



SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİNİN PASLANMAZ ÇELİKLERE UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Artunç ALPTEKİN

**Temmuz 2006
DENİZLİ**

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİNİN
PASLANMAZ ÇELİKLERE UYGULANABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Artunç ALPTEKİN

Danışman: Yard. Doç. Dr. Cemal MERAN

**Haziran, 2006
DENİZLİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

Artunç ALPTEKİN tarafından Yard. Doç. Dr. Cemal MERAN yönetiminde hazırlanan **“Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönetimin Paslanmaz Çeliklere Uygulanabilirliğinin Araştırılması”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof Dr. Alper GÜLSÖZ
Jüri Başkanı



Yard. Doç. Dr. Yıldray TURHAN
Jüri Üyesi



Yard. Doç. Dr. Cemal MERAN
Jüri Üyesi (Danışman)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun / / tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başlangıcından bitimine kadar her aşamada çalışmayı yönlendiren, özverili yardımlarını esirgemeyen hocam, Sayın Yard.Doç. Dr. Cemal MERAN'a, tezin biçimlendirilmesinde değerli katkılarını aldığım Sayın Prof. Dr. Alper GÜLSÖZ ve Arş. Gör. Dr. Volkan KOVAN'a, uygulama yaptığım atölyelerinden ve her türlü olanaklarından yararlanmamı sağlayan Sayın Fikret EFE'ye , Sayın Orhan ÖDEMİŞ'e (Uygar Makine), Sayın İhsan ve Uğur KARLIK'a (Tekmak), Sayın Süleyman APOHAN'a; denemelerimde kullandığım takımları kısa sürede temin etmemde yardımcı olan Sayın Orhan AKSOY'a, çalışmamı biçimlendirmeme yardım eden Sayın Makine Ressamı Özkan ERTUĞRUL ve Makine Mühendisi Volkan DANIŞMAN'a, sürekli fikir alışverişi yaptığım Sayın Makine Yüksek Mühendisi Osman YILDIRIM'a , çalışmalarım sırasında bana destek çıkıp gerekli sabrı gösteren müdürlerim Sayın Makine Mühendisi Ahmet OKLAY, Sayın Makine Yüksek Mühendisi Hakkı GERELİOĞLU'na ve Öcal GERELİOĞLU'na (Germetal), yaptığı titiz çalışmayı benimle paylaşan Sayın Makine Yüksek Mühendisi İbrahim DORUK'a ve bana her türlü maddi ve manevi destekte bulunan başta babam, annem, kardeşim, amcam, dayım ve yengem olmak üzere tüm sevdiklerime teşekkürü bir borç bilir , şükranlarımı sunarım.

Artunç ALPTEKİN

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırılmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza

:



Öğrenci Adı Soyadı :

Artunç ALPTEKİN

ÖZET

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİNİN PASLANMAZ ÇELİKLERE UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Alptekin, Artunç
Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği ABD
Tez Yöneticisi: Yard. Doç. Dr. Cemal MERAN

Temmuz 2006, 112 Sayfa

Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi günümüzden yaklaşık 15 yıl önce İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde geliştirilen ve halen üzerinde oldukça fazla araştırma yapılan bir katı faz kaynak yöntemidir. Kaynak katı faz yani ergime sıcaklığının altında yapıldığından düşük çarpılma ve yüksek mekanik özellikler elde edilir. Çeşitli yurt içi ve yurt dışı çalışmalarda alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları, çinko alaşımları, bakır alaşımları, titanyum alaşımları ve çelikler üzerine başarılı birleştirmeler yapılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı özellikle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan 2,5 mm kalınlığında TS EN 1.4301 (AISI 304) paslanmaz çelik numunelerin ilerleme hızı hariç tüm değişken parametreler sabitlenerek ve 1000 min⁻¹ devir sayısında değişken ilerleme hızlarında optimum birleştirme parametresinin bulunmasıdır. Deneysel çalışmaların ilk bölümünde karşılaşılan ilk problemler önlenmeye çalışılmış, parametreler kontrol altına alınmıştır. İkinci bölümde ise numunelerin kaynak yapılabilirliği incelenmiştir. Elde edilen kaynak dikişleri röntgen, çekme deneyi ve mikro sertlik ölçüm sonuçları, mikro yapı görüntüleri incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Bu çalışma toplam sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci Bölüm'de konuya giriş kaynaklı imalatın avantaj ve dezavantajları açıklanmıştır. İkinci Bölümde paslanmaz çelik ve türleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümde paslanmaz çeliklere uygulanan diğer kaynak yöntemleri, kaynak esnasında ortaya çıkması muhtemel hasarlar üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde ise sürtünme karıştırma kaynağı, tarihçesi, kaynak parametreleri ve etkileri, yöntemin uygulanma alanlarına örnekler verilerek, yöntemin avantaj ve dezavantajları açıklanmıştır. Bu bölümde ayrıca sürtünme karıştırma kaynağı üzerine yapılan bazı çalışmalar sonuçları ile birlikte derlenmiştir. Materyal ve Metodun anlatıldığı beşinci bölümde deney düzeneği, deney numunesi ve özellikleri, karıştırıcı uç ve bağlama aparatı açıklanmıştır. Altıncı bölümde deney parametrelerinin belirlenmesi ve yapılan deneyler verilmiştir. Yedinci bölümde ise elde edilen kaynak dikişlerinin çekme deneyi, sertlik ölçme deneyi, metalografik inceleme sonuçları ile röntgen sonuçları verilmiştir. Son bölüm olan Sekizinci bölümde ise sonuç ve öneriler, paslanmaz çeliklerin bu yöntemle kaynak edilebilmesinin geleceği yönünde öneriler ışığında ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz çelik, Sürtünme karıştırma kaynağı

Prof. Dr. Alper GÜLSÖZ
Yard. Doç. Dr. Yıldırım TURHAN
Yard. Doç. Dr. Cemal MERAN

ABSTRACT**THE INVESTIGATION OF FRICTION STIR WELDABILITY OF STAINLESS
STEEL**

Alptekin, Artunç

M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering Department

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Cemal MERAN

July 2006, 112 Pages

Friction stir welding is a solid state welding process which has been invented in the last 15 years and its improvement is still going on together developed technology. The excellent mechanical properties and low distortion are attributed to the low heat input and under of melting point. In the experiments in Europe and U.S., aluminium alloys, magnesium alloys, zinc, titanium alloys and steels have also been friction stir welded.

The aim of this Project is to obtain the optimum joining parameter of TS EN 1.4301 (AISI 304) stainless steel sheets of 2,5 mm width, with 1000 rpm welding rotating speed by keeping all varying parameters. In the first part of experimental studies, it had been worked to prevent the primary problems which have been faced off and the parameters have been taken under control. In the second part of the experiments, successful joinings have been reported. Welding joint that have been obtained, roentgen, tensile test, micro hardness measurement results and inner structure imaging have been investigated and commented on.

In the first chapter, the welding process has been briefly given. In the second chapter, general information on the stainless steel and properties has been shown. In the third chapter all welding methods using on stainless steels has been reviewed. In the fourth chapter, Friction Stir Welding method has been explained. In this chapter also advantages and disadvantages, variable parameters and industry applications of FSW method has been explained. Beside this topics the FSW of high temperature materials has been shown. In the fifth chapter, the experimental setup has been given and the welding condition briefly given. In the sixth chapter FSW ability of the material has been given. In the seventh chapter, mechanical, inner structure properties has been investigated. In the last chapter, the experimental results has been generally, evaluated and some suggestions for the future studies have been made.

Keywords: Stainlees Steel, Friction Stir Welding

Prof. Dr. Alper GÜLSÖZ

Asst. Prof. Dr. Yıldıray TURHAN

Asst. Prof. Dr. Cemal MERAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Yüksek Lisans Tezi Onay Formu	i
Teşekkür.....	ii
Bilimsel Etik Sayfası	iii
Özet	iv
Abstract	v
İçindekiler	vi
Şekiller Dizini	viii
Tablolar Dizini	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Kaynağın Tanımı.....	1
1.1.1 Kaynaklı imalatın avantajları.....	1
1.1.2 Kaynaklı imalatın dezavantajları.....	2
2. PASLANMAZ ÇELİKLER VE ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1. Paslanmaz Çeliğin Tanımı ve Özellikleri.....	3
2.2. Paslanmaz Çelik Türleri.....	4
2.2.1 Ostenitik paslanmaz çelikler.....	5
2.2.2 Ferritik paslanmaz çelikler.....	7
2.2.3 Martenzitik paslanmaz çelikler.....	8
2.2.4 Ostenitik–ferritik (Dubleks) paslanmaz çelikler.....	9
2.2.5 Ayrışım sertleştirmesi yapılabilen paslanmaz çelikler.....	10
3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI.....	12
3.1. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti ve Özellikleri.....	12
3.2. Ostenitik Paslanmaz Çeliklerde Kaynak Kabiliyeti.....	13
3.2.1 Krom karbür oluşumu.....	14
3.2.2 Sıcak çatlak oluşumu.....	15
3.2.3 Sıgma fazı oluşumu.....	16
3.3. Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Uygulanan Kaynak Yöntemleri.....	18
3.3.1 Gaz ergitme kaynağı.....	19
3.3.2 Örtülü elektrot ile ark kaynağı.....	19
3.3.3 MIG kaynağı.....	22
3.3.4 TIG kaynağı.....	24
3.3.5 Plazma arkı ile kaynak.....	25
3.3.6 Tozaltı kaynağı.....	26
3.3.7 Elektron ışını kaynağı.....	27
3.3.8 Lazer ışını ile kaynak.....	28
3.3.9 Nokta kaynağı.....	29
3.3.10 Sürtünme kaynağı.....	31
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ.....	33
4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminin Gelişimi ve Tarihçesi.....	33
4.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi ve Uygulanması.....	34
4.3. Kaynak Kesitinin Mikro Yapısının İncelenmesi.....	37
4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağına Etki Eden Faktörler.....	38
4.4.1 Geliştirilen farklı uç dizaynları.....	41
4.4.1.1 Whorl™ serisi pimler (batıcı uçlar).....	42

4.4.1.2 MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ serisi pimler (batıcı uçlar).....	43
4.4.1.3 Skew-Stir™ ve A-Skew™ serisi pimler (batıcıuçlar).....	44
4.5. Yöntemin Uygulama Alanları.....	46
4.5.1 Deniz endüstrisinde uygulama alanları.....	46
4.5.2 Havacılık endüstrisinde uygulama alanları.....	47
4.5.3 Uzay endüstrisinde uygulama alanları.....	49
4.5.4 Otomotiv endüstrisinde uygulama alanları.....	49
4.5.5 Hızlı tren endüstrisinde uygulama alanları.....	51
4.5.6 Savunma endüstrisinde uygulama alanları.....	52
4.5.7 Özel uygulama alanları.....	52
4.6. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Avantajları.....	53
4.7. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Dezavantajları.....	60
4.8. Yüksek Ergime Sıcaklığına Sahip Malzemelerin SKK ile Birleştirilmesi.....	62
4.9. Literatür Taraması.....	64
4.9.1 Literatürde alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi.....	64
4.9.2 Literatürde çelik ve alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi.....	68
5. MATERYAL VE METOD.....	74
5.1. Deney Düzenegi.....	74
5.1.1 SKK' nın yapıldığı kalıpcı freze.....	74
5.1.2 Deney numunesi bağlama aparatı.....	75
5.2. Deney Numunesi.....	76
5.2.1 Deney numunesinin kimyasal ve mekanik özellikleri.....	76
5.2.2 Deney numunesinin boyutları.....	77
5.2.3 Deney numunelerinin birleştirilme şekli.....	78
5.3. SKK Uçları.....	79
6. DENEYLER.....	81
6.1. Paslanmaz Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İçin Ön Deneyler Parametrelerin Belirlenmesi.....	82
6.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulamaları.....	89
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	93
7.1. Çekme Deneyi Sonuçları.....	93
7.2. Kaynak Bölgesinde Oluşan İç Yapının İncelenmesi.....	96
7.3. Sertlik Profili.....	99
7.4. Röntgen Muayenesi.....	101
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR.....	106
Özgeçmiş.....	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan kromoksit film tabakasının hasara karşı davranışı.....	4
Şekil 3.1 Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökmesi.....	14
Şekil 3.2 Paslanmaz çeliklerde sıcaklık ve zamana bağlı sigma fazı oluşumu.....	17
Şekil 3.3 Örtülü elektrot ile ark kaynağı prensip şeması.....	21
Şekil 3.4 Gazaltı kaynağı prensip şeması.....	22
Şekil 3.5 TIG kaynağı prensip şeması.....	24
Şekil 3.6 Nokta kaynağı prensip şeması.....	30
Şekil 4.1 Sürtünme karıştırma kaynağı şematik gösterimi.....	34
Şekil 4.2 SKK aşamaları.....	35
Şekil 4.3 SKK prensip şeması.....	36
Şekil 4.4 Bir SKK uygulamasından alıntı.....	36
Şekil 4.5 SKK uygulaması mikro iç yapısının şematik gösterimi.....	37
Şekil 4.6 SKK uygulanmış numunenin mikro iç yapısının incelenmesi.....	38
Şekil 4.7 SKK uygulanan CuZn40 alaşımının devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı numune yüzey ve röntgen incelemeleri.....	39
Şekil 4.8 SKK uygulanan CuZn40 alaşımının devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı kaynak merkezinin mikro iç yapı değişimi	40
Şekil 4.9 Sabit ilerleme hızı değişken devir sayısına bağlı vickers sertlik değişimi.....	40
Şekil 4.10 Sabit devir sayısı,değişken ilerleme hızına bağlı vickers sertlik değişimi.....	41
Şekil 4.11 Farklı takım pimi geometrilerinin kullanımı ile Al 1018 malzemesinin SKK ile birleştirilmiş numunelerin birleşme hattına dik doğrultuda doğrultuda yapılmış olan mikrosertlik ölçüm sonuçları	41
Şekil 4.12 SKK 'da kullanılan basit tip kaynak takımı.....	41
Şekil 4.13 Çeşitli Whorl™ konfigürasyonları.....	42
Şekil 4.14 75mm kalınlığındaki AA6082T6 alaşımının kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü....	43
Şekil 4.15 Esin kaynağı deniz kabukları olan MX Triflute™ serisi pimin resim ve şematik çalışma şekli.....	43
Şekil 4.16 MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Dizaynları.....	44
Şekil 4.17 Flared Triflute probe ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara yüzeyinin görünümü	44
Şekil 4.18 Skew-Stir Metodunun çalışma prensibi ve A-Skew ucu.....	45
Şekil 4.19 Whorl™ Ve MX Triflute™ Takımlarının omuz profilleri	45
Şekil 4.20 Alüminyum panel ekstrüzyonları birleştirilmesi ve birleştirilmiş alüminyum panelleri.....	47
Şekil 4.21 SKK ile imal edilen Airbus A340-600 ve A380 Modellerinde kanat kaburgaları.....	48
Şekil 4.22 SKK ile imal edilen Eclipse 500 modeli kanat montajı.....	48
Şekil 4.23 2005 Ford GT' de kullanılan SKK ile imal edilen vites kolu paneli....	50
Şekil 4.24 Prototip otomobil jantı.....	50

Şekil 4.25 Japonya'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan Al-paneller.....	51
Şekil 4.26 Bakır plakaların birleştirilmesi.....	52
Şekil 4.27 Dogalgaz yakıtlı araçların yakıt hücreleri.....	53
Şekil 4.28 Dogalgaz yakıtlı araçların yakıt hücrelerinin üretiminde SKK uygulaması.....	53
Şekil 4.29 SKK Metodunun içi boş boru kaynaklarında uygulama örnekleri.....	54
Şekil 4.30 Çeşitli SKK şematik birleştirme konfigürasyonları.....	54
Şekil 4.31 SKK ile T ve L köşe birleştirme konfigürasyonları.....	55
Şekil 4.32 SKK 'ında batıcı pimin eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi.....	55
Şekil 4.33 Sürtünme karıştırma kaynağı ark kaynağı kaynak bölgesi yüzey görünüşleri.....	56
Şekil 4.34 316 Paslanmaz çeliğin SKK ile birleştirilmesinde tane sınırlarında bulunan He kabarcıklarının sıcaklığa bağlı boyut değişiklikleri.....	56
Şekil 4.35 TIG ve SKK yöntemi ile elde edilen numunelerin kaynak dikişindeki He kabarcık oluşumu.....	57
Şekil 4.36 Sürtünme karıştırma kaynağı ve ark kaynak yöntemi ile kaynatılmış malzemelerin çarpılma ve burulma incelemesi.....	58
Şekil 4.37 Sürtünme karıştırma kaynağı ile MAG Kaynakları çekme dayanımı ve % uzama karşılaştırması.....	59
Şekil 4.38 Bakır plakaların Sürtünme karıştırma kaynağı ile Elektron ışını kaynaklarının çekme dayanımı ve % uzama karşılaştırması.....	59
Şekil 4.39 Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve MIG Kaynakları yapılan 5083 alüminyum numunelerin Charpy çentik darbe deney sonuçları.....	60
Şekil 4.40 Pim uzunluğu ayarlanabilen takım tasarımı.....	61
Şekil 4.41 Değişen parametrelere bağlı olarak takım piminde görülen aşınma....	61
Şekil 4.42 Megadiamond şirketi tarafından üretilen PCBN özel takım dizaynı....	63
Şekil 4.43 Tecnara şirketi tarafından geliştirilen soğutuculu özel takım tutucu....	64
Şekil 4.44 Devir sayısı ve ilerleme hızı değişimine bağlı olarak kaynak uzunluğuna göre takım aşınması grafiği.....	67
Şekil 4.45 Takım ilk hali (solda) takım aşınması sonrası şekli(sağda).....	67
Şekil 4.46 1250 min ⁻¹ ve 61 mm/min. ilerleme hızında birleştirilen 4 mm kalınlığındaki bakır levhanın mikrosertlik eğrisi.....	68
Şekil 4.47 SKK yöntemi ile boruların alın altına kaynağında kullanılan sabitleme mekanizması.....	72
Şekil 4.48 SKK 'da takım çıkış noktasındaki yarığı önlemek için alınan önlem....	72
Şekil 5.1 SKK denemelerinde kullanılan freze tezgahı.....	75
Şekil 5.2 SKK yapılacak parçaları tutan aparat.....	76
Şekil 5.3 Sürtünme karıştırma kaynağı numunesi.....	78
Şekil 5.4 Deney Numunelerinin birleştirilme şekli.....	78
Şekil 5.5 SKK denemelerinde kullanılan batıcı uç şematik resmi.....	79
Şekil 5.6 SKK denemelerinde kullanılan yarıklı pimli batıcı uç.....	80
Şekil 6.1 SKK ilk denemelerinde kullanılan batıcı uçların uygulama öncesi ve sonrası durumları.....	83

Şekil 6.2 SKK ikinci denemelerinde kullanılan batıcı uçların uygulama sonrası görünüşleri.....	84
Şekil 6.3 SKK son denemelerinde kullanılan batıcı uçların uygulama sırası ve sonrasında takım aşınmaları.....	84
Şekil 6.4 1000 min ⁻¹ devir sayısı 40 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı -1 derece parametreleri ile elde edilen SKK denemesi üst yüzeyi.....	85
Şekil 6.5 710 min ⁻¹ devir sayısı 40 mm/min ilerleme hızı ve dik takım dalış parametreleri ile elde edilen SKK denemesi üst yüzeyi.....	85
Şekil 6.6 710 min ⁻¹ devir sayısı 40 mm/min ilerleme hızı ve dik takım dalış parametreleri ile elde edilen SKK denemesi alt yüzey nüfuziyeti.....	86
Şekil 6.7 1000 min ⁻¹ devir sayısı 50 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1 derece parametreleri ile elde edilen SKK denemesi üst yüzeyi.....	87
Şekil 6.8 1000 min ⁻¹ devir sayısı 50 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 4 SKK denemesi üst yüzeyi.....	87
Şekil 6.9 SKK da 20 mm çapındaki batıcı ucun dalış açısına bağlı dalış miktarı...	88
Şekil 6.10 1000 min ⁻¹ devir sayısı 63 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 7 SKK denemesi üst yüzeyi.....	90
Şekil 6.11 1000 min ⁻¹ devir sayısı 63 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 7 SKK denemesi alt yüzey nüfuziyet.....	91
Şekil 6.12 1000 min ⁻¹ devir sayısı 80 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 10 SKK denemesi üst yüzeyi.....	91
Şekil 6.13 1000 min ⁻¹ devir sayısı 100 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 13 SKK denemesi üst yüzeyi.....	92
Şekil 7.1 Çekme deneyi numunesi boyutları.....	93
Şekil 7.2 1000 min ⁻¹ devir sayısı 63 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 7'e ait çekme deneyi numuneleri görülmektedir.....	94
Şekil 7.3 1000 min ⁻¹ devir sayısı 80 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı parametreleri ile elde edilen Numune 10'a ait çekme deneyi numuneleri görülmektedir.....	94
Şekil 7.4 1000 min ⁻¹ devir sayısı 50 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 4 çekme deneyi sonrası.....	95
Şekil 7.5 1000 min ⁻¹ devir sayısı 63 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 7 çekme deneyi sonrası.....	95
Şekil 7.6 Numune 4 ve 7 çekme deneyi sonrası uzama karşılaştırılması.....	96
Şekil 7.7 MECATOME T 255/100 marka sulu testere.....	97
Şekil 7.8 MECAPRESS II marka bakalite alma makinesi.....	97
Şekil 7.9 Kaynak edilmiş numuneden kesilmiş parçaların bakalitlenmiş durumu..	98
Şekil 7.10 Kaynak bölgesinin mikroskoptaki görünümü.....	98
Şekil 7.11 Kaynak bölgesi mikroiy yapı incelenmesi.....	99
Şekil 7.12 Mikrosertlik ölçümlerinin yapılışının şematik gösterimi.....	100
Şekil 7.13 SKK Numunelerinin birleşme hattına dik doğrultuda yapılmış olan mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	100
Şekil 7.14 Farklı kaynak parametrelerinde elde edilmiş kaynak dikişlerinin röntgen sonuçları.....	102

TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Yaygın olarak kullanılan ostenitik paslanmaz çelik türleri.....	6
Tablo 2.2 Yaygın olarak kullanılan ferritik paslanmaz çelik türleri.....	8
Tablo 2.3 Yaygın olarak kullanılan martenzitik paslanmaz çelik türleri.....	9
Tablo 2.4 Yaygın olarak kullanılan Ostenitik–ferritik paslanmaz çelik türleri.....	10
Tablo 3.1 Örtülü elektrot ile ark kaynağında elektrot seçimi.....	21
Tablo 3.2 Nokta kaynağı kaynak parametreleri.....	30
Tablo 5.1 Deneyde kullanılan numunelerin EN ve US normlarında gösterimleri..	77
Tablo 5.2 X5CrNi18-10'nin kimyasal bileşimi.....	77
Tablo 5.3 X5CrNi18-10'nin mekanik özellikleri.....	77
Tablo 5.4 X5CrNi18-10'nin fiziksel özellikleri.....	77
Tablo 6.1 SKK ilk denemelerinde kullanılan batıcı uç malzemelerinin EN ve US normlarında gösterimleri.....	82
Tablo 6.2 304 Paslanmaz çelik deney numunelerinin SKK'nda uygulanan parametreler.....	90
Tablo 7.1 Yapılan çekme deneylerinin sonuçları.....	95

1. GİRİŞ

1.1 Kaynağın Tanımı

Kaynak tanım olarak, sınırlandırılmış bir bölgede malzemeleri ısı veya basınç veya her ikisini birden kullanarak, bir ilave kaynak malzemesi katarak veya katmadan birleştirmektir. Toz, gaz veya pasta gibi yardımcı kaynak malzemeleri de işleme kolaylık sağlamaktadır.

1.1.1 Kaynaklı imalatın avantajları

Makine imaltında gün geçtikçe kullanımı artan kaynaklı konstrüksiyonların avantajları şöyle sıralanabilir:

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

- Kaynaklı bağlantıların mukavemeti lehimli, perçinli veya yapıştırırmalı bağlantılardan daha yüksektir.
- Kaynaklı imalatta pahalı olan lehim malzemesi gerekmez.

1.1.2 Kaynaklı imalatın dezavantajları

Kaynaklı imalat yönteminin başlıca dezavantajları şunlardır:

- Kaynak sonucunda parçada meydana gelebilecek iç gerilmelerden dolayı parçanın mukavemeti azalabilir.
- Genellikle aynı cinsten malzemeler birbiri ile kaynak edilebilir.
- Her malzeme kaynak için uygun olmayabilir.
- Kaynaklı bağlantıların kalite kontrolü zordur ve yapılması özel tecrübe ister.
- Kaynaklı parçaların demontajı yoktur bu nedenle sökülüp yeniden takılamazlar.
- Kaynaklı bağlantılarda kaynak bölgesinde içyapı değişimleri olabilir (Meran 2001).

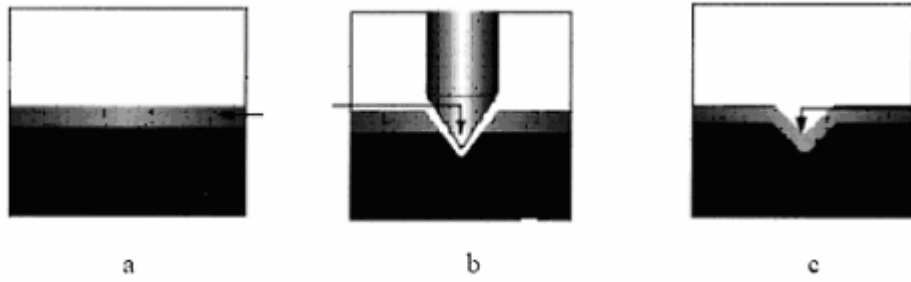
2. PASLANMAZ ÇELİKLER VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Paslanmaz Çeliğin Tanımı ve Özellikleri

Paslanmaz çelik esas olarak oksitleyici ortamlarda paslanmayan çeliklerin genel adıdır. Özellikle nikel ve molibden, çeliğin paslanmazlık özelliğini iyileştirmek için alaşım yapımında kullanılsa da paslanmazlığı sağlayan element kromdur. Paslanmazlık için gerekli en az krom miktarı, kütle olarak, %10,5'tir. Dünyada üretilen çeliğin çoğu karbonlu ve alaşımlı çeliktir. Karbon ve alaşımlı çeliğe göre paslanmaz çeliğin, daha küçük fakat cazip ve gelişen bir pazarı vardır (Kayır 2003).

Paslanmaz yapı çeliklerinin karbon oranı da en çok % 1,2'dir. Paslanmaz çelikler normal atmosfer şartlarına ve suya dayanıklıdır. Asitli ve korozif ortamlara dayanım da bu çeliklerin büyük bir bölümünde iyidir. Paslanmaz çeliklerde en önemli alaşım elementi kromdur. Kromun oksijene karşı olan afinitesi demirden fazla olduğu için mevcut oksijenle kendisi birleşerek 20-30 nm kalınlığında pasif Cr_2O_3 tabakası oluşturur (Yüksel 2002).

Paslanmaz çelikler su ve hava gibi oksitleyici ortama bırakıldıklarında oksitlenmeye başlar. Bu reaksiyon yüzeyde ince krom oksit film tabakasını oluşturur (Şekil 2.1 a). Bu film tabakası oksitleyici ortamlarda kararlı ve stabil olurken indirgen ortamlarda stabilitesini kaybeder ve tabaka incelmeye başlar. Film herhangi bir nedenle hasar görebilir (Şekil 2.1 b). Bu durumda pasif film tabakası oksitleyici ortamlarda kendi kendini tamir eder (Şekil 2.1 c). Artan krom, nikel ve molibden miktarı ile pasif film tabakasının stabilitesi artarken daha şiddetli korozif ortamlara karşı direnç de artar (WEB_1 2004).



Şekil 2.1 Paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan kromoksit film tabakasının hasara karşı davranışı (WEB_1 2004)

Alaşım elementi olarak çeliğin içinde %12'yi aşan miktarda kromun bulunması, çeliği atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, HNO_3 (nitrik asit) gibi oksitleyici asitlere karşı da korur. Buna karşın sadece krom içeren çelikler HCl (hidroklorik asit) ve H_2SO_4 (sülfirik asit) gibi asitlere karşı dayanıklı değildir. Bu asitler yüzeyi koruyan kromoksit tabakasını ortadan kaldırır ve dolayısı ile çelik kromsuz kalır. Günümüz endüstrisinde redükleyici asitlere karşı iyi bir dayanım gösteren, içinde nikel, molibden gibi alaşım elementleri bulunan paslanmaz çelikler imal edilmektedir. Bu tür çelikler yapılarında kromun yanı sıra yüksek miktarlarda nikel ve molibden içerirler. Bu alaşım elementleri çeliklerin mikro yapılarını etkin bir şekilde değiştirerek; paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasına yardımcı olur (Tülbentçi 1990).

2.2 Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilir. Krom miktarı yükseltilerek veya nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, azot, kükürt ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama ile ilave olumlu etkiler sağlanmaktadır. Bu şekilde makine tasarımcıları ve imalatçıları değişik kullanımlar için en uygun paslanmaz çeliği seçme şansına sahip olurlar. Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Paslanmaz çeliklerin içerisinde, paslanmazlık özelliği sağlayan elementlerin yanı sıra, diğer bazı gereksinimleri karşılamak üzere isteyerek katılan alaşım elementleri veya kaçınılmaz olarak bulunan karbon ve alaşım elementleri bulunmaktadır (Aran ve Temel 2004).

Paslanmaz çelikler ile ilgili çıkan en son standart EN 10088'dir. Bu standartta paslanmaz çelikler aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır (Yüksel 2002).

1. Ostenitik Paslanmaz Çelikler
2. Ferritik Paslanmaz Çelikler
3. Ostenitik - Ferritik Paslanmaz Çelikler
4. Martenzitik Paslanmaz Çelikler
5. Ayrışım Sertleştirilmesi Yapılabilen Paslanmaz Çelikler

2.2.1 Ostenitik paslanmaz çelikler

Ostenitik paslanmaz çeliklerde yapılan iyileştirmeler sonucunda karbon içeriği % 0,03 seviyesine indirilmiştir. Çeliğin alaşımına Ti, Mo ve Nb elementleri katılarak sürünme dayanımı ve taneler arası korozyon minimum seviyeye indirilmiştir. Paslanmaz çelik üretiminin yaklaşık % 75'ini ostenitik paslanmaz çelik oluşturur. Yaygın olarak kullanılan ostenitik paslanmaz çelik türleri Tablo 2.1'de verilmiştir(ASM International 1990).

%16-25 Cr ve %20'ye kadar Ni içeren yüzey merkezli kübik (ymk) kristal yapısına sahip çelikler ostenitik paslanmaz çeliklerdir. Korozyona dayanıklı çeliklerin en önemlilerindendir. Ostenitik içyapı dönüşüm göstermediği için normalleştirme ve sertleştirme ısıl işlemi uygulanamaz. Kromun ferrit yapıcı etkisi ostenit yapıcı alaşım elementleri katılarak giderilir. Ostenit yapıcı temel element niktir. Sertlik sadece soğuk şekillendirme ile artırılabilir(Bargel ve Schulze 1987, Rothman 1989).

Korozyon dirençleri bakımından karşılaştığımızda; ostenitik krom nikteli paslanmaz çeliklerin korozyon direnci, martenzitik ve ferritik kromlu paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. İçyapının ostenitik olması, geçiş sıcaklığı altında görülen gevrekleşmeyi ortadan kaldırır. Gerek sıfır altı (-270 °C'ye kadar) ve gerekse yüksek sıcaklıklardaki korozyon dirençleri, mekanik özelliklerin üstünlüğü bu çelik grubunun birçok alanda rakipsiz bir yapı çeliği olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Ostenitik krom nikteli paslanmaz çelikler genellikle nemli ortamlarda kullanılır (Tülbentçi 1995).

Çelikte yüksek nikel içeriği gerilmeli korozyon çatlamasına karşı riski azaltır. Bu çeliklerin, katılan alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak genel korozyona,

çukurcuk ve aralık korozyonuna dirençleri artan molibden ve krom ile artar. Ostenitik paslanmaz çelikler soğuk haddelenmiş veya çekilmiş halde yüksek mukavemetli ve yüksek korozyon dirençli çeliklerdir (Nickel Development Institute, 1974).

Tablo 2.1 Yaygın olarak kullanılan ostenitik paslanmaz çelik türleri (Meran 2004).

Ostenitik Paslanmaz Çelikler			
Kısa Adı	Malz. No	Kısa Adı	Malz. No
X10CrNi18-8	1.4310	X2CrNiMoN17-13-3	1.4429
X2CrNi18-7	1.4318	X3CrNiMo17-13-3	1.4436
X2CrNi18-9	1.4307	X2CrNiMo18-14-3	1.4435
X2CrNi19-11	1.4306	X2CrNiMoN18-12-4	1.4434
X2CrNi18-10	1.4311	X2CrNiMo18-15-4	1.4438
X5CrNi18-10	1.4301	X2CrNiMoN17-13-5	1.4439
X8CrNiS18-9	1.4305	X1CrNiSi18-15-4	1.4361
X6CrNiTi18-10	1.4541	X12CrMnNiN17-7-5	1.4372
X6CrNiNb18-10	1.4550	X2CrMnNiN17-7-5	1.4371
X4CrNi18-12	1.4303	X2CrMnNi18-9-5	1.4373
X1CrNi25-21	1.4335	X3CrNiCu19-9-2	1.4560
X2CrNiMo17-2-2	1.4404	X6CrNiCuS18-9-2	1.4570
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	X3CrNiCu18-9-4	1.4567
X5CrNiMo17-2-2	1.4401	X3CrNiCuMo17-11-3-2	1.4578
X1CrNiMoN25-22-2	1.4466	X1NiCrMoCu31-27-4	1.4563
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539
X6CrNiMoNb17-12-2	1.4580	X1CrNiMoCuN25-25-5	1.4537
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	X1CrNiMoCuN20-18-7	1.4547
		X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529

Paslanmaz çeliklerin çeşitleri çok fazla olmasına rağmen en çok üretilen türü ostenitik tipte olanlarıdır. Bu tip gıda sanayinde yaygın kullanıma sahiptir. Bu türün de çok fazla sayıda çeşidi olmasına rağmen ülkemizde tamamı bulunamamaktadır.

Ostenitik paslanmaz çeliklerin temel özellikleri kısaca aşağıda belirtildiği gibidir:

- Mükemmel korozyon dayanımına sahiptirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri mükemmeldir.
- Sünük olduklarından kolay şekillendirilebilirler.
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır.
- Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler.
- Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir.

- Manyetik değildirler (tavlanmış halde).
- Dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilir (Aran ve Temel 2004).

Bu çeliklerin yaygın kullanım alanları;

1-Bilgisayar disket sürücüler, kapakları ve yayları

2-Mutfak lavabosu

3-Yemek hazırlama ekipmanları

4-Mimari uygulamalar

5-Bilgisayar klavyesi ve tuşlarının yayları

6-Kimyasal gübre hazırlama ekipmanlarıdır (Aldemir 2000).

2.2.2 Ferritik paslanmaz çelikler

Isıl işlemle sertleştirilemezler ve bazı türleri çok az nikel içerir (ASM International1980). %11-30 Cr içeren hacim merkezli kübik (hmk) kristal yapısına sahip alaşımlardır. Manyetikler, soğuk veya sıcak haddelenebilirler, ancak tokluk, süneklik ve korozyon dirençleri normalleştirilmiş hallerinde maksimum değeri gösterir (Kanbolu 1996). Bu çelikler, pahalı ve stratejik bir element olan nikel içermemeleri nedeni ile de krom nikelli ostenitik paslanmaz çeliklerden daha ekonomiktirler (Fırat 1998). Bu çeliklerin sertleştirilebilmeleri ancak soğuk şekil değiştirme ile mümkündür. Yaygın olarak kullanılan ferritik paslanmaz çelik türleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Ferritik paslanmaz çeliklerin temel özellikleri kısaca aşağıda belirtildiği gibidir:

- Korozyon dayanımı, krom miktarının artması ile iyileşir,
- Isıl işlemle dayanım artırılmaz ve sadece tavlanmış durumda kullanılır,
- Manyetikler,
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür,
- Ostenitik çelikler kadar kolay şekillendirilemezler (Aran ve Temel 2004).

Ayrıca ostenitik krom nikelli çeliklere nazaran şu üstün özelliklere sahiptir;

1- Klorürlü çözeltilerde gerilmeli korozyon çatlamasına karşı dirençlidirler,

- 2- Daha yüksek akma mukavemetine sahiptirler,
- 3- Daha az soğuk şekil değiştirme sertleşmesi gösterirler,
- 4- 750 °C'ye kadar manyetikleşme özelliğine sahiptirler (Kanbolu 1996).

Tablo 2.2 Yaygın olarak kullanılan ferritik paslanmaz çelik türleri (Meran 2004)

Ferritik Paslanmaz Çelikler			
Kısa Adı	Malz. No	Kısa Adı	Malz. No
X2CrNi12	1.4003	X6CrMoS17	1.4105
X2CrTi12	1.4512	X2CrMoTi17-1	1.4513
X6CrNiTi12	1.4516	X2CrMoTi18-2	1.4521
X6Cr13	1.4000	X2CrMoTiS18-2	1.4523
X6CrAl13	1.4002	X6CrNi17-1	1.4017
X2CrTi17	1.4520	X6CrMoNb17-1	1.4526
X6Cr17	1.4016	X2CrNbZr17	1.4590
X3CrTi17	1.4510	X2CrAlTi18-2	1.4605
X3CrNb17	1.4511	X2CrTiNb18	1.4509
X6CrMo17-1	1.4113	X2CrMoTi29-4	1.4592

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler, ekonomiklikleri yanında üstün özellikleri nedeni ile de çok çeşitli kullanım alanları bulmuşlardır. Yaygın kullanım alanları;

- 1-Otomobil eksozu (X2CrTi12) AISI 409),
- 2-Bilgisayar sürücü disket göbeği (X6Cr17)(AISI 430),
- 3-Otomobil sanayi (kalıplama, iç döşeme, şekil verme),
- 4-Yüksek ısı tankları (X2CrMoTi18-2)(AISI 444),
- 5-Kömür maden işletmesi ekipmanları (ASM International 1980).

2.2.3 Martenzitik paslanmaz çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, bileşiminde %11,5-18 Cr ve %0,15-1,5 C içeren sertleştirme koşullarında hacim merkezli kübik (hmk) kristal yapısına sahip ve ısıl işlem ile sertleştirilebilen martenzitik yapıya paslanmaz çeliklerdir. Yaygın olarak kullanılan martenzitik paslanmaz çelik türleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Martenzitik paslanmaz çelikler demir-krom çelikleridir. Diğer alaşım elementlerinin ilavesi düşük miktarlardadır. Kuvvetli ostenit yapıcı olan karbon belirli bir miktara

ulaşınca kromun ferrit yapıcı etkisi ortadan kalkar ve yüksek sıcaklıkta oluşan ostenitin soğuma hızına bağlı olan dönüşüm ürününe göre genellikle havada su alan martenzitik paslanmaz çelik elde edilir (Bargel ve Schulze 1987).

Yüksek alaşımlı çelikler gibi sertleştirilip temperlenen bu çelikler manyetikler ve oldukça üstün mukavemet özelliklerine sahiptirler. Ancak korozyon direnci diğer paslanmaz çeliklere göre daha düşüktür.

Tablo 2.3 Yaygın olarak kullanılan martenzitik paslanmaz çelik türleri (Meran 2004)

Martenzitik ve Ayrışım Sertleşmesi Yapılabilen Paslanmaz Çelikler			
Kısa Adı	Malz. No	Kısa Adı	Malz. No
X12Cr13	1.4006	X39CrMo17-1	1.4122
X12CrS13	1.4005	X105CrMo17	1.4125
X20Cr13	1.4021	X90CrMoV18	1.4112
X30Cr13	1.4028	X17CrNi16-2	1.4057
X29CrS13	1.4029	X3CrNiMo13-4	1.4313
X39Cr13	1.4031	X4CrNiMo16-5-1	1.4418
X46Cr13	1.4034	X5CrNiCuNb16-4	1.4542
X50CrMoV15	1.4116	X7CrNiAl17-7	1.4568
X70CrMo15	1.4109	X8CrNiMoAl15-72	1.4532
X14CrMoS17	1.4104	X5CrNiMoCuNb14-5	1.4594

Su verilmiş ve temperlenmiş olan ve piyasada temin edilebilen bu tür çeliklerin çekme mukavemeti özellikleri yüksektir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin derin çekme mukavemeti, aynı karbon içeriğine sahip karbonlu ve alaşımlı çeliklerden çok daha yüksektir (Kanbolu 1996). Kaynak kabiliyetleri düşüktür (ASM International 1980).

Martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynak edilebilirliklerini geliştirmek ve kaynak bölgesinde tane irileşmesi sonucu oluşan tokluk azalması problemi dikkate alınarak az karbonlu krom-nikelli martenzitik paslanmaz çelikler üretilmiştir (Kanbolu 1996).

2.2.4 Ostenitik–Ferritik (Dubleks) paslanmaz çelikler

1970’lerden bugüne kullanımlarında hızlı bir artış gösteren ostenitik-ferritik paslanmaz çelikler aynı zamanda kullanıcıya birçok avantaj sağlamaktadır. Bu çeliklerin özelliği aynı anda çift yapıyı bünyelerinde bulundurmalarıdır. Ostenitik-ferritik

paslanmaz çelikler yapılarında %50 ferrit ve %50 ostenit bulundurlar. Ostenitik çeliklerle karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemet değerlerine, iyi süneklığe, korozyon direncine ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı yüksek mukavemete sahiptir (Bargel ve Schulze 1987).

Ostenitik-ferritik paslanmaz çelikler büyük çapta kimya endüstrisinde, doğal gaz tesislerinde ve kimyasal maddeler için tank yapımında kullanılmaktadır. En çok kullanılan türü EN 1.4460 (AISI 329) türüdür. Bu çelikler sıcak yırtılma eğilimi göstermezler. Yaygın olarak kullanılan ostenitik–ferritik paslanmaz çelik türleri Tablo 2.4’de verimiştir (Aldemir 2000).

Tablo 2.4 Yaygın olarak kullanılan ostenitik–ferritik paslanmaz çelik türleri (Meran 2004).

Ostenitik-Ferritik Paslanmaz Çelikler	
Kısa Adı	Malz. No
X2CrNiN23-4	1.4362
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501

Genellikle kimyasal aparat imalatında, arıtma tesislerinde ve deniz veya off-shore teknolojisinde kullanılır (Aran ve Temel 2004).

2.2.5 Ayrışım sertleştirme yapılabilen paslanmaz çelikler

Katı bir fazdan solvüs çizgisinin geçilmesi sırasında başka bir katı fazın ayrışması kolayca engellenebilir. Böylece kristal kafesi gerilerek malzemenin dayanımı artar. Bu olay ayrışım (çökme) sertleştirme temelinin oluşturur. Sertliğin artış nedeni, çökelen fazın taneciklerinin, dislokasyon hareketlerini engelleyici bir hareket göstermesidir (Aldemir 2000).

Bu çelikler 425 °C üzerindeki sıcaklıklarda yüksek korozyon direnci nedeni ile endüstriyel ve askeri uygulamalarda kullanılır.

Ayrışım Sertleştirmesi Yapılabilen Paslanmaz eliklerin temel özellikleri kısaca aşağıda belirtildiği gibidir

- Orta ila iyi derecede korozyon dayanımı vardır.
- Çok yüksek mekanik dayanım gösterirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir
- Manyetikler (Aran ve Temel 2004).

Tipik kullanım yerleri, dişli kutuları, yakıt tankları, uçak motorları, buhar türbinleri ve kesme takımlarıdır (Harvey 1982).

3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI

3.1 Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti ve Özellikleri

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

Gıda sanayinde en çok kullanılan ve en ideal paslanmaz çelik türü olan ostenitik paslanmaz çeliklerdir. Bu bölümde ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak özellikleri belirlenecektir.

Tüm paslanmaz çelikler herhangi bir ark kaynak yöntemi ile birleştirilebilir, ancak kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgedeki korozyon dayanımı, artık gerilmeler, çarpılma ve dikişlerde çatlak oluşumu gibi hususlara dikkat edilmelidir. Paslanmaz çeliklerin direnç kaynağı da oldukça yaygındır. Karbon çeliğinden sonra en çok direnç kaynağı uygulanan malzeme paslanmaz çeliklerdir (Gerken ve Kotechki 1990).

Ostenitik çeliklerin düşük ısı iletimi, yüksek elektrik direnci ve manyetik olmamaları sonucu, kaynak sırasında karbonlu çeliklerden daha düşük kaynak akımları yeterlidir. Ancak ısıl genişleme katsayıları yüksek olduğundan çarpılma sorunu vardır. Kaynak süreleri çok kısa olduğundan karbür çökmesi nedeni ile korozyon dayanımında önemli bir düşme olmaz. Ancak bindirme şeklinde yapılan nokta kaynaklarında belirli ortamlarda aralık korozyonu problem oluşturabilir. Çok yaygın olmasa da martenzitik ve ferritik türlerde de direnç kaynağı uygulanabilir. Kaynak sonrası soğumada martenzit oluşumu söz konusu ise temperleme için ikinci bir akım uygulaması gerekebilir. Paslanmaz çeliklerde genellikle gaz ergitme kaynağı hemen hemen hiç uygulanmaz. Gaz kaynağında kaynak metalini oksidasyondan veya karbürasyondan koruyan bir kaynak atmosferi oluşturmak oldukça güçtür.

3.2 Ostenitik Paslanmaz Çeliklerde Kaynak Kabiliyeti

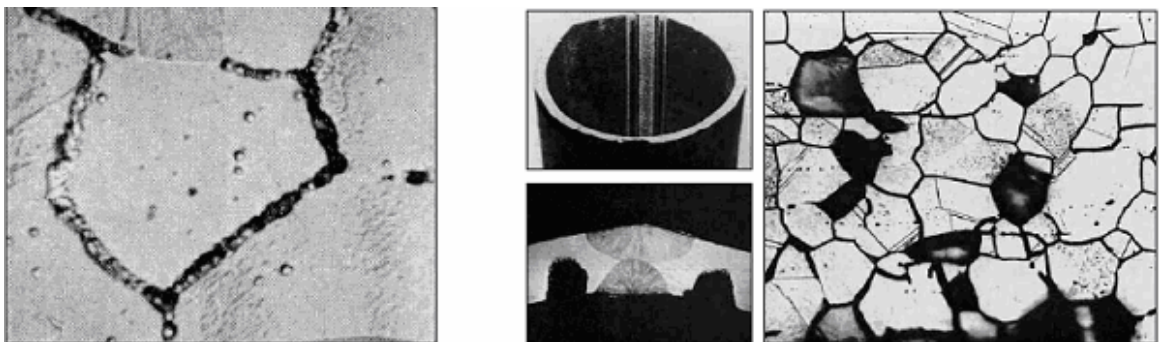
Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağına geçmeden önce bu çeliklerin ısı iletim kabiliyetinin karbonlu çeliklerin üçte biri kadar olduğu bilinmelidir. Bu durum, kaynak yapılan bölgede sıcaklığın daha uzun süre kalacağını gösterir. Genleşme katsayılarının ostenitik çeliklerde, karbonlu çeliklerden % 50 kadar daha fazla olduğu bilinmelidir. Bu husus yalnız kaynakçıyı değil, tasarımcıyı da ilgilendirir. Paslanmaz çeliklerin özgül elektrik direncinin, karbonlu çeliklere göre 4-7 misli daha yüksek olması dikkat edilmesi gereken başka bir özelliktir. Çünkü bu üç faktörün paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti üzerine etkisi büyüktür.

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

malzemeleri ise sınırlı olarak, sadece dolu tel ve özlü tel olarak üretilmektedir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında başlıca üç kaynak problemi ile karşılaşılabilir. Bunlar sırası ile; ısının etkisi altında kalan bölgede "Krom Karbür" oluşması sonucu meydana gelen hassas yapı, kaynak dikişinde görülen "Sıcak Çatlak" oluşumu ve yüksek çalışma sıcaklıklarında karşılaşılan "Sigma Fazı" oluşumu riskleridir (Odabaş 2004).

3.2.1 Krom karbür oluşumu

Paslanmaz çeliklerin kaynağında, sıcaklığın 450°C 'nin üzerine çıkması ile karbonun difüzyon hızı, karbon molekülünü tane sınırlarından dışarı çıkaracak kadar artar. Tane sınırlarında biriken karbon, kroma karşı olan yüksek ilgisinden dolayı bu bölgede krom ile birleşerek krom karbür oluşur. Ostenitik paslanmaz çelikler tavlandıktan sonra soğurken 500°C-900°C arasındaki sıcaklıklardan geçerken (özellikle 450°C-850°C sıcaklık aralığında uzun süre kaldıklarında) içyapılarında krom karbür çökmesi oluşur (Şekil 3.1). Böylece tane sınırlarında bir krom azalması ve dolayısı ile de taneler arası korozyon meydana gelir. Oluşan krom karbürün ağırlık olarak %90'ını krom oluşturduğundan, çok karbon bulunması halinde bile, tane sınırlarında kromca bir zayıflama meydana gelir. Bunun sonucunda malzeme korozif bir ortamda bulunduğu anda, kromca zayıflamış olan tane sınırlarında korozyon oluşur. Bu şekilde ortaya çıkan taneler arası korozyon bütün malzemeyi çok kısa bir zamanda kullanılamaz hale getirir. Çeliğin karbon içeriği arttıkça bu olay şiddetlenir.



Şekil 3.1 Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökmesi (Odabaş 2004)

Bu sorun, kromla birleşerek krom karbür oluşmasına neden olan karbonun yapıda düşük seviyelerde tutulduğu düşük karbonlu (L tipi) ana metallerin ve dolgu metallerinin kullanılmasıyla önlenabilir. Bunun yanında kaynak işleminin ön tav uygulanmadan yapılması, ısı girdisinin düşük seviyede tutulmasına özen gösterilmesi ve bakır altlık kullanılarak hızlı soğuma sağlanması hassas sıcaklık aralığında kalma süresinin kısa tutulması açısından oldukça yararlıdır. Diğer bir yöntem, stabilize edilmiş olan paslanmaz çelik ana malzemelerin ve dolgu metallerinin kullanılmasıdır. Bu sayede stabilizatör görevi gören alaşım elementleri karbon ile reaksiyona girecek ve krom miktarının azalmadan yapıda kalması sağlanacağından korozyon dayanımında herhangi bir düşüş ile karşılaşılmayacaktır. AISI 321 kalite paslanmaz çelikler stabilizatör olarak titanyum (Ti) içerirken AISI 347 türü paslanmaz çelikler niyob (Nb+Ta) ile stabilize edilmişlerdir. Her iki element de kromdan daha güçlü karbür oluşturma özelliğine sahiptir. Bunların dışında kalan bazı ısıl işlem yöntemleri pahalı olmaları, pratik olmamaları ve parçalarda çarpılmalara yol açmaları nedeniyle pek tercih edilmezler.

3.2.2 Sıcak çatlak oluşumu

Ostenitik çelik kaynakları bazı hallerde, aşağıdaki iki belirtici özelliği olan bir çatlama şekline hassas olurlar;

- 1) Çatlama, çok yüksek sıcaklıklarda, muhtemelen 1200°C'nin üstünde, soğuma sırasında meydana gelir.
- 2) Çatlaklar dentritler arasında olur, yani soğuma dokusunun kristal sınır birleşmelerini takip eder.

Genel olarak, tam soğumadan sonra tamamen ostenitik olan kaynakların, çatlamaya en hassas oldukları görülür. Bunun yanında kaynak ısısından etkilenmiş bölge de yüksek sıcaklıkta çatlama hassas olabilir. Sıcak çatlamanın temel nedeni; kükürt (S) ve fosfor (P) gibi elementlerin oluşturduğu ve tane sınırlarında toplanma eğilimi yüksek olan düşük erime sıcaklığına sahip metalik bileşimlerdir. Bu bileşimler, eğer kaynak dikişinde veya ısının etkisi altında kalan bölgede bulunuyorsa, tane sınırlarına doğru yayılırlar ve kaynak dikişi soğurken ve çekme gerilmeleri oluştuğunda çatlama neden olurlar. Bütün diğer koşullar aynı kalmak suretiyle, yüksek sıcaklıkta çatlama

hassasiyeti ferrit eğilimi attıkça azalır. Yine ana metale yeterli bir ferritik eğilim vererek bu çatlamaı önlemek mümkündür. Ferrit, kükürt ve fosfor bileşimlerini kontrol altında tutabilen ve ferritik ostenitik yapıya sahip olan tane sınırları oluşturarak sıcak çatlak oluşumunu engeller. Alaşım ve ilave elementler bakımından; nikel, tantal, silisyum, titanyum ve niyob çatlama eğilimini artırır. Krom, tungsten, mangan, molibden ve azot ise çatlama eğilimini azaltır. Çatlamaı önlemek için en çok uygulanan tedbir, kaynakta ergimiş metal bileşimini % 1-8 ferrit ihtiva edecek şekilde ayarlamaktır. Burada çatlama mukavemetini menfi olarak bozan elementler, ostenite nazaran ferrit içinde daha çok ergimektedir (Anık ve Vural 1991).

Bu sorun "S" ve "P" miktarlarının çok düşük seviyelerde tutulması ile de giderilebilir, ancak bu durumda, çeliklerin üretim maliyetleri belirgin bir şekilde artacaktır.

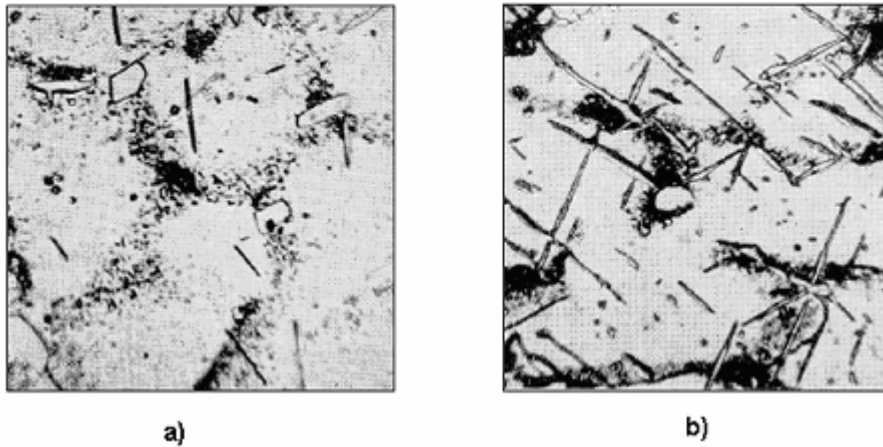
3.2.3 Sigma fazı oluşumu

Sigma fazının, ferritik kromlu paslanmaz çeliklerde görülmesinin yanı sıra, %9'dan daha az nikel içeren ostenitik paslanmaz çeliklerde kaynak bölgesinde oluşması, bu tür çeliklerin de kaynak kabiliyetini olumsuz yönde etkiler. 550°C-925°C sıcaklık aralığında oluşan sert, kırılgan ve manyetik olmayan bir metaller arası bileşiktir. Sigma fazı, kromlu veya krom-nikel esaslı paslanmaz ve ısıya dayanıklı çeliklerin kaynak bölgesinde oluşur. Sigma fazının (800 HV-1000 HV) oluşabilmesi için ostenitik yapı içinde bir miktar da ferrit bulunması gerekir. Bu faz genellikle çeliğin, alaşımın bileşimine göre 650°C-900 °C arasında bir sıcaklıkta ve uzun süre tutulması sonucu ferritten dönüşüm suretiyle teşekkül eder. Sigma fazı kırılganlığı 650- 850°C sıcaklıklar arasında görülür ve bu sıcaklık aralığında kalma süresi ile oluşan yapının yoğunluğu arasında yakın bir ilişki vardır. Bu ilişki aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.2 a ve 3.2 b) görülmektedir. Faz dönüşüm hızının en yoğun olduğu sıcaklık 720°C civarındadır.

Yapıda bulunan ferrit miktarının % 3-4 ile sınırlı tutulması durumunda, ostenit tanelerinin etrafı ferrit ile çevrilemeyecek ve kırılganlık riski önlenecektir. Buna karşın ferrit miktarının % 12'yi geçmesi ile birlikte esneklik kabiliyeti hızla azalacaktır.

Ferritin sigma fazına dönüşmesi sonucu kaynak dikişinde oluşan çatlama eğilimi gösterir.

Kaynak işlemi sırasında banyonun çok hızlı soğuması ve katılaşması nedeni ile sigma fazı kolay oluşamaz. Bu sorun esas olarak ferrit içeriği çok yüksek olan bir kaynaklı bağlantının kaynak işleminden sonra uzun süre yüksek sıcaklık değerlerinde kalacak bir çalışma ortamında kullanılması durumunda karşımıza çıkar.



Şekil 3.2 Paslanmaz çeliklerde sıcaklık ve zamana bağlı sigma fazı oluşumu **a)**780°C 'da 100 saat ısıtma işlemi uygulandıktan sonra x1600 içyapı incelemesi **b)**780°C'da 500 saat ısıtma işlemi uygulandıktan sonra x1600 içyapı incelemesi (Odabaş 2004)

Sigma fazı konusunda yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- a-** Sigma fazının oluşumu 750°C'da, 650°C'dakinden daha çabuk meydana gelir. 750°C'da 30 saat gibi bir zamana gereksinim varken bu süre 650°C'da 1 haftaya çıkar.
- b-** Sigma fazı oluşumu soğuk şekil değiştirme ile hızlanır.
- c-** Sigma fazı oluşumuna kuvvetli olarak etki eden elementler : molibden (Mo), krom (Cr), niyob (Nb) ve silisyum (Si)'dur.
- d-** Sigma oluşumunu kuvvetlendiren elementlerin miktarı yüksek ise, belirli şartlar altında, kaynağa bağlı olmadan ve ısıtma işlemi uygulamadan da sigma fazı meydana gelebilir.

- e- Sigma fazı, 950°C -1100°C sıcaklıklar arasında belirli bir süre tavlandıktan sonra, suda hızlı olarak soğutularak giderilebilir.
- f- Sigma fazının giderilmesi için uygulanan ısıtıl işleminden sonra oluşan yapıdaki ferrit miktarı, ısıtıl işlem uygulanmamış yapıdakine oranla daha azdır.
- g- Ferrit miktarı, parçaya 1150°C'da homojenleştirme tavlama uygulanarak daha da düşürülebilir. Bu durumda ferrit mikro toplanmalar şeklinde oluşur.
- h- Isıtıl işlem uygulanmamış 19 Cr / 9 Ni /1.5 Mo tipi çeliğe ait kaynak bölgesinin yapısında bulunan % 15 ferrit sigma fazına dönüşünce, kaynak dikişinin mukavemet özelliklerinde aşağıda belirtilen değişimler meydana gelir :
- Çekme dayanımı yükselir, akma sınırı düşer.
 - Uzama, büzülme ve çentik dayanımları önemli derecede azalır.
 - 24 saat 750°C'da tavlama yapılmış olan kaynak bölgesinin 0°C'daki çentik dayanımı, 650°C'da bir hafta tavlama yapılan kaynak yerinin çentik dayanımı ile hemen hemen aynıdır. Buna karşın, yapısında % 12 ferrit bulunan kaynak bölgesinin çentik dayanımının 1/10'u kadardır. Aradaki bu fark, yüksek sıcaklıklarda daha da azalmaktadır.
- i- 300-400°C'ın üzerinde oldukça iyi çentik değerleri elde edildiği için, yüksek işletme sıcaklığında çalışan konstrüksiyonlarda, sigma fazının neden olduğu gevrekleşmeden korkulmamalıdır.
- k- Sigma fazının neden olduğu kırılma, kaynak bölgesinin tavlama yapılmadan önceki durumunda içerdiği ferrit miktarına bağlıdır. Eğer kaynak bölgesi başlangıçta % 6,5 ferrit içerirse, sigma dönüşmesi çentik darbe dayanımının azalmasına neden olmaz. Burada ferrit miktarı az olduğu için, ferrit ostenitik yapı içerisinde ağ şeklinde değil, izole edilmiş odacıklar halinde meydana gelir. Bu yolla elde edilen sigma, yapıya bir süneklik kazandırmaktadır.

3.3 Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Uygulanan Kaynak Yöntemleri

Paslanmaz çelikler, çağımız endüstrisinin en vazgeçilmez malzemeleri arasına girmişlerdir ve her gün kullanım alanları artmaktadır. Her türde ve biçimde bulunabilen ve kolaylıkla şekillendirilebilen bu çeliklerin geliştirilmiş kaynak yöntemleri ile başarılı bir biçimde kaynak edilebilmeleri uygulama alanlarını daha da genişletmektedir (Tülbentçi 1995).

Paslanmaz çelik yapı elemanlarının birbiri ile veya farklı çelikler ile birleştirmelerinde kullanılan kaynak yöntemleri ergitme kaynak yöntemleri ve basınçlı kaynak yöntemleri olarak ikiye ayrılır:

1. Ergitme Kaynak Yöntemleri

- a) Gaz ergitme kaynağı
- b) Örtülü elektrot ile ark kaynağı
- c) Ergiyen elektrod ile gazaltı kaynağı
- d) Ergimeyen elektrod ile gazaltı kaynağı
- e) Plazma arkı ile kaynak
- f) Tozaltı kaynağı
- g) Elektron ışın kaynağı
- h) Lazer ışını kaynağı

2. Basınçlı Kaynak yöntemleri

- a) Elektrik direnç kaynak yöntemleri
- b) Sürtünme kaynağı
- c) Difüzyon kaynağı (Önal 1997).

3.3.1 Gaz ergitme kaynağı

Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı için tavsiye edilen bir yöntem değildir. Genellikle tamir işlerinde kullanılan oksii-asetilen kaynağı, ostentik paslanmaz çeliklerin kaynağında özellikle ince sacların birleştirilmesinde nadiren kullanılır.

3.3.2 Örtülü elektrot ile ark kaynağı

Örtülü elektrot ile ark kaynağı yöntemi, uygulamada demir ve demir olmayan metal ve alaşımlarının kaynağında her kaynak pozisyonunda kullanılabilir. Ancak bu kaynağı uygularken, teknik donanım kadar kaynakçının bilgisi de büyük önem taşımaktadır.

Bir kaynak yönteminin diğerine tercih edilmesinde ise şu faktörler göz önüne alınır;

- a) Uygun kaynak cihazlarının varlığı ve kurularak kullanılabilirliği
- b) Kaynak edilecek malzeme kalınlığı

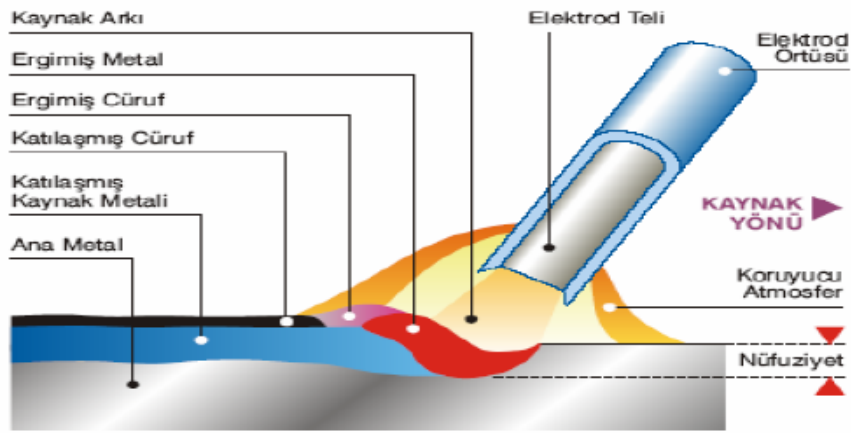
- c) Kaynağın gerçekleştirildiği ortam
- d) Kaynak pozisyonu
- e) Malzemenin kimyasal bileşimi
- f) Yardımcı donanım ve ekipmanın bulunabilirliği.

Örtülü elektrod kaynağında kullanılan elektrod türleri çok fazla olup ana metalin türüne uygun olarak elektrod seçimi yapılmalıdır. Kullanımı kolay ve her pozisyonda kaynak yapma imkanı vardır.

Bu kaynak daha çok tamir ve montaj kaynaklarında tercih edilmelidir. Ayrıca kullanılan elektrodların mutlaka kuru olması gerekir. Bunun için elektrodlar uygun şekilde depolanmalı ve ön ısıtma gerekiyorsa mutlaka yapılmalıdır. Bu kaynaktaki cürufun temizliği önemlidir. Bu temizliğin dikkatle ve hassasiyetle yapılması gerekir (Anık 1991).

Paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinden dolayı kaynak bölgesinde karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağına nazaran daha fazla kendini çekme olayının meydana geldiğini daha önce belirtilmişti. Bu olay dikişin soğuması sırasında bu bölgede şiddetli iç gerilmelere dolayısıyla çatlama tehlikesine yol açar. Bu nedenle, kaynak edilecek yapı elemanında kaynak dikişlerinin en az gerilme birikimi oluşacak bölgelere kaydırılması gerekir. Özellikle kesilmiş kaynak dikişleri ile çift taraflı iç köse dikişlerinden mümkün olduğu kadar kaçınılmalıdır. Kaynak ağzlarının standartlara uygun hazırlanması, paslanmaz çelik ve elektrot üreticilerinin önerilerine uyulması gereklidir. Aksi takdirde yapı elemanı çok kısa bir servis ömrüne sahip olacaktır. Şekil 3.3'de örtülü elektrot ark kaynağı prensip seması görülmektedir.

Yüksek mukavemetin gerekli olduğu veya dinamik zorlamaların etkin olduğu hallerde parça tüm kesiti boyunca kaynatılmak zorundadır ve dikiş tam bir nüfuziyete sahip olmalıdır.



Şekil 3.3 Örtülü elektrot ile ark kaynağı prensip seması (WEB_4 2004)

Korozyon direnci bakımından, kaynak metalinin kimyasal bileşiminin esas metale çok yakın olması gerekmektedir. Bunun için doğru elektrot türünün seçimi önemlidir. Örtülü elektrot ile ark kaynağında elektrot seçimi Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 Örtülü elektrot ile ark kaynağında elektrot seçimi (WEB_5 2004)

Ana Metal			Kaynak Sarf Malzemesi
EN 10088		AISI	EN 1600
Kısa Adı	Malzeme Numarası		Örtülü Elektrotlar
X5CrNi18-10	1.4301	304	E 19 9
X2CrNi18-9	1.4307	304L	E 19 9 L
X6CrNiTi18-10	1.4541	321	E 19 9 Nb
X5CrNiMo17-2-2	1.4401	316	E 19 12 2
X2CrNiMo17-2-2	1.4404	316L	E 19 12 3 L
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316Ti	E 19 12 3 Nb
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	317L	E 19 13 4 NL
X10CrNi18-8	1.4310	301	E 19 9
X2CrNi18-7	1.4318	301L	E 19 9 L
X12CrNi23-13	1.4833	309S	E 22 12
X8CrNi25-21	1.4845	310S	E 25 20
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	317L	E 19 13 4 NL

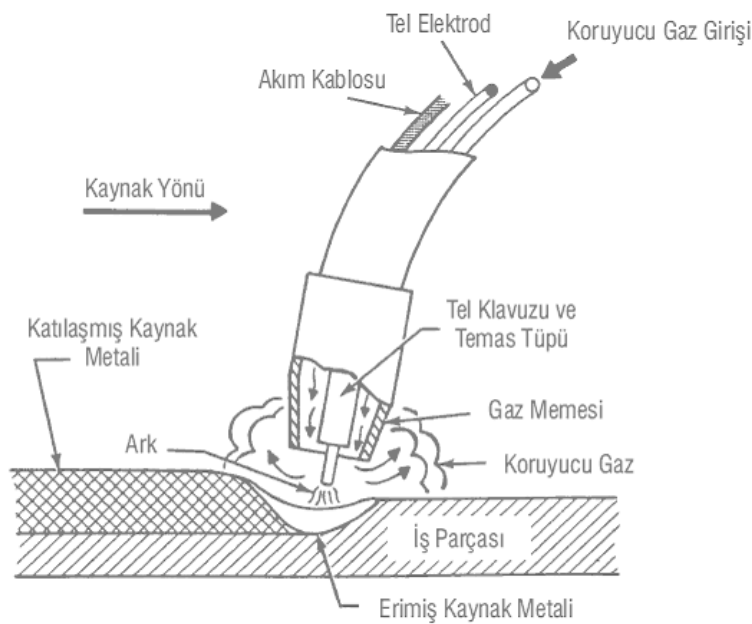
Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler sıcak çatlamaya karşı duyarlıdır. Bu durumda alınması gereken önlemler ve dikkat edilmesi gereken konuları şöyle

sıralayabiliriz;

- 1- En küçük elektrot çapı seçilmelidir.
- 2- En düşük akım şiddeti kullanılmalıdır.
- 3- Elektrota zigzag hareketi verilmeli ve pasolar ince çekilmelidir.
- 4- Çok pasolu kaynaklarda her paso çekildikten sonra parça oda sıcaklığına kadar soğutulmalı ve ikinci paso sonra çekilmelidir. Soğuma olanaklar ölçüsünde hızlı bir şekilde gerçekleştirilmelidir.
- 5- Kaynağın bitimindeki krater mutlaka doldurulmalı, kaynak sırasında çatlak saptanırsa taşlanarak yok edilmeli ve sonra kaynatılmalıdır (Kanbolu 1996).

3.3.3 MIG kaynağı

Soy gaz atmosferi altında eriyen metal elektrodla yapılan MIG yönteminde kaynak dikişi, sürekli olarak eriyen kaynak teli ile eriyen ana malzemedan oluşur(Şekil 3.4). Kaynak telinin sürekli bir akış halinde olması, elektrik ark kaynağına göre üstünlüklerini ortaya çıkarmaktadır. Çalışma tekniği olarak, MIG kaynak yöntemi ile yatay pozisyondaki dikişler hem el hem de otomatik olarak kaynak edilebilir. Ancak zor pozisyonlarda yalnız el kaynağı kullanılır.



Şekil 3.4 Gazaltı kaynağı prensip şeması (Odabaş 2004)

Kaynak dikişinin biçim ve boyutları, ark gücü, kaynak telinin ergime oranı ve ana malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkar. Kaynak dikişinin yüksekliği, genişliği ve nüfuziyet miktarı, aynı hamlaç tutuluşunda kaynak gerilimini, kaynak akım şiddetini ve kaynak hızını değiştirerek ayarlanabilir.

Akım şiddeti yükseldikçe nüfuziyet artar, ancak dikiş genişliği ve yüksekliği azalır. Kaynak geriliminin ve hızının yükselmesi de dikişin genişliğine ters yönde etki yapar.

MIG kaynak yönteminde, sıçrama kaybının azalması ve kararlı bir ark elde edilmesi amacıyla, kaynak teli doğru akım üreticinin pozitif kutbuna bağlanmalıdır. Eğer negatif kutba bağlanırsa, düzensiz bir işlem ile fazla miktarda sıçrama kaybı olur.

MIG yöntemi ile ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı; kısa ark, darbeli ark kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Kaynak, düşük akım şiddetlerinde ve 18-24 V arasındaki ark gerilimlerinde oluşur. Bu ark türleri 0,25 mm incelikteki sacların kaynağında da kullanılabilir. Bu tekniklerde ısı girdisi sprey ark haline karşın daha düşük olduğundan çarpılmalar da en az seviyede oluşur.

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin MIG kaynağında argon, argon+oksijen veya CO₂ gibi oksitleyici bileşen içeren karışım koruyucu gazlar kullanılır. Argon, oksijen veya karbondioksit katılması arkın dengelenmesini sağlar.

Argon helyum ilavesi kaynak dikişinin nüfuziyet formunu genişletir. Saf argon alın birleştirmelerinde nüfuziyet azlığına neden olabilir. %50 Argon + %50 Helyum karışım gazı, nüfuziyeti daha iyi ayarlayarak problemi ortadan kaldırır (Anık ve Vural 1991).

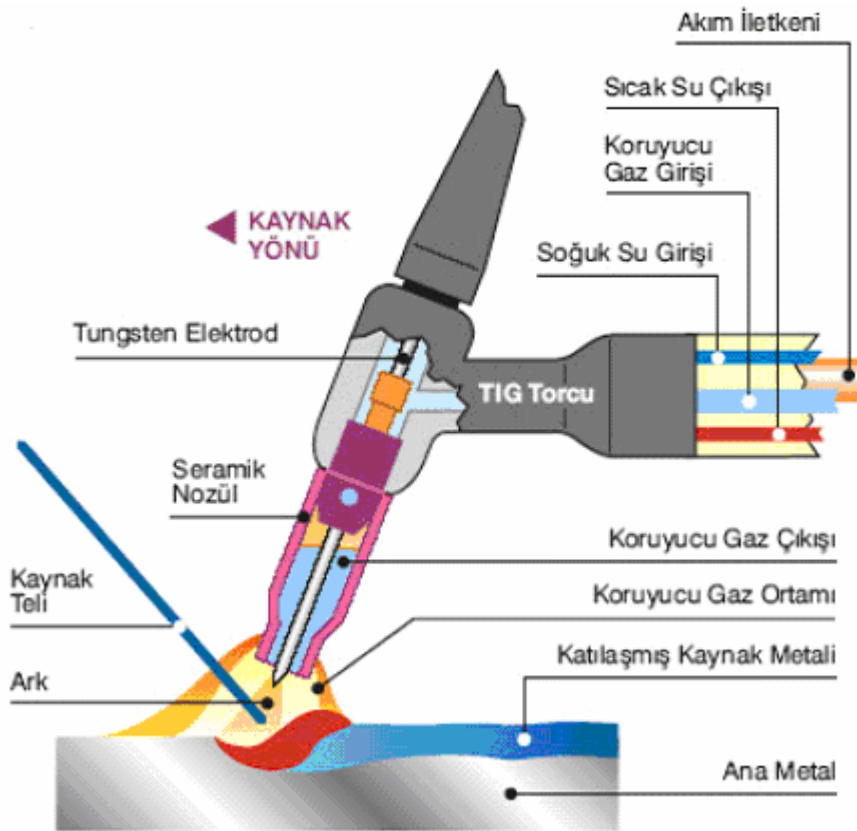
N₂ + H₂ karışımında kök koruma gazı olarak çok sık kullanılır ve diğerlerine nazaran oldukça iyi koruma görevine sahiptir. He havadan daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan özellikle bağlantının bazı bölgelerindeki havayı uzaklaştırmak için kullanılır. Hidrojen içeren gazların kaynak metaline hidrojen difüzyonu ile kullanım

sırasında çatlak tehlikesi oluşturur (Kanbolu 1996).

3.3.4 TIG kaynağı

Bu yöntemde kaynak için gerekli olan ısı enerjisi bir tungsten elektrod ve iş parçası arasında yanan elektrik arkı ile sağlanmakta ve kaynak bölgesi de havanın olumsuz etkilerinden bir koruyucu gaz (helyum, argon veya bunların karışımı) akımı tarafından korunmaktadır(Şekil 3.5). TIG kaynak yöntemi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir, kaynakçı tarafından kullanılması kolaydır, prensip olarak gaz ergitme kaynağını andırır, ısı enerjisi ise elektrik arkı tarafından sağlanmaktadır.

TIG kaynak yönteminde ergimeyen bir elektrod kullanıldığı için kıvrık olarak ağız hazırlanmış parçalar, ek kaynak metaline gereksinim göstermeden birleştirilebilir.



Şekil 3.5 TIG Kaynağı prensip şeması (WEB_3 2005)

Bu kaynak, ostenitik paslanmaz çelik ince saclara tüm kaynak pozisyonlarında uygulanabilir. Ayrıca kök pasoların çekilmesinde ve tamir işlerinde kaynakçıya büyük kolaylık sağlar. TIG kaynak yöntemi her pozisyonda ve prensip olarak da her kalınlıktaki parçalara uygulanabilirse de, fazla kalın parçalar için işlem süresinin uzaması, yöntemin ekonomikliğini yitirmesine neden olmaktadır. Bu nedenle 7 mm'den kalın parçaların kaynağı için önerilmez. Akım şiddeti azaltılarak diğer ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi olanaksız olan 0,1 mm kalınlığa kadar ince saclar bu yöntem ile çok sağlıklı olarak birleştirilebilmektedir(Anık 1993).

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin TIG kaynağında koruyucu gaz olarak argon çok tercih edilir. Kaynak hızı ve nüfuziyetini artırmak için argona hidrojen ilave edilir. Böylece daha temiz ve kaliteli dikişler elde edilir. Mekanize kaynak işlemlerinde, özellikle yüksek kaynak hızları istendiği durumlarda He, He + Ar veya Ar + H₂ karışım gazları önerilir. Sürekli boru kaynaklarında da He + Ar veya Ar + H₂ koruyucu gazları saf argona tercih edilir, çünkü kaynak hızlarında üstün özelliklere sahip kaynak dikişlerinde yanma oluşu tehlikesi azalır (Gerken ve Kotechki 1990).

3.3.5 Plazma arkı ile kaynak

Plazma ark torcu, ucunda küçük bir deliği bulunan meme ile bu memenin merkezindeki tungsten bir elektrodan oluşmaktadır. Plazma gazı, bu iç içe geçmiş dairesel meme ile elektrod arasından geçerek dışarıya çıkar. Plazma arkı sıcaklığının çeliği eritmeye yetecek derecede yüksek olması uygulamada, çeşitli metallerin kaynak, püskürtme ile yüzey doldurma, kesme, kaynak ağzı açma, tavlama ve yüzey hazırlama işlemlerinde, refrakter metallerin ince saclarının kaynağında çok iyi sonuçlar vermektedir (Tülbentçi 1995).

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan plazma ark kaynağı hem yarı otomatik hem de otomatik olarak uygulanır. Yöntemin uygulanmasında ek kaynak teli kullanılarak uzun ve kaliteli kaynak dikişleri gerçekleştirilir. Ek kaynak teli kullanmadan da ince saclar halinde ağız hazırlanmadan alın birleştirmeleri oluşturulur. Kök gazı kullanımı genellikle istenir ve en çok

kullanılan kök gazları da Ar + H₂ karışım gazlarından seçilir. Tungsten ve toryum alaşımlı elektrodlar akım türüne ve malzeme kalınlığına göre aynen TIG kaynağında olduğu gibi özel olarak üretilir ve kullanılırlar. Azot eklenerek, plazma ark kaynak yöntemi, mukavemetleri artırılmış ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında da TIG yöntemine nazaran tercih edilir. Bu yöntemde nüfuziyet ve genişlik oranları sınırlanmış olmakla birlikte gözenek oluşumu ve dikişin gaz kapması en az miktardadır. Silindirik depolama tanklarının boyuna dikişlerinde, plazma ark kaynağı otomatik olarak TIG kaynak torcu ile birlikte kombine edilerek yaygın olarak kullanılır.

4-7 mm'lik saclar halinde aynı dikiş ekseninde önde plazma ark torcu, arkasında TIG torcu ilerleyerek kaynak gerçekleştirilir. Burada nüfuziyet plazma arkı ile sağlanırken dikişin yüzeyinin düz olması TIG ile elde edilir. Kalın saclar halinde ise, kızgın tel TIG tekniği + plazma ark kaynağı beraber kullanılır.

Plazma arkı ile birleştirme kaynağında, plazma oluşturan gaza ek olarak banyoyu atmosfer etkilerine karşı koruyan ikinci bir gaz akımı da (%99,95 Ar) bulunur. Plazma ark kaynak cihazlarının büyük bir çoğunluğunda üçüncü bir gaz akımı plazma demeti meme dışında daraltmak için odaklayıcı gaz (Ar + He, Ar + H₂) olarak kullanılır.

3.3.6 Tozaltı kaynağı

Tozaltı kaynağının karakteristik özellikleri, kaynak süreci boyunca arkın örtülü bir ortam içinde oluşumu, işlemin sürekliliği, yüksek ergime verimi, kaynak dikiş kalitesinin yüksekliği ve uygulama işlem parametreleri yönünden oldukça geniş bir çalışma serbestliğine sahiptir. İşlemden ergiyen çıplak bir elektrod, tozlu örtülü bir ortamda ana parça ile ark oluşturarak yanmaktadır. Bu kaynak türü yüksek güçlü bir kaynak usulüdür. Bu usulde normal el kaynağına nazaran elektrod teli daha yüksek bir akım şiddeti ile yüklendiğinden, oldukça büyük bir ergimiş banyo elde edilir ve dolayısı ile de daha derin bir nüfuziyet sağlanır (Kanbolu 1996).

Günümüzde çeşitli türde çeliklerin kaynağı için oldukça elverişli olan tozaltı kaynak yöntemi kazan, profil, gemi ve basınçlı kap üretimi ve yüzey doldurma işlemlerinde

yoğun bir biçimde kullanılmaktadır. Arkın sıcaklığında eriyen bir miktar toz, dikişi örten cüruf haline geçer ve bu cüruf, henüz çok sıcak olan kaynak banyosunu ve metalini atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, içerdiği dezoksidasyon ve alaşım elementleri sayesinde kaynak banyosunun dezoksidasyonu ve kaynak metalinin alaşımlamasını gerçekleştirir. Bu kaynaktaki ısı girdisinin ve dolgu oranının oldukça yüksek olması, ostenitik paslanmaz çelik kalın sacların birleştirilmesinde rahatlıkla kullanılmaktadır. Kaynak metalinin katılaşması, oluşan banyonun büyüklüğü nedeni ile oldukça yavaş olmaktadır. Dolayısıyla alaşım elementlerinin segregasyonu ve mikro yapıda tane irileşmesi gibi problemler ile karşılaşılır.

Ostenitik paslanmaz çeliklerin tozaltı kaynağında hem doğru akım hem de alternatif akım kullanılabilir. Doğru akım özellikle ince sacların kaynağı için tercih edilir. Akım şiddeti aynı kalınlıktaki sade karbonlu sacları uygulananandan % 20 daha düşük ayarlanması gereklidir (Cebekan 1988).

Ostenitik paslanmaz çelik sacların tozaltı kaynağında V, Y, X veya simetrik çift Y kaynak ağızları kullanılır. V ve X alın kaynaklarında kök pasoların örtülü elektrod ile veya TIG kaynağı ile yapılması nüfuziyet ve kök pasonun korozyon direnci açısından önemlidir. Ancak rutil örtü karakterli elektrod kullanılması halinde örtünün iyi temizlenememesi nedeni ile kaynak metalinde gözenekler oluşacağından, bu elektrodla kök paso kaynağından kaçınılmalıdır.

3.3.7 Elektron ışını kaynağı

Elektron ışını kaynağındaki eritme enerjisi, yüksek hızdaki elektronların bir noktaya yönltilmesiyle elde edilir. Bu işlem elektronların yüksek vakum altında hızlandırılmaları sonucu kazandıkları kinetik enerji kullanılarak sağlanır. Elektronlar, kazandıkları kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürür. Elektron ışını oluşturulan elektron demetinin üretimi tungsten veya benzeri elementlerden yapılmış bir flaman tarafından sağlanır. Elektronların çarpması sonucu elde edilen ısı enerjisi sonucu metal erimeye başlar (Kanbolu 1996).

Yöntemin diğer eritme kaynak yöntemlerine tercih edilmesinin başlıca nedenleri;

şekil ve boyutsal hassasiyet, birleştirmede ulaşılan mukavemet, kaynaklanabilirliği zayıf eş, benzer yada farklı malzemelerin birleştirilmesine yatkınlık ve diğer koşullara bağlı olarak ortaya çıkan ekonomiklidir. En dar elektron ışınının kesitinin çapı 0,1-0,5 mm'dir. Işın odağında yüksek bir güç yoğunluğu mevcuttur ve elektron ışın hücresinden 1 metre uzaklığa kadar çalışma mesafesine sahiptir. Elektron ışını altında, kaynak yerinin kuvvetli bir şekilde ısınması ile ortaya çıkan yüksek buhar basıncı etkisi ergiyikte, elektronların enerjisini bırakmadan önce iş parçasının derinliklerine kadar nüfuz edebildikleri kanalın oluşumuna yol açar. Oluşan ergime bölgesinin derinliğinin, ortalama genişliğe oranı 25/1'e kadar olan dar bir kamanın şekline benzemektedir.

Bu yöntemle birkaç µm kalınlığındaki folyolardan 100 mm kalınlığın üzerindeki levhalara kadar kaynak yapılabilen sac kalınlıklarına başka hiçbir yöntem ile erişilemez.

Odaklanmış elektron ışınının yüksek güç yoğunluğu, birkaç santimetre mertebesindeki iş parçalarının, alışlagelmişin aksine olarak birkaç pasoda değil, sadece bir pasoda kaynak yapılabilmesine olanak sağlar. Büyük ısı girdisi nedeni ile iş parçasındaki çarpılma, ark kaynağının yaklaşık onda biri kadardır. Diğer kaynak yöntemlerine nazaran kapalı bir hücrede (kamarada) çalışma zorunluluğu, vakum kamarasının hacmi, iş parçasının büyüklüğünü sınırlar.

3.3.8 Lazer ışını ile kaynak

Bu yöntemde, kaynak için zorunlu olan enerji optik bir sistemle, sac teli kalınlığındaki ışık demetinin kaynak alanına gönderilmesidir. Işık demetinin enerji miktarı oksijen-gaz kaynağının yaklaşık on katı kadardır. Lazer ile aynı özellikteki veya aynı özellikte olan malzemeler kaynak edilebilmektedir.

Kaynak süresi olarak (yoğunlaştırılmış ısı iletim koşuluna bağlı olarak), metalurjik içyapı değişimlerinin oluşumu önlenemez ve yüksek üretim hızlarına erişilebilecek şekilde, noktasal bağlantılar için birkaç mikro saniye yeterlidir. Lazer ışını temassız çalışır, yani takım ile iş parçası arasında hiçbir mekanik temas oluşmaz ve iş parçasının istenmeyen alaşımlanması ve çarpılması önlenmiş olur. Lazer ışını üretiminde,

koruyucu gaz kullanılması ve bir vakum ortamı gerekmediğinden, özellikle seri üretimde maliyetin düşmesi, çalışma hızı ve otomatize edilebilmesi bakımından önemli üstünlükler ortaya çıkar.

Lazerin çeşitli türleri mevcuttur;

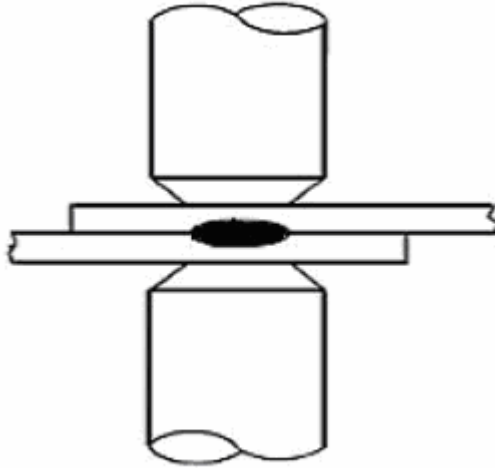
- 1- Katı hal lazerleri,
- 2- Sıvı lazerleri,
- 3-Gaz lazerleri,
- 4- Yarı iletken lazerler.

Lazer ışını ile kaynak aslında bir ergitme kaynağı yöntemidir. Güç yoğunluğu malzeme kuvvetle buharlaşmadan ergiyecek şekilde ayarlanmalıdır. Teorik olarak ek kaynak metali kullanılmadan çalışıldığı için, parçalar birbirlerine tam olarak birleştirilebilir. Ağızlar arasındaki aralığın mertebesi ergimiş banyo genişliğinin beşte biridir. Ergimiş banyo genişliği ise 100 µm civarındadır. Ancak yoğunlaştırılmış ışın girişi, hassas kaynak ağızı hazırlığı gerektirir.

Daha derin nüfuziyet istendiğinde; parça içinde, ergimiş metalle sarılı, buharlaşmış bir bölge oluşur. Darbe ve güç gibi parametreler, uygun şekilde değiştirilerek, kaynak dikişi maksimum nüfuziyet ve minimum ITAB elde edilecek şekilde ayarlanabilir (WEB_4 2004).

3.3.9 Nokta kaynağı

Elektrik direnç nokta kaynağı, elektrik akımının ısı etkisinden yararlanılarak, bir kaynak devresi içinde birleştirilecek metalleri direnç olarak kullanıp, basınç altında çözülmeyen birleştirme haline getirme yöntemidir. Bu yöntemde, kaynak yerinde çok az renk değişimi ve elektrod izlerinden başka bir şey görünmez. Ayrıca iyi bir kaynak bağlantısının yapılmasında, ısınmanın çok kısa sürede oluşması nedeni ile, ergitme kaynağı ile birleştirilmiş paslanmaz çeliklerin ostenitik türlerinde görülen krom karbür çökmesi ve ferritik türlerde görülen tane irileşmesi yoktur yada az bulunur.



Şekil 3.6 Nokta kaynağı prensip şeması (WEB_5 2004)

Elektrik direnç nokta kaynağı, malzemenin üzerinden geçen elektrik akımına karşı, malzemenin gösterdiği elektrik direnci ile oluşan ısı ve kaynak bölgesine uygulanan basma kuvveti ile gerçekleştirilen bir yöntemdir (Şekil 3.6) (WEB_5 2004).

Paslanmaz çelik türleri içinde en çok ostenitik paslanmaz çeliklere nokta kaynağı uygulanır. Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler grubunda en çok kullanılan ve nokta kaynağı yapılan çelik X5CrNi18-10'dir (AISI 304). Ostenitik ve Ferritik paslanmaz çeliklerin nokta kaynak parametreleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Nokta kaynağı kaynak parametreleri (WEB_5 2004)

Parça Kalınlığı (mm)	Elektrot Çapı (mm)	Elektrot Baskı Kuvveti (N)	Kaynak Akımı (A)	Kaynak Zamanı (Periyot Zamanı)
<i>%18 Cr - %9 Ni Ostenitik Paslanmaz Çelik</i>				
0,5	3	1700	3500	3
0,8	4,5	3000	6000	4
2	6	6500	11000	8
<i>%17 Cr'lu Ferritik Paslanmaz Çelik</i>				
	0,5	30	150	4000
	0,8	45	250	7550

Ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerin nokta kaynağında taneler arası korozyona hassasiyet oluşmamaktadır. Çünkü kaynak merceğinin ısınma ve soğutma çevrimi çok kısa sürede gerçekleşmekte ve krom karbür çökmesinin oluşumu için yeterli süre hızla geçilmektedir (WEB_5 2004).

3.3.10 Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağı, kaynak edilecek parçaların birleşme yüzeyleri arasında, mekanik enerjinin sürtünme aracılığı ile ısı enerjisine çevrilmesi ve parçalara eksenleri doğrultusunda baskı kuvveti uygulanması sonucunda yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Kaynak süresi boyunca sürtünen yüzeyler basınç altındadır ve ısıtma fazı yada sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç, yüzeylerde plastik şekil değişimine izin verecek sıcaklık oluşana kadar sürer. Çelikler için bağlantı bölgesinde oluşan sıcaklık 900°C-1300°C'dir.

Bu yöntemde, temas eden yüzeyler toplam yüzeyler olmayıp, sadece pürüzlülük uçlarıdır. Parlatılmış metal yüzeylerinde de söz konusu olan bu mikroskobik düzgünsüzlük, uygulanan basınçla yassılaştırılmakta ve dolayısı ile gerçek temas yüzeyleri büyümüş olmaktadır. Sürtünmedeki süreklilik etkisi ile temas yüzeylerinin sıcaklığı giderek artmakta, bu durum ise şekil değiştirme kabiliyetini artırarak, kaynak bölgesine, temas yüzeylerinin daha da büyümesi şeklinde yansımaktadır. Kontak noktalarının yığılma basıncı, genellikle tavlama basıncının üstünde, bazı istisnalarda ise aynı mertebelerde tutulabilmektedir. Yığılma aşamasından sonra çözülen parçada sıkı, gözeneksiz ve oksit kalıntısız bir kaynak birleştirmesine ulaşılmaktadır(WEB_6 2004).

Sürtünme kaynağı, mekanik enerjiyi sağlama biçimine göre iki ayrı yöntem ile uygulanabilir. Bunlar; sürekli tahrikle sürtünme kaynağı ve volan tahrikli sürtünme kaynağıdır. Sürekli tahrikle sürtünme kaynağında, parçaların biri motor hareket ünitesine bağlıdır ve sabit bir devirde döner ve sabit eksenel kuvvet uygulanır. Volan tahrikli tahrikli sürtünme kaynağında ise, parçalardan biri bir volana bağlanarak, mekanik enerji volana depolanmış olur. Daha sonra iki parça temas ettirilir.

Sürtünme kaynağı ile, ostenitik paslanmaz çelikler, aynı ve ayrı türde çelikler, farklı ısı ve mekanik özelliklere sahip metaller oldukça rahat bir şekilde birleştirilebilmektedir.

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ

Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi günümüzden yaklaşık 10 yıl önce İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde geliştirilen ve halen üzerinde oldukça fazla araştırma yapılan bir katı faz kaynak yöntemidir. Bu yöntemin uygulanması sırasında zararlı duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz, tel veya elektroda gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi olanağının bulunması ve otomasyona da yatkınlığı gibi daha bir çok uygulama üstünlüğünün yanında yüksek mekanik özellikler, düşük maliyet, düşük çarpılma gibi ürün üstünlükleri bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir. Yöntem günümüzde uçak, uzay, gemi, taşıt üretiminde, yakıt deposu, gıda depolama elemanları ve radyoaktif atık madde taşıyıcılarının üretiminde kullanılan Al ve Al alaşımlarının yanı sıra Cu ve Cu alaşımlarının, Ti ve Ti alaşımlarının ve bazı tür çeliklerin birleştirilmesinde uygulama alanı bulmaktadır.

4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminin Gelişimi ve Tarihçesi

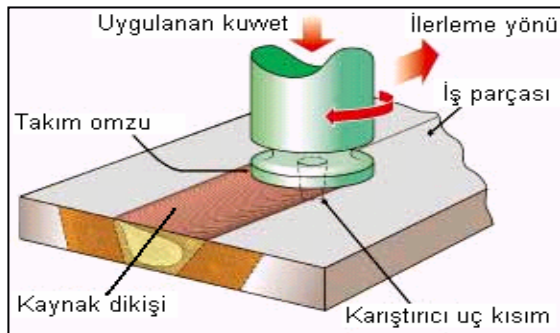
Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI: The Welding Institute), Wayne Thomas tarafından icat edilen bir katı faz kaynak yöntemidir. İlk patent işlemleri de 1991 yılının Aralık ayında tamamlanmıştır. Küçük bir laboratuvar denemesi olarak görülebilecek bu işlem daha sonraları alüminyum konstrüksiyonların imalatında önemli bir yer teşkil etmiştir (Lahti 2002).

Şu ana kadar A.B.D, Japonya, İskandinav ülkeleri ve Avustralya'da 51 organizasyon bu tekniği kullanabilmek için genel lisans almıştır. Dünya genelinde 42 organizasyon sürtünme karıştırma kaynağı kullanım lisansına sahiptir (Nicholas ve Kallee 2000).

1991 yılından beri üzerinde çalışılan bu kaynak yöntemi geçmişte ergiterek kaynağı mümkün olmayan materyallerin kaynağında kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem; alüminyum alaşımları, bakır, titan, paslanmaz çelik ve diğer çelik türlerinin kaynaklı birleştirmeleri için elverişli bir yöntemdir (WEB_7 2004).

4.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi ve Uygulanması

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi, alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir pim (baticı uç) daldırılması ve kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir (Şekil 4.1) (Şekil 4.4).



Şekil 4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı şematik gösterimi (Dawes 1999).

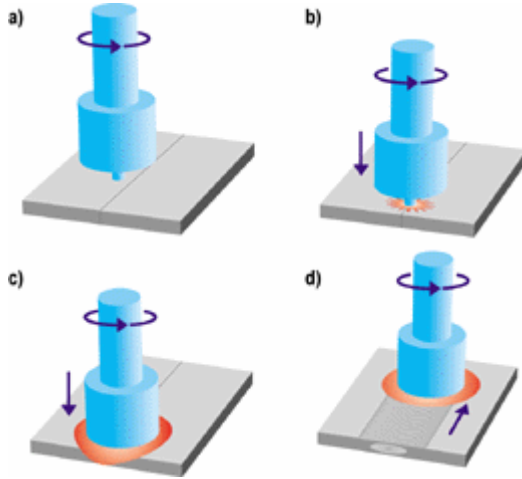
Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemini aşama aşama inceleyecek olursak ilk aşamada:

Birleştirilecek parçalar bir altlık üzerinde mengene ile sıkıştırılır yani kaynak edilecek parçalar öncelikle sabit bir yüzey üzerine yerleştirilir. Yöntemin uygulama aşamasında tablanın, dolayısıyla parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi yapması olanağı da vardır. Dönen silindirik bir uç, iş parçası ile temas haline gelinceye kadar yavaşça hareket ettirilir (Şekil 4.2 a) .

İkinci aşamada:

Karıştırıcı uç denilen takımın uç kısmı, alın yüzeyleri birbirine dayandırılan (bitişik hale getirilen) iş parçalarının içine daldırılır ve takım dönerken sürtünmeden dolayı ısı

oluşur (Şekil 4.2 b). Bu ısı, takım ucunun daldırıldığı yerde ve iş parçası ile takımın omuz kısmının arasında kalan ara yüzeyde, plastik şekil değiştirmeye yatkın yumuşak bir bölge oluşturur (Şekil 4.2 c).



Şekil 4.2 SKK aşamaları **a)**SKK takımına ilk dönüş verilmesi **b)**SKK takımının malzemeye daldırılması **c)**SKK takımının omuz kısmının plakaları ön ısıtması **d)**Yeterli ön ısıtmanın ardından SKK takımına ilerleme verilmesi (Bradley ve James 2000)

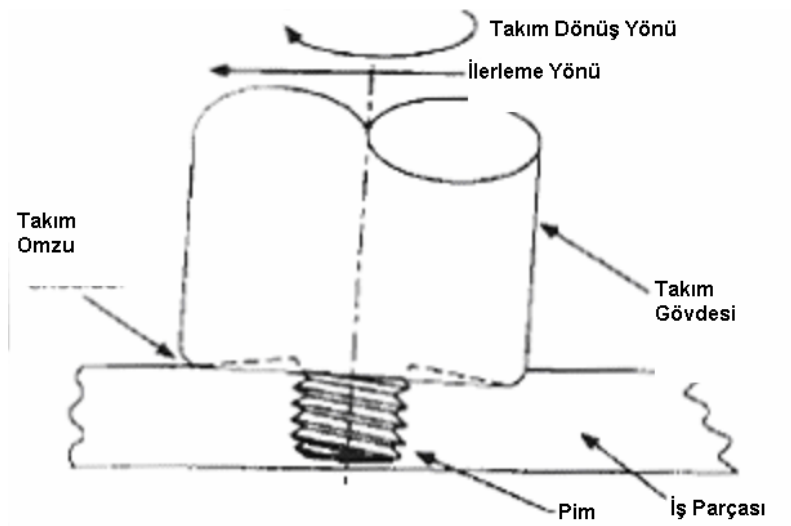
Son aşamada ise:

Dönen takıma, kaynak dikişi boyunca kaynaklanacak uzunluğun sonuna gelinceye kadar bastırılarak ilerleme verilir ve takım yolu boyunca iki malzeme birleşmiş olur (Şekil 4.2 d). İlerleme sırasında özel şekil verilmiş pim yumuşayan malzemeyi parçanın tabanına doğru sıvamalıdır (Şekil 4.3). Daha sonra genellikle dönmeye devam ederken geri çekilir. Kafa tamamen geri çekildikten sonra dönüş durdurulur ve kaynaklanan parça tespit edildiği yerden sökülür, burada kafayı geri aldığımızda kafa ucundaki kalemin kaynak dikişini kaynaklanacak uzunluğun tam sonunda terk etmesi gerektiğine dikkat edilmelidir (Kurt vd 2002).

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde kullanılan takımın hızı oldukça yüksektir. İki metal alaşım arasında bağ oluşturmak yani kaynak yapmak için gerekli ısı ergime sıcaklığının %60-80'ine ulaşılır. Bu ısı yüksek hız sırasında sürtünmeden dolayı oluşur ve takımın uç kısmı karıştırma görevini görürken, omuz kısmı baskı uygulayarak ek bir

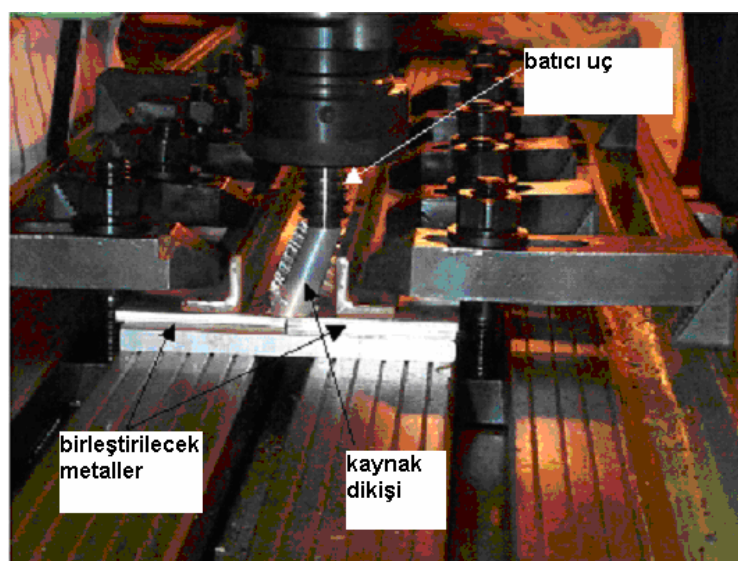
sürtünme oluşturur ve kaynak bölgesinden plastik şekil değiştiren malzemenin uzaklaşmasını önler, böylece kaynaklı birleştirme ortaya çıkar (Bradley ve James 2000).

Yöntemde değişik tasarımlarda, tükenmeyen ve dönen ve yüksek sıcaklıklarda üstün özelliklere sahip malzemelerden üretilen takımlar kullanılır.



Şekil 4.3 SKK prensip şeması (Seidel ve Reynolds 2001)

Yöntemde iki malzeme dibinin tam kapanmasını sağlamak üzere kalemin altında sınırlı miktarda bir plastik deformasyon meydana geldiğinden kalemin, parçanın altındaki destek plakasına (sacına) çok yakın geçmesi gerekmektedir (Kurt vd 2002).



Şekil 4.4 Bir SKK uygulamasından alıntı (WEB_9 2003)

4.3 Kaynak Kesitinin Mikro Yapısının İncelenmesi

Bu kaynak yönteminde kaynak bölgesi dört farklı bölgeden oluşmaktadır(Şekil 4.5).

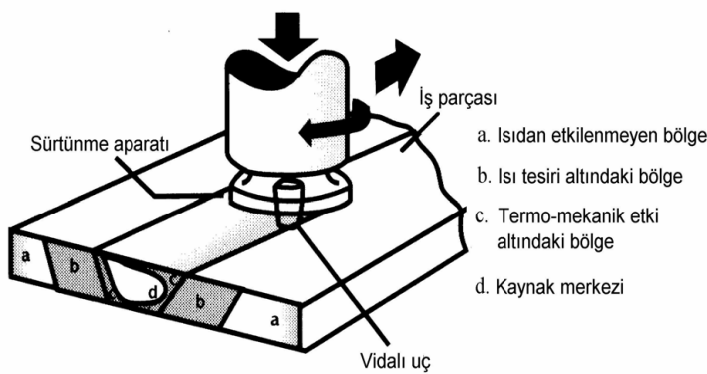
A: Kaynak işlemlerinden etkilenmeyen bölgedir. Esas metal olup hadde yapısındadır(base metal).

B: Mekanik özellik ve mikroyapının değişikliğe uğradığı, termal değişikliklere maruz kalan alan. Artık kaynak gerilmeleri ve ısı değişimleri gibi etkilerle özelliklerin değişebileceği bir bölgedir. Plastik deformasyona uğramamış bölgedir. Yaşlanmış veya mekanik yaşlandırılmış alaşımlarda bu bölge sert değildir (HAZ-Heat Affected Zone).

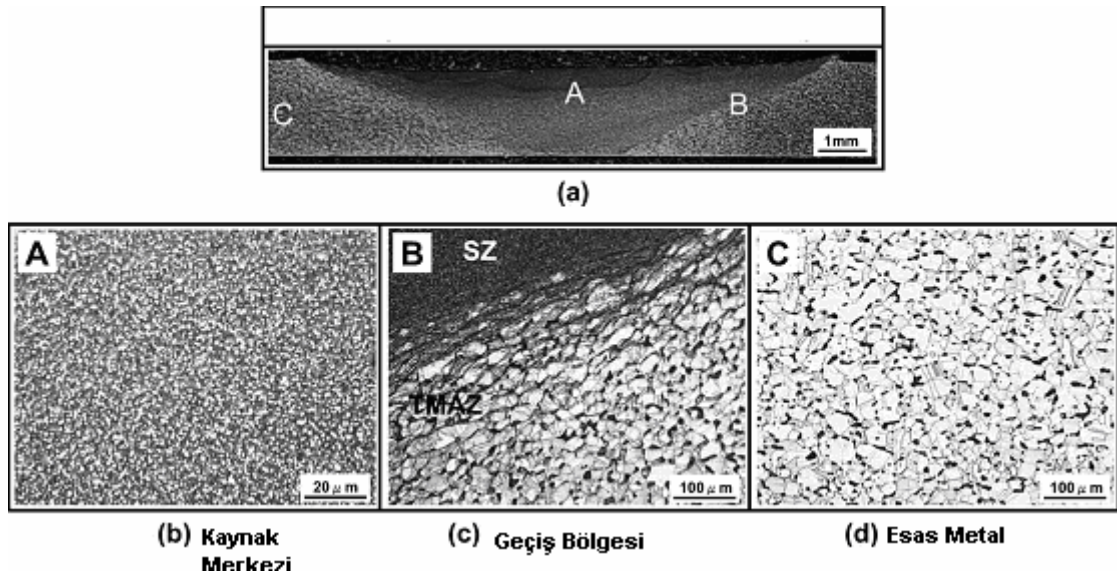
C: Plastik deformasyon gözlenir. Termomekanik olarak etkilenme söz konusudur. Bu etkileşimde yeniden kotalizasyona neden olmaktadır (TMAZ-Thermo-Mechanically Affected Zone).

D: Rekristalize olmuş kaynak metalidir. Kaynak metalinin mikroyapısında da alaşım türü, ısıl işlem, tane boyutu ile beraber bir değişim olabilmektedir. Kaynak metalinin boyutları nüfuziyete etki eder (WEB_8 2004).

Sürtünme Karıştırma Kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin mikroskop ile incelenmiş mikro içyapıları Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5 SKK uygulaması mikro içyapısının şematik gösterimi (Külekcı ve Şık 2004)



Şekil 4.6 SKK uygulanmış numunenin mikro içyapısının incelenmesi **a)** SKK uygulanmış numunenin mikro içyapısının genel resmi, **b)** SKK uygulanmış numunenin kaynak merkezi mikro içyapısı, **c)** SKK uygulanmış numunenin kaynak merkezi termomekanik etki altındaki bölgeye geçişi mikro içyapısı, **d)** Esas metal mikro içyapısı (Park vd 2004).

4.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağına Etki Eden Faktörler

Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile elde edilen birleşmelerin mekanik ve dinamik özellikleri uygun parametreler bir araya geldiğinde üstündür. Sürtünme Karıştırma Kaynağında kaynak kalitesine etki eden parametreler:

- Takımın ilerleme hızı
- Takımın devir sayısı

SKK uygulanan CuZn40 alaşımının Şekil 4.7’de devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı numune yüzey ve röntgen incelemeleri, Şekil 4.8’de ise devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı kaynak merkezinin mikro içyapı değişimi ve tane yapısı incelemeleri, Şekil 4.9’da ise Sabit İlerleme hızı değişken devir sayısına bağlı vickers sertlik değişimi verilmiştir. Bu grafikler sayesinde devir sayısı ve ilerleme hızı değişkenlerinin SKK uygulamalarındaki en önemli parametrelerinden olduğu görülmektedir.

- Takımın uç dizaynı

SKK uygulamalarında, kullanılan farklı takım uç dizaynlarına (Şekil 4.10) göre birleştirilen numunelerin birleşme hattına dik doğrultuda yapılmış olan mikrosertlik ölçüm sonuçlarındaki farklılık göstermektedir (Şekil 4.11).

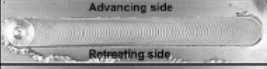
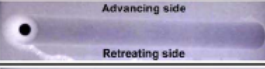
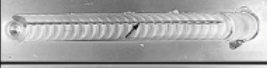
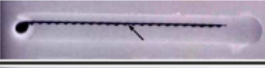


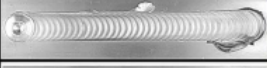
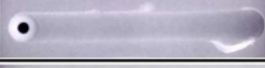



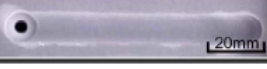
- Takım baskı kuvveti

SKK uygulamalarında takım omzu ile birleştirilecek numune arası sürtünme ve baskıyı kontrol ederek kaynak dikişini etkileyen önemli bir parametredir.

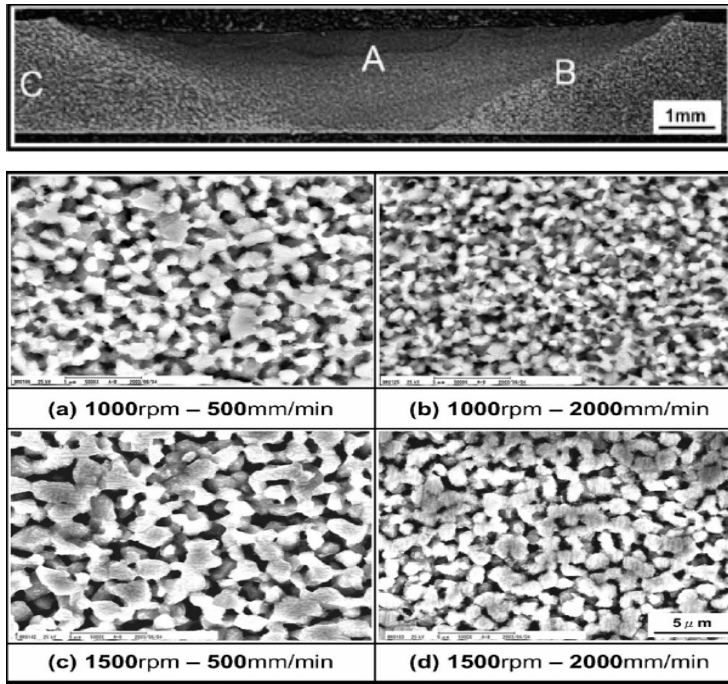
- Takımın yüzeye dalma açısı

SKK uygulamalarında kaynak dikişini ve kaynak üst yüzeyini etkileyen önemli bir parametredir.

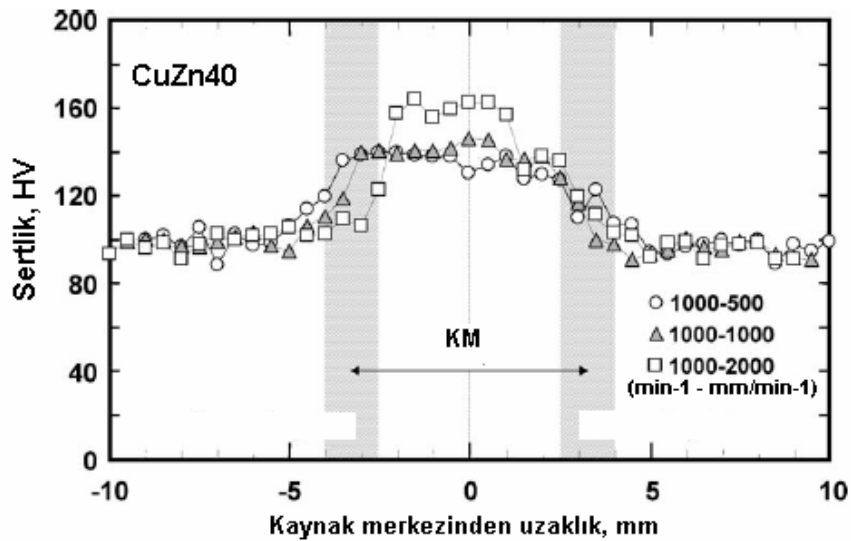
- Pim batma derinliği
- Yüzey hazırlama
- Malzeme kalınlık farklılığı
- Kalıp ve sabitleme aparatları

Devir Sayısı min-1	İlerleme Hızı mm/min	Surface appearance	X-ray photograph
500	500		
	1500		
1000	500		
	2000		
1500	500		
	2000		

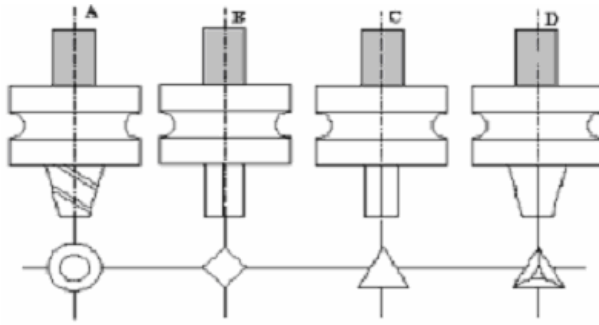
Şekil 4.7 SKK uygulanan CuZn40 alaşımının devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı numune yüzey ve röntgen incelemeleri (Park vd 2004).



Şekil 4.8 SKK uygulanan CuZn40 alaşımının devir sayısı ve ilerleme hızı parametrelerinin değişimine bağlı kaynak merkezinin mikro içyapı değişimi (Park vd 2004)



Şekil 4.9 Sabit İlerleme hızı değişken devir sayısına bağlı vickers sertlik değişimi (Park vd 2004)



Şekil 4.10 Farklı pim geometrileri



Şekil 4.11 Farklı takım pimi geometrilerinin kullanımı ile Al 1018 malzemesinin SKK ile birleştirilmiş numunelerin birleşme hattına dik doğrultuda yapılmış olan mikrosertlik ölçüm sonuçları (Özdemir ve Taşkın 2004)

4.4.1 Geliştirilen farklı uç dizaynları

Bu kaynak yöntemi geliştirildiğinde ilk kullanılan batıcı uçlar yüzeyine helisel diş açılmış uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik pimlerdi (Şekil 4.12) .



Şekil 4.12 SKK 'da kullanılan basit tip kaynak takımı (WEB_9 2003)

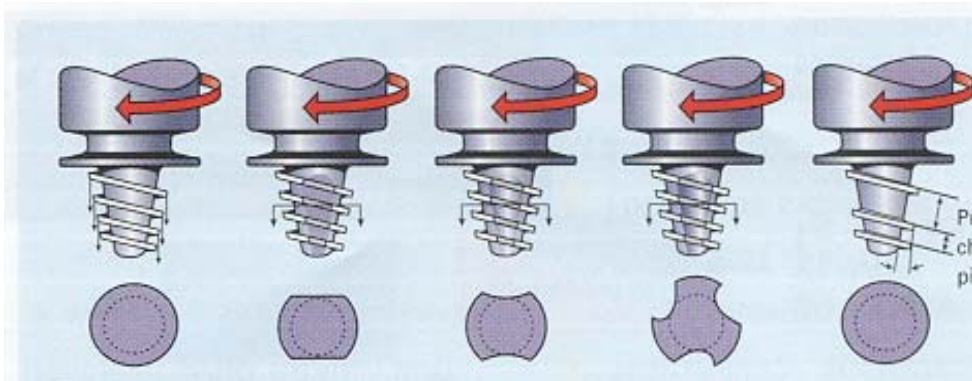
Silindirik uç yerine üzerine spiral diş açılmış konik bir uç kullanılabileceği düşünülerek Whorl™, Triflute™ ve Skew-Stir™ serisi özel profilli sürtünme karıştırma kaynağı takımları dizayn edilmiş ve geliştirilmiştir.

Bu kaynak yöntemi geliştirildiğinde ilk kullanılan batıcı uçlar yüzeyine helisel diş açılmış uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik pimlerdi. Fakat, son yıllarda sürtünmeden açığa çıkan ısı ile akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik pim dizaynları geliştirilmiştir.

4.4.1.1 Whorl™ serisi pimler (batıcı uçlar)

Denemeler sonunda, Whorl™ konfigürasyonları belirlenmiştir (Şekil 4.13). Kesik koni şeklindeki Whorl™ pim , plastik akışa uğrayan metali aşağıya doğru yönlendirmek için helisel sırtlı profiller ihtiva etmektedir.

Whorl™ konsepti dairesel olmayan kesitleri sağlar. Bu nedenle, malzemenin daha kolay akmasına imkan vermek için pimin yer değiştirme miktarı, dönme miktarından daha az olması gerekmektedir. Şekil 4.14’de 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımının içine geçmiş Whorl™ serisi pim görülmektedir ve buradan da kaynak dikişi ile takım profilinin ilişkisi açıkça görülmektedir. Pim etrafındaki malzemenin daha etkili akması için her bir helisel sırt arasındaki uzaklığın sırt kalınlığından daha büyük olması gerekir. Pimin ucunun helisel sırtlarla paralel olması kritik bir husus değildir.



Şekil 4.13 Çeşitli Whorl™ konfigürasyonları (Nicholas ve Kallee 2000)



Şekil 4.14 75mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımının kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü (Thomas vd 2001)

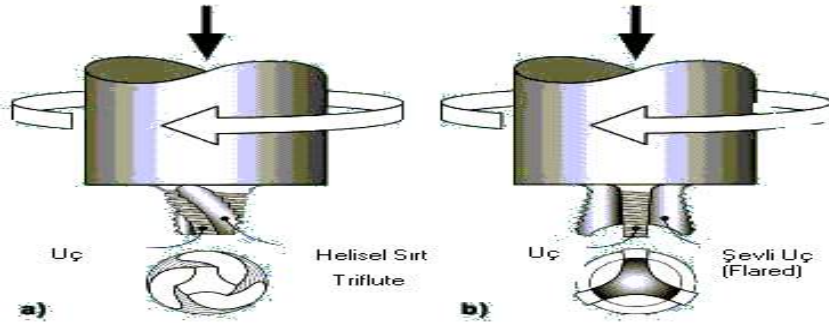
4.4.1.2 MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ serisi pimler (Batıcı uçlar)

Multi-Helix takımların (MX Triflute™) yivlerinin çevresinde helisel sırtların bulunması takımın hacmini düşürmekle beraber malzeme akışına yardım eder ve yüzeydeki oksitleri dağıtır (Şekil 4.15 ve Şekil 4.16).

Alın kaynağında kullanılan, Whorl™ ve Triflute™ uçları kesik piramit şeklindedir ve yüzeylerinde aşağıya doğru delme etkisini kolaylaştırmak amacıyla kaba işlenmiş helisel sırtlar ve oluklar bulunmaktadır. Bu girintili köşe şekilleri ucun hacmini azaltır ve statik hacim oranı için uygun olan karıştırma hacmini sağlar. Daha iyi bir hacim oranı ile malzemenin akış yolu daha iyi olur ve böylece uç daha etkili çalışır. Ayrıca özellikle ucun etrafındaki kaba işlenmiş helisel sırtlarda bulunan girintili köşe özellikleri kaynak bölgesindeki yüzey oksitlerinin parçalanmasına ve dağıtılmasına yardımcı olur.

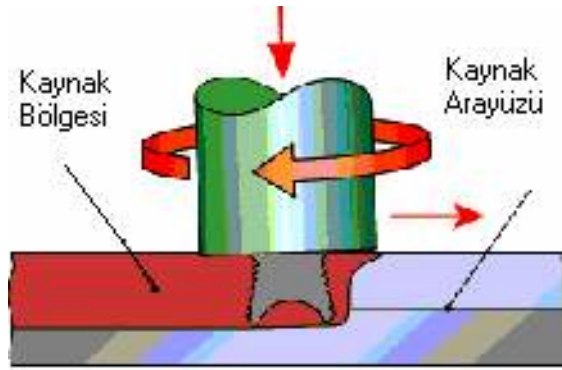


Şekil 4.15 Esin kaynağı deniz kabukları olan MX Triflute™ serisi pimlerin resim ve şematik çalışma şekli (Nicholas ve Kallee 2000)



Şekil 4.16 MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ dizaynları (Thomas ve Dolby 2002)

Bindirme kaynağında ise uç, daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzeylerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek amacıyla daha farklı dizayn edilmiştir (Şekil 4.17). Bindirme kaynağında pim yüzeyi kaynak ara yüzeyine zorunlu olarak diktir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst yüzeyden mesafesi ve ucun girintilerinin kaynağın kenarıyla kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır. Ucun karakteristiği, süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki farkın artmasıyla ucun etrafındaki ve aşağısındaki akış yolunun büyümesidir.



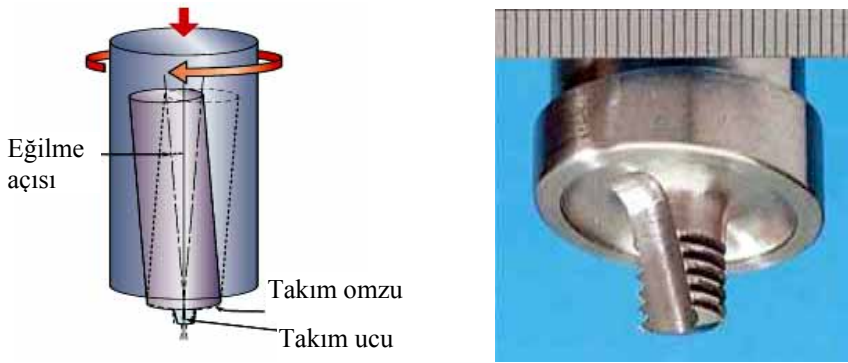
Şekil 4.17 Flared Triflute probe ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak ara yüzeyinin görünümü (Thomas ve Dolby 2002)

4.4.1.3 Skew-Stir™ ve A-Skew™ serisi pimler

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması için geliştirilen Skew-Stir™ serisi pim, pim ekseninin iş mili eksenine göre biraz eğim verilmesi ile diğer pimlerden ayrılır. Skew-Stir™ serisi pimler, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı

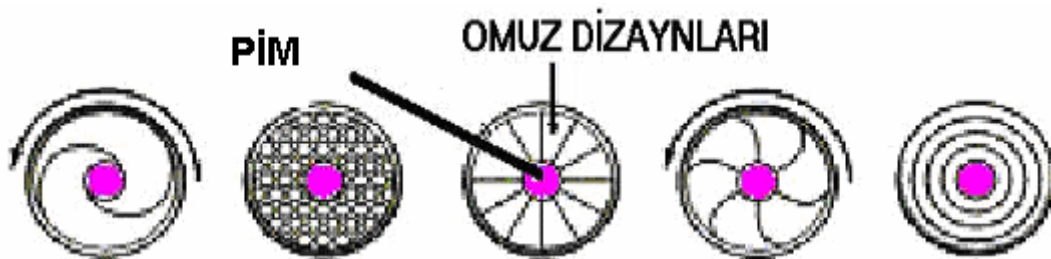
pimin eğik hareketi ile artırabilmektedirler. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür.

Şekil 4.18'de görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım eksenine belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi ise, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi eksen dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır.



Şekil 4.18 Skew-Stir metodunun çalışma prensibi ve A-skew ucunun resmi (Kallee ve Mistry 2002)

Yeni jenerasyon Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuzları (shoulder) da özel profillere sahiptir (Şekil 4.19). Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak amacıyla kullanılır. Sürtünme teması ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir.



Şekil 4.19 Whorl™ ve MX Triflute™ Takımlarının omuz profilleri (Thomas vd 2001)

4.5 Yöntemin Uygulama Alanları

Mazisi çok eskiye dayanmayan SKK Yöntemi gün geçtikçe endüstrinin birçok alanında uygulanmaya başlanmaktadır. Yöntemin uygulama alanları aşağıda verimiştir:

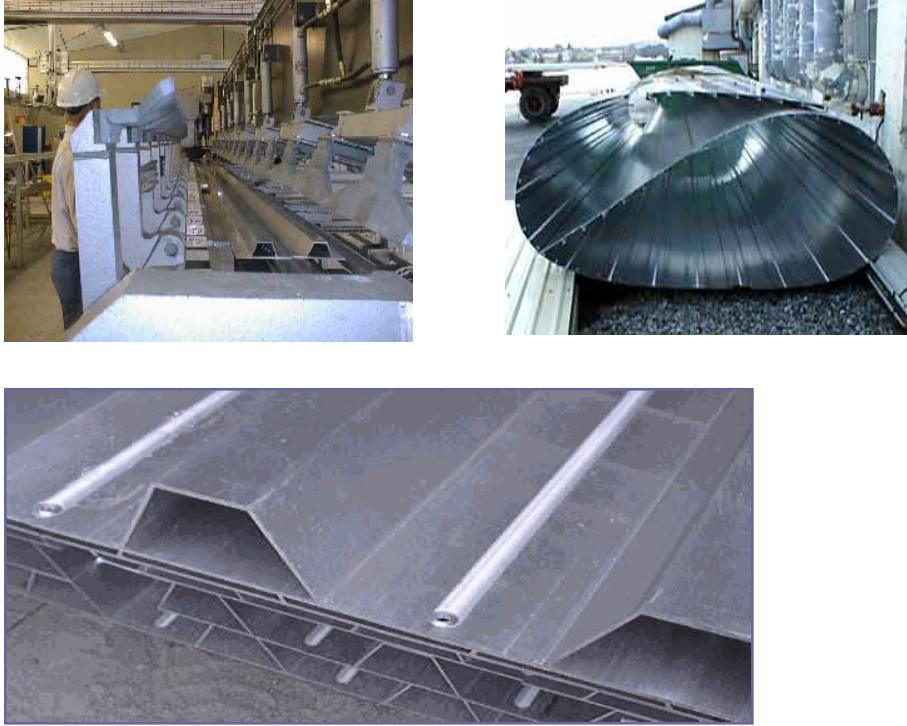
- Deniz Endüstrisinde
- Havacılık Endüstrisinde
- Uzay Endüstrisinde
- Demiryolu Endüstrisinde
- Otomotiv Endüstrisinde

4.5.1 Deniz endüstrisinde uygulama alanları

Sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili ilk ticari uygulama, balıkçı gemilerinin derin dondurucularının oluklu alüminyum panellerinde kullanılmıştır. Bu kaynak yöntemindeki minimum çökme ve yüksek verimlilik, teknik ve ekonomik yönden sert panel üretiminde bu yöntemi cazip kılmaktadır. Bu yöntem ile, Japonya'da alüminyum petek paneller ve deniz suyunun korozyon etkisine dayanıklı panellerin üretimleri yapılmaktadır.

Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir. Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması panellerdeki çökme ve kalıntı gerilmelerini minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır. Norveç'te bulunan Hydro Marine Aluminum firmasında son üç yılda 70 kilometre uzunluğunda alüminyum ekstrüzyon paneli sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir (Şekil 4.20) (Kallee ve Mistry 2002).

Amerikan Deniz Kuvvetlerinin yaptığı çalışmalarda karbon çeliklerini, HSLA çelikleri (HSLA-65, HSLA-107) , 304 paslanmaz çelikleri, titanyum alaşımlarının Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmeleri üzerine çalışmalar hızlandırılmıştır (Posada vd 2003).



Şekil 4.20 Alüminyum panel ekstrüzyonları birleştirilmesi ve birleştirilmiş alüminyum panelleri (Kallee ve Mistry 2001).

4.5.2 Havacılık endüstrisinde uygulama alanları

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin 2000 yılı başından itibaren havacılık endüstrisine girişi ile birlikte endüstride hızlı değişiklikler oluşmaya başlamıştır. Perçinli birleştirmelerin yerini gün geçtikçe kaynaklı birleştirmeler almaya başlamıştır. Uygulamalarda plazma ark kaynağının yerine kullanılmaya başlanarak bu endüstrideki asıl birleştirme yöntemi olarak kullanılmaya başlamıştır. Lazer kaynak yöntemi ile birlikte özellikle;

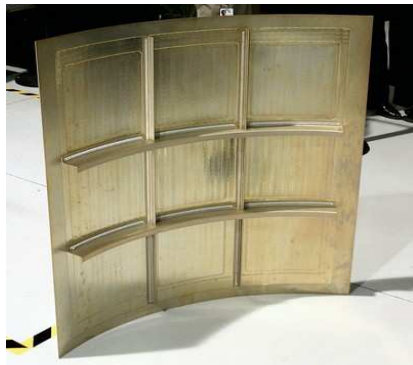
- Kanatlar, uçaklar gövdeleri, kuyruk takımı
- Taşıtlar için yakıt tanklarını soğutma ünitesi
- Uçuş yakıt tankları
- Askeri uçaklar için dıştaki atım tankları
- Askeri ve araştırma roketleri
- Hatalı MIG kaynaklarının tamirinde yaygın kullanım alanı bulmuştur.

Sürtünme karıştırma kaynağı yolcu uçakları gibi hafif alüminyum iskeletli yapılarda büyük potansiyel arz etmektedir. Boeing Şirketi, ince alın, bindirme ve T birleştirmeleri ile çeşitli havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılacak kalın alın kaynaklarında bu yöntemi kullanma çalışmalarına son zamanlarda büyük hız vermiştir. Şu ana kadar, uçakların iniş takımlarının kapaklarında ve bazı savaş uçaklarının kaportasında ince T birleştirmelerinde (sandviç montaj) sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış ve test uçuşları başarı ile sonuçlanmıştır.



Şekil 4.21 SKK ile imal edilen Airbus A340-600 ve A380 modellerinde kanat kaburgaları (Shepherd 2004)

Sürtünme Karıştırma Kaynağı Airbus A340-600 ve A380 ve Eclipse 500 uçak modellerinde kanat kaburga birleştirmelerinde ve yakıt tanklarının birleştirmelerinde uygulanmaktadır (Şekil 4.21 ve Şekil 4.22).



Şekil 4.22 SKK ile imal edilen Eclipse 500 modeli kanat montajı (WEB_11 2004)

Eclipse Aviation Corporation da, ürettiği özel jetlerde perçinleme ve yapıştırma yerine; maliyet ve montaj zamanından tasarruf amacıyla sürtünme karıştırma kaynağını

kullanmaya başlamıştır. Bu, sürtünme karıştırma kaynağının ilk büyük havacılık denemesi olmuştur. Bu yöntem alüminyum alaşımlarının % 65'inin birleştirilmesinde kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanılması ile birlikte yaklaşık 30000 adet perçinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Artan üretim hızı sayesinde de uçak başına yaklaşık 50-10.000 \$ kazanç sağlanmıştır (Mendez ve Eagar 2002).

Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Eclipse 500 tipi uçaklarda kullanılması ile birlikte 100.000 saatlik uçuş süresinde 7000 \$ yakıt tasarrufu sağlanacağı hesaplanmıştır. Üst üste bindirme şeklinde yapılan perçinin yerine kullanılmaya başlandığı ve yüksek mukavemetler elde edildiği için kullanıldığı yerlerde ağırlık düşüşünü sağlar ve bu sayede düşük yakıt tüketimi sağlamaktadır (Mendez ve Eagar 2002).

4.5.3 Uzay endüstrisinde uygulama alanları

1993 yılında başlayan araştırmalar sonucunda uzay gemisi dış tanklarında kullanılan Al-2219 yerine daha hafif (tank başına 3402 kg ağırlık düşüşü) Al-Li 2195 alaşımı kullanılmaya başlanmıştır. Zamanla bu alaşımın kaynaklı birleştirmelerinin onarım zorluğu ve düşük mukavemet özellikleri nedeniyle yeni birleştirme yöntemleri araştırılmaya başlanmış ve araştırmalar sonunda bu birleştirmelerde kullanılmaya başlanmıştır (Kallee ve Mistry 2002).

2001 Nisan ayında havalanan Mars Odyssey uzay gemisinin kaynaklı birleştirmelerinde SKK kullanılmıştır. Boeing firması ilk kez sürtünme karıştırma kaynağını ticari uygulamalarında kullanan Amerikan firmasıdır .

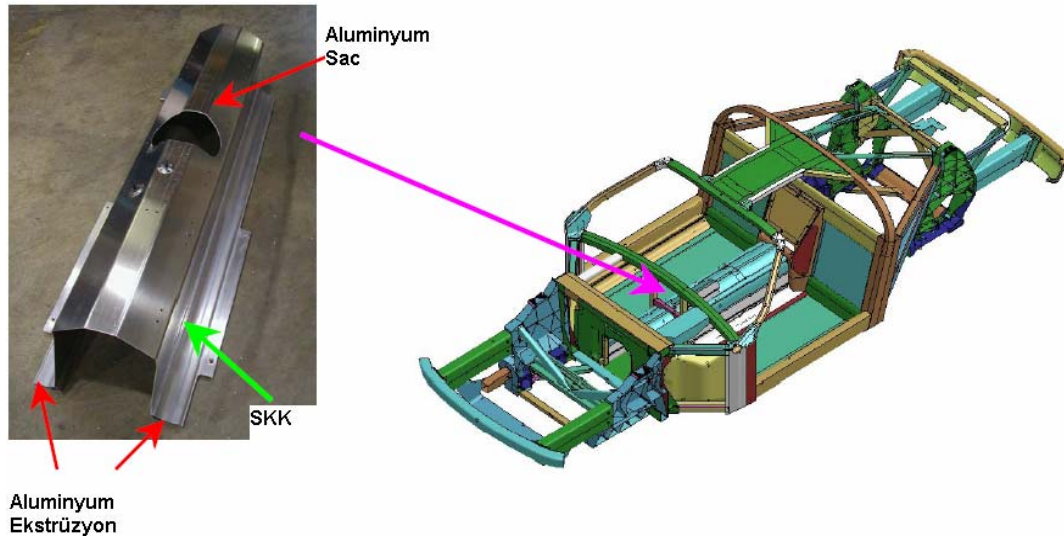
Hızlı üretim az kusur uzun ömür ve %30-50 oranında fazla kaynak mukavemeti sayesinde %10 daha hafiflik sağlaması nedeniyle Delta IV ek motor tanklarının birleştirmelerinde halen SKK kullanılmaktadır (WEB_10 2001).

4.5.4 Otomotiv endüstrisinde uygulama alanları

Çarpışma performansını düşürmeden daha hafif araçlar dolayısıyla daha düşük yakıt tüketimine doğru yönelimlerin sonucu otomotiv üreticileri alüminyum ve birleştirme

yöntemleri üzerine yoğunlaşmaya başladı. Alüminyum birleştirme yöntemlerinden sürtünme karıştırma kaynak yöntemi birçok avantajı sayesinde gün geçtikçe daha fazla kullanılmaktadır. Bu yöntem:

- Süspansiyon kolları gibi küçük çaptaki parçaların
- Tekerlek jantlarının
- Şasi parçalarının bağlantısı için bağlantı elemanları ve özel gövde yapıları
- Yakıt tankerlerinin
- Yöntem, ayrıca alüminyum esaslı arabalarda iç panellerinin üretiminde uygulanmaktadır (Şekil 4.23).
-



Şekil 4.23 2005 Ford GT'de kullanılan SKK ile imal edilen vites kolu paneli (Pan 2001)



Şekil 4.24 Prototip otomobil jantı (Johnson ve. Kallee 1999)

Sürtünme karıştırma kaynağının otomotiv sektöründe ilk uygulamalarından biri Hydro Marine Aluminium (Norveç) firması tarafından prototip otomobil jantlarının iki parçasının birleştirilmesidir (Johnson ve. Kallee 1999) (Şekil 4.24).

2004 Mazda RX-8 modelinin kaput ve arka kapı panellerinin birleştirmelerinde kullanılmıştır. Ayrıca düşük yoğunluğu, yüksek mukavemet/ağırlık oranı kolay dökülebilme ve doğal korozyon direnci sayesinde otomotiv sektöründe kullanılan bazı magnezyum (AZ91 ve AM60) alaşımlarının birleştirmelerinde sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılmaktadır (EWI Insights 2003).

4.5.5 Hızlı tren endüstrisinde uygulama alanları

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun Al-ekstrüzyonlar aralarına sıklık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir (Şekil 4.25). Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanım artırılmaktadır.



Şekil 4.25 Japonya 'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan Al-paneller (Çam 2005).

Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli Al-alaşımlarında ITAB bölgesinde aşırı mukavemet kaybına sebep olduğu için, son yıllarda Almanya ve İngiltere'de meydana gelen hızlı tren kazalarında daha dayanıklı kaynaklara ihtiyaç duyulduğu gerçeği ortaya çıkmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak bölgesinde daha düşük seviyelerde mukavemet kaybına neden olduğundan cazip bir alternatif

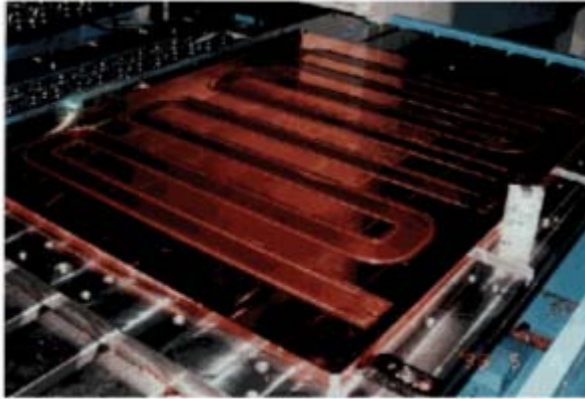
oluşturduğu için son yıllarda Avrupa ve Japonya 'da hızlı tren vagonlarının üretiminde bu kaynak teknolojisi ile imal edilen Al-alaşımı petek paneller kullanılmaya başlanmıştır.

4.5.6 Savunma endüstrisinde uygulama alanları

Savaş araçlarının çelik ve alüminyum zırh paslanmaz çelik ve titanyum alaşımlarından oluşan gövdelerinin onarım, birleştirme, yama işlemlerinde kullanılır. Amerikan savaş araçları üreticisi Anniston Army Depot üretimlerinde SKK yöntemini uygulamaktadır(Burns 2004).

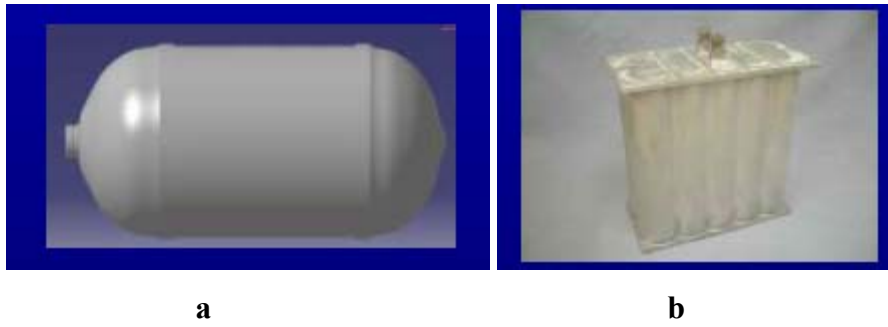
4.5.7 Özel uygulama alanları

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminden Hitachi Cable, Ltd firması LCD, CD, DVD'lerde kullanılan yarı iletken ince film tabakasının üretiminde yararlanılan destek, elektrot ve soğutma amaçlı kullanılan bakır plakaların birleştirilmesinde yararlanmaktadır (Şekil 4.26). Bu yöntem plakaların çarpılmasını en aza indirdiği için ve kullanılan aparatların ucuzluğu nedeniyle tercih edilmektedir.

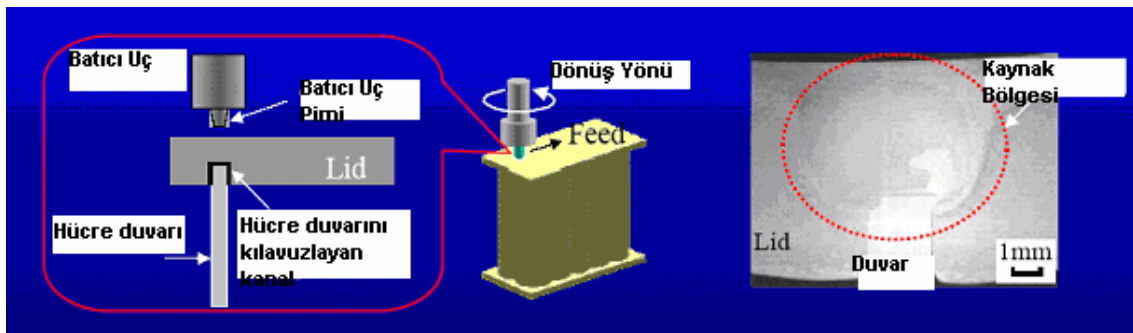


Şekil 4.26 Bakır plakaların birleştirilmesi (WEB_2 2001)

Ülkemizde otomobillerde çokça kullanılan geleneksel tip LPG depolama tanklarına göre 5 kat daha düşük basınç altında (düşük tehlike) 4 kat daha fazla stoklama hacmi sağlayan ANG tipi depolama tanklarının üretiminde SKK yöntemi uygulanmaktadır (Şekil 4.27 b ve Şekil 4.28).



Şekil 4.27 Doğalgaz yakıtlı araçların yakıt hücreleri **a)** Ülkemizde yaygın kullanılan LPG stoklama tankı **b)** ANG tipi LPG stoklama tankı. (Mukaibo 2004)



Şekil 4.28 Doğalgaz yakıtlı araçların yakıt hücrelerinin üretiminde SKK uygulaması (Mukaibo 2004)

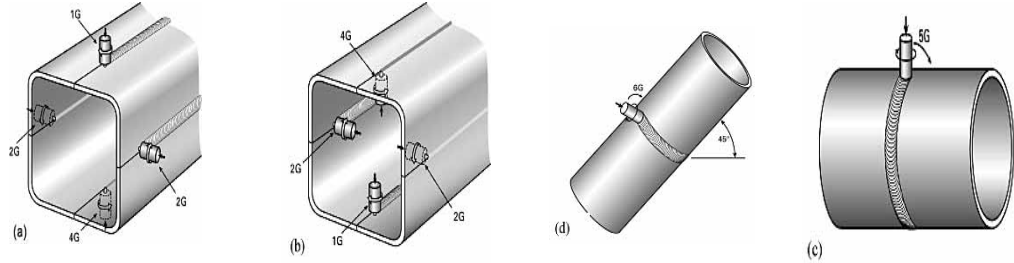
4.6 Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Avantajları

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin geleneksel kaynak yöntemlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bu yöntemde,

- Kaynak, ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme yoktur
- Tükenmeyen kaynak takımı kullanılmaktadır
- Kaynak işlemi sırasında ilave kaynak metali ve koruyucu gaza gerek yoktur
- Çok az bakım ister
- Verimi yüksektir enerji tasarrufu sağlar (3kw'lık toplam güçle 6XXX alaşımında 12,5 mm derinliğinde kaynak yapılabilir)
- İdeal olarak teknik otomasyona uygundur.
- Kaynağı yapan personeli olumsuz etkileyecek zararlı gazlar ve ışınlar söz konusu

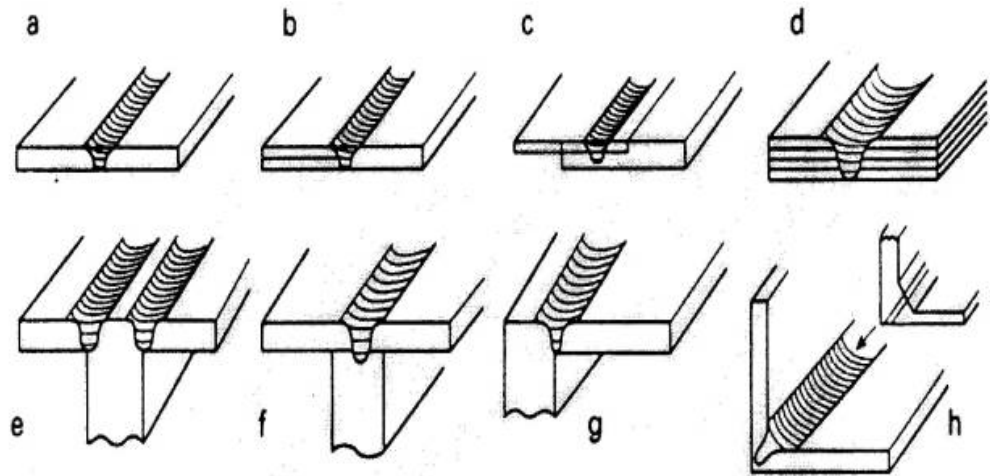
değildir

- Bütün pozisyonlara uygundur (Şekil 4.29)



Şekil 4.29 SKK metodunun içi boş boru kaynaklarında uygulama örnekleri (Thomas ve Dolby 2002).

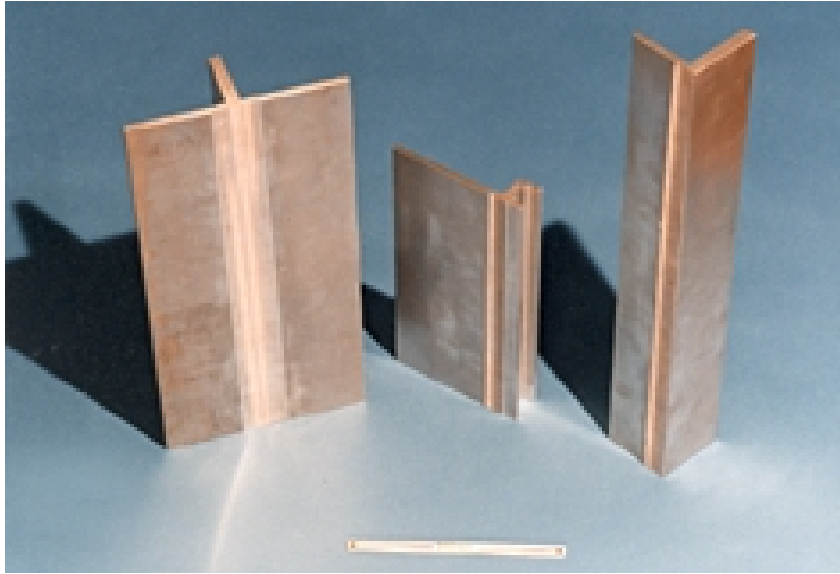
- Farklı koşullarda metaller birleştirilebilir (Şekil 4.30 ve Şekil 4.31)



Şekil 4.30 Çeşitli SKK şematik birleştirme konfigürasyonları

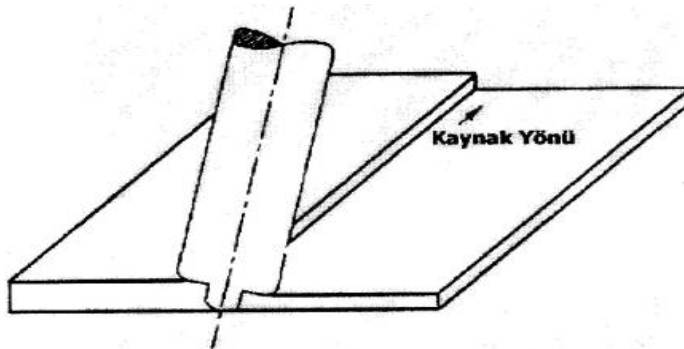
Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı uygulanarak gerçekleştirilen birleştirmeler.

- a) Küt alın birleştirme b) Birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme c) Bindirme
d) Çoklu bindirme e) İki pasolu T- köşe birleştirme f) Tek pasolu T- köşe birleştirme
g) Dış köşe birleştirme h) İç köşe birleştirme (Kaluç ve Bozduman 1998).



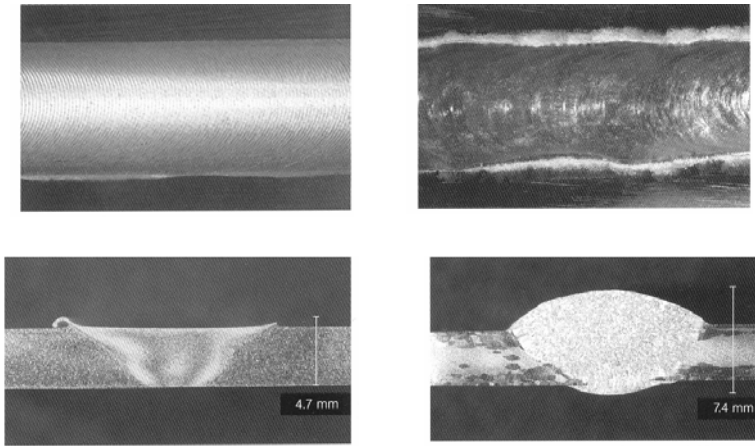
Şekil 4.31 SKK ile T ve L köşe birleştirme konfigürasyonları (Kallee ve Nicholas 2001)

- Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde batıcı pimin eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi mümkündür.



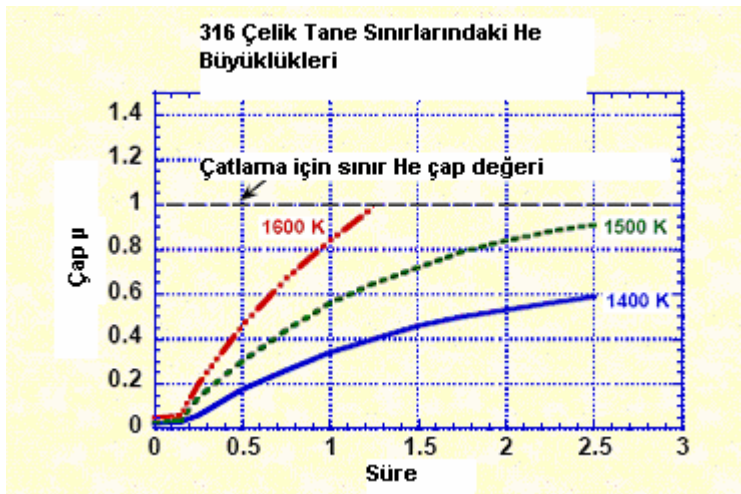
Şekil 4.32 SKK'ında batıcı pimin eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi (Çam ve Koçak 1998 ,Kallee ve Mistry 1999).

- Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek yoktur.
- Farklı yapıdaki malzemelerin kaynağını mümkün kılar (6013-T4 alüminyum alaşımı ve X5CrNi18-10 paslanmaz çeliğin birleştirilmesi) (Çam 2003).
- Sıçrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir. Taşlama ve yüzey polisaj işlemlerine gerek duyulmaz ve yüksek kalitede kaynak dikişi oluşumu gözlenir (Uygun parametreler dahilinde) (Şekil 4.35).



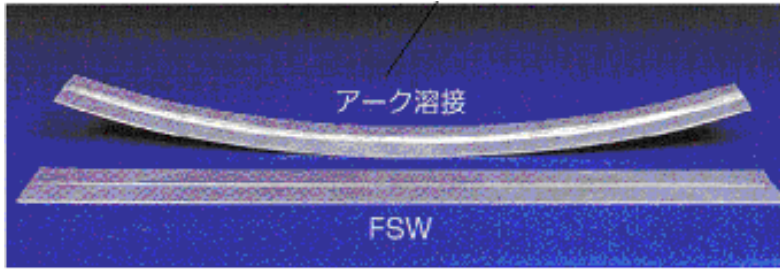
Şekil 4.33 Sürtünme karıştırma kaynağı (solda) elektrik ark kaynağı (sağda) kaynak bölgesi yüzey görüntüleri (Çam 2003)

-
- Düşük ısı girdisi ve takım omzunun oluşturduğu basınç sonrası hamurlaşan metalin akışı ve taşınması sonucu He kabarcık ve gözenek oluşumu minimum seviyededir (Şekil 4.33).

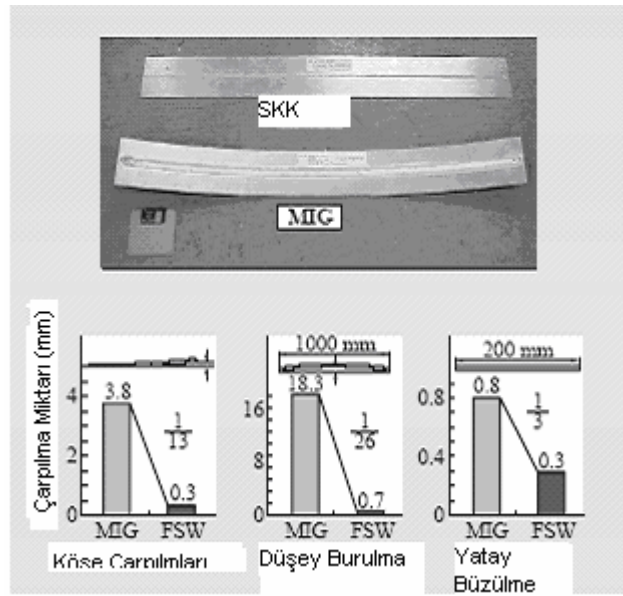


Şekil 4.34 316 Paslanmaz çeliğin SKK ile birleştirilmesinde tane sınırlarında bulunan He kabarcıklarının sıcaklığa bağlı boyut değişiklikleri(Zinkle 2004)

Şekil 4.34'te TIG kaynağı (7,1 kJ/cm ısı girdisi) ve Sürtünme karıştırma kaynağı (530 min⁻¹, 76 min⁻¹, 19 mm takım omzu parametrelerine sahip) ile yapılan birleştirmelerin yapılarındaki He kabarcıklarının kıyaslaması görülmektedir. Kıyaslama sonucu TIG kaynağında maksimum He kabarcığı 254 nm iken SKK'nda He kabarcığı 69 nm büyüklüğündedir. Yani yaklaşık %27 si kadar daha fazladır.



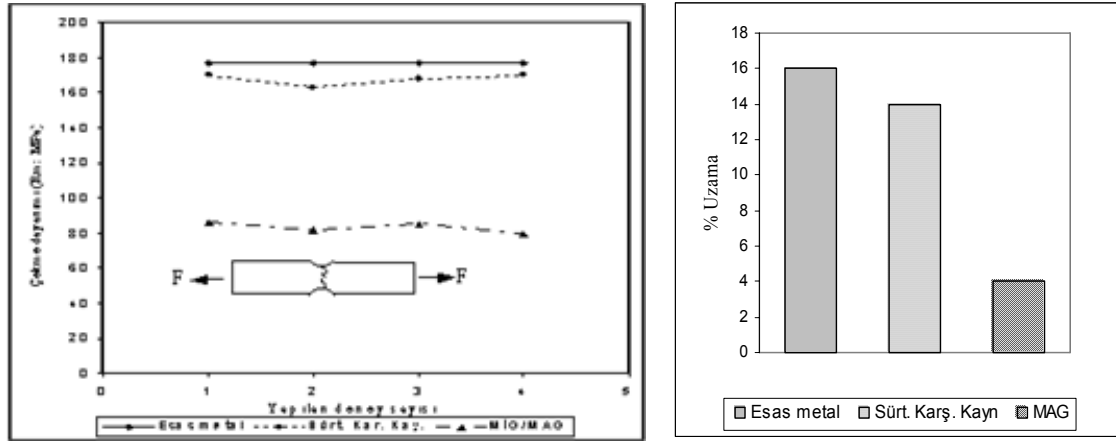
(a)



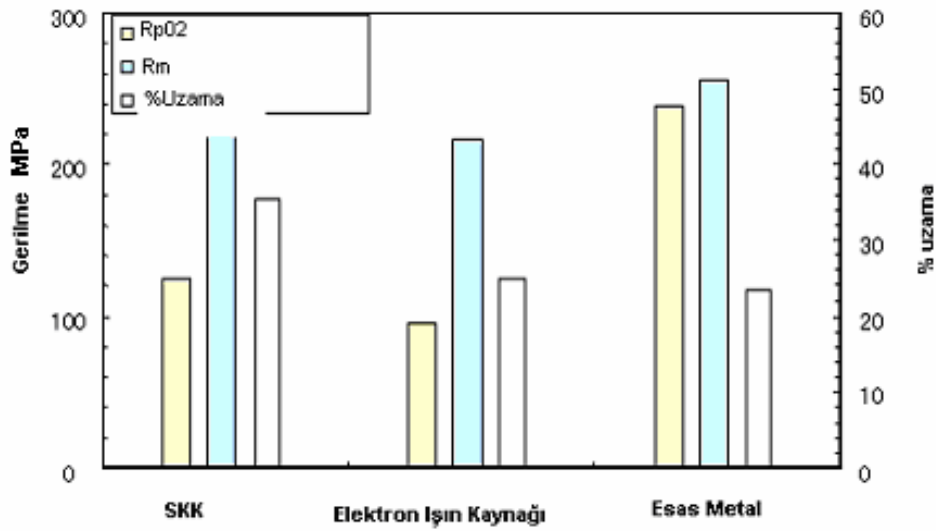
(b)

Şekil 4.36 Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve ark kaynak yöntemi ile kaynak yapılmış malzemelerin çarpılma ve burulma incelemesi **a)**Sürtünme karıştırma kaynağı ve MIG kaynak yöntemi ile kaynatılmış bakır plakaların numunelerin çarpılması (WEB_2 2001) **b)**Sürtünme karıştırma kaynağı ve MIG kaynak yöntemi ile kaynatılmış bakır plakaların numunelerin çarpılmasının karşılaştırılması (Ohba vd 2001)

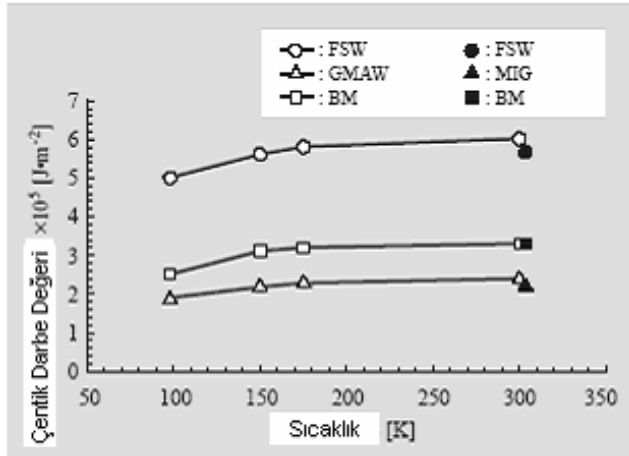
- Dinamik ve mekanik özellikleri ergitme kaynaklı birleştirmelere göre daha yüksektir. SKK ile yapılan uygulamalardan elde edilen sonuçlar, statik veya dinamik yük taşıyan Alüminyum alaşımı birleştirmelerde Sürtünme Karıştırma Kaynak yönteminin MIG'e göre oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir (Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38).



Şekil 4.37 Alüminyum alaşımının Sürtünme karıştırma kaynağı ile MAG kaynakları çekme dayanımı ve % uzama miktarlarının karşılaştırması (Külekcı ve Şık 2004)



Şekil 4.38 Bakır plakaların Sürtünme karıştırma kaynağı ile Elektron ışını kaynaklarının çekme dayanımı ve % uzama miktarlarının karşılaştırması (WEB_2 2001)



Şekil 4.39 Sürtünme karıştırma kaynağı ve MIG kaynakları yapılan Al-5083 numunelerin Charpy çentik darbe deney sonuçları (Ohba vd 2001)

4.7 Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Dezavantajları

1. Levhanın bir ucundan diğerine kaynak isteniyorsa, ileri geri hareket eden tablolara ya da hareketli robotik kafalara gereksinim vardır.
2. Özellikle kalın parçalarda %100 nüfuziyet isteniyorsa parçalar ters çevrilip arka tarafından da kaynak yapılması gerekebilir.
3. Kaynak öncesi yüzey hazırlama kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir.
4. Her kaynak sonunda takımın piminin çıktığı yerde pim deliği kalmaktadır. Bu dezavantaj pratikte pimin; kaynak yapılacak son bölgeyi geçtikten sonra kaldırılması ile aşılabilir.
5. Kaynak yapılacak malzemenin kalınlığına göre omuz üzerindeki pim uzunluğu verilmelidir.

Sürtünme Karıştırma Kaynağının dezavantajlarını gidermek için uluslararası alanda çalışmalar yapılmaktadır. NASA Marshall Uzay Merkezi ve Boeing Şirketlerinin ortak yürüttüğü proje dahilinde yapılan çalışmalarda bilgisayar kontrollü motor ile pim uzunluğu değiştirilebilen takım tasarlanmıştır (Şekil 4.40). Bu tasarım sayesinde

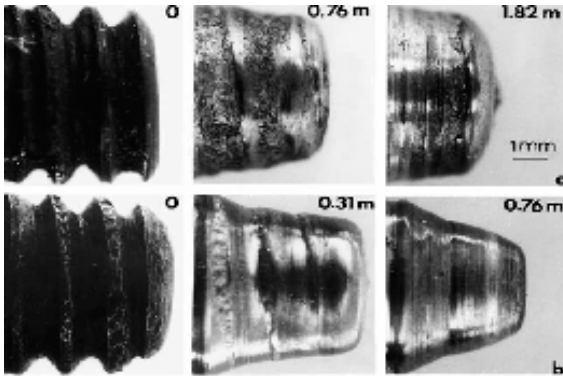
kullanılacak takımın sadece pim uzunluğu ayarlanıp farklı kalınlıktaki numuneler kaynak yapılabilmektedir. Böylelikle dezavantaj olarak sayılan 4. madde ortadan kaldırılmış olmaktadır.

Ayrıca kaynak sonunda pim omuz içine yavaş yavaş çekilerek kaynak sonu gözlenen delik oluşmamaktadır. Böylelikle dezavantaj olarak sayılan 5. madde ortadan kaldırılmış olmaktadır.



Şekil 4.40 Pim uzunluğu ayarlanabilen takım tasarımı (Mendez ve Eagar 2002)

6. Kaynak yapılacak malzeme, takım malzemesi uygun kaynak parametreleri belirlenmesine rağmen kullanılan takımlar sürekli aşınmaya maruz kaldıklarından dolayı belirlenen aralıklarda onarılmalı ya da değiştirilmelidir (Şekil 4.41).



Şekil 4.41 Değişen parametrelere bağlı olarak takım piminde görülen aşınma **a)** Al-6061 kaynak malzemesi 500 min^{-1} devir sayısı **b)** Al-6061 kaynak malzemesi 1000 min^{-1} devir sayısı (Kullanılan takım malzemesi tüm uygulamalarda 62 HRC karbon çeliğidir) (Fernandez ve Murr 2004)

4.8 Yüksek Ergime Sıcaklığına Sahip Malzemelerin SKK ile Birleştirilmesi

Yöntemi icad eden ve patent hakkına sahip olan TWI'nin ilk SKK uygulamaları alüminyumlu birleştirmeler üzerinedir. Daha sonra magnezyum (AZ91), çelik, titanyum ve nikel alaşımlarının FSW metodu ile birleştirilmeleri konusunda çalışmalar başlamıştır. TWI'nin son çalışmalarında titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V malzemesi FSW yöntemi ile başarıyla birleştirilmiştir (Anonymous 2001).

En son olarak da paslanmaz çelik ve HSLA çelikleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. (AISI 1018 Çeliği, AISI 304 ve 316 paslanmaz çelikler, 2507 Süper dubleks paslanmaz çelikler, HSLA 65)

Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmelerinde kullanılacak silindirik takımın malzemesi takım çeliği H13 (X40CrMoV5-1), WC₁₀Co ve Si₃N₄ seçilebilir. Ergime sıcaklığı 660°C olan saf alüminyumun sürtünme karıştırma yöntemi ile birleştirilmesi sırasında malzeme yüzey sıcaklığı ve dolayısıyla takım sıcaklığı yaklaşık (Literatürde malzeme ergime sıcaklığının yaklaşık %60-80 arası sıcaklığa çıktığı belirtilmekte) 396 °C – 528 °C'ye yükselir ve bu sıcaklıklarda takım çelikleri alüminyumdan daha sert olup sertliğini yitirmeden çalışabilir

Ancak düşük karbonlu çelikler, düşük alaşımlı yüksek sertliğe sahip çelikler, nikel bazlı alaşımlar, titanyum alaşımları, paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmeleri işleminde kullanılacak takım malzemesi yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 900 °C ~ 1100 °C) sertliğini koruyan ve sertliği yüksek malzemelerden seçilmelidir. Yüksek ergime sıcaklığı bulunan malzemelerin SKK ile kaynağında kullanılan takımlarda bulunması gereken özellikler; yüksek sıcaklıkta yüksek sertlik, düşük reaktivite, yüksek aşınma dayanıklılığı ve termal şok direncidir (Feng 2003).

Bu sayılan özelliklere sahip çok fazla malzeme bulunmamaktadır. Bu şartları sağlayabilecek alaşımları iki kategoride inceleyecek olursak.

- Refrakter alaşımlar:

a) Tungsten alaşımları ve karbürleri, molibden alaşımları,

Yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir ancak oda sıcaklığında düşük tokluk ve yüksek sıcaklıkta ergiyen malzemelerin kaynağında çabuk aşınan malzemelerdir.

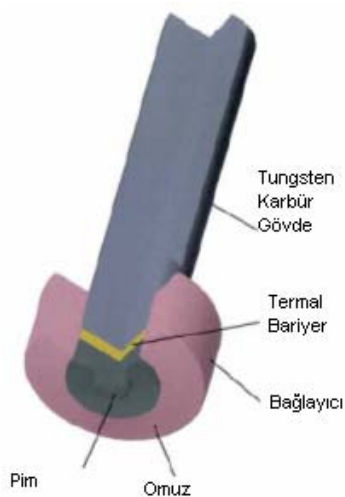
b) Tungsten (Volfram) renyum alaşımları

Oda sıcaklığında yüksek tokluk, geliştirilmiş aşınma dayanımına sahiptir. Ancak esas metalle kimyasal reaksiyona girebilir.

- Süper aşındırıcılar:

PCBN Polikristalin Kübik Boron Nitrit veya PCD Polikristalin Elmas olarak anılan sertlik bakımından elmastan sonra gelen 1450°C'de 5990MPa basınç altında toz metalurjisi ile üretilmiş 1200°C'de kararlı kalabilen üstün özelliklere sahip kimyasal açıdan soy malzemelerdir.

Yüksek sıcaklık direnci (Yaklaşık 1500 K), yüksek aşınma direnci, SKK sırasında esas metalle kimyasal reaksiyona girmez ancak zor şekil verilebilir ve düşük tokluğa sahiptir.



Şekil 4.42 Megadiamond şirketi tarafından üretilen özel takım dizaynı (Sorensen 2004).

Yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin SKK ile kaynağı sırasında tezgahın

rulman ve yataklarının maruz kalacağı yüksek sıcaklıktan olumsuz etkilenmesini önlemek için soğutmalı tutucular kullanılabilir.



Şekil 4.43 Tecnara şirketi tarafından geliştirilen soğutuculu özel takım tutucu (Sorensen 2004).

İçindeki termo-eleman ile takım sıcaklığı ölçülerek içinden geçen akışkan sayesinde sıcaklığın belirli bir değerin üzerine çıkması önlenir. Tezgahın rulman ve yataklarının aşırı ısınması bu sayede önlenmiş olunur. Ayrıca bu tutucu kaynak bölgesinin korozyona direncini arttırmak için koruyucu gaz akışı da sağlanır (Sorensen 2004).

4.9 Literatür Taraması

4.9.1 Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi

Al-1080 malzemesi kullanılan bir çalışmada farklı batıcı uç formlarına bağlı kaynak değişimi incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan 1,40 ve 2,0 mm diş adımlı takımlar bir karıştırıcıdan çok bir matkap ucu gibi ana malzemeyi yırtarak çapak çıkarmışlardır. En iyi kaynak yapısı 0,85 ve 1,10 mm diş adımlı takımlarla yapılan kaynak denemelerinde elde edilmiştir. Her iki takımla yapılan denemelerde yakın mekanik özellikler elde edilmiştir. Kare uçlu takımla yapılan denemelerde uygun kaynak kesiti görülmesine rağmen kötü mekanik ve metalurjik özellikler gözlenmiştir ve bunun nedeni olarak kaynak malzemesinin büyük hacimde transferi belirlenmiştir (Tüm denemeler aynı

ilerleme 200 mm/min ve devir sayıları 1000 min⁻¹ ile yapılmıştır).

Deney numuneleri incelendiğinde kare uçlu takım ile yapılan deneme hariç diğer denemelerde kırılan bölgelerin ana metal bölgesinde olduğu görülmüştür. Ayrıca numuneler ve bağlama aparatı arasında yalıtkan malzemeler (seramik v.b.) kullanılmıştır (Boz ve Kurt 2004).

SKK yöntemi ile AA-7075 alüminyum alaşımı başarılı bir şekilde kaynak edilebilmiştir. Mikroyapı analizi sonuçlarından, bütün kaynaklı numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklikte önemli farklılıklar gözlenmemektedir. Ayrıca ITAB'ın şekli ve boyutunun, sürtünme elemanının uç geometrisine göre şekillendiği belirlenmiştir. Esas metal ve dört farklı kaynaklı numuneye uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen sonuçlar, esas malzemeye yakın sonuçlar vermiştir. Bu durum ergitme kaynak yöntemleri ile yapılan birleştirmeler ile kıyaslandığında, bu yöntemin alüminyum alaşımlarının kaynağı için büyük avantajlar sağladığı görülmüştür (Özdemir ve Taşkın 2004).

Çam ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 2 mm kalınlığındaki EN AW-5754 [AlMg3] alaşımı, yüzeyi düz ve diş açılmış pim (baticı uç) kullanarak SKK ile birleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir;

- Farklı yüzey geometrisine sahip iki uç ile Al-alaşımı levhalar sürtünme karıştırma kaynağı yapılmıştır. Her iki uç ile yapılan denemelerde birleştirme gerçekleştirilmiştir.
- Düz uç ile yapılan kaynaklarda, kaynak dikişi içerisinde tabana yakın kısımda tünel şeklinde porozite gözlenmiştir. Bu duruma, vida dişli uç ile yapılan kaynaklarda rastlanmamıştır. Bunun sebebini baticı uç yüzeyinin düz olması durumunda akıcı çamur kıvamına gelen malzemenin yukarıya doğru taşınması ve baticı uç omzu tarafından levha yüzeylerine sürülmesi; vida diş açılmış baticı uç durumunda ise dişler tarafından akıcı hale gelen malzemenin aşağıya doğru taşınması ve kaynak bölgesinde tutulması olarak tespit etmişlerdir. Çekme deneylerinde düz uçla kaynak yapılan numuneler kaynak dikişi içerisinden kırılmıştır. Çekme mukavemeti oldukça düşük çıkmıştır. Bunun nedeni kaynak dikişi içerisinde tabana yakın kısımda tünel

şeklinde porozite olduğu sonucuna varmışlardır (Ataoğlu 2002).

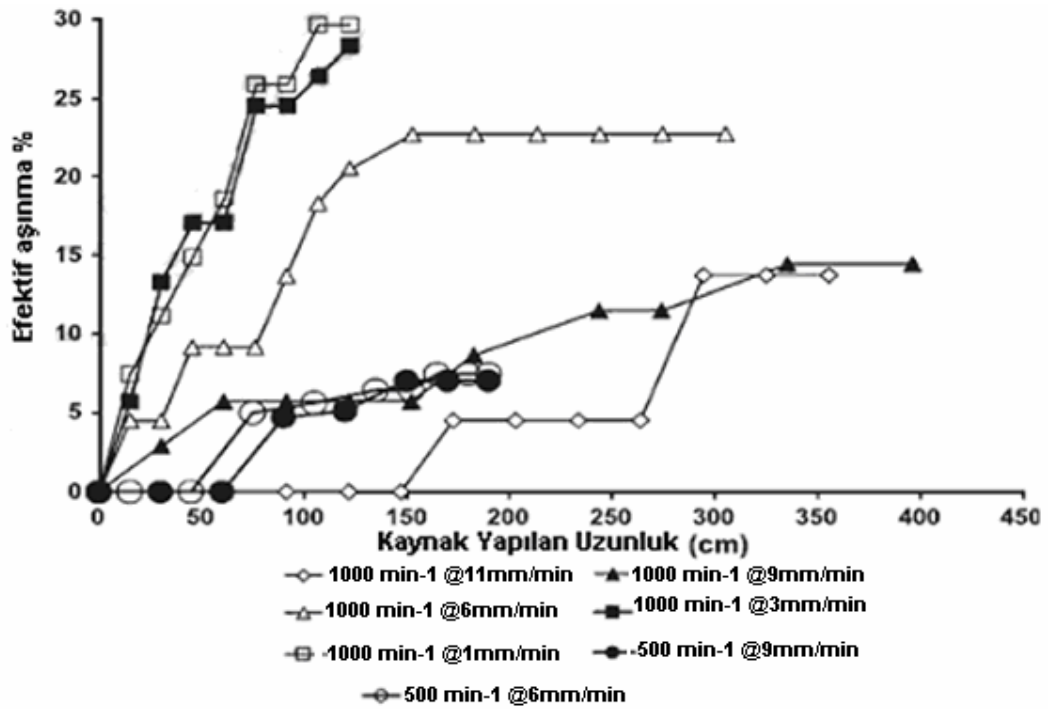
Kaynakla birleştirilmesi güç olan döküm Al-356 malzemesinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiş ve homojen içyapı düşük gözeneklilik ve yeniden kristallenen içyapı sonucu yorulma dayanımında diğer yöntemlere göre artış gözlenmiştir (Sharma vd 2004).

Aluminyum-zirkonyum alaşımlarının açılı preslenerek kaynaklanması ve kaynak sonrası sertlik ve mikroyapı değişimleri incelenmiştir. Deney sonucunda alüminyuma zirkonyum ilavesinin, termomekanik etki bölgesinde dinamik iyileşmeyi önlediği ve açılı olarak preslenen alaşımların, kaynak süresince yüksek sertlik özelliğini korumada rol oynadığı görülmüştür (Sato vd 2003).

2017-T351 Aluminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinin incelendiği çalışmada 1500 min^{-1} , $0,07 \text{ mm/min}$ ilerleme ile iyi birleştirmeler yapılmıştır. Daha yüksek ilerleme hızlarında birleştirmede noksanlıklar, düşük çekme dayanımı ve kaynak merkezinde kırılmalar gözlemlendi. Düşük ilerleme hızlarında ise birleştirmede noksanlıklar gözlenmemiş, çekme dayanımı yüksek elde edilmiş ancak kaynak merkezi ile termomekanik etki altındaki bölgede kırılmalar gözlenmiştir (Liu vd 2003).

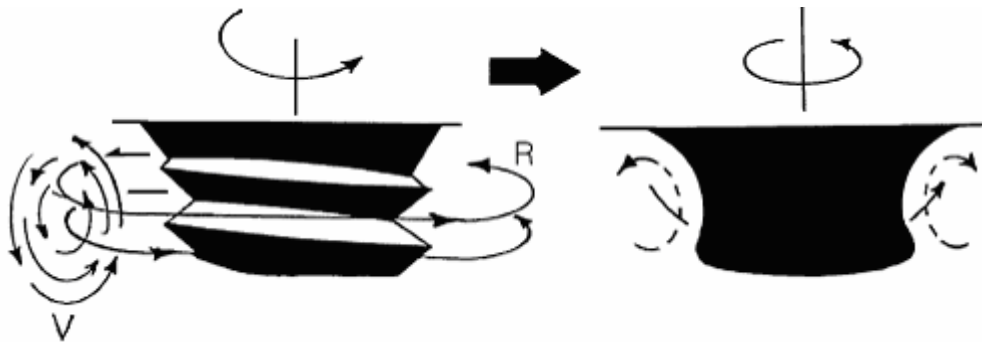
Prado ve arkadaşları, Al 359+20% SiC ve Al 6061+20% Al_2O_3 alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle birleştirilmesinde karbon çeliğinden yapılmış takımların aşınmalarını incelemiştir (Prado vd 2001).

Park ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda 2 mm kalınlığındaