

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRTÜNME KAYNAĞI YAPILMIŞ FARKLI MALZEMELERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Özgür ÇELİK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Ağustos 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ağustos 2008

Tez Danışmanı :Öğr.Gör.Dr. N.Sinan KÖKSAL

Diğer Jüri Üyeleri :Doç.Dr. Hakan BOYACI

Yrd.Doç.Dr. Salim ŞAHİN

MANİSA 2008

ÖZET

Günümüz endüstrisinde kullanılan malzeme çeşitlerinin artması ve ekonomik faktörlerin giderek önem kazanması farklı malzemelerin bir arada kullanılması gerekmektedir. Farklı metallerin birleştirilmesi genellikle katı hal kaynak yöntemleri ile yapılmaktadır. Bu yöntemlerden biri olan sürtünme kaynağı yöntemi ile farklı malzemelerin birleştirilmesinde, mekanik ve metalürjik özelliklerinde oluşan değişimler önemli olmaktadır.

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde kullanılan Ck 45 ve St 52-3 malzemelerinin sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Böylece maliyeti yüksek olan St 52-3 çeliğinin sarfiyatından tasarruf sağlanması amaçlanmıştır. Kaynak sırasında, kızılötesi sıcaklık ölçme cihazı ile yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Birleştirilen numunelere çekme, izod darbe deneyleri uygulanmış, mikrosertlik ölçümleri yapılmış, mikroyapı ve kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri ve EDS analizi yapılarak mekanik ve metalürjik özellikleri saptanmıştır. Parametrelerden sürtünme süresi ve yığma basıncı artırılarak yapılan birleştirmede diğerlerine göre daha iyi bir birleşme kalitesi elde edilmiştir.

Bunun sonucunda, farklı iki çeliğin sürtünme kaynağı ile yeterli bir şekilde birleştirilebileceği görülmüştür.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Sürtünme kaynağı, Ck 45, St 52, mikroyapı, mekanik özellikler

ABSTRACT

Recent developments in technology and increase of necessities have effected manufacturing methods. Welding procedure is one of the methods that has been changed. Welding of different materials becomes very important to reduce cost. With friction welding method which is one of the solid state bonding methods, it is possible to weld different materials.

In this study, the weldability of Ck 45 and St 52-3 by friction welding was investigated. So it was aimed to save consumption St 52-3 which has high cost. During welding process, temperature variations at the surface of welding places were measured with infrared temperature measurement device. After welding, tensile and hardness experiments were done on specimens, micro structures to determine optimum welding parameters. In addition changes at grain structures and mechanical properties were investigated by applying heat treatment under suitable conditions

As a result of this study, it has been seen that these two steels could be joined by friction welding.

KEY WORDS: Friction welding, Ck 45, St 52, micro structure ,mechanical properties

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER	I
ABSTRACT, KEY WORDS	II
İÇİNDEKİLER	III
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	x
TEŞEKKÜR	xi
1. GİRİŞ	1
2. SÜRTÜNME KAYNAĞI	3
2.1 Yöntemin Tarihçesi	3
2.2 Yöntemin Tanımı ve İşlem Basamakları	7
2.3 Sürtünme Kaynağı Parametreleri	10
2.3.1 Çevresel Hız	11
2.3.2 Sürtünme Basınç Kuvveti	11
2.3.3 Sürtünme Süresi	11
2.3.4 Yığma Süresi	11
2.3.5 Yığma Basınç Kuvveti	12
2.4. Sürtünme Kaynağı Metotları	13
2.4.1 Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı	13
2.4.2 Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı	14
2.4.3 Kombine Sürtünme Kaynağı	16
2.5 Birleşme Bölgesindeki İç Yapı	16
2.6 Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri	17
2.7 Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Malzemeler	18
2.8 Sürtünme Kaynağı Uygulama Alanları	21
2.9 Sürtünme Kaynağının Ülkemizdeki Durumu	24
2.10 Sürtünme Kaynağının Avantajları	26
2.11 Sürtünme Kaynağının Dezavantajları	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
3.1 Malzemeler ve Özellikleri	27
3.2 Sürtünme Kaynak Cihazı ve Teknik Özellikleri	29
3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması	31
3.4 Sürtünme Kaynağı Deneyleri ve Kaynak Parametreleri	31
3.5 Kaynak Bölgesinin Sıcaklığının Ölçülmesi	35

3.6 Çekme Deneyi	38
3.7 Izod Darbe Deneyi Uygulamaları	45
3.8 Sertlik Ölçümleri	47
3.9 Mikro Yapı İncelemeleri	50
4. DENEY SONUÇLARI	61
5. GENEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA	63
6. KAYNAKLAR	64

SEMBOL LİSTESİ

<u>Simge Adı</u>	<u>Tanımı</u>	<u>Birimi</u>
n	Devir sayısı	dev/dk
P₁	Sürtünme basıncı	daN/cm ²
t₁	Sürtünme süresi	s
P₂	Yığma basıncı	daN/cm ²
t₂	Yığma süresi	s
T	Sıcaklık	°C

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil Numarası</u>	<u>Şekil Adı</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.	Sürtünme kaynağı işlemi	8
Şekil 2.2.	Sürtünme kaynağı işlem basamakları	8
Şekil 2.3.	Sürtünme kaynak cihazı ve donanımı	10
Şekil 2.4.	Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı	13
Şekil 2.5.	Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı Yönteminde Zamana Bağlı Kaynak Parametreleri	14
Şekil 2.6.	Volan Tahrikle Sürtünme Kaynağı	15
Şekil 2.7.	Volan Tahrikle Sürtünme Kaynağı Yönteminde Zamana Bağlı Kaynak Parametreleri	15
Şekil 2.8.	Sürtünme Kaynağına Uygun Parça Kesitleri	18
Şekil 2.9.	Sürtünme Kaynağı ile İmal edilmiş Egzoz Subapları	21
Şekil 2.10.	Ticari Araçlarda Kullanılan, Sürtünme Kaynağı ve Sıcak Presleme Uygulanmış “V” Çeki Kolları	22
Şekil 2.11.	Mercedes Benz ve BMC gibi Firmaların Ticari Araçlarında Kullanılan, Sürtünme Kaynağı uygulanmış Çeki Kolları	22
Şekil 2.12.	Sürtünme Kaynağı ile İmal edilmiş uçak parçası	23
Şekil 2.13.	Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş dizel motor pistonu	23
Şekil 2.14.	Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş parçalara örnekler	24

Şekil 3.1.	Deneylerde Kullanılan Sürtünme Kaynağı Cihazı	29
Şekil 3.2.	Elektrik motoru, hidrolik pompa motoru ve basınç kontrol ünitesi	30
Şekil 3.3.	Elektrik panosu ve zaman kontrol ünitesi	30
Şekil 3.4.	Tezgah kontrol ünitesi	30
Şekil 3.5.	A, B, C ve D grubu deney numunelerinin kaynak sonrası görüntüleri	33
Şekil 3.6 .	Numune gruplarındaki malzeme kayıplarının grafiksel gösterimi	35
Şekil 3.7.	Kızılötesi sıcaklık ölçme cihazıyla sıcaklık ölçümü	36
Şekil 3.8.	Numune gruplarının ortalama sıcaklık değerlerinin grafiksel gösterimi	38
Şekil 3.9.	Çekme numunelerinin cihazın çenelerine bağlanması	39
Şekil.3.10.	A,B,C,D grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelere uygulanan çekme deneyi sonrası kırılma yüzey görüntüleri	40
Şekil.3.11.	A grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin çekme deneyi sonuçları ve grafikleri.	41
Şekil.3.12.	B grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin çekme deneyi sonuçları ve grafikleri.	42
Şekil.3.13.	C grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin çekme deneyi sonuçları ve grafikleri.	43

Şekil.3.14.	D grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin çekme deneyi sonuçları ve grafikleri.	44
Şekil.3.15.	Tüm numunelerin çekme grafikleri	45
Şekil.3.16.	Yığılma basıncı ile Kırılma enerjisi değişimi grafiği	46
Şekil.3.17.	Sertlik ölçümü ve mikro yapı incelemeleri için hazırlanan sürtünme kaynağı yapılmış numuneler ve numunelerin şematik gösterimi	47
Şekil.3.18.	A grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikro sertlik değişimi grafiği	48
Şekil.3.19.	B grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikro sertlik değişimi grafiği	48
Şekil.3.20.	C grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikro sertlik değişimi grafiği	49
Şekil.3.21.	D grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikro sertlik değişimi grafiği	49
Şekil.3.22.	A grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunenin (A3) mikro yapı görüntüleri (400 X)	51
Şekil 3.23.	B grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunenin (B6) mikro yapı görüntüleri (400 X)	52
Şekil 3.24.	C grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunenin (C3) mikro yapı görüntüleri (400 X)	53
Şekil 3.25.	D grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunenin (D3) mikro yapı görüntüleri (400 X)	54
Şekil 3.26.	SEM görüntüleri için hazırlanan numuneler	55

Şekil 3.27.	A grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin SEM görüntüleri (500 X) ve EDS analiz sonuçları	56
Şekil 3.28.	B grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin SEM görüntüleri (500 X) ve EDS analiz sonuçları	57
Şekil 3.29.	C grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin SEM görüntüleri (500 X) ve EDS analiz sonuçları	59
Şekil 3.30.	D grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin SEM görüntüleri (500 X) ve EDS analiz sonuçları	60

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge Numarası</u>	<u>Çizelge Adı</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1	Malzemelere göre optimum kaynak parametreleri	12
Çizelge 2.2	Malzemelere göre optimum kaynak parametreleri	20
Çizelge 2.3	Türkiye'de sürtünme kaynağı kullanan işletmeler ve bu işletmelere ait veriler	25
Çizelge 3.1.	Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi	27
Çizelge 3.2.	Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri	28
Çizelge 3.3.	Maliyet Çizelgesi	28
Çizelge 3.4	Kaynak parametreleri	32
Çizelge 3.5	Sürtünme kaynağı sonrası numunelerin boyutları ve % kayıplar	34
Çizelge 3.6.	Sürtünme Kaynağı işlemi sonrası numunelerin boyutları ve birleşme bölgelerinin max. sıcaklıkları	37
Çizelge 3.7	Çekme deneyi uygulanmış numuneler ve deney sonuçları	41
Çizelge 3.8	İzod Darbe deneyi uygulanmış numuneler ve deney sonuçları	46

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans çalışmasının her aşamasında engin bilgi ve tecrübesi ile bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Öğr. Gör.Dr. N.Sinan KÖKSAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar için, Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarını ve sürtünme kaynak makinesini kullanımımıza açarak bu tezin meydana gelmesindeki büyük paylardan birinin sahibi olan Balıkesir Üniversitesi öğretim üyeleri Prof. Dr. İrfan AY'a, Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK'e, Yüzbaşı İsmail ERSÖZLÜ'ye, arkadaşlarım Ayşegül GÜNGÖR'e, Arsen ÖZDEMİR'e, Bahadır KARATAŞ'a, malzeme temininde ve metalürjik incelemelerde desteklerini esirgemeyen ZF Lemförder-İZMİR çalışanlarına, teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tüm eğitim hayatımda, bana her zaman destek olup, hiçbir fedakârlıktan çekinmeyen, hayatım boyunca asla borçlarını ödeyemeyeceğim babam Mahmut ÇELİK'e, annem Yüksel ÇELİK'e, ablam Ceren ÇELİK'e sevgi ve saygılarımı sunar, sonsuz teşekkür ederim.

1.GİRİŞ

Günümüzde hızla ilerleyen teknoloji, artmakta olan taleplere karşılık vermek zorundadır. Bu ise ancak, zamanla eksiklikleri saptayıp gidermek ve kendini sürekli yenilemekle mümkündür. Üretim teknolojisinin önemli alanlarından biri olan kaynak tekniği de çağa ayak uydurmalıdır.

Kaynaklı birleştirmeler tarih boyunca insanların ihtiyacı olan araç ve gereçleri elde etme çalışmaları ile ortaya çıkmıştır. İhtiyaçların sınırsız olması teknolojideki gelişmenin başlıca sebeplerindendir. Kaynaklı birleştirmelerde, başlangıçta iki metal malzemenin birbirleriyle birleştirilmesi ihtiyacından doğmuştur. Ancak daha sonraları insanlar sadece birleştirmenin yeterli olmayacağı, birleştirmenin malzeme özelliklerini etkilemeden gerçekleştirilebilmesini araştırmışlardır.

Buradan hareketle kaynak teknikleri ergitmeli ve ergitmesiz kaynak metotları olarak iki şekilde gruplandırılmışlardır. Ergitmeli kaynak yöntemlerinde birleştirilen metalik malzemelerin birleşme yüzeylerinin ergimesi ve ergiyik karışımın katılaşması sonucu metaller birleştirilirken, ergitmesiz kaynak yönteminde metalik malzemeler ergitilmeden, malzemelerin ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta malzeme katı haldeyken birleşme sağlanmaktadır.

Mühendislik uygulamalarında farklı metal ve alaşımlarının kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak farklı metallerin fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları nedeniyle ergitme kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmeleri hemen, hemen imkânsız gibidir. Bu ihtiyacı gidermek amacı ile yapılan çalışmalar sonucunda sürtünme kaynak yöntemi geliştirilmiştir.

Çeşitli kaynak usullerinde genelde rastlanan ve kaynağın kalitesini etkileyen ortak bazı sorunlar vardır. Farklı kristal yapıdaki kompozitlerin kaynak bağlantılarında istenilen dayanım ve verimliği almak her zaman mümkün olamayabilir. Kaynak sonrası malzemelerde gözlenen gevrek yapılar buna neden olabilmektedir. Bu faz tabakasının kalınlığı ve tane yapısı da kaynak kalitesini etkilemektedir. Bunun yanında oluşan gözenekler, cüruf, iç gerilmeler ve ısı etkisi altında kalan alanın genişliği bu kaliteyi etkileyen faktörlerdendir. Bu noktada günümüzde yaygın olarak endüstride kullanım alanı bulan bir katı hal birleştirme kaynağı olan sürtünme kaynağı önem kazanmaktadır. Bu yöntemle bir problem olarak görünen farklı malzemelerin birleşimi başarıyla gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde parça üretiminde kullanılan Ck 45 ve St 52-3 çelik

malzemelerin sürtünme kaynağı yöntemi ile birleebilirliği ve yapılan kaynağın kalitesi araştırılmıştır. Sürtünme kaynağında önemli parametrelerden olan sürtünme süresi, sürtünme basıncı ve yığma basıncı değiştirilerek birleştirme gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerden sonra elde edilen birletirmelerde mekanik ve metalürjik özellikler ile mikrosertlik değişimleri incelenmiştir.

2. SÜRTÜNME KAYNAĞI

2.1. Yöntemin Tarihçesi

Sürtünmeyle oluşan ısı ve ortaya çıkan enerjiden faydalanma fikri çok eskilere dayanmaktadır. Ancak bu enerjiyi bir bağlantı oluşturmak amaçlı kullanma fikri ilk kez 1929 yılında Almanya' da Richter tarafından ortaya konulmuştur, ardından 1942 yılında Klosstock tarafından İngiltere' de kullanılmıştır [1].

Sürtünme kaynağının ticari amaçlı kullanılması fikrine bağlı olarak ilk bilimsel çalışma 1956 yılında Chdikov adlı bir Rus tarafından başlatılmıştır. Bu çalışmalarda iki metal çubuğu sürtünme kaynağı ile belli şartlarda birleştirip buna bağlı patent almıştır [2]. Lucas 1971 yılında yaptığı çalışmalarda, bir saniye süre ile dövme basıncının uygulanmasının gerekli olduğunu, yığma basıncının yüksek tutularak uygulanmasıyla, kısa kaynak sürelerinin kaynak bölgesini olumlu etkilediğini izlemiştir [3]. Duffin ve Crossland 1971 yılında yürüttükleri araştırmada, düşük karbonlu çelikler için yüksek yığma basınçları ve düşük kaynak sürelerinin malzemede daha ince taneli bir yapı oluşumuna sebep olduğunu görmüşlerdir [4].

Jenning 1971 yılındaki çalışmasında, 19 mm çaplı Cr-Mo/Cr çelik çiftine kaynaktan önce ısıtım işlemleri uygulamış ve farklı kaynak parametrelerinde kaynak işlemleri yapmıştır. Daha sonra bu parçaları bir dizi çekme, yorulma ve eğme deneylerine tabi tutup mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çekme deneylerinde bütün kopmalar kaynak bölgesi dışında olmuştur. Bu ısıtım işlemin çekme dayanımına olumlu etkilerinin olduğunu göstermiştir. Kullanılan kaynak parametrelerinden sürtünme basıncı ve yığma basıncının düşük seçilmesi en iyi çekme özelliklerini vermiştir [5].

Sereign ve Sabantsev (1975) 14,1 mm çaplı kaynak öncesi çeşitli derecelerde deformasyona uğramış St 20 çeliklerini kullanarak, diğer parametreler sabit kalmak şartıyla, $n = 1200-1400$ d/d gibi iki ayrı dönme hızında elde edilen sürtünme kaynaklı bağlantılara çentik darbe deneyi uygulamışlardır. Bu deneylerin sonucunda dönme hızının yüksek seçilmesi dayanımı arttırmıştır [5]. 1980 yılında yayınlanan Welding Handbook' a bakılırsa genel olarak, düşük karbonlu çelikler için; sürtünme basıncı 30–65 MPa, yığma basıncı 75–140 MPa, orta ve yüksek derece karbonlu çelikler için; sürtünme basıncı 70–210 MPa, yığma basıncı 100–420 MPa değerleri arasında uygulanmalıdır [6].

Alüminyum ile bakırın, daha önce yapılan sürtünme kaynağı araştırmalarında görüldüğü gibi, kesiti yaklaşık olarak 500 mm^2 ye kadar olan bağlantılarda dayanım değerleri,

alüminyumun ana malzeme dayanımı ile sınırlı bulunmaktadır. Gürleyik (1988) yaptığı çalışmada ise 7800 mm² ye kadar olan oldukça geniş kesitlerin de sürtünme kaynağı ile birleştirilebileceğini göstermiştir. Kaynak dikişinin yüksek dayanım ve elastisitesi, birleşme bölgesinde oluşan intermetalik fazlı difüzyon tabakası kalınlığının 2 µm den daha az olması ile ilgili olduğunu açıklamıştır. Alüminyum ile bakırın sürtünme kaynağındaki mekanik özelliklerin, difüzyon tabakasının genişliğine bağlı olduğunu, bu bağlantıların, yüksek sıcaklıklarda yapılışında ise, ara tabaka genişliğinin, sınır değerleri aşmamasına dikkat edilmesini savunmuştur [7]. Grünauer, (1989) yapmış olduğu araştırmada sürtünme kaynağı ile basınçlı döküm yapılmış alüminyum (G-AlSi7Mg) ile preslenmiş alüminyum çubuk (AlZnMgCu 0.5) malzemeyi birleştirmiştir. Yapılan bir dizi deneyden sonra döküm borunun iç yapı oluşumunun çok düzgün ve ince olduğunu, kesitte büyük ötektik yapıların az olduğunu gözlemlemiştir. Bileşim bölgesine bağlı olmayan, bazı ince gözenekler oluşmuştur. AlZnMgCu-0.5 borusunun başlangıçtaki iç yapısı yeniden kristalize olmakta ve az sayıda deforme olmuş taneler görülmüştür. Yapılmış olan deneyler, döküm alüminyum parçalarında sürtünme kaynağı ile birleştirilebileceğini göstermiştir [8].

Tanicheva 'nın 1989 'da takım çelikleri üzerine yaptığı bir çalışmada, kaynak bölgelerinden kırılan takım çeliklerinin yüzeyinde görülen hatayı ortadan kaldırmak için, sıcaklığın buna paralel olarak sürtünme basıncının yüksek olması gerektiğini savunmuştur [9].

Yılmaz ve arkadaşları (1995) ortak yürüttükleri çalışmada, deney malzemesi olarak 11.5 mm çapında, C45 alaşımsız ve HS 6-5-2 yüksek hız çeliği çubuklar kullanılmıştır. Deney parçalarının büyük bir bölümü, endüstriyel bir sürtünme kaynak makinesinde değişik kaynak parametreleri kullanılarak; diğer bir bölümü ise, endüstriyel bir yakma alın kaynak makinesinde sabit kaynak parametreleri kullanarak C45 tarafına farklı ön tav sıcaklıkları verilerek kaynak edilmişlerdir. Tüm bağlantılar, kaynaktan sonra fırın içinde 650 °C de 4 saat süre ile tavlantı edilmişlerdir. Kaynaklı bağlantıların tümünde çubuk eksenine boyuna sertlik değişimleri ölçülmüş, kaynak bölgeleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş, değişimleri ölçülmüş, yapılan EDX ve WDX analizleri ile karbon ve ana alaşım elementleri olan Cr, W, V ve Mo 'nin kaynak bölgesindeki difüzyonları ve metalürjik içyapıya etkileri incelenmiştir. Bu incelemelerin ardından şu sonuçlara varılmıştır; yakma alın kaynaklı bağlantılarda, yüksek hız çeliğinden olan malzeme kaybını azaltmak amacı ile uygulanan ön ısıtma sıcaklığı 1 mm gibi çok az bir malzeme kazancı sağlarken, ek işlemler ve artan kaynak süresi yanında kaynak bölgesinin genişlemesine ve ara bölgedeki sertlik farkının artmasına neden olmuştur. WDX analizi ile elde edilen karbon profili ve aynı bölgedeki sertlik profili aynı karakteristikteki eğrilerdir. Karbon profilinde, C45 tarafında gözlenen karbon düşüşü ve yüksek hız çeliği tarafında gözlenen karbon artışı, C45 tarafından yüksek hız çeliği tarafına bir karbon göçü olduğunu açıkça

göstermiştir. Bu karbon yapıda bulunan Cr ile birleşerek karbür çökeltileri oluşturmuştur. Kaynaklı bağlantının hemen C45 tarafında gözlenen sertlik düşüşü, saf ferrite yakın dekarbürize bölgeden kaynaklanmıştır. Kaynak sonrası sürtünme kaynaklı bağlantılarda da uygulanan ve tavlama sonrası martenzit ve artık ostenite rastlanılmayan, 650 °C deki 4 saat süre ile tavlama yakma alın kaynaklı bağlantılarda yeterli olmamıştır. Bu da yakma alın kaynağında ısı girdisinin çok daha fazla olduğunu göstermiştir [10].

