Materials and applications - part 1, ed. Oates, W. R., Eighth Edition, Volume 3, American welding society, Miami, (1997).

[37] Sahin, M., "Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 168, Issue 2, (2005) 202-210.

[38] Welding Handbook, Met& and their webbility, ed. Kearns, W. H, Seventh edition, Volume 4, American welding society, Miami, (1997), s. 287.

[39] Jefferson's Welding encyclopedia, Ed. O'Brien, R. L., Eighteenth Edition, American welding society, Miami, (1997), s. 197-200.

[40] www.teamafw.com, (American Friction Welding Inc.) _08.05.2009

[41] San, K., Temel, M., Otomatik (ileri) kaynak teknolojisi, Milli eğitim basım evi, (1984), s. 133-134.

[42] Savaşkan, T., Malzeme bilgisi ve muayenesi, Dördüncü baskı, Celepler matbaacılık, Trabzon, (2007).

[43] Yıldırım, S., Saf bakırın yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışı: dinamik yeniden kristalleşme ve dinamik tane büyümesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, (2001).

[44] Krauss, G., "Steels processing structure and performance", ASM international materials park, Ohio, (2005), s.141-145, 495-531.

[45] Akbulut, H., Deformasyon ve yeniden kristalleşme, (2007).

[46] Bargel, H. J., Schulze, G., Malzeme bilgisi cilt 2, Çeviren: Güleç, Ş., Aran, A., TÜBİTAK Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü Matbaası, Gebze, (1987). s. 58-60, 96-98.

[47] Bramfitt, B. L., Benschoter, A. O., Metallographer's guide practices and procedures for irons and steels, ASM international materials park, OH, (2002).

[48] Odabaş, C., Paslanmaz çelikler, temel özellikleri, kullanım alanları, kaynak yöntemleri, Baskı-Cilt:Tavaslı Matbaası, 2. Baskı, İstanbul, (2004).

[49] Mühendis ve Makine Dergisi, tmmob makine mühendisleri odası aylık yayın organı, cilt 21, sayı 247, tmmob makine mühendisleri odası aylık yayın organı, Ankara, (1977), s. 263-294.

[50] Kahraman, N., Gülenç, B., Akça, H., Ark kaynak yöntemi ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 17, Ankara, (2002).

- [51] <http://www.frntr.com/muhendislik-mimarlik-peyzaj-mimarligi/795907-paslanmaz-celiklerin-kaynagi.html>_08.05.2009
- [52] <http://www.muhendisforum.net/index.php?topic=871.0>_08.05.2009
- [53] <http://www.makinahaber.com/egitim/316l-316-kalite-paslanmaz-celikler-ozellikleri-astm-316-aisi-316-l.html>_04.05.2008
- [54] http://www.fapaslanmaz.com/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=40_04.05.2008
- [55] <http://www.hirdavatstore.com/index.php?page=MzA=&anakat=48&altkat=118>_04.05.2008
- [56] http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=863#_Welding_08.05.2009
- [57] <http://www.metalravne.com/selector/steels/ck45.html>_30.03.2010
- [58] Raytek, Inc., Raytek raynger 3i series operator's manual, Copyright raytek corporation, Santa Cruz, California, USA, (2001), s. 1-29, 46-48.
- [59] Raytek, Inc., Datatemp 2 data retrieval, Recording and graphing software for portable and online infrared thermometers operator's manual, Copyright raytek corporation, Santa Cruz, California, USA, (1995), s. 6-30.
- [60] Turanlı, M., Güriş, S., Temel istatistik, Der yaymevi, Basım: Günaydın ofset, 2. Baskı, İstanbul, (2005), s. 513-569.
- [61] <http://ekutup.dpt.gov.tr/ekonomi/tahmin/yurtoglh/ysa.pdf>_06.05.2010
- [62] Toktaş, İ., Mekanik sistemler için bir kavramsal tasarım modelinin geliştirilmesinde yapay sinir ağlarının kullanılması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara, (2003).