Kurban ve Kahraman çalışmalarında (1995), farklı özellikteki H2210 - St42 çelik malzemelerin sürtünme kaynağı ile birleştirmeleri sağlanmış ve devir sayısı, kaynak süresi, yükleme basını ile kaynak basıncının kaynaklı parçaların dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır [11].

Kahraman ve arkadaşları (1995) ortak yürüttükleri bir çalışmada ergime sıcaklıkları farklı H2210 çeliği ve alüminyumun sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi imkânlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler esnasında kaynak parametreleriyle oynanarak bu parametrelerin kaynak dikişine etkilerini incelemişlerdir. Kaynak sırasında farklı ergime bölgelerinin oluştuğunu saptamışlardır. Bunun sebebinin kaynak metallerinin farklı ısı özelliklerinin olduğunu düşünmüşlerdir. Ayrıca kaynak metallerinin mikro yapıları ve mekanik özellikleri inceleyerek kaynak dikişinin mukavemetinin alüminyumunkinden daha yüksek olduğunu görmüşlerdir [12].

Kato ve arkadaşları 1996 yılında normalize edilmiş sürtünme kaynaklı bağlantılara farklı sıcaklıklarda bir dizi deney uygulamışlardır. Bu araştırmaya göre, normalize edilmiş kaynaklı bağlantının yutma enerjisi, normalize edilmemiş göre oldukça fazladır, normalize edilmiş bağlantıda yaklaşık 24 °C olan enerji geçiş sıcaklığı, kırılma yüzeyindeki sıcaklık ile uyum içersindedir. Normalize edilmiş bağlantının geçiş bölgesindeki çatlak ilerleme dayanımı, normalize edilmemiş olana göre fazladır. Ayrıca normalize edilmiş kaynaklı bağlantının darbe eğilme mukavemeti, sıcak çekilmiş ana metalin darbe eğilme mukavemetine yakın olduğu görülmüştür [13].

Şahin ve arkadaşları 1996 yılındaki çalışmalarında; Al-Al, Al-Çelik ve Çelik-Çelik malzeme çiftlerini sürtünme kaynağı ile birleştirilmeleri sonucunda oluşan durumlar kıyaslanmıştır. Kaynak işlemi sırasındaki sıcaklık değişimi modellenmiş, kaynak yeri çekme testleri ve mikro sertlik ölçümleri yapılmış, ısı tesiri altındaki bölgedeki metalürjik değişiklikler SEM ile incelenmiş, yüzeydeki sıcaklık artışı hesabı yapılmıştır. Kaynak kalitesinden etkilenen parametreler, istatistiksel analizle tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; kaynak parametrelerinin karşılıklı etkisi akma, çekme ve kırılma mukavemetini değiştirmekte,

alüminyum parçadaki ITAB'in, Al-Çelik kaynaklı bağlantılarında daha geniş olduğunu ortaya koymuşlardır [14].

1998 yılında, Chen ve arkadaşları araştırmalarında, 14 mm çapında ASTM 1045' in karbon çeliği, C-4A-1 marka mantıklı programlanabilir bir sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak ara yüzeyinde oluşan derin olmayan çentikler CTS - 220 A adlı ultrasonik kusur ölçerle teste tabi tutulmuştur. Bu araştırmada kullanılan algoritma yöntemiyle tüm kusurlar belirlenememiştir. Zayıf yapışma bölgesi % 4,8 den küçük olduğunda malzemenin mekanik özelliklerini etkilemediği gözlenmiştir [15].

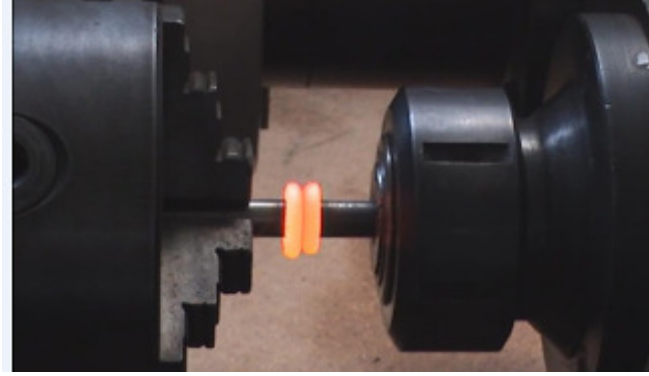
Farklı metaller arasındaki sürtünme kaynağı ile ilgili olarak yapılan teorik (FEM) çalışmalarının sayısı sınırlıdır. Bu konuda önemli kaynaklardan biri, farklı kaynaklardan dolayı oluşan ısı dağılımının hesaplanması için sayısal simülasyonların sonuçlarını sunmuş olan Balasubramanian'dır. Yapılan bu çalışma sadece ısı hesabını içermektedir. Alvis ve arkadaşları 2002 yılında yaptıkları bir çalışmada, malzemelerin sürtünme kaynağıyla gerçekleşen temasında, deneysel olarak onaylanmış etkili bir sayısal malzeme modelini denemişlerdir. Sürtünme kanunu ve parametreleriyle ilgili sonuca varabilmek için orijinal bir yöntem kullanılmış ve önemi anlatılmıştır. Sonuçta çıkan artık gerilme değerleri, endüstriyel kaynak kalitesini açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan bu çalışmada kaynak sonrası oluşan saçığın nasıl olabileceği bile yüksek bir doğruluk derecesiyle önceden belirlenmiştir [16]. 2003 yılında, Yılmaz ve arkadaşları beraber yürüttükleri bir çalışmada Al/ Çelik numunelerin sürtünme kaynağıyla birleştirilmeleri sırasında oluşan demir dışı fazların birleşmeyi etkilediğinden bahsetmişlerdir. Bu ara fazlar, $FeAl$, $FeAl_2$, $FeAl_5$ ve $FeAl_3$ olup, bunlar yüksek ısılarla kadar malzeme ara yüzeylerinde sabit kalırlar. Bu ara tabakaların çok ince veya çok kalın olması birleşmeyi olumsuz olarak etkiler. İdeal olan bu faz oluşumunun etkisini ortadan kaldırabilmektir, Bununla sürtünme kaynağı yapılacak malzemelerin arasında doğru seçilmiş bir ara katman kullanmakla olabileceğini ileri sürmüşlerdir [17]. 2004 yılında, Özdemir ve Orhan beraber yaptıkları bir çalışmada, termomekanik işlemlerle tane boyutu küçültülmüş süperplastik haldeki ötektoid üstü çelik çifti, farklı işlem kullanılarak sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde birleştirilmiştir. Kaynak sonrası elde edilen mikro yapı ve mikro sertlik analizi sonuçlarından, bütün kaynaklı numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen mikro yapısal değişiklikte önemli farklılıklar gözlenmemekle beraber, numunelerde yaklaşık 200-500 μm genişliğindeki aşın deformasyona uğramış bölge ve bu bölgenin bitişiğinde yine basıncın etkisiyle dövülmüş, taneler arasında plastik deformasyon etkisinin açıkça görüldüğü iki bölgenin varlığı tespit edilmiştir. Bu iki bölgede meydana gelen mikro yapısal bozunum ve plastik deformasyon miktarındaki değişim üzerinde, devir sayısı, sürtünme basıncı ve yığma basıncının önemli derecede etkili oldukları gözlenmiştir [18]. Şahin 2004 yılındaki çalışmasında aynı boyda ama

farklı çaplardaki silindirik AISI 1040 numuneleri sürtünme kaynağı ile birleştirerek ek yerlerini incelemiştir. Araştırmalar sırasında, çapsal oranlardaki artışın kaynak mukavemetini olumsuz etkilediğini görmüştür. Bu etkiler, kaynak süresince kaynak elemanları arasındaki artan çap oranı ile artan ısı kaybının negatif sonuçları olarak söylenebilir. Bununla birlikte ısı kaybı kaynak elemanlarının yüzey bölgeleri ve ısı yığılması ile ilgilidir [19].

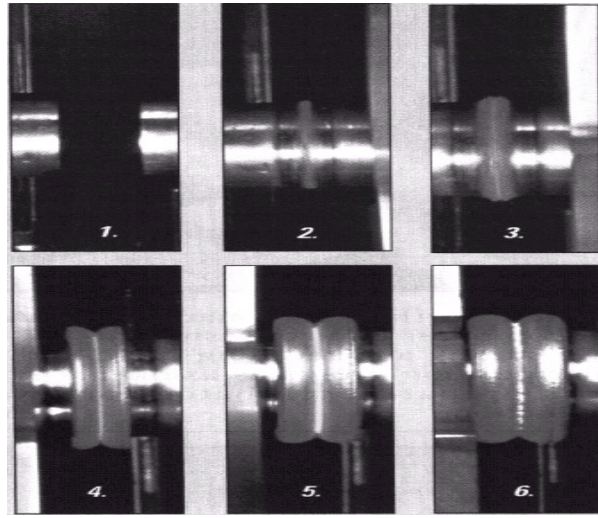
2004 yılında, Antonio ve arkadaşları yürüttükleri çalışmada, Ti-6Al-4V + %10 TiC malzemesinin sürtünme kaynağının birleşme noktalarındaki metalürjik ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmalar sonucunda ek yerlerindeki gerilme dayanımı, düşük dönme hızı ve basınçtan yararlanılarak iyileştirilmiştir. Bu şekilde iyi gerilme değerlerine sahip olan sürtünme kaynaklı Ti-6Al-4V + %10 TiC malzemeleri geniş bir kullanım alanına sahiptir. Dönme hızı ve basınç yüksek seçildiğinde daha geniş ve ince dönüşmüş bölgelere rastlanmıştır [20]. 2004 yılında, Lee ve arkadaşları beraber yürüttükleri bir araştırmada TiAl alaşımını ve AISI 4140 'ı ara metal kullanarak sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirmişlerdir. Bu malzemelerin direkt olarak birleştirilmesi sırasında gevrek reaksiyon ürünlerinden dolayı ara yüzeyde çatlaklar gözlenmiş, TiAl 'da martenzit yapıya dönüşen alanın giderek genişlediği izlenmiştir. Bu dönüşümü önlemek için, saf bakır ara metal olarak kullanılmıştır. Sıcaklıkta etkilenen bölgenin genişliğini en aza indirmek için kullanılan bakır AISI 4140 tarafında uygulanmıştır. Diğer kaynak yöntemlerine göre daha yüksek gerilim gücü değerlerine ulaşılmıştır. Ara metal olarak saf bakırın kullanılmasıyla sürtünme kaynağı bağlantılarında daha iyi sonuçlar alınmıştır [21].

2.2. Yöntemin Tanımı ve İşlem Basamakları

Bilindiği gibi sürtünme kaynağı; parçaların ara yüzeylerinde sürtünme yoluyla oluşturulan mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilen ısı yardımıyla gerçekleştirilen bir kaynak türüdür. Genel olarak sürtünme kaynağı eksensel simetriye sahip ve daire kesitli parçaların birleştirilmelerinde kullanılmasına rağmen cihazların otomasyonu ve bilgisayarlı kontrol olanaklarının gelişmesiyle birlikte daire dışı kesitli parçaların birleştirilmesinde de kolaylıkla kullanılabilir. Ayrıca, bu kaynak yönteminde malzeme ve enerji tasarrufu sağlamak gibi önemli bir avantaja da sahip olduğu için gittikçe artan oranlarda tercih edilmektedir. Yine bunlara ek olarak sürtünme kaynağıyla aynı veya farklı malzeme türleri, eşit veya farklı kesitli parçaların birleştirilmesi de kolaylıkla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.1. Sürtünme kaynağı işlemi



Şekil 2.2. Sürtünme kaynağı işlem basamakları [22]

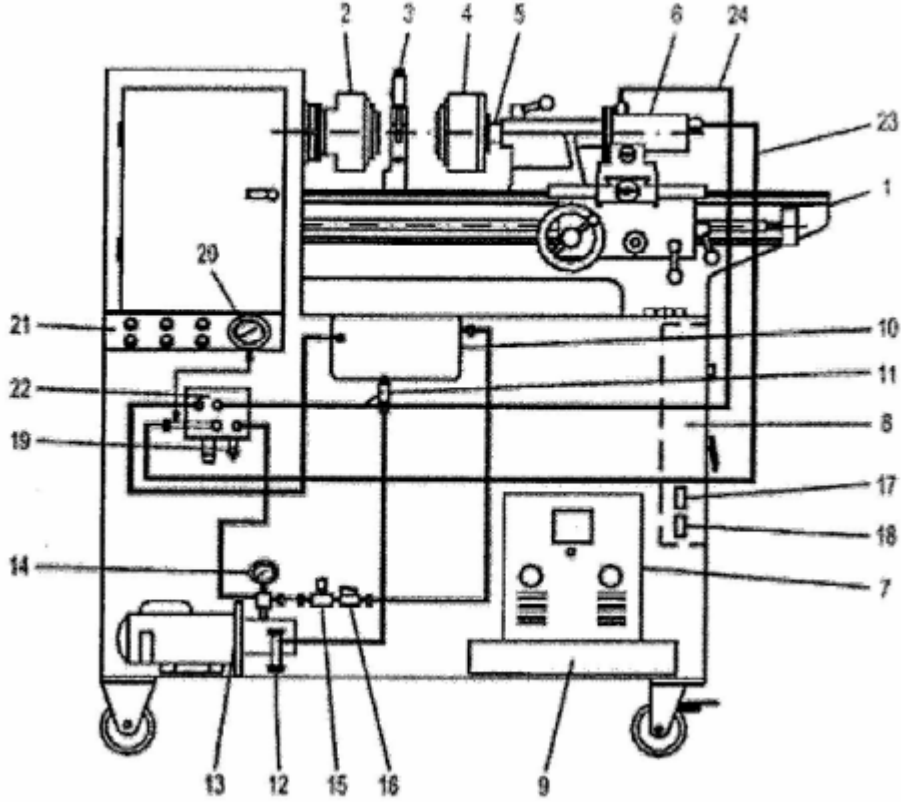
1. Parçalardan biri sürtünme kaynağı mekanizması tarafından döndürülürken diğer parça sabittir. Sabit parça dönen parçaya temas edecek şekilde ilerletilir.
2. Dönme sonucu sürtünen yüzeylerde ısı açığa çıkar. Metallerde ortaya çıkan yüksek ısı, kaynak bölgesi sıcaklığını her zaman ergime sıcaklığının altında tutar.
3. Yumuşayan metal uygulanan basıncın etkisiyle dışarı doğru taşmaya başlar.
4. Dövülmüş sıcak bölge ara yüzeyden dışarı doğru yönlendirilir.
5. Makine döndürme işlemini durdurur ve dövme kuvveti ile kaynak tamamlanır.
6. Sıcak işlemeye maruz kalan birleşme bölgesi tüm yüzey ve çap boyunca homojen bir forma ve yüksek kalitede kaynağa sahiptir.

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. Çelikler için bağlantı bölgesinde oluşan sıcaklık 900–1300 °C arasındadır. Çoğu

durumda ısıtma fazı sonrasında basınç artırılarak ara yüzeydeki ısıtılmış metal yığılır. Böylece kaynak bölgesi bir tür termomekanik işleme tabi tutulmuş olur ve dolayısı ile bu bölge iyi bir tane yapısı gösterir. 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 yığma işleminden dolayı ergimiş metale ait bir delil bulunmaz [23].

Sürtünme kaynağı cihazı tasarım olarak bir torna tezgâhını andırmaktadır. Bu makinelerin üzerinde birtakım değişiklikler yapıp modifiye edilmesiyle aşağıda bölümlerini rahatlıkla görebildiğimiz sürtünme kaynağı makineleri elde edilmektedir.



Şekil 2.3. Sürtünme kaynak cihazı ve donanımı [24]

- | | | |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1.Torna | 9.Takım avadanlık kutusu | 17.Zaman rolesi (I) |
| 2.Döner ayna | 10.Hidrolik yağ deposu | 18. Zaman rolesi (II) |
| 3.Merkezleme yatağı | 11.Küresel vana | 19.Basınç ayar valfi (II) |
| 4.Sabit ayna | 12.Filtre | 20.Hidrolik basınç göstergesi |
| 5.Piston kolu | 13.Hidrolik pompa | 21.Kumanda panosu |
| 6.Çift etkili silindir | 14.Yağ basınç göstergesi | 22.Yön kontrol valfi |
| 7.Manyetik fren ünitesi | 15.Basınç ayar valfi (I) | 23.Basınç hattı |
| 8.Elektrik panosu | 16.Selenoid ventil | 24.Dönüş hattı |

2.3. Sürtünme Kaynağı Parametreleri

Sürtünme kaynağı kontrolü gereken oldukça fazla sayıda parametre içermektedir. Bu yöntemle ilgili değişkenler dönme hızı, sürtünme basıncı, yağma basıncı, sürtünme süresi, frenleme süresi, yağma geciktirmesi süresi ve yağma süresidir. Bunun dışında numune geometrisi ve numunenin yapıldığı malzemeden kaynaklanan diğer parametreler de söz konusudur. Ancak yapılan çalışmalar yöntem üzerinde en etkili olan ve optimizasyonu gereken parametrelerin dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yağma basıncı ve yağma süresi olduğunu göstermiştir. Kaynak parametreleri incelendiğinde en önemli bazı parametreler

aşağıda detaylı olarak incelenmiştir.

2.3.1. Çevresel Hız

Literatürde ara yüzey sıcaklığı ve bağlantı kalitesi üzerinde en etkili parametrenin çevresel hız olduğunu görülmüştür. Yüksek çevresel hız yüksek ara yüzey sıcaklığı üretirken düşük çevresel hız yetersiz ısıtma sonucu kaynak bağlantısını olumsuz etkiler. Yüksek çevresel hızına bağlı olarak deformasyon hızının değişimi kaynak süresini kısaltır. Çelikler için çevresel hız 1,2–1,8 m/s arasında önerilirken 1,2 m/s altındaki hızlar çok yüksek momentler, dolayısıyla üniform olmayan bir yığma üretir. Bununla birlikte, farklı metal bağlantıları için düşük hızlar, gevrek bir intermetalik fazın oluşumunu sınırlandırabilir. Yüksek hızların kullanılması durumunda ise kaynak bölgesindeki aşırı ısınmayı önlemek için sürtünme basıncı ve sürtünme süresi çok dikkatli kontrol edilmelidir. [25]

2.3.2. Sürtünme Basıncı Kuvveti

Sürtünme basınç kuvveti, numune geometrisi ve birleştirilecek malzeme çiftinin plastik şekil değiştirme yeteneğine bağlı olarak değişir. Sürtünme basıncı kuvveti, temas eden ara yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek, yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve ara yüzeyde üniform bir ısıtma sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Sürtünme basıncı, dar bir aralıkta değişmez. Basıncı değişkeni, kaynak bölgesindeki sıcaklık derecesi ve eksenel kısalma ile kontrol edilebilir [26].

2.3.3. Sürtünme Süresi

Sürtünme süresi, sürtünen yüzeylerdeki olası kalıntı ve pislikleri temizleyecek ve gerekli plastisite için üniform bir kaynak bölgesi sıcaklığına ulaşmayı sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Buna karşın sürtünme süresinin aşırı uzun olması ITAB'ın genişlemesine ve aşırı yığılmaya sebep olacaktır [25].

2.3.4. Yığma Süresi

Yığma süresi, malzeme çifti ara yüzeyinde gerekli plastik deformasyonu oluşturmak ve sürtünme kaynağının oluşum mekanizmalarından biri olan difüzyonu hızlandırmak için yığma basınç kuvvetinin uygulandığı süredir [25].

2.3.5 Yığma Basıncı Kuvveti

Sürtünme periyodu sonrasında özellikle çelikler için bir yığma basıncının uygulanması bağlantı kalitesini artırır. Yığma basıncı malzemenin sıcak akma sınırına bağlıdır ve aşırı kaynak yığılmasına sebep olacak kadar yüksek, elverişsiz şekillendirmeye dolayısıyla yetersiz kaynaklanmaya sebep olacak kadar düşük olmamalıdır. Yığma basınç kuvveti, sürtünme periyodu sonrasında malzeme çifti arasında difüzyon mekanizmasını hızlandırmak amacıyla uygulanır. Yığma basıncı, malzemelerin birleştirilebilmeleri için malzemelerin sıcak dövme mukavemetlerinin altında olmamalıdır. Buna karşın yığma basıncı çok yüksek alınırsa aşırı metal deformasyonu oluşur ve bu aşırı yığılma sırasında kaynak bölgesinde metalik olmayan inklüzyonlar arzu edilmeyen enine bir akış göstererek yeniden şekillenirler [25].

Sürtünme kaynağıyla ilgili yapılan araştırmalardan yola çıkarak çeşitli malzemelere göre optimum kaynak parametreleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Malzemelere göre optimum kaynak parametreleri [27]

MALZEME	Çap(mm)	Sürtünme kuvveti(N/mm ²)	Yığma kuvveti(N/mm ²)	Sürtünme süresi(sn)	Yığma süresi(sn)	Çevresel hız(m/sn)
Alaşımsız ve D. Alaşımlı çelikler	20	20-80	80-200	1-100	250	0,5-5
C 60	20	50-80	150-250	3-6	2-3	3,5-6
42 CrMo4	20	50-80-	150-250	3-6	2-3	1,5-3
Yüksek alaşımlı çelikler	20	40-100	120-400	3-120	2-10	0,5-5
X5CrNi18 8	20	60-80	250-300	6-10	2-3	1,5-3
S6-5-3	20	60-100	190-250	10-15	2-3	1,5-3
Y.Sic. Dayanımlı alaşımlar	20	60-180	180-600	5-150	2-15	0,5-5
Nimonic 80	20	60-100	180-400	5-10	2-3	1,5-3
Inconel 713C	20	60-100	400-500	5-10	2-3	1,5-3
Hafif ve ağır metaller	20	10-80	20-250	1-8	2-5	0,5-4
E – Cu	20	10	20-60	1-6	2-5	4
TiAl6V4	20	20-30	60-80	2-8	2-5	1-4
Al 99.5	20	10-30	30-80	0,1-4	2-5	2-4
AlMgSi0.5	20	30-80	50-150	0,1-6	2-5	0,5-2
Pb	20	50-70	70-100	2-4	2-5	1,5-2

2.4.Sürtünme Kaynağı Metotları

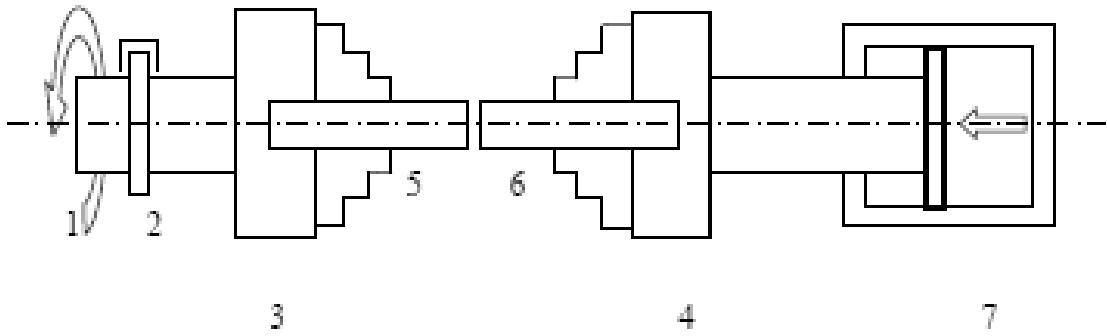
Sürtünme kaynağı, gerekli mekanik enerjiyi sağlayan kaynağa göre farklı isimler alabilir. Genelde iki tür sürtünme kaynağı vardır. Bunların dışındaki yöntemler bu iki yöntemin ortak kullanıldığı ve frenleme biçimine göre dallara ayrılan yöntemlerdir.

Sürtünme kaynağı yöntemlerinde, tahrik şekli ve yığma işlemi birbirinden farklıdır.

2.4.1. Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı

Birleştirilecek parçalardan biri eksenini etrafında döndürülmekte diğeri ise eksenel yönden hareketli olarak dönen parçaya belirli bir süre bastırılmaktadır. Sürtünen yüzeylerde yeterli sıcaklığa erişilince dönme işlemi ani olarak durdurulurken basınç arttırılmakta ve yumuşak malzeme bu yüksek basınç altında soğumaya bırakılmaktadır.

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 (Şekil 2.4) [28]

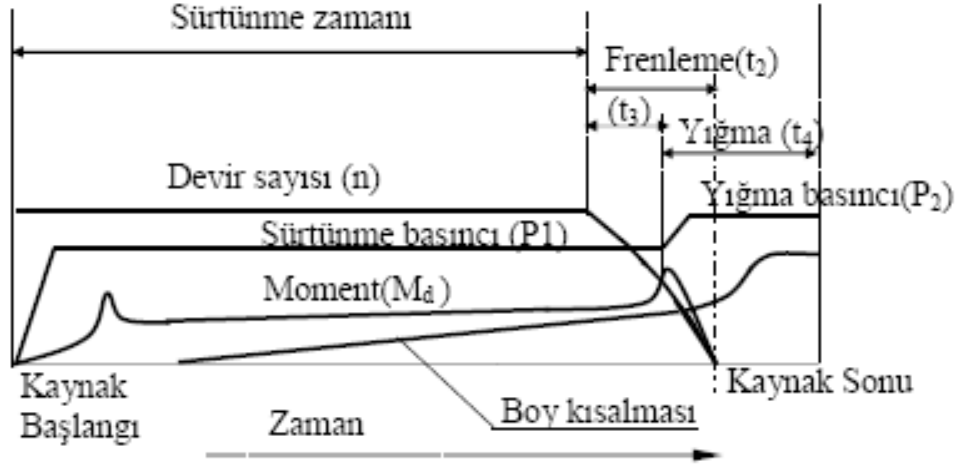


Şekil 2.4. Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı

- | | |
|--|---------------------|
| 1. Tahrik motoru | 5. Dönen iş parçası |
| 2. Fren | 6. Sabit iş parçası |
| 3. Dönen iş parçasının bağlandığı ayna | 7. Yığma silindiri |
| 4. Sabit parçanın bağlandığı ayna | |

Şekil 2.5'te sürekli tahrikle sürtünme kaynağı yönteminde kaynak parametrelerinin zamana göre

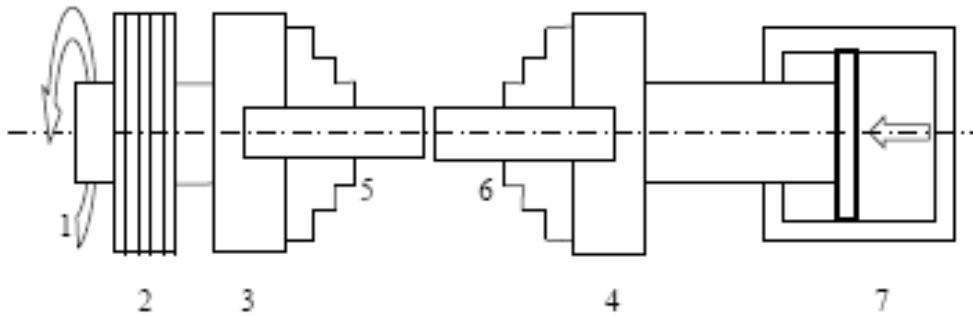
değişimi gösterilmektedir.



Şekil.2.5. Sürekli tahrikle sürtünme kaynağı yönteminde zamana bağlı kaynak parametreleri

2.4.2. Volan Tahrikle Sürtünme Kaynağı

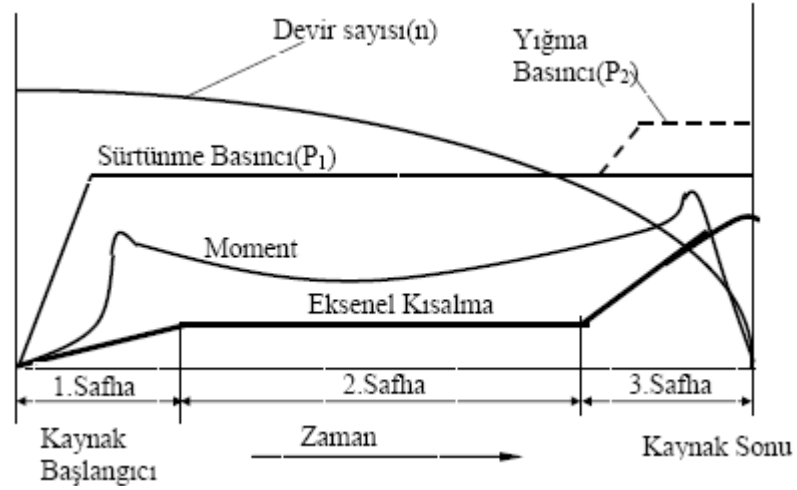
Bu yöntemde bir volandaki kinetik enerjiden yararlanılır. Volan, işlemden önce belli bir devir sayısına getirilerek tahrik motoru devreden çıkarılır. Birleştirilecek parçaların birbirine bastırılmasıyla sürtünen yüzeyler ısınır ve kaynak edilir. Volan ise gittikçe artan bir şekilde yavaşlar ve durur. Ancak bundan sonra basınç (p) ve sıcaklık (T) azalmaya başlar ve moment (M_d) ile devir sayısı (n) birlikte sıfıra erişir. Boy kısalması (Δl) ise eriştiği değerde kalır. Burada önceki proseste görülen dövme zamanı t_y yoktur. Bu nedenle volanlı sürtünme kaynağı işlemi daha kısa zamanda gerçekleşmektedir [28].



Şekil 2.6. Volan tahrikle sürtünme kaynağı

1. Tahrik motoru
2. Değiştirilebilir volan
3. Dönen is parçasının bağlandığı ayna
4. Sabit parçanın bağlandığı ayna
5. Dönen is parçası
6. Sabit is parçası
7. Yığma silindiri

Şekil 2.7’de volan tahrikle sürtünme kaynağı yönteminde kaynak parametrelerinin zamana göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil.2.7. Volan tahrikle sürtünme kaynağı yönteminde zamana bağlı kaynak parametreleri

2.4.3. Kombine Sürtünme Kaynağı

Her iki kaynak işleminin yapıldığı kaynak türüdür. Kaynak işlemi sürtünme ve yığma safhalarını içermektedir. Hem atalet ve hem de sürtünme kaynağı için moment eğrilerinin değişimi işlemin açıklanması için önemli değer taşımaktadır. Prosesin başlangıcında kuru sürtünme durumu olup ve bu sürtünmenin etkisiyle moment eğrisi bir zirve yaptıktan sonra dengeye gelir. Süreç içersinde oksit tabakalarının parçalanması sonucu çıplak yüzeyde temaslar sırasında kuvvetli atomsal bağlar oluşmaya başlar. Sürtünme hareketi ile bu bağlar

koparılmaya çalışılır. Sonuçta bu temas noktalarında büyük adhezyon kuvvetleri oluşur, moment artar ve sıcaklık istenilen düzeye ulaşır. Frenleme sonrası hız azalırken moment de sıfıra düşer. Tasarım olarak sürtünme kaynağı makineleri torna, matkap gibi metal işleme makinelerini andırmaktadır ve ilk sürtünme kaynağı makineleri bu tezgâhların modifiye edilmiş şekilleridir.

Temel kaynak parametreleri; devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme kuvveti, yığma süresi, yığma kuvveti ve frenlemeye başlama zamanıdır.

2.5. Birleşme Bölgesindeki İç Yapı

Sürtünme kaynağında yapılan kaynak dikişinde de, ergitme ve difüzyon kaynaklarındaki gibi, kaynak malzemelerinin birbirine karıştığı bir bölge ve bu bölgenin etrafında her iki malzeme tarafında da ısıdan etkilenmiş alanlar mevcuttur. Malzemelerin birbirine karıştığı bölgede difüzyon söz konusu olup atomlar karşılıklı yer değiştirir. Isıdan etkilenen bölgeler genelde kaynak sırasında oluşan sıcaklığın, değer olarak yaklaşık malzemelerin erime sıcaklıklarının yarısına kadar çıktığı ve daha da üzerine çıktığı alanlardır.

Sürtünme kaynağı sırasında farklı malzemelerde meydana gelebilecek içyapı değişimleri aşağıda sıralanmıştır:

- a) İntermetalik fazın oluşması.
- b) Yüksek karbonlu alaşımsız çeliklerde karbon miktarının azalması
- c) İç yapı da rekristalizasyon
- d) Ergitme sıcaklığı malzemelerin kendinden daha az olan ötektik alaşımların oluşması.
- e) İç yapıda tane irileşmesinin olması
- f) Çeliklerde martenzitik içyapı dönüşümü

Yukarıda maddeler halinde verilen durumlar, kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler.

İntermetalik fazlar sert ve gevrek olduklarından kalınlıkları belli genişliği aşınca bulundukları tabaka boyunca aşırı bir gevrekleşme gösterirler.

Alaşımsız çeliklerde karbon azalması lokal olarak mukavemet değerlerinin azalması demektir. Bu şekilde oluşan yumuşak bölgelerin kaynak bağlantılarının mukavemeti de az olacaktır. İçyapı da rekristalizasyon veya tanelerin irileşmesi, yumuşak bölgelerin oluşmasına

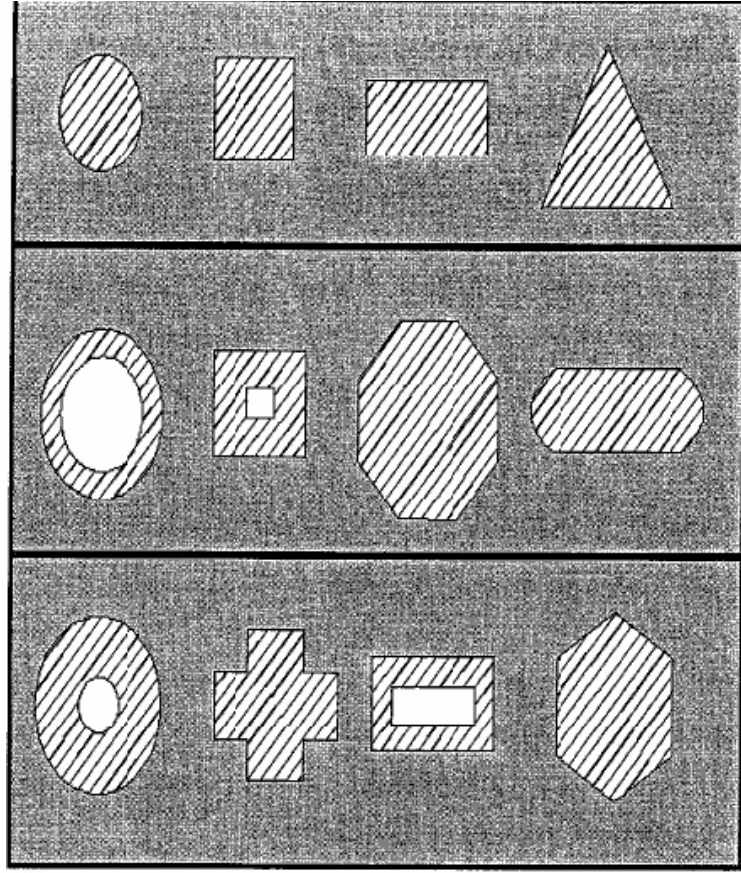
neden olur. Martenzitik dönüşüme uğrayan bölgeler de belli bir büyüklük ve sertliği aşınca intermetalik fazlarda olduğu gibi gevrekleşmeye neden olurlar.

Sürtünme kaynağının kısa sürmesi ve bu sırada sıcaklık artarken, daha sonrada şişirme esnasında aşın plastik deformasyonların meydana gelmesi, diğer kaynak metotlarına göre malzeme içyapı dönüşümünü azaltıcı yönde bir avantaj sağlar [29].

2.6. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Parça Geometrileri

Sürtünme kaynağı genel olarak ekstenel simetriye sahip ve dairesel kesitli parçaların birleştirilmesinde kullanılırken, cihazların otomasyonu ve bilgisayarlı kontrol olanaklarının gelişmesiyle birlikte daire dışı kesitli parçaların birleştirilmesinde de kolaylıkla kullanılmaktadır.

Sürtünme kaynağı ile hem içi dolu hem de boş kesitlerin kaynağını yapmak mümkündür. Dolu kesitlerde parça için çap değeri 1 mm' den 300 mm' ye kadardır. Parçalar eğer boş ise, birbirine benzer büyüklükteki kesit alanlarına sahip olanları sürtünme kaynağı ile birleştirilebilir. Günümüzde yapılan çok sayıdaki araştırmalar sonucunda, sürtünme kaynağı ile birçok basit biçimli parçanın birleştirilmesi imkânı ortaya çıkmıştır. Az önce bahsedilen teknolojinin gelişmesiyle, sürtünme kaynağı cihazındaki dönel aynanın istenilen pozisyonda frenlenmesi sayesinde, dönel simetrisi olmayan kesitli parçaların da alın kaynağının yapılabileceği ve meydana gelebilecek açısız çarpımların önlenebileceği ortaya konmuştur (Şekil 2.8) [30] .



Şekil 2.8. Sürtünme Kaynağına Uygun Parça Kesitleri [31]

2.7. Sürtünme Kaynağı Yapılabilen Malzemeler

Farklı özellikteki malzemelerin birleştirilmeleri endüstride büyük önem arz etmektedir. Sürtünme kaynağı teknikleri, benzer ve benzer olmayan birçok malzeme çifti için son derece uygundur. Malzeme karakteristikleri hakkındaki bilgiler, metalik malzemenin ve malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynağına uygun olup olmadığı konusunda kesin bilgi vermez.

Metalik malzemenin veya kombinasyonlarının sürtünme kaynağına uygunluğu hakkındaki bilgiler pratikten ve deneylerden ortaya çıkmaktadır. Her yeni malzeme ve malzeme kombinasyonlarında sürtünme kaynağına uygunluk, birleştirilecek parçalar için optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ön deneylerle ortaya çıkarılabilmektedir. Başka yöntemlerle kaynağına uygun olmayan birçok malzeme ve kombinasyonları sürtünme kaynağı yapılabildiğinden, diğer kaynak yöntemleri için söz konusu olan kaynağına uygunluğun belirlenmesindeki kriterler sürtünme kaynağına kullanılamazlar [26].

Ayrıca sürtünme kaynağı farklı termik ve mekanik özelliklere sahip metallerin kaynağında da kullanılır ki bu malzemeler çoğunlukla diğer kaynak yöntemleriyle kaynaklanamaz. Erime sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda çalışılması ve kısa kaynak süresi sürtünme kaynağına bu imkânı vermektedir [25]

Demir esaslı malzemeler, yumuşak çelikten, yüksek alaşımlı çeliklere kadar uzanan çok geniş bir aralıkta sorunsuz olarak kaynak edilebilmektedirler. Yumuşak elikler yüksek alaşımlı çeliklere göre daha kolay kaynak edilebilmektedirler. HSS türü yüksek alaşımlı çelikler ise daha dar bir parametre aralığında ve daha yüksek eksenel kuvvetlerde kaynaklanabilir. Bunların tokluğu ve çatlak hassasiyeti dikkat edilmesi gereken bir konudur, parçalarda oluşan çapaklar kesinlikle alınmalıdır. Çünkü bu çapaklar çatlak başlangıcı için uygun yerlerdir [25]

Çizelge 2.2 Malzemeler ve sürtünme kaynağına uygunluğu [32]

	Ticari Saf Alüminyum	Alüminyum Alaşımları	Bakır	Bakır Alaşımları	Yumuşak Çelik	Orta Karbonlu Çelik	Düşük Alaşımlı Çelik	Sertleştirilmiş Çelik	Yüksek Hız Çeliği	Östenitik Paslanmaz Çelik	Ferritik Paslanmaz Çelik	Duplex paslanmaz Çelik	PH Paslanmaz Çelik	Martenzitik Paslanmaz Çelik	Nikel	Nikel Alaşımları	Niobyum	Titanyum Alaşımları	Tungsten	Zirkonyum
Ticari Saf Alüminyum																				
Alüminyum Alaşımları																				
Bakır																				
Bakır Alaşımları																				
Yumuşak Çelik																				
Orta Karbonlu Çelik																				
Düşük Alaşımlı Çelik																				
Sertleştirilmiş Çelik																				
Yüksek Hız Çeliği																				
Östenitik Paslanmaz Çelik																				
Ferritik Paslanmaz Çelik																				
Duplex Paslanmaz Çelik																				
PH Paslanmaz Çelik																				
Martenzitik Paslanmaz Çelik																				
Nikel																				
Nikel Alaşımları																				
Niobyum																				
Titanyum Alaşımları																				
Tungsten																				
Zirkonyum																				

1	Kaynak Edilebilir	4	Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır
2	Kaynak Edilebilir Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Olmalı	5	Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Olmalı
3	Kaynak Edilebilir Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Tavsiye Edilir	6	Kaynak Edilebilirlik Alaşım Miktarına Bağlıdır Kaynak Başlangıcında Isıl İşlem Tavsiye Edilir

2.8. Sürtünme Kaynağı Uygulama Alanları

Sürtünme kaynağı yıllardır, hızlı, çevreye zararlı olmayan ve güvenilir bir kaynak yöntemi olarak kabul edilmektedir. Sürtünme kaynağı, takım üretiminde ve otomotiv sanayinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Sürtünme kaynağından hafif yapıların elde edilmesinde de yararlanılır. Diğer uygulama alanları; elektroteknik, yapı endüstrisi ve tesisat yapımıdır.

Sürtünme kaynağı öncelikle kütle ve seri imalatla aynı veya farklı malzemelerden makine parçalarının birleştirilmesinde uygulanır. Birçok hallerde bu yöntem küçük parça sayılarında da ekonomik olabilmektedir, özellikle diğer yöntemlerle kaynak yapılmayan veya kötü kaynak edilebilen malzeme kombinasyonları söz konusu ise bu yöntem uygulanır. Halen mevcut olan sürtünme kaynağı makineleriyle 0,6–200 mm çaplı makine parçaları kaynak yapılabilir. Günümüzde çelik borular için maksimum çap 900 mm, kalınlığı da $S = 7$ mm'dir [33]. Sürtünme kaynağı günümüzde değişik endüstrilerde uygulama alanı bulmuştur. Sürtünme kaynağının uygulanmasına dair örnekler şu şekilde sıralanabilir:

A) Otomotiv Endüstrisi

Supaplar, kadran milleri, fren milleri, akslar (rot kolu, çeki kolu, stabilizer vb), vites kolları, turbo dondurucular, ön yıkama odaları, şanzıman parçaları, ön ısıtma odaları, boru milleri, taşıyıcı aks boruları gibi (Şekil 2.9 – Şekil 2.11).



Şekil 2.9. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş egzoz supapları [34]



Şekil 2.10. Ticari araçlarda kullanılan, sürtünme kaynağı ve sıcak presleme uygulanmış “V” çeki kolları



Şekil 2.11. Ticari araçlarda sürtünme kaynağı uygulanmış çeki kolları

B) Havacılık ve Uzay Endüstrisi

Rotorlar, türbinler, miller, itme jetleri (memeler), yanma odaları, borular, flanşlar, fittingler (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Sürtünme Kaynağı ile İmal edilmiş uçak parçası

C) Takım Endüstrisi

Helisel matkaplar, freze çakıları, raybalar, çelik kalemler, delik zımbaları.

D) Makine İmalatı ve Endüstrisi

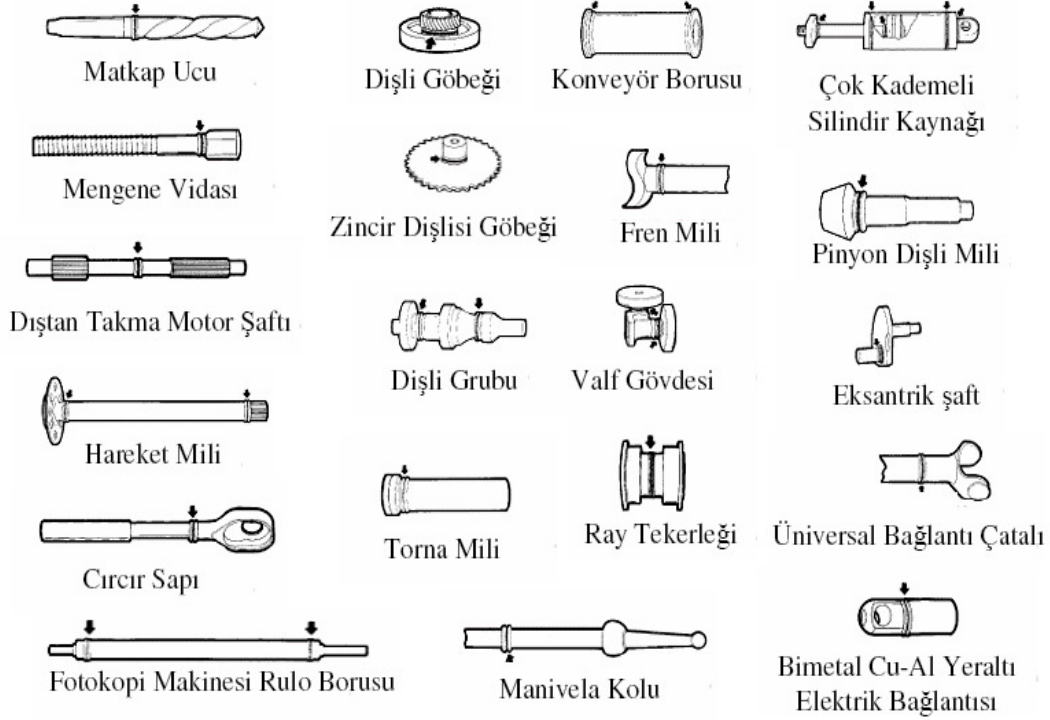
Miller, borular, flanşlar, fittingler, dişli çarklar, hidrolik silindirler, piston kolları, sonsuz vidalı miller, krank milleri, valflar, matkap uçları (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş dizel motor pistonu [34]

E) Elektronik ve Elektroteknik Endüstrisi

Gaz analizleri alıcı kameralar, kromatografiler için ayırma sütunları, röntgen cihaz tüpleri için döner anod miller, sürekli lehim uçları, devre kontakları, geçiş parçaları [33]. Genel olarak bu yöntemle üretilmiş parçalara ait örnekler Şekil 2.14'ta verilmiştir.



Şekil 2.14. Sürtünme kaynağı ile imal edilmiş parçalara örnekler [35]

2.9. Sürtünme Kaynağının Ülkemizdeki Durumu

Ülkemizde de sürtünme kaynağı endüstride geniş uygulama alanı bulmuştur. Bunlar arasında İzmir'de Ege Endüstri A.Ş., İstanbul'da Supsan A.Ş. ve Konya'da Supar A.Ş. sürtünme kaynağını, büyük miktarlardaki üretimler için ülkemizde kullanan işletmelerdir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Türkiye’de sürtünme kaynağı kullanan işletmeler ve bu işletmelere ait veriler

		TÜRKİYEDE SÜRTÜNME KAYNAĞINI KULLANAN İŞLETMELER		
		EGE ENDÜSTRİ A.Ş.	SUPSAN A.Ş.	SUPAR A.Ş.
Sürtünme kaynağıyla birleştirilen malzemeler (isim veya DIN numaraları)		5035 1035	X45CrSi93 NiCr20TiAl X55CrMnNiN208 X33CrNiMnN238 X53CrMnNiN214 X53CrMnNiNbN219 X50CrMnNiNbN219	X45CrSi93 X53CrMnNiN219
İmalatta kullanılan sürtünme kaynak makineleri	Adet	2	3	2
	Cinsi (marka)	Thompson	Blacks, Gatwick, Kuka	Kuka, Gatwick
	Tipi	Klasik	Hidrolik	PLC Kontrollü, Hidrolik
Sürtünme kaynağıyla imal edilen parça isimlerinden örnekler		Diferansiyel kovanı, İlave dingil	Motor supapları	Motor supapları
Üretim hacmi (Adet, Kg,...)	Günlük	78/1 vardiya 168/2 vardiya 258/3 vardiya Kovan üretimi	–	6500 Adet
	Yıllık	Yaklaşık 130.000 Adet kovan ve ilave dingil üretimi	3.000.000 adet	2.000.000 adet
Yaklaşık olarak	Yurtiçi / Toplam satışlar oranı	16.7 milyon dolar (oran değil)	–	%55
	Yurtdışı / Toplam satışlar oranı	7.5 milyon dolar (oran değil)	–	%45
Birleştirme sonrası parçalara uygulanan testler (Mekanik, mikroyapı, korozyon, v.s.) ve ısı işlemler		Her muyluya 80 ton baskı kuvveti uygulanmaktadır.	Mikroyapı kontrolü Eğme testi Kırma testi Gerilim alma	Kırılma testi Eğme testi Ultrasonik muayene Isıl işlem (gerilme giderme)

2.10. Sürtünme Kaynağının Avantajları

- a) Kullanılan enerji bakımından, diğer kaynak yöntemlerine göre daha tasarrufludur.
- b) İlave metal kullanılmadığı için, bütün kesitte düzgün bir kaynak kalitesi sağlanabilir.
- c) Kaynak bölgesi, kir, pas ve oksit içermez.
- d) Kaynak sonrası oluşan kaynak bölgesinin mukavemeti, birleştirilen malzemelerin dayanımına eşit hatta bazı durumlarda daha fazla olabilir.
- e) Bilinen kaynak yöntemleriyle birleştirilebilmesi zor olan farklı kompozit malzemeler sürtünme kaynak yöntemiyle kolaylıkla birleştirilebilmektedir.
- f) Kaynağın yapım aşaması çok kolay ve kaynak yüzeylerinde tam anlamıyla bir birleşme söz konusudur.
- g) Kaynak parametrelerini kontrol edebilmek basittir.
- h) Sadece silindirik değil, çok farklı kesitteki malzemelerin kaynağını yapmak mümkündür.
- i) Kaynak sırası ve sonrası ısı değişikliklerindeki hızlı değişimler, kaynak bölgesinde ince taneli bir yapı oluşumuna sebep olur, buda mukavemeti korur.
- j) Sürtünme kaynağı sırasında sürtünmenin etkisiyle oksit, yağ gibi yabancı maddeler yüzeyden uzaklaştırılır.
- k) Kaynak öncesi ayrıca bir temizleme gerekmez.
- l) Kaynağın süresi kısa, birleştirilme sıcaklığı düşüktür.
- m) Isıdan etkilenen bölge dardır.
- n) Koruyucu bir atmosfere gerek yoktur.

2.11. Sürtünme Kaynağının Dezavantajları

- a) İş parçasının boyutları, sürtünme kaynak makinesinin boyutlarıyla sınırlanmaktadır.
- b) Kaynak sonrası gevrekleşme söz konusudur.
- c) Oksijene karşı büyük ilgi vardır.
- d) Kaynak sonrası parçaların boyunda belirli bir kısalma söz konusu olduğundan, malzeme sarfiyatı söz konusudur.
- e) Genelde malzeme listesini kendi eksenini etrafında dönebilen malzemeler oluşturmaktadır.
- f) Büyük kesitli parçalarda homojen bir ısıtma söz konusu olmadığından kaynağın yapımı zorlaşmaktadır.
- g) Sürtünme kaynağı makinesinin ve teçhizatının maliyetleri yüksektir.
- h) Su verilmiş veya su alınmış malzemelerde mukavemet düşer.
- i) Özellikle yüksek karbonlu çeliklerde kaynak sonrasında sertleşme söz konusu olur.
- j) İş parçaları, eksenel yönde basınca, ısıya ve torka karşı dayanıklı olmalıdırlar.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Malzemeler ve Özellikleri

Deneylerde kullanılan malzemeler ticari ürünlerden Ck 45 ve St 52-3 olup, ZF Lemförder Aks Modülleri San. ve Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir. Malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi [%] [37, 38].

Malzeme	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Mo	Sn
Ck 45	0.38	0.71	0.23	0.027	0.024	0.018	0.05	0.21	0.004	0.003
St 52-3	0.22	1.60	0.55	0.030	0.020	0.020	-	-	-	-

Ck 45 çeliği, otomotiv, makine, motor ve aparat imalinde, aktarma organı mili ve dişlisi gibi yüksek zorlanmalı parçaların yapımında, yük kancası ve manivela kolu imalinde kullanılmaktadır.

St 52-3 çeliği, endüstriyel binalarda, köprü ve demiryollarında, geçici ve kalıcı zemin altyapı projelerinde, denizde yapılan dalgakıranlarda, gemi yapımı, otomotiv sektöründe yüksek dayanımın istendiği emniyet elemanlarında, şehirlerarası elektrik kabloları taşıyan direklerde, petrol ve gaz offshore platformlarda, çok amaçlı sosyal tesisler, ticari yapılar, binaya yük bindirmeyen çatı katlarında kullanılmaktadır.

Bu malzemeler, otomotiv sektöründe rot kolu, çeki kolu ve rotil vb. gibi taşıt emniyet elemanlarının, çeşitli birleştirme teknikleri (klasik kaynak yöntemleri, sıcak presleme vb.) ile üretiminde kullanılmaktadır. Bu malzemelere uygulanan bu yöntemlerin yanında sürtünme kaynağının da yapılabilişi araştırılmıştır.

Sürtünme kaynağı ile kaliteli, yüksek mukavemetli birleştirmeler elde edilebilir. St 52-3 çeliği piyasada nispeten temin edilmesi zor ve pahalı bir malzeme olarak bilinir. Ck 45 karbon çeliği ise malzeme piyasasında kolaylıkla bulunur ve maliyeti diğerine göre daha düşüktür.

Bu malzemelerin üretici firmanın kataloglarında verilen mekanik özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge. 3.2. Malzemelerin mekanik özellikleri [37, 38].

Malzeme	Akma Muk. [MPa]	Çekme Muk. [MPa]	Kopma Uzaması [%]	Sertlik [HV]
Ck 45	433–447	650–666	23,6	229
St 52-3	355	490–630	22	207

Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de verilen rot kolu ve çeki kolu üretiminde kullanılan malzemelerin 28.05.2008 tarihli fiyat listesine göre maliyet analizi Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Maliyet Çizelgesi (fiyatlar YTL/Kg) [39].

Malzeme	Büyük Kesit	Orta Kesit		Lama
	Ø 70 ve üzeri Platina Ø 70–220	Ø 30–73	Ø22–29 ve Ø0–65	
Ck 45	2,12	2,20	2,26	2,20
St 52–3	3,21	3,33	3,42	3,35

Çizelge 3.3’den St 52-3 malzemenin Ck 45’e göre %40-50 gibi daha pahalı olduğu görülmektedir. Bu durumda bu iki çeliğin birleştirilmesi ve yeterli mukavemetin sağlanabilmesi ile malzeme maliyetinde tasarruf sağlanabilecektir.

ZF Lemförder Aks Modülleri San. Ve Tic. A.Ş. ‘de çeki kolu ve rot kolu üretiminde kullanılan Ck45 malzemeden imal edilen rot başı parçasının St52-3 malzemesine sıcak presleme yöntemi denilen özel yönelme yapılan birleştirme işleminin maliyeti şu şekilde oluşmaktadır.

Sürtünme kaynağıyla yapılacak bir birleştirme tekniğiyle Ck 45 in kullanıldığı rot başı parçasının 1 tanesinden 0,839 kg tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca bu 0,839 kg’lık kısmın özel CNC tezgahlarında işlenmesine karşılık gelen işçilik ve diğer amortismanların bedeli 9,65 YTL / adet’ dir. Yılda yaklaşık 93528 adet Ck 45 malzemesinin kullanıldığı rot başı parçasından 0,839 kg’lık kısımdan ve bir adedinin işçilik bedeli olan 9,65 YTL / adet tasarruf edilerek toplamda ;

$$93528 \times 0,839 \text{ kg} = 78470 \text{ kg}$$

$$78470 \text{ kg} \times 2,20 \text{ YTL}(\text{Ø 30–73 malzeme için fiyatı}) = 172634 \text{ YTL}$$

$$9,65 \text{ YTL} \times 93528 = 902545 \text{ YTL}$$

$$172634 \text{ YTL} + 902545 \text{ YTL} = 1075179 \text{ YTL} \text{ kar edilecektir.}$$

3.2. Sürtünme Kaynak Cihazı ve Teknik Özellikleri

Belirlenen malzemeleri birleştirmek için, Balıkesir Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinde bulunan Şekil 3.1- Şekil 3.4'deki sürekli tahrikli sürtünme kaynağı cihazı kullanılmıştır. Kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesinde deney parametrelerinin ayarlanması ve kontrolü elle olarak sağlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda, parametrelerden sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığma süresi sabit tutulup (A, B ve C grubu) yığma basıncı değiştirilerek birleştirme işlemleri yapılmıştır. Daha sonra da sürtünme basıncı ve yığma basıncı sabit tutulup (D grubu) sürtünme süresi ve yığma süresi artırılarak deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan sürtünme kaynağı cihazı



Şekil 3.2. Elektrik motoru, hidrolik pompa motoru ve basınç düzeneği



Şekil 3.3. Elektrik panosu ve zaman kontrol ünitesi



Şekil 3.4. Tezgah kontrol ünitesi

Çalışmalarda kullanılan sürekli tahrikli sürtünme kaynak cihazının teknik özellikleri [31]:

Tezgâh Genişliği: 600 mm	Elektrik Motoru Gücü: 7,5 kW
Tezgâh Boyu: 1550 mm	Hidrolik Pompa Motor Devri: 1420 d/dak
Tezgâh Yüksekliği: 1170 mm	Hidrolik Pompa Motor Gücü: 1,5 Kw
Elektrik Motoru Devri: 1440 d/dak	Hidrolik Pompanın Tipi: Dişli

3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılacak Ck 45 ve St 52-3 silindirik numuneler ZF Lemförder Aks Modülleri San. Ve Tic. A.Ş.'nin kalıp ve takım atölyesinde nümerik kontrollü çubuk malzeme kesme tezgâhında Ø10x80 mm boyutlarında $\pm 0,01$ mm toleransla hassas bir şekilde işlenmiştir.

3.4. Sürtünme Kaynağı ve Kaynak Parametreleri

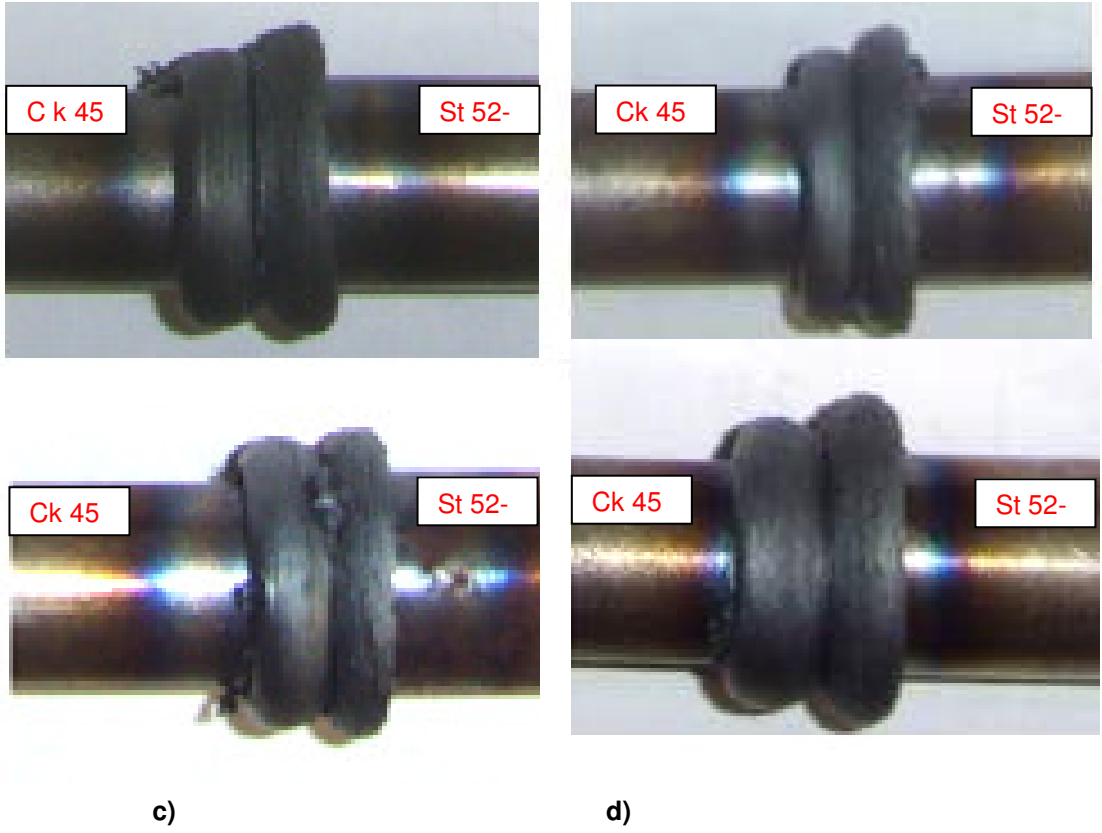
Yapılan literatür çalışmaları ve ön denemeler sonucunda, bu iki farklı çeliğin sürtünme kaynağı için cihazın kapasite ve özellikleri de dikkate alınarak birleştirmeye uygun olabilecek kaynak parametreleri Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kaynak parametreleri

Deney Grubu	Devir Sayısı (n) (dev/dak)	Sürtünme Basıncı (P_1) (daN/cm ²)	Sürtünme Süresi (t_1) (s)	Yığma Basıncı (P_2) (daN/cm ²)	Yığma Süresi (t_2) (s)
A	3000	20	2	25	4
B	3000	20	2	20	4
C	3000	20	2	15	4
D	3000	20	4	25	6

Deneylerde sürtünme basıncı sabit tutularak 20 daN/cm² olarak alınmıştır. Yığma basıncı ise sürtünme basıncından düşük (15), ona eşit (20 daN/cm²) ve büyük (25 daN/cm²) olarak ayarlanmıştır. Burada yığma basıncının değişiminin birleşmeye etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Sürtünme süresi 2 s, yığma süresi 4 s tutulup sadece 4 numaralı deneyde sürtünme süresi ve yığma süresi artırılarak 4s ve 6 s'ye çıkarılarak bu sürelerdeki artışın da kaynak kalitesine etkisi amaçlanmıştır.

Sürtünme kaynağı sırasında, malzemelerin bağlantı yerlerinin özelliklere etkisini sabitlemek için cihazın motoruna bağlı dönel aynaya Ck 45 numuneleri, hidrolik mekanizmaya bağlı olan sabit pense ise St 52-3 numuneleri bağlanmıştır. Birleştirme sonrası numune görüntüleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5.

- a)** A Grubu numunesinin kaynak sonrası görüntüsü
- b)** B Grubu numunesinin kaynak sonrası görüntüsü
- c)** C Grubu numunesinin kaynak sonrası görüntüsü
- d)** D Grubu numunesinin kaynak sonrası görüntüsü

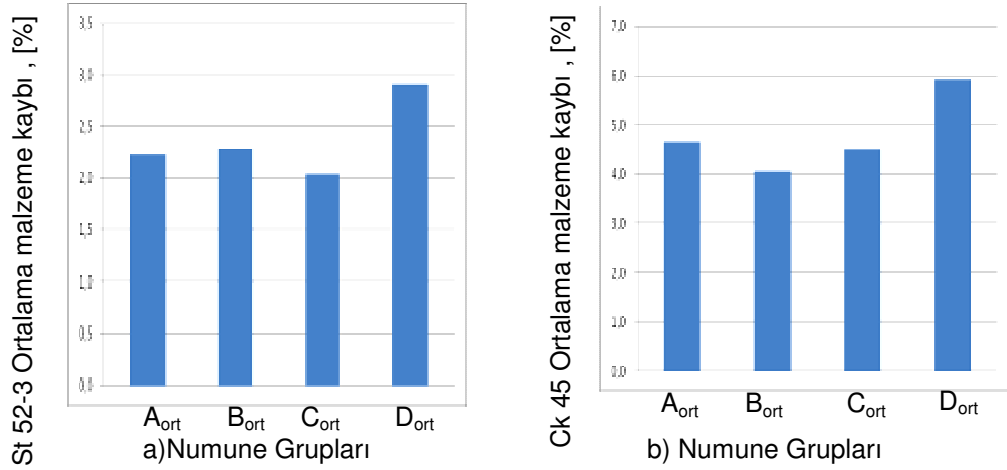
Şekil 3.5. a-d 'de A, B, C ve D deney gruplarında yapılan sürtünme kaynağı sonucunda çapak oluşumu farklılık göstermiştir. Bu çapak oluşumunun Ck 45 malzemede fazla olduğu gözlemlenmiştir ve dolayısıyla Ck 45 tarafında daha fazla malzeme kaybı olduğu söylenebilmektedir. Numunelerin kaynak sonrası boyları ve malzeme kayıpları (%) olarak Çizelge.3.5'de verilmektedir.

Deneylerde kullanılan bütün numunelerin kaynak işlemi öncesi çapları 10 mm boyları 80 mm'dir.

Çizelge 3.5. Sürtünme Kaynağı sonrası numunelerin boyutları ve (%) malzeme kayıpları.

Grup	Ck45 Kaynak Sonrası boyu (mm)	St 52-3 Kaynak Sonrası boyu (mm)	Ck45 malzeme kaybı (%)	Ck45 Ortalama malzeme kaybı (%)	St 52-3 malzeme kaybı (%)	St 52-3 Ortalama malzeme kaybı (%)
A1	76,0	78,0	5,0	4,7	2,5	2,2
A2	76,3	78,2	4,6		2,3	
A3	75,5	79,1	5,6		1,1	
A4	76,2	78,2	4,8		2,3	
A5	77,5	77,5	3,1		3,1	
A6	76,2	78,3	4,8		2,1	
B1	77,4	78,2	3,2	4,1	2,3	2,3
B2	76,2	78,9	4,8		1,4	
B3	76,1	78,2	4,9		2,3	
B4	77,0	77,8	3,8		2,8	
B5	77,0	77,9	3,8		2,6	
B6	76,9	78,1	3,9		2,4	
C1	76,2	78,6	4,8	4,5	1,8	2,0
C2	76,5	78,2	4,4		2,3	
C3	76,4	78,1	4,5		2,4	
C4	77,0	78,1	3,8		2,4	
C5	76,4	78,9	4,5		1,4	
C6	76,1	78,5	4,9		1,9	
D1	75,1	77,6	6,1	5,9	3,0	2,9
D2	75,5	77,9	5,6		2,6	
D3	75,3	77,7	5,9		2,9	
D4	75,2	77,8	6,0		2,8	
D5	75,1	77,6	6,1		3,0	
D6	75,4	77,5	5,7		3,1	

Numune gruplarında oluşan malzeme kayıpları ortalama olarak Şekil 3.6 a-b' de verilmiştir.



Şekil 3.6. a) St 52-3 Ortalama malzeme kaybı , [%]
b) Ck 45 Ortalama malzeme kaybı [%]

Çizelge 3.5. ve Şekil 3.6. da görüldüğü gibi, her iki çelik türü için de en fazla malzeme kaybı D grubu deney parametreleriyle yapılan deneylerde gerçekleşmiştir. Çünkü bu parametrelerin kullanıldığı numunelerdeki sürtünme süresi ve yığılma süresi diğer deneylerdeki sürtünme süresi ve yığılma sürelerinden daha uzundur. Ayrıca deneyler sonucunda Ck 45 malzemesindeki kaybın St 52-3'e göre yine Çizelge 3.5. ve Şekil 3.6. da yüzde oranları olarak belirtildiği gibi daha fazla olduğu görülmektedir.

3.5. Kaynak Bölgesinin Yüzey Sıcaklığının Ölçülmesi

Sürtünme kaynağı deneylerinde sürtünme ile oluşan ısıнын ölçümü, kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı (infrared termometre) ile yapılmıştır (Şekil 3.7). Bu cihaz rahatlıkla taşınabilmekte olup, sıcaklık ölçümünde numuneye temas olmadan, hızlı ve tahribat vermeden kullanılmaktadır. Sıcaklık ölçüm cihazı hedef tarafından yayılan kızıl ötesi enerjiyi toplar ve hedefin yüzey sıcaklığını hesaplar. Bu sıcaklıklar dijital olarak cihazın üstünden takip edilebilir. Bu infrared termometre 200 – 1800 °C sıcaklık ölçümlerini yapabilmektedir. Cihazın hassasiyetinden dolayı 200 °C' nin altındaki sıcaklıklar ölçülememektedir.

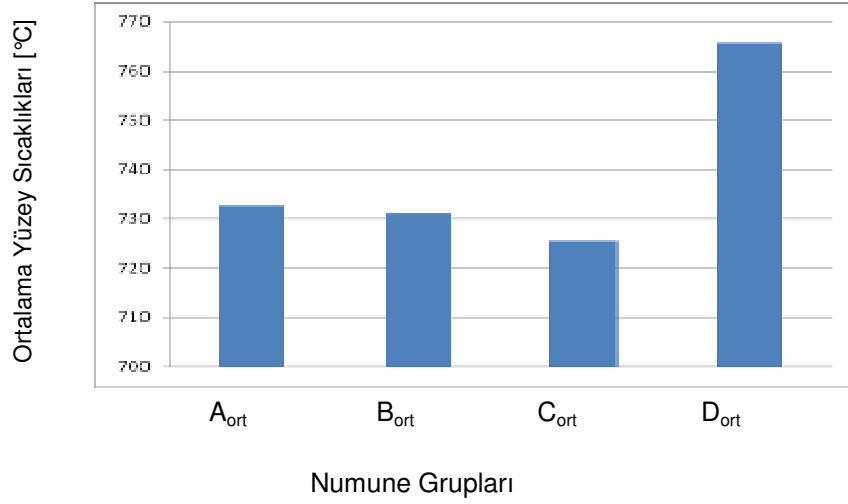


Şekil 3.7. Kızılötesi sıcaklık ölçme cihazıyla yüzey sıcaklık ölçümü

Yapılan sürtünme kaynağında işlem esnasında birleşme bölgesinin maximum yüzey sıcaklıkları Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Sürtünme kaynağı işleminde birleşme bölgelerinin yüzey sıcaklıkları (°C)

Grup	Birleşme bölgesi maximum yüzey sıcaklığı (°C)	Ortalama
A1	738	733
A2	733	
A3	727	
A4	729	
A5	731	
A6	739	
B1	740	731
B2	735	
B3	705	
B4	720	
B5	730	
B6	757	
C1	751	726
C2	750	
C3	732	
C4	707	
C5	710	
C6	705	
D1	775	766
D2	758	
D3	763	
D4	765	
D5	770	
D6	762	



Şekil 3.8. Numune gruplarının ortalama maximum yüzey sıcaklık değerleri (°C)

Çizelge 3.6. ve Şekil 3.8. de görüldüğü gibi en yüksek yüzey sıcaklık değerleri D grubu deney parametreleriyle yapılan kaynaklı birleştirmelerde ortaya çıkmaktadır. A, B ve C grubu numunelerde sürtünme süresi 2 s yığma süresi 4 s iken D grubu numunelerde sürtünme süresi 4 s yığma süresi 6 s. dir. Sürelerdeki bu artış birleşme bölgesindeki yüzey sıcaklığını artırmıştır.

3.6. Çekme Deneyi

Numune çiftlerinin sürtünme kaynağı işlemlerinin ardından çekme testi uygulamak için sürtünme kaynağı yapılan numuneler ZF Lemförder Aks Modülleri San. Ve Tic. A.Ş.'nin Kalıp ve Takım Atölyesinde üniversal torna tezgâhında hassas bir şekilde işlenerek TS 138'e uygun ölçülere getirilmiştir.

Sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin çekme deneyleri Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Schimadzu marka test cihazında uygulanmıştır.



Şekil 3.9. Çekme numunelerinin cihazın çenelerine bağlanması

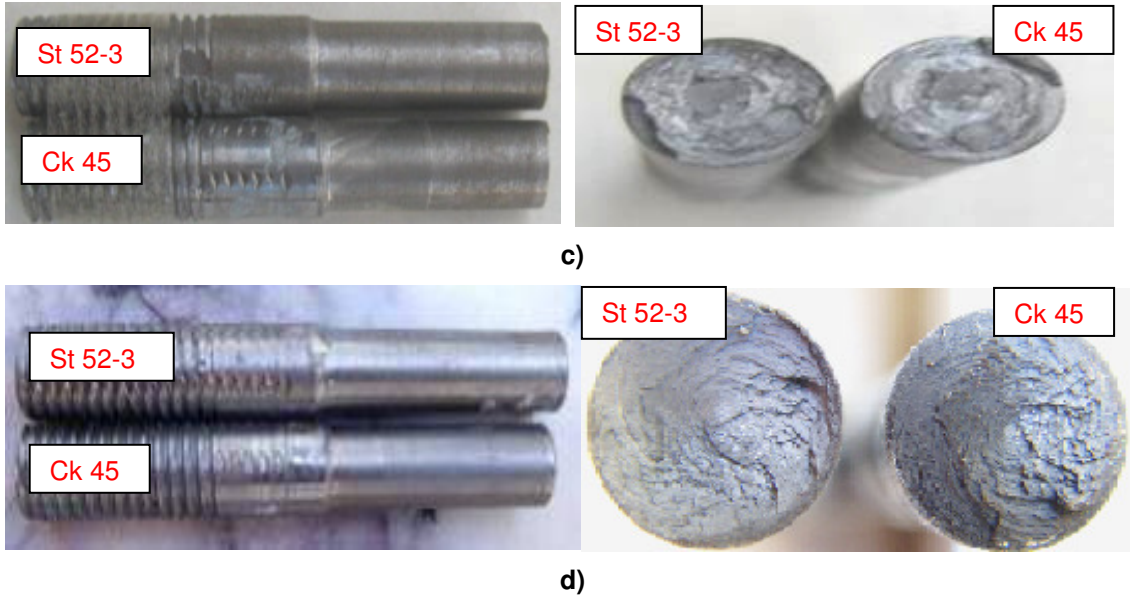
Çekme cihazı kendine ait program ile bilgisayar ile kumanda edilebilir. Bu programda, deney şartları kusursuz bir şekilde yerine getirildiğinde, ortalama hız, akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve birim uzama gibi veriler hatasız bir şekilde hesaplanır. Kaynaklı numuneler çekme cihazına yerleştirilirken, çenelerin numuneleri her iki taraftan da eşit kavramasına dikkat edilmiştir. Bu şekilde dikey ekseninde uygulanan kuvvetin eşit dağılımı sağlanmıştır.



a)



b)



Şekil 3.10. a) A grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelere uygulanan çekme deneyi sonrası kırılma yüzey görüntüleri

b) B grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelere uygulanan çekme deneyi sonrası kırılma yüzey görüntüleri

c) C grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelere uygulanan çekme deneyi sonrası kırılma yüzey görüntüleri

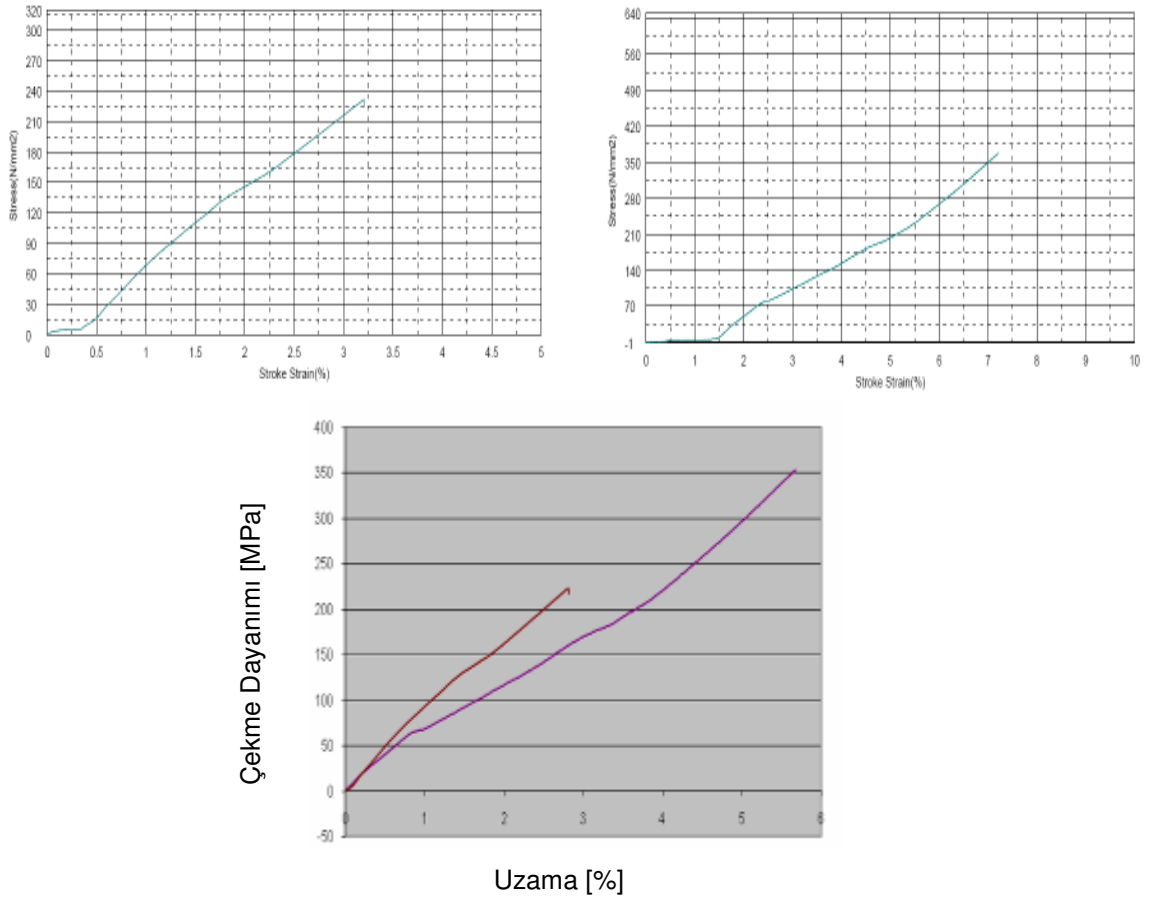
d) D grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılmış numunelere uygulanan çekme deneyi sonrası kırılma yüzey görüntüleri

Şekil 3.10. a-d 'de, sürtünme kaynağı yapılmış numunelere uygulanan çekme deneyi sonrası kopmanın meydana geldiği bölgelerdeki yüzeylerinin makro görüntüleri verilmektedir. Burada yığılma basıncının en yüksek (25 daN/cm^2) olduğu A ve B grubu numunelerde birleşmenin daha iyi olduğu bunun sonucunda da Çizelge 3.6' da verildiği gibi akma ve çekme dayanımlarının B ve C grubu numunelerden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge.3.7. Numunelerin çekme deneyi sonuçları

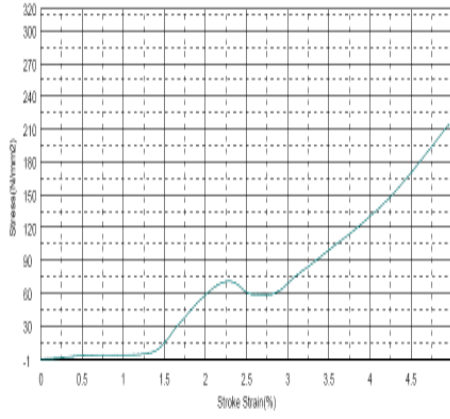
Grup	Çekme Kuvveti (N)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
A5	18475	180,54	367,549	2,15
A6	11659	152,67	231,956	1,86
B2	10778	58,43	214,424	1,74
B3	5359	30,34	106,621	0,89
C4	9768	146,71	194,343	0,96
C5	26975	77,71	536,651	3,21
D5	26421	281,24	525,647	2,84
D6	27132	308,32	512,326	2,52

Çizelge 3.6'da gösterildiği gibi sürtünme kaynağı yapılmış olan her bir deney parametresinden ikişer adet numuneye çekme deneyi uygulanmıştır.

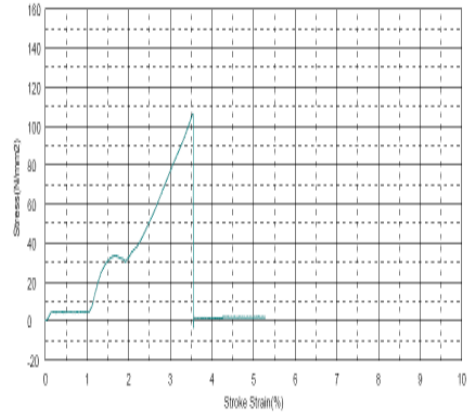


c

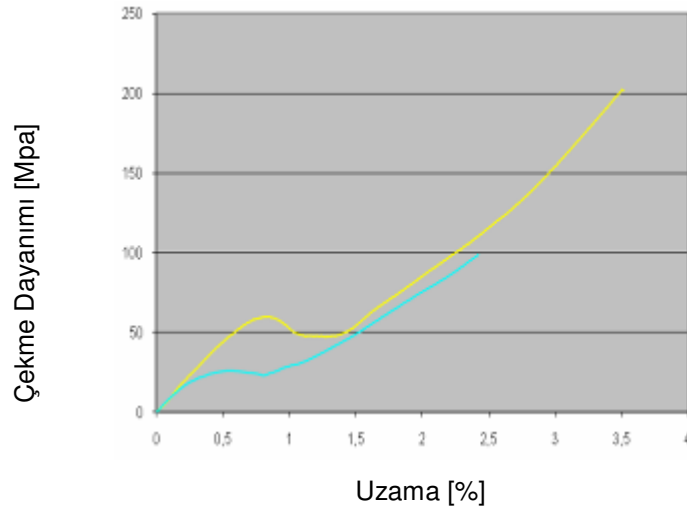
Şekil.3.11.a-c) A grubu deney numunelerinin çekme deneyi grafikleri.



a

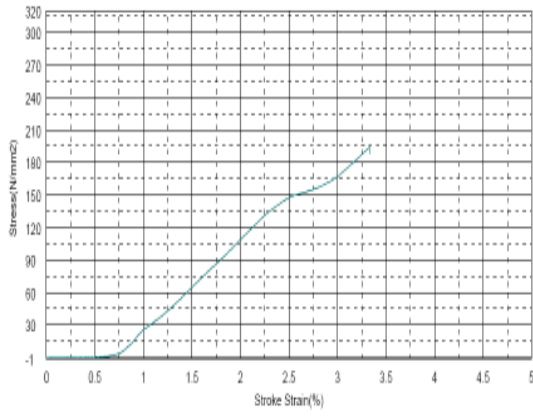


b

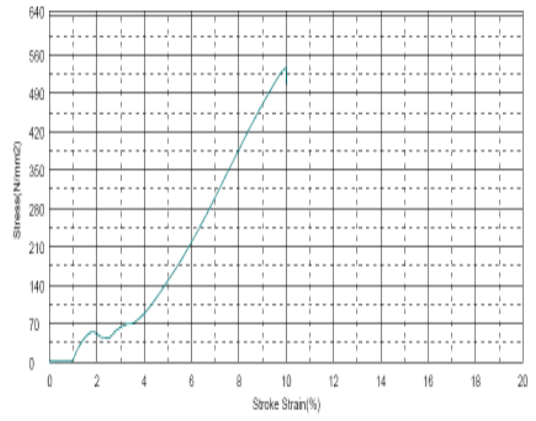


c

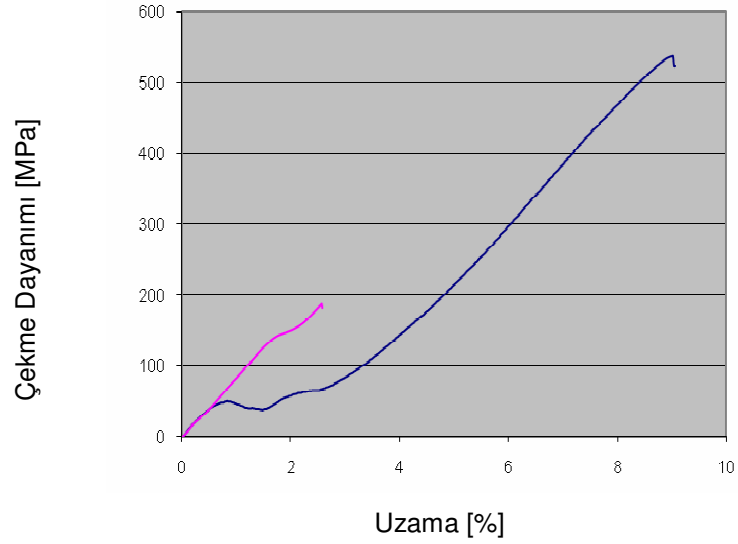
Şekil 3.12. a-c) B grubu deney numunelerinin çekme deneyi grafikleri



a

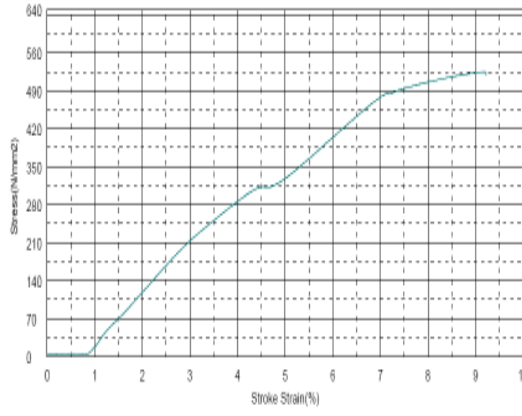


b

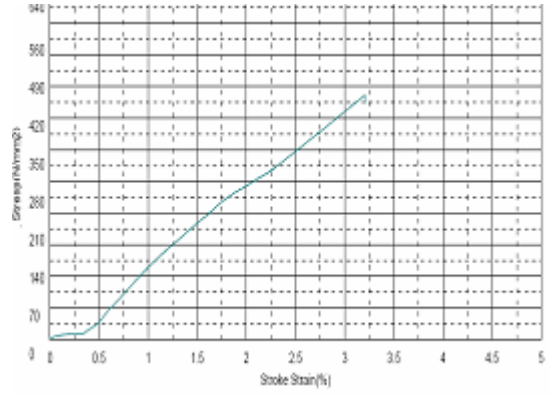


c

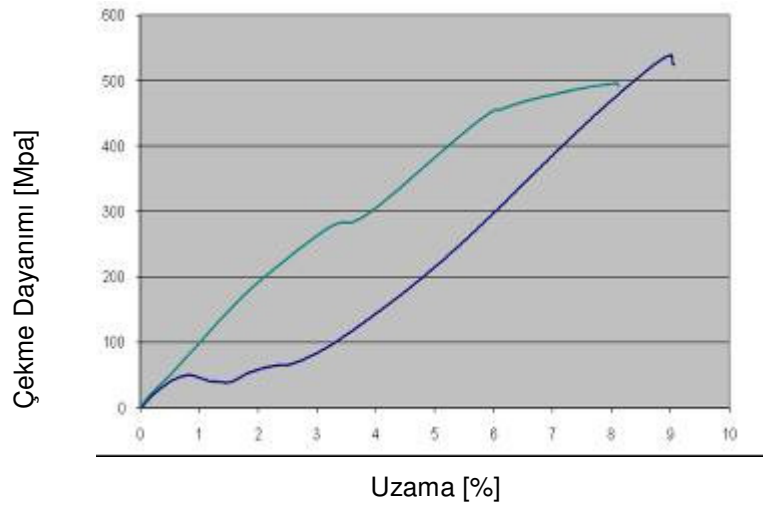
Şekil 3.13. C grubu deney numunelerinin çekme deneyi grafikleri.



a

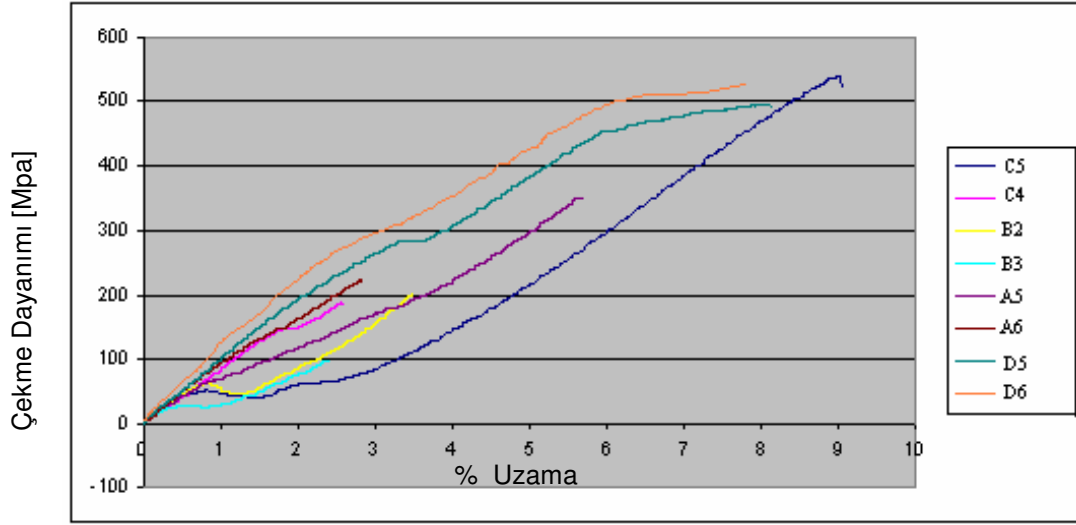


b



c)

Şekil 3.14. a-c) D grubu deney numunelerinin çekme deneyi grafikleri.



Şekil 3.15. Tüm numunelerin çekme grafikleri

Şekil 3.10-14. de 4 farklı deney grubundaki parametrelerle sürtünme kaynağı yapılmış olan numunelere uygulanan çekme deneyi sonuçlarının grafikleri görülmektedir. Çekme deneyi yapıp cihazdan alınan sonuçlar ve grafikler a ve b şekilleri altında gösterildiği gibidir. c şekilleri altındaki grafikler ise çekme deneyi sırasında numunelerin cihazın çenelerinden sıyrılması ile hatalı olarak sonuç veren uzama miktarlarının gerçek uzama değerlerine uygun olarak girilmesiyle ortaya çıkan grafiklerdir.

3.7. Izod Darbe Deneyi Uygulamaları

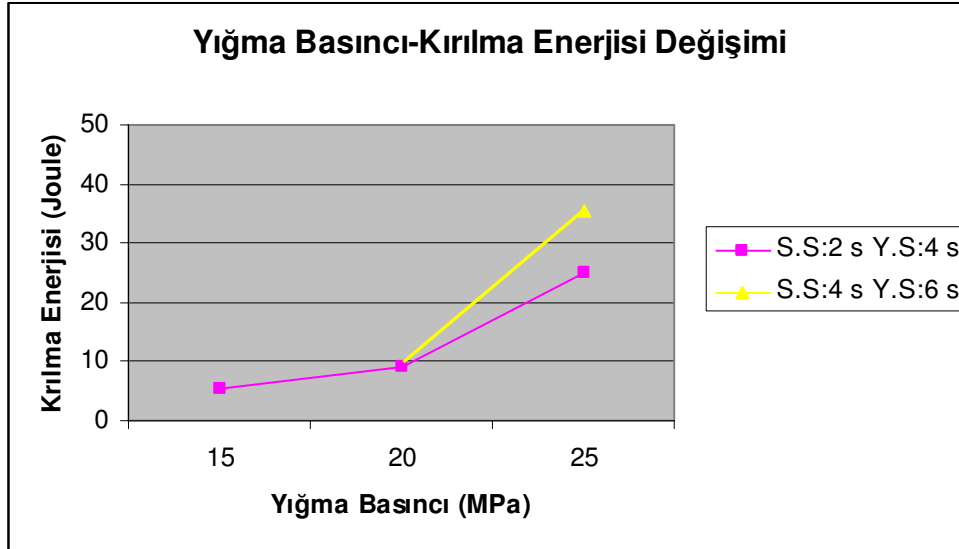
Numune çiftlerinin sürtünme kaynağı işlemlerinin ardından izod darbe deneyi uygulamak için sürtünme kaynağı yapılan numuneler yine ZF Lemförder Aks Modülleri San. Ve Tic. A.Ş.'nin Kalıp ve Takım Atölyesinde üniversal torna tezgâhında hassas bir şekilde işlenerek Ø10 ve 55 m boyunda standartlara uygun ölçülere getirilmiştir.

Sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin izod darbe deneyleri TS 10045-2'ye göre, Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Farklı deney parametrelerine sahip olan numunelere uygulanan izod darbe deneyi sonucunda elde edilen kırılma enerjileri Çizelge 3.8' de verilmiştir.

Çizelge.3.8. Izod Darbe deneyi uygulanmış numuneler ve deney sonuçları

Grup	Kırılma Enerjileri (Joule)	Ortalama kırılma Enerjileri (Joule)
A1	24	25
A2	26	
B4	10	9
B5	8	
C1	5	5,5
C2	6	
D1	36	35,5
D2	35	

Şekil 3.16'da, yağma basıncındaki artışın Izod darbe deneyi uygulanan numunelerin kırılma enerjilerindeki oluşturduğu değişim gösterilmektedir.

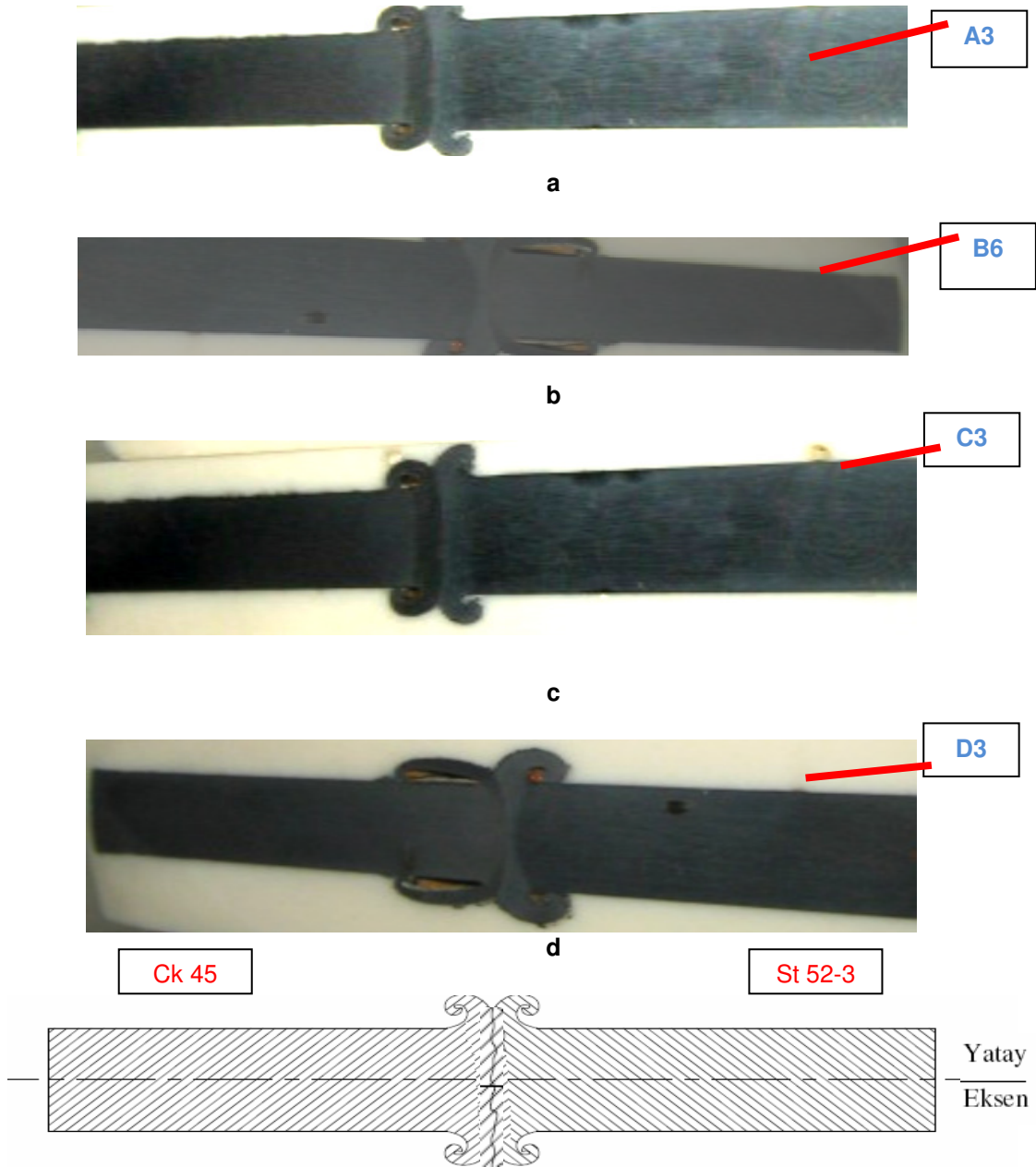


Şekil 3.16. Yağma basıncı ile kırılma enerjisi değişimi grafiği

Burada, sürtünme basıncı sabit tutulup (20 daN/cm^2) sürtünme süresi 2 s, yağma süresi 4 s olan A, B ve C deney parametreleriyle yapılan kaynaklı birleştirmelerde oluşan enerjilerindeki değişim gösterilmektedir. Ayrıca yine sürtünme basıncı sabit (20 daN/cm^2), yağma basıncının 25 daN/cm^2 olduğu ancak sürtünme süresinin 4 s'ye yağma süresinin de 6 s'ye çıkarıldığı D gurubu deney parametreleriyle yapılan kaynaklı birleştirmelerdeki numunelerin kırılma enerjisinin en yüksek olduğu görülmektedir.

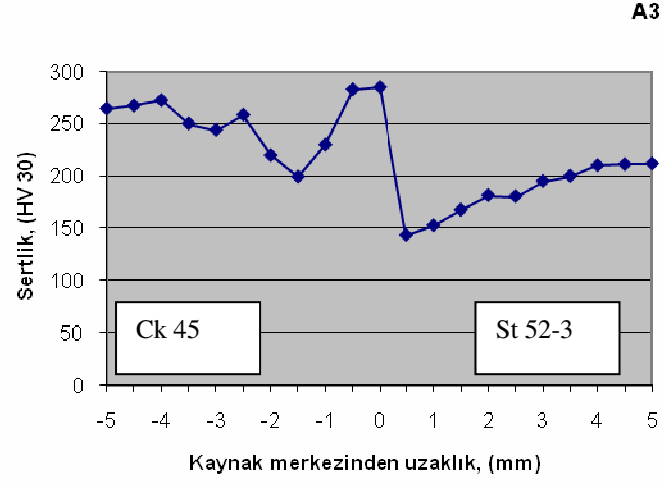
3.8. Sertlik Ölçümleri

Sürtünme kaynağı yapılmış numunelerin sertlik ölçme deneyleri de, yine Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarında yapılmıştır. Sertlik deneyi uygulanacak olan numuneler de ZF Lemförder Aks Modülleri San. ve Tic. A.Ş.'nin Test Laboratuvarında hazırlanmıştır. Numuneler bakalite alınıp gerekli parlatma işlemleri yapıldıktan sonra Şekil 3.16 a-e. de görüldüğü gibi sertlik ölçümü için hazır hale getirilmiştir.

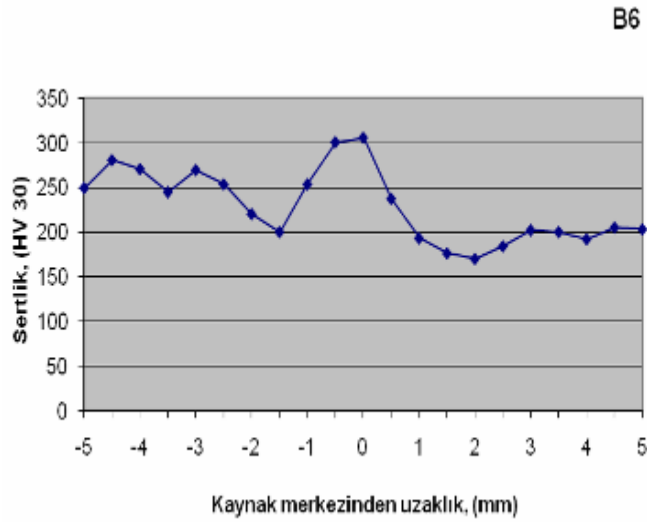


Şekil 3.17. a-e) Sertlik ölçümü ve mikroyapı incelemeleri ve numunelerin şematik gösterimi

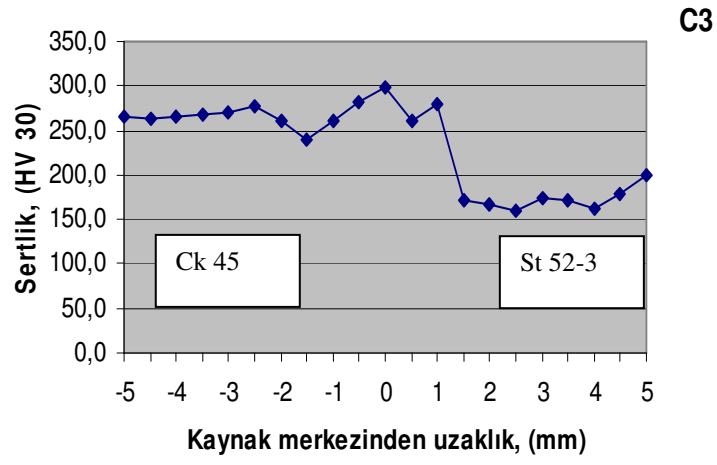
Yapılan mikro sertlik ölçümlerinde, kaynak merkezinden uzaklık ile sertlik arasındaki değişimi gösteren grafikler Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



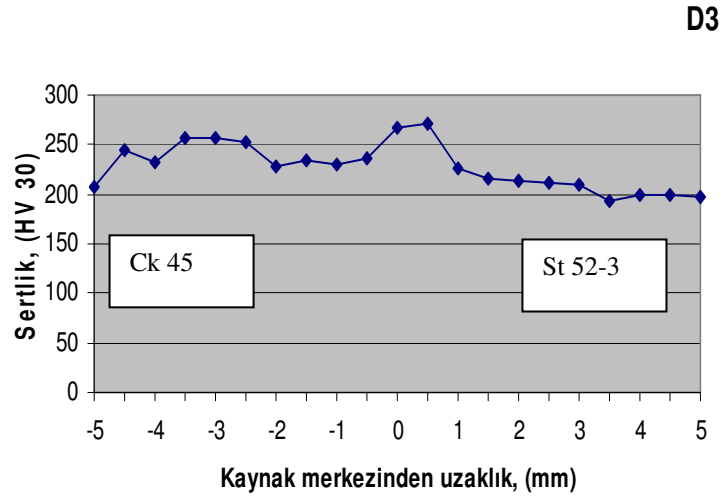
Şekil 3.18. A grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikro sertlik değişimi grafiği



Şekil 3.19. B grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikro sertlik değişimi grafiği



Şekil 3.20. C grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikro sertlik değişimi grafiği



Şekil 3.21. D grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin mikrosertlik değişimi grafiği

3.9. Mikroyapı İncelemeleri

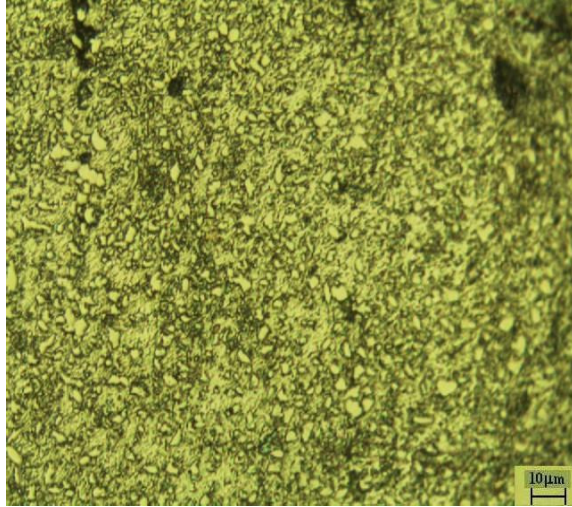
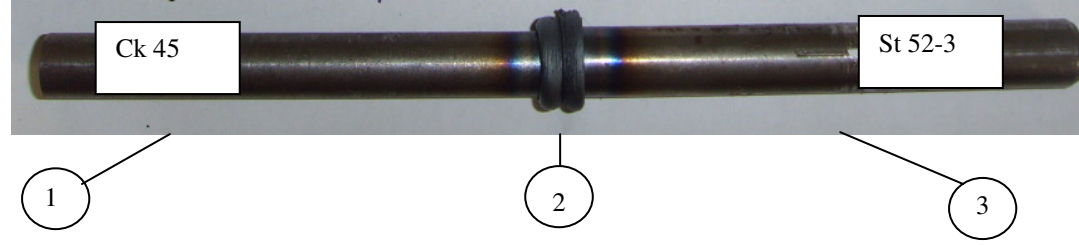
Mikroskopta incelenecek metal parçaların yüzeylerindeki kristaller, polisaj sırasında kaymış durumdadır. Polisaj yapılmış bu yüzeyler gelen ışığı ayna gibi dik olarak geri yansıttığı için mikro yapıların görünmesine engel olur. Bu katmanı kaldırmak ve mikro yapıyı oluşturan elemanların görünebilmesini sağlamak için metal ve alaşım çeşitlerine uygun dağlayıcı seçilir ve yüzeye uygulanarak aşındırma sağlanır, dolayısıyla da düzgün kristaller açığa çıkartılmış olur.

Ck 45 ve St 52–3 çeliklerinin sürtünme kaynak işlemlerinin ardından mikro yapı incelemeleri öncesi araştırmalara dayanarak numuneler dağlanmışır [36]. Uygulanan dağlama sıvıları % 40'lık nitrik asitten (% de 40 nitrik asit-% de 60 su karışımıdır). Bu bileşimden (HNO_3) 60 cl - etil alkolden de ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) 940 cc ilave yapılarak 1000 cl'lik olacak şekilde hazırlanır. Örnek parçanın alaşım durumuna göre bu karışım bir saniye ile iki dakika arasında değişen sürelerde uygulanır.

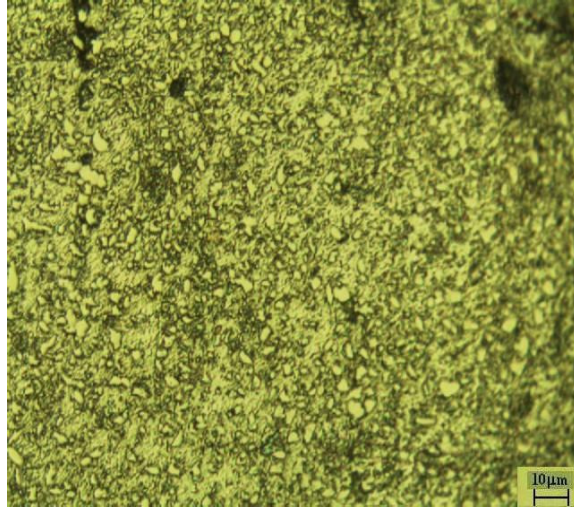
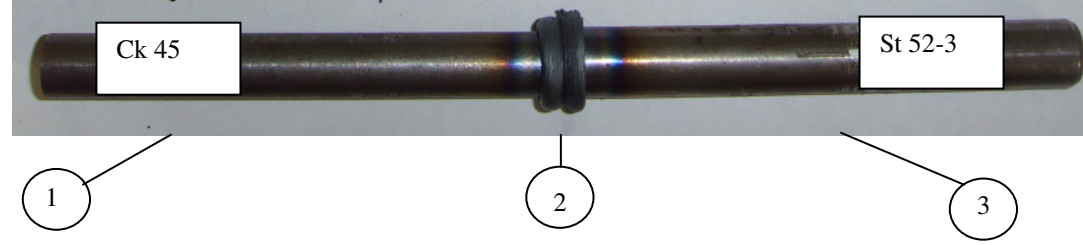
İncelemelerde kaynak yeri ve iki numunenin kaynağa yakın bölgelerinde yapısal farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılığın sebebi kaynak esnasında yüksek sıcaklıklara ulaşılması ve bu esnada uygulanan basınç olarak gösterilebilir.

Bu deneyler sonucunda ortaya çıkan mikro yapı görüntüleri malzeme temin edilen ZF Lemförder firmasının standart olarak kabul ettiği LMN 310'la karşılaştırıldığında bu çeliklerde beklenen içyapılara benzer yapılar ortaya çıkmıştır.

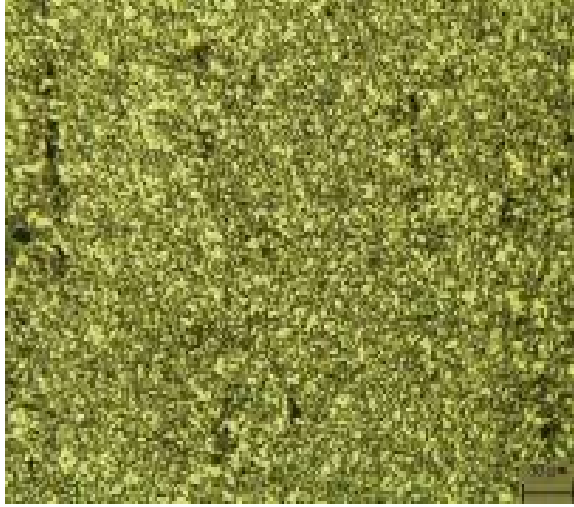
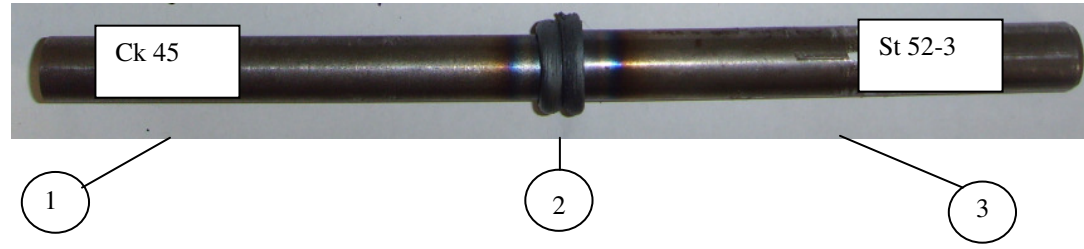
A, B, C ve D grubu deney numunelerinin mikro yapıları Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde optik mikroskop ile incelendi (Şekil 3.22-Şekil 3.25). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalürji Mühendisliği Bölümünde de Şekil 3.26.'da ki gibi hazırlanan numunelerin kırılma yüzeyleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelendi. Numunelerin içyapıları farklı bir açıdan irdelenmiş olup element geçişi de EDS analizi yapılarak sonuçları Şekil 3.27, Şekil 3.28, Şekil 3.29, Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



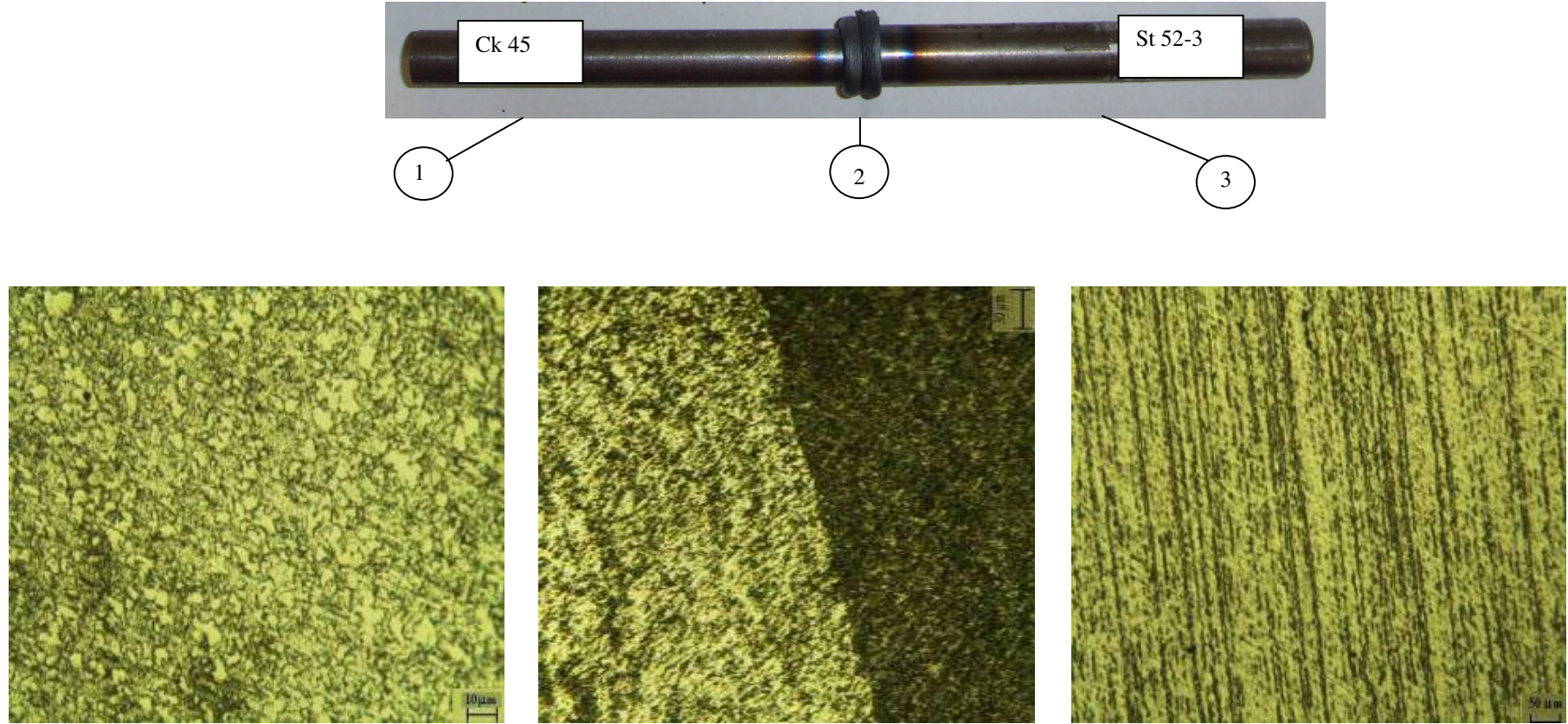
Şekil 3.22. A grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunenin (A3) mikro yapı görüntüleri (400 X)



Şekil 3.23. B grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunenin (B6) mikro yapı görüntüleri (400 X)



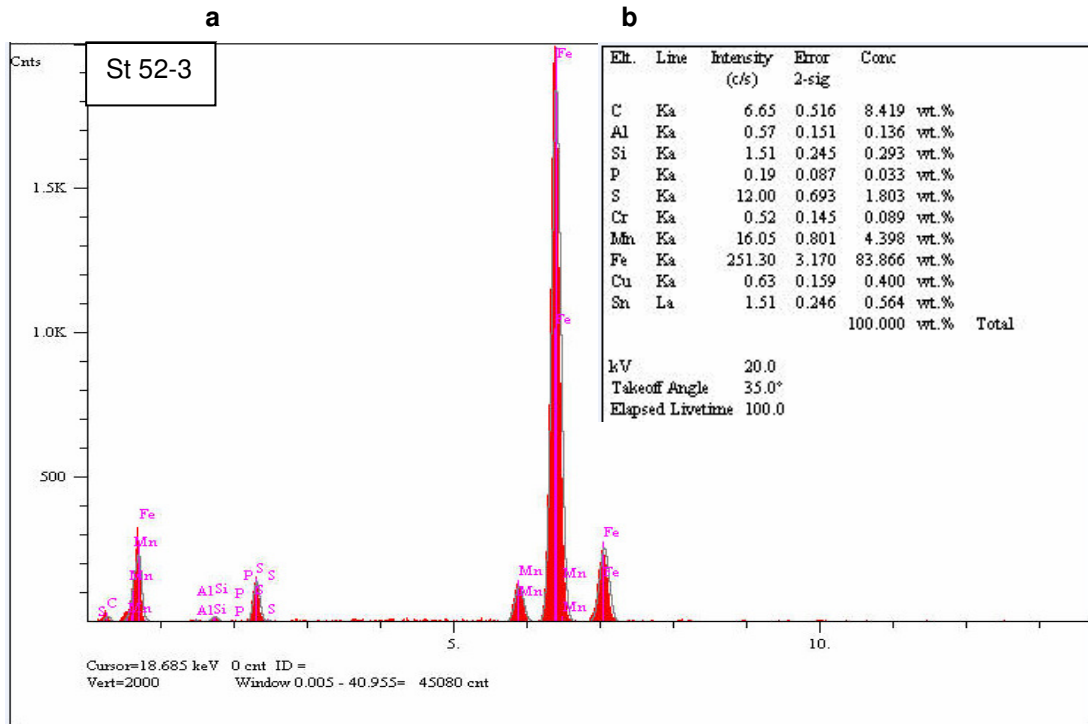
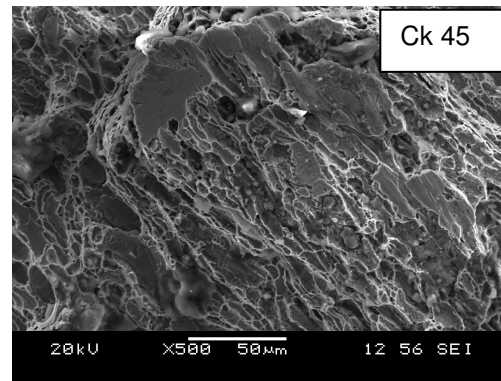
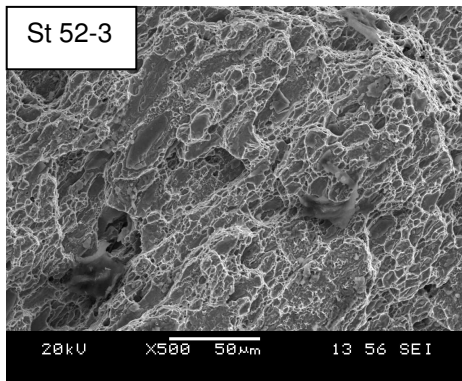
Şekil 3.24. C grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunenin (C3) mikro yapı görüntüleri (400 X)

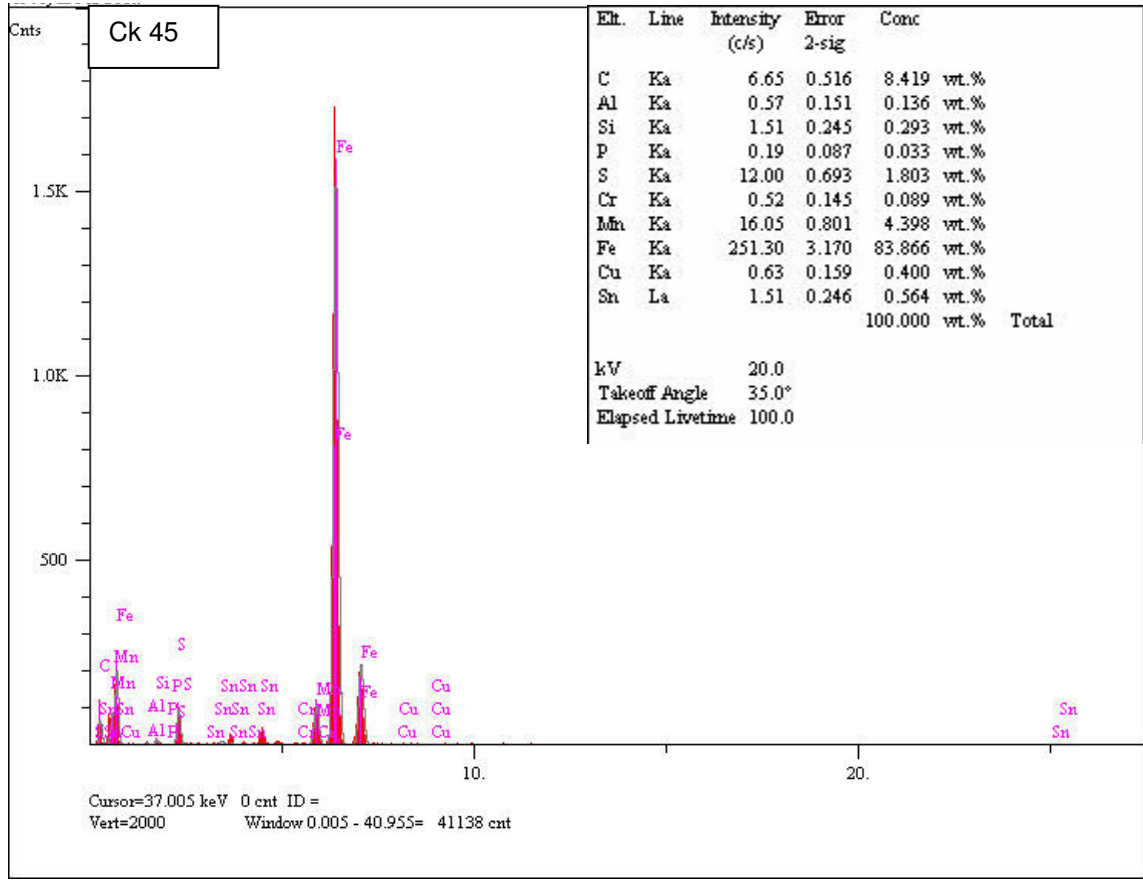


Şekil 3.25. D grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunenin (D3) mikro yapı görüntüleri (400 X)

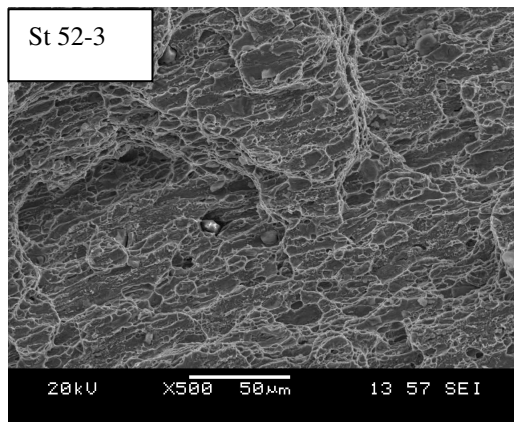


Şekil 3.26. SEM görüntüleri için hazırlanan numuneler

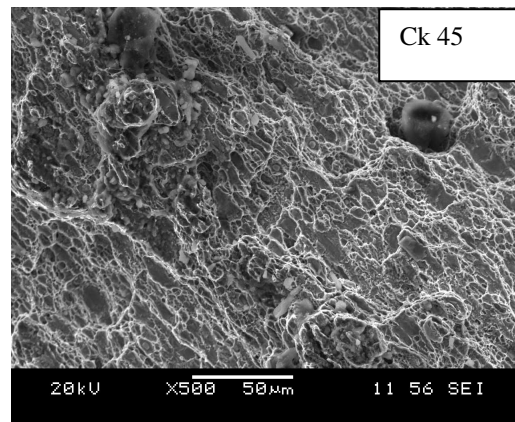




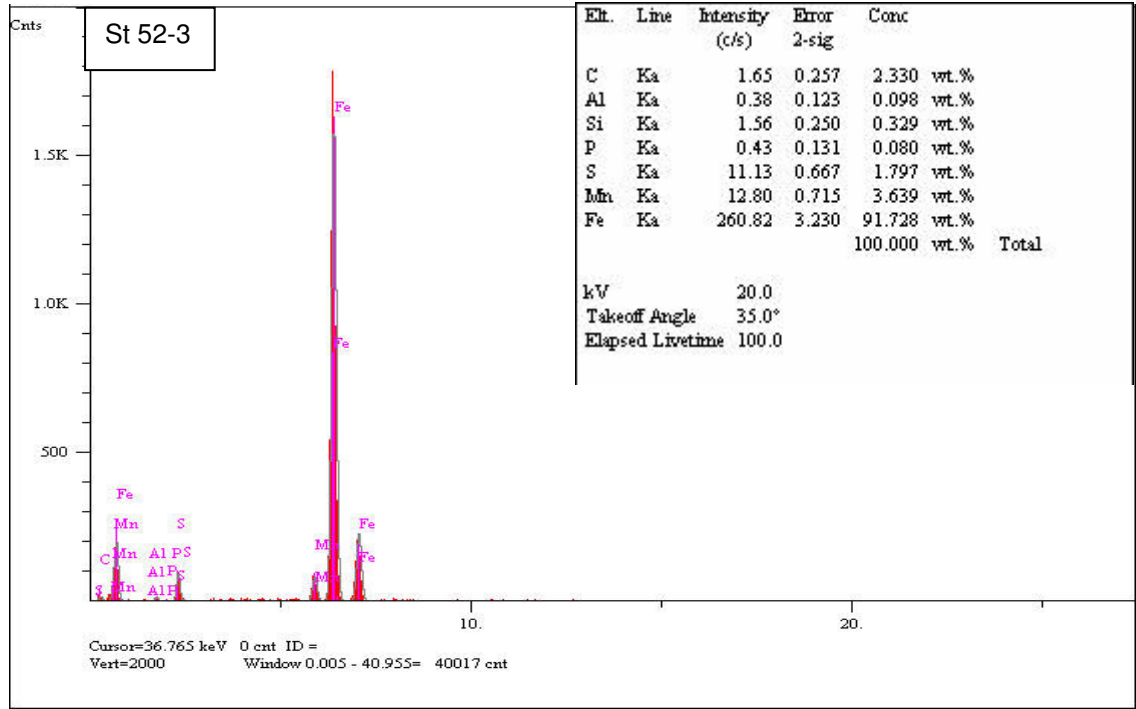
Şekil 3.27.a-d) A grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin SEM görüntüleri (500 X) ve EDS analiz sonuçları.



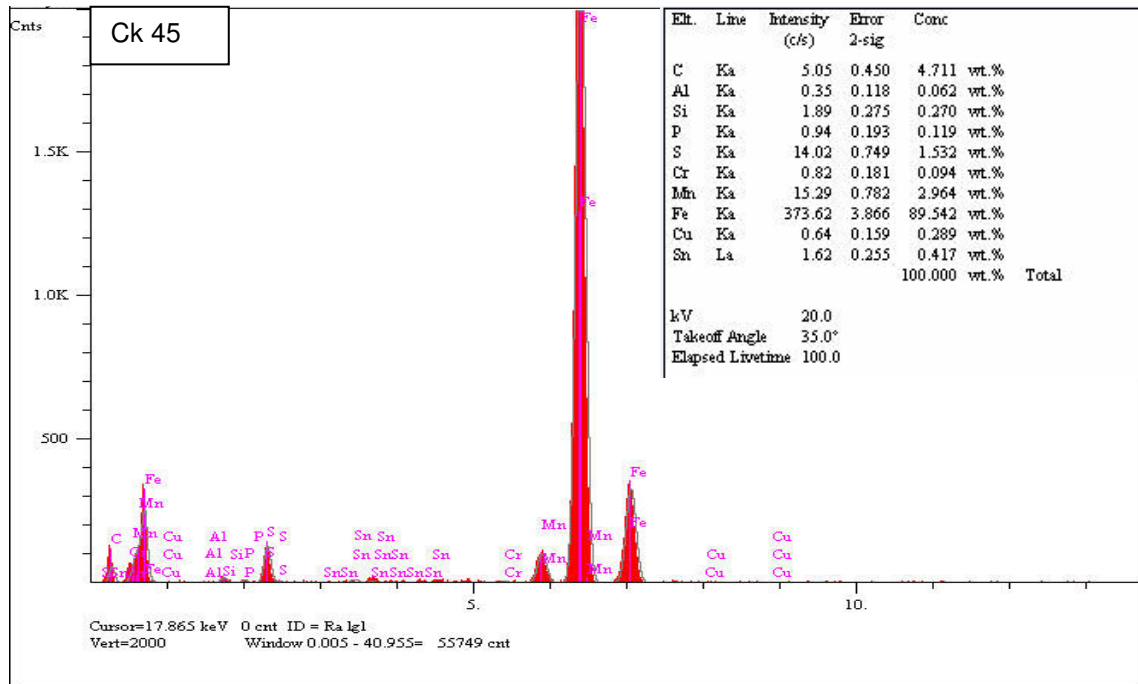
a



b

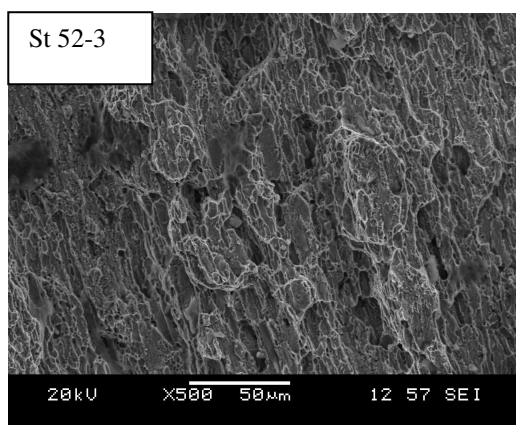


c

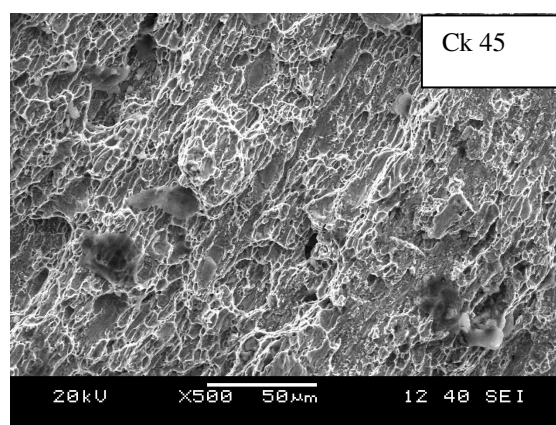


d

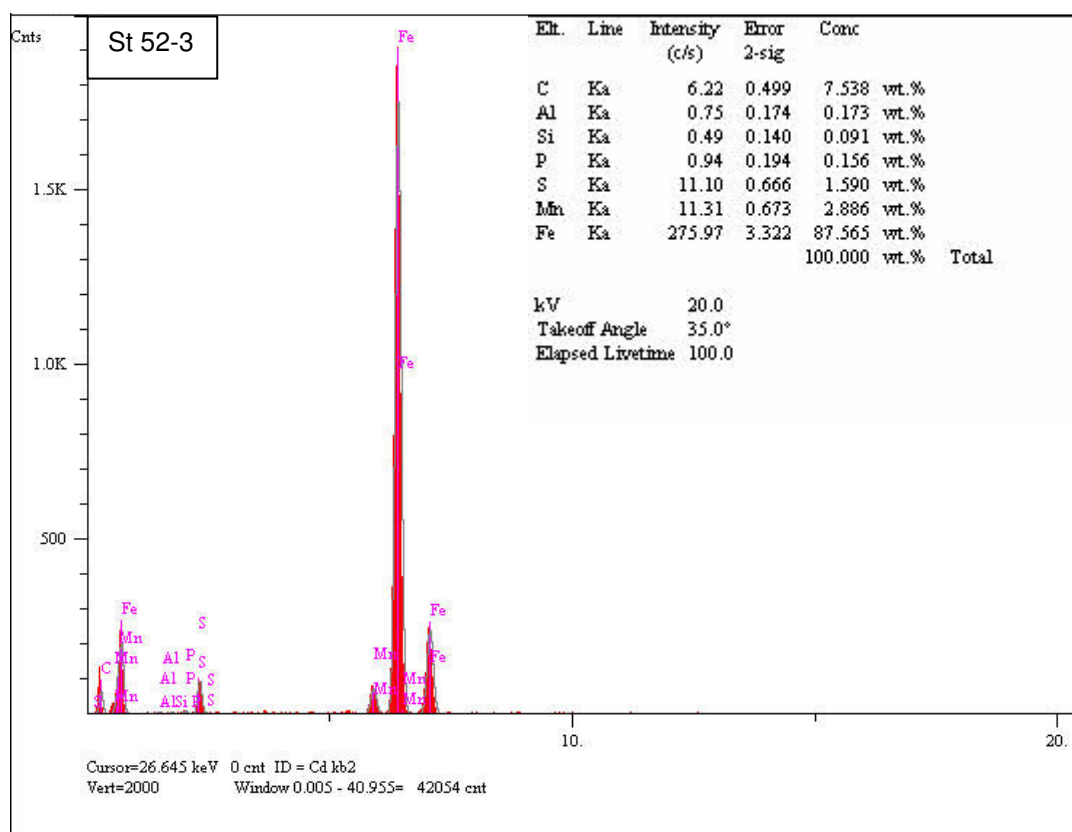
Şekil 3.28.a-d) B grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin SEM görüntüleri (500 X) ve EDS analiz sonuçları.



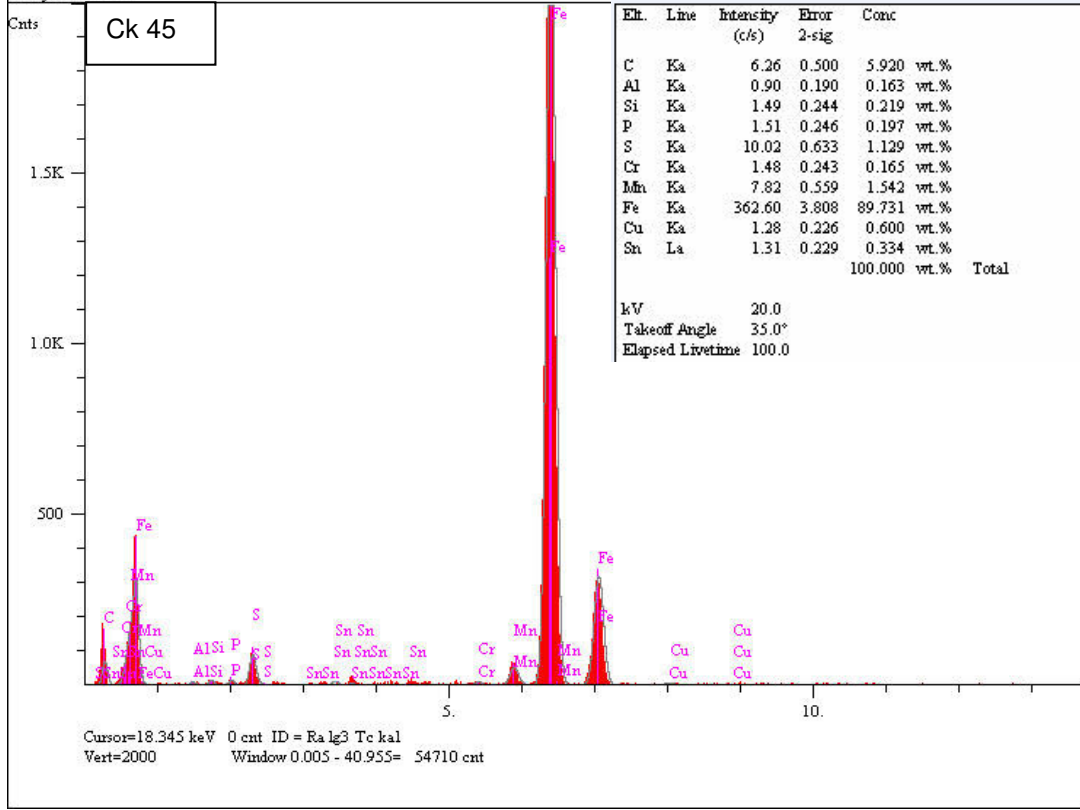
a



b

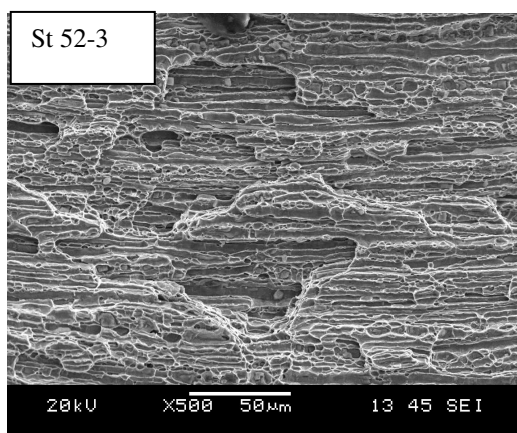


c

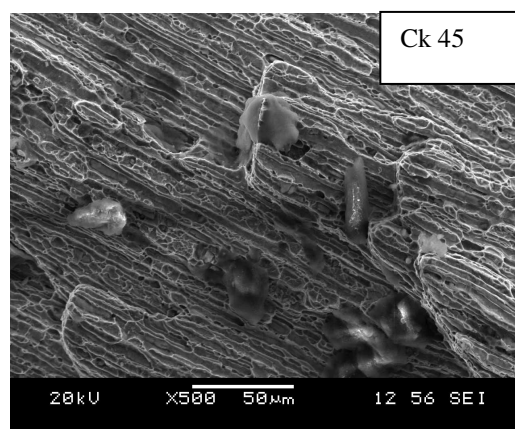


d

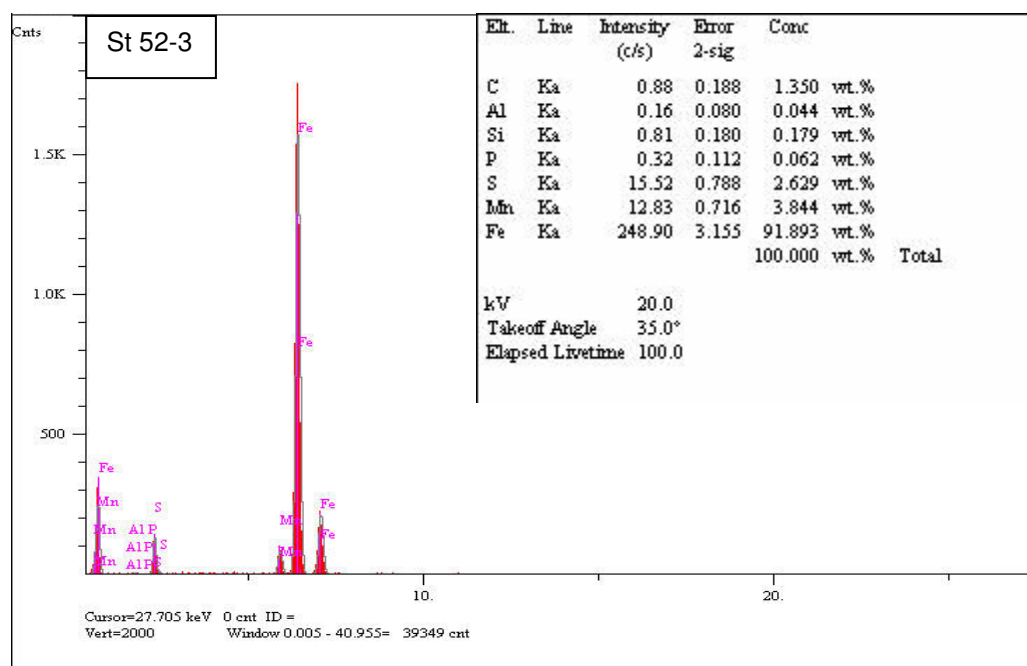
Şekil 3.29.a-d) C grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin SEM görüntüleri (500 X) ve EDS analiz sonuçları.



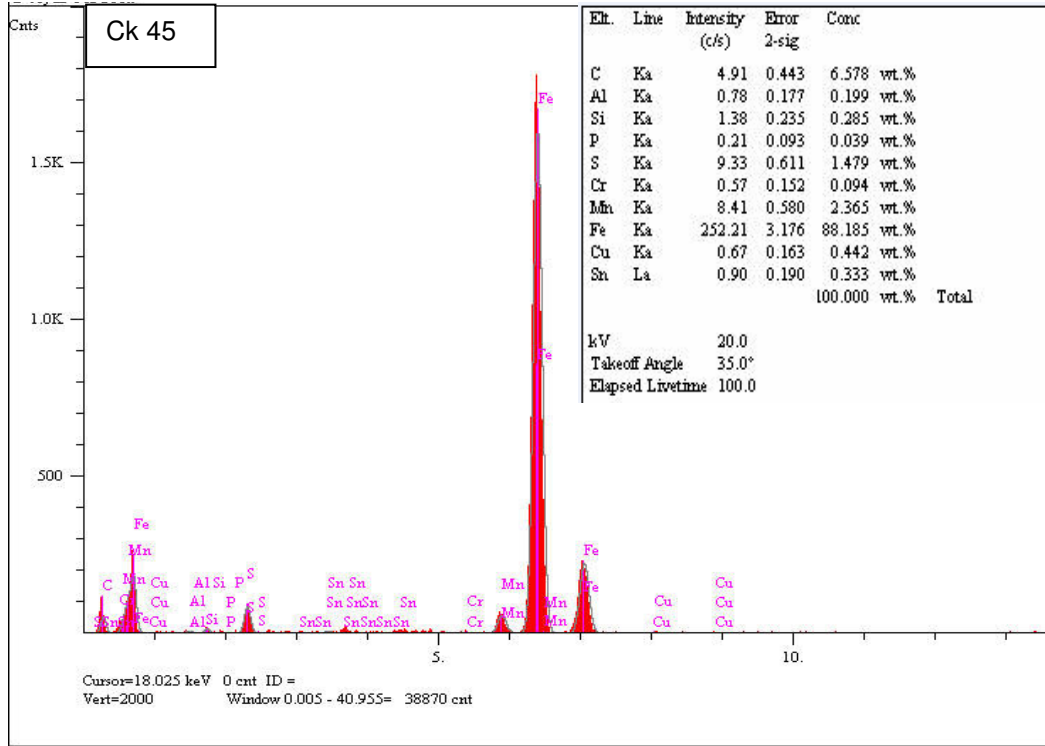
a



b



c



d

Şekil 3.30.a-d) D grubu parametrelerle yapılan sürtünme kaynaklı numunelerin görüntüleri (500 X) ve EDS analiz sonuçları.

SEM

4. DENEY SONUÇLARI

- 1) Bu çalışmada Ck 45 ve St 52-3 çeliklerinin sürtünme kaynağıyla birleştirilmesi işlemleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Parametrelerden sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi ve yığma süresinin birleştirmeye etkisi araştırılmıştır.
- 2) Malzemelerin birleştirilmesinde çapak oluşumu ile ortaya çıkan malzeme kaybının oranı ve maliyeti de araştırılmıştır. Birleştirme sonucunda maliyeti yüksek olan St 52-3'ün malzeme kaybının daha az olduğu görülüp birleştirmelerde kullanımından tasarruf sağlanmıştır.
- 3) Yığma basıncındaki değişimin birleşmeye etkisi açıkça ortaya konulmuştur. Yığma basıncı 15 daN/cm², 20 daN/cm² ve 25 daN/cm² olarak değiştirilmiş ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi ve yığma süresi gibi deney parametrelerinden yığma basıncının değişiminin sürtünme kaynağı ile birleştirmede önemli olduğu görülmektedir.
- 4) Sürtünme süresinin 2 s.den 4 s.ye artırılmasıyla oluşan yüzey sıcaklıkları en yüksek sıcaklıklara ulaşmıştır. D grubunda A, B ve C grubu deney parametrelerinden farklı olarak sürtünme süresi ve yığma süresi artırılmış olduğundan bu sürelerin birleşme bölgesindeki sıcaklıkların artışında etkili olduğu gözlenmiştir.
- 5) Numunelere yapılan çekme ve darbe deneyleri sonucunda dayanımı en yüksek olan numunelerin D grubu deney parametreleriyle yapılan numuneler olduğu saptanmıştır (Çizelge 3.6, Çizelge 3.7 ve Şekil 3.10–13 a-c). Sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığma süresi A, B ve C grubu deney parametrelerinde sabit tutulduğu yalnızca D grubu deney parametrelerinde sürtünme süresi ve yığma süresi artırılmıştır. Yığma basıncının artırılmasıyla çekme dayanımının arttığı gözlenmiş olup son olarak D grubu deney parametrelerinde sürtünme süresi ve yığma süresi de artırılarak yüksek dayanımlı birleştirmeler sağlanmıştır.
- 6) Numunelerin yatay ekseninde ölçülen sertlik değerleri incelendiğinde genelde kaynak bölgesinde bir artış gözlenmiştir. Kaynak bölgesinden ana malzemelere doğru sertlik değerleri değişikliği görülmüştür (Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21). Birleşme sırasında oluşan intermetalik fazlar, karbürler gibi dönüşümler bu sertlik artışında etkili olmaktadır.

7) Mikro yapı incelemelerinde, birleşme bölgesinde ısı tesiri altında kalan bölgeler ortaya çıkmaktadır. Görülen içyapıların normal olan bir takım tane yönlenmelerinin yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin havada hızlı soğumaya bırakılmalarından kaynaklanmıştır. Yığma basıncı değerinin en düşük olduğu (15 daN/cm^2) C grubu numuneleri çekme ve darbe dayanımları en düşük çıkan numuneler olmuştur. Mikro yapı görüntülerinden de anlaşılabacağı üzere kaynak bölgesinde boşluklar görülmektedir. İçyapıda ki bu boşluklar birleşme işlemi sırasında nüfuziyetin çok iyi olmadığını göstermekte ve bu durum da kaynaklı numunelerin dayanımına doğrudan etki etmektedir. Şekil 3.27-Şekil 3.30'da görülen SEM görüntüleri ve EDS sonuçlarına göre yığma basıncının artmasıyla element geçişinin arttığı düşünülmüştür [40].

Ayrıca SEM görüntülerinden de A, B ve C grubu deney parametreleriyle sürtünme kaynağı yapılan numunelerin içyapılarında ağsı bir yapı ile A, B, C grubu numunelerinin mikroyapıları benzerlik göstermiştir. Bununla birlikte bu 3 grup numunenin kırılma yüzeyleri de incelendiğinde de aynı davranış ve oluşum saptanmıştır. D grubu deney numunesinde ise içyapıda A, B ve C grubu numunelerinden daha farklı bir içyapı görüntüsü olan ağsı yapılardan farklı bir şekilde küresel formlarda yapılar gözlemlenmiştir. D grubu deney numunesinin kırılma yüzeyi de diğer deney parametreleriyle yapılan kaynaklı birleştirmelerdeki numunelerin kırılma yüzeylerinden daha düzgün ve kaynağın daha iyi nüfuziyette olduğu görülmüştür.

5. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Farklı cinsten malzemelerin sürtünme kaynağı sırasında; intermetalik faz oluşumu, ergime sıcaklığı malzemelerin kendilerinden daha az olan ötektik alaşımların oluşumu, çeliklerin martenzitik içyapı dönüşümü, yüksek karbonlu alaşımsız çeliklerde karbon azalması, içyapıda rekristalizasyon ve tane irileşmesi olayları meydana gelebilir. Bu malzeme dönüşümlerinin hepsi de kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini, kötü yönde etkilerler. Örneğin intermetalik fazlar sert ve gevrek olduklarından, kalınlıkları belirli genişliği aşınca bulundukları tabaka boyunca, aşırı bir gevrekleşme gösterirler. Ergitme sıcaklığı düşük olan ötektikler ise, bazı hallerde kaynak yapma sırasında bile çatlakların meydana gelmesine neden olurlar. Martenzit dönüşüm yapan bölgeler de, belirli bir büyüklük ve sertliği aşınca, intermetalik fazlarda görüldüğü gibi gevrekleşmeye neden olurlar [28].

Alaşımsız çeliklerde karbon azalması, lokal olarak mukavemet değerlerinin azalması demektir. Yumuşak bölgelerin oluşumu ise kaynak bağlantılarının mukavemetini azaltır. İçyapıda rekristalizasyon veya tanelerin irileşmesi de, yumuşak bölgelerin oluşumuna neden olur. Sürtünme kaynağının oldukça kısa sürede yapılması ve bu sırada hem sıcaklık yükselirken hem de daha sonraki şişirme sırasında aşırı derecede plastik deformasyonların meydana gelmesi, diğer kaynak metotlarına göre malzeme içyapı dönüşümünü azaltıcı yönde bir avantaj sağlar [31].

Önceki çalışmalarda farklı malzemelerin sürtünme kaynağıyla birleştirilmesinde çekme dayanıma sürtünme basıncı ve sürtünme süresi gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada da farklı metallerin sürtünme kaynağıyla birleştirilmesinde sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığma basıncı değiştirilerek başarılı şekilde birleştirme yapılmıştır. Çekme dayanımı, sertlik ve mikro yapı incelemelerinde yığma basıncının etkisi ortaya koyulmuştur. Ayrıca EDS analizleri sonucunda Cr elementinin geçişinin daha önceki çalışmalarda kaynak bölgesinde sertliği artırdığı belirlenmiş olup bu çalışmada da benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır.

6. KAYNAKLAR

- [1] Tülbentçi, K., ve Yılmaz, M., "Farklı Takım eliklerinin Katı Hal Kaynağı", 11. Ulusal Kaynak Sempozyumu, İT, (1989)
- [2] Ertuğ, A., "Sürtünme Kaynağı", Mühendis ve Makine Dergisi, cilt: 21, sayı:241, (1977), 45
- [3] Lucas, W., Pocess parameters and friction welds. Met. Conts. And British, Welding Journal, (1971), 293
- [4] Duffin, F.D., Crossland, B., Friction welding with sudden relase of the rixed component, advances in welding processes, solid phase joining of the conference, The Welding Institute, ağabeyngton Hail, Cambridge, (1971), 25
- [5] Sereign, S.A., Sabantsev, V.P., "The Friction Welding of Plastically Deformed Steel", Weld. Prod., (1980), 34
- [6] AWS, Resistance and Solid-state Welding and Other Joining Processes, Weiding Handbook, Miami, (1980), 240
- [7] Gürleyik, M., "Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilen Alüminyum İle Bakırın Mikroskopik Yapısı ve Mekanik zellikleri", Mühendis ve Makine Dergisi, cilt: 29, sayı: 337, (1988), 21
- [8] Grnauer, H., "Döküm Parçalarının Sürtünme Kaynağı", Mühendis ve Makine Dergisi, cilt: 30, sayı: 357, (1989), 13
- [9] Tanicheva, O.N., ET AL, Nature of the defect "bright ring" forming in friction welding of tooi steel, Metarial Science and Heat Treatment, (1989),200
- [10] Yılmaz, M., Kaluç, E., Karagöz, ř., Tülbentçi, K., "Alaşımsız C45 ve HS 6-5-2 Yüksek Hız eliğı çiftinin Sürtünme ve Yakma Alın Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mikro Yapısal Analizi", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, Nisan, (1995), 185
- [11] Kurban, A., Kahraman, N., "Farklı Metallerin Sürtünme Kaynağı ve Kaynak Parametrelerinin Kaynak zerine Etkisi", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, Nisan, (1995), 226
- [12] Kahraman, N., Yılbaş, B., Odabaş, D., "H2210 eliğı İle Alüminyumun Sürtünme Kaynağıyla Kaynak İşlemi ve Kaynak Parametrelerinin Kaynak zerine Etkilerinin Deneysel olarak Araştırılması", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, Nisan (1995), 217
- [13] Kato, M., Kagaya, C, Kawaguchi, Y., Tokisue, H., "Influence of normalization on impact fracture behaviour of friction welded joints", Society of Mechanical Engineers, (1996), v62, n602, p2236
- [14] şahin, A.Z., Yılbas, B.S., Al-Garni, A.Z., "Friction Welding of Al-Al, Al-Steel, and Steel-Steel Samples", Journal of Materials Engineering and Performance , v5,nl,(1996), 89
- [15] Chen, Y.J., Shi, Y.W., Zhang, X.P., "Detection of Weak Bonding in Friction Welds by Ultrasound", Ultrasonics 36, (1998), 141
- [16] Alvise, L.D., Massoni, E., Wailqe, S.J., "Finite element modelling of the inertia friction

- welding process between dissimilar materials", Journal of Materials Processing Technology, 125-126, (2002), 387
- [17] Yılmaz, M., Çöl, M., Acet, M., "Interface properties of aluminium/steel friction-welded components", Materials Characterization, 49, (2003), 421
- [18] Özdemir, N., Orhan, N., "Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş süperplastik haldeki ötektoid üstü çeliğin ara yüzey mikro yapı değerlendirmesi". On birinci Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, Antalya, (2004)
- [19] Şahin, M., "Simulation of friction welding using a developed computer program", Journal of Materials Processing Technology, 153-154, (2004)1011
- [20] Silva, A., Meyer, A., Santos, Jorge., Kwietniewski, C., Strohaecker, T., "Mechanical and metallurgical properties of friction-welded TiC particulate reinforced Ti~6Al-4V", Composites Science and Technology, 64, (2004), 1495
- [21] Lee, W., Kim, Y., Jung, S., "Effects of copper insert layer on the properties of friction welded joints between TiAl and AISI 4140 structural steel", Intermetallics 12, (2004), 671
- [22] Marr S., (2001), "Friction Welding Into The Future", Welding Design and Fabrication, August 2001, 74(8):34-36.
- [23] Duffin, F. D. ve Bahrani, A. S., (1973), Friction Behaviour Of Mild Steel Of Friction Welding, 57-73.
- [24] Karabulut, A., Taşgetiren, S., "Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesi Tasarım ve İmalatı", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, (2004), 38
- [25] Yılmaz, M., (1993), Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Makine Fakültesi.
- [26] Anık, S., (1983), Kaynak Teknolojisi El Kitabı, İTÜ Makine Fakültesi.
- [27] Orhan, A., Al Matrisli Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Metalürji Eğitim Anabilim Dalı, (2003)
- [28] Şahin, M., "Sürtünme Kaynağı ile Birleştirmede Parça Boyutları ve Plastik Sekil Değiştirmenin Etkilerinin Araştırılması", T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Edirne, (2001).
- [29] Gürleyik, M., "Sürtünme Kaynağı", Mühendis ve makine Dergisi, 16, (1982),91
- [30] Şahin, M., Akata, H.E., Özel, K., "Soğuk şekil verilmiş alüminyum malzemelerin sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmesi üzerine deneysel bir çalışma", Kaynak Teknolojisi Beşinci Ulusal Kongresi.
- [31] Çelik, İ., Alüminyum ve Bakır Çubukların Sürtünme Kaynağı Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, (1997)
- [32] <http://www.thompson-friction-welding.co.uk/about.html>

- [33] Dede, A., Soy, U. ve Aslanlar, S., (2002), "Sürtünme Kaynak Yöntemi", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Mart 2002, Sakarya, 6(1).
- [34] www.mtiwelding.com
- [35] www.teamafv.com
- [36] Kovan, V., Materials 2006, 11 th International Materials Symposium, Denizli, (2006), 84
- [37] Mokov Morasky Kovarny Test Laboratuvarları.
- [38] Zeleziarne Podbrezova Test Laboratuvarları.
- [39] Asil Çelik San. Ve Tic. A.Ş.
- [40] N. Arivazhagan & Surendra Singh & Satya Prakash & G. Madhusudhan Reddy,"An assessment of hardness, impact strength, and hot corrosion behaviour of friction-welded dissimilar weldments between AISI 4140 and AISI 304" , 2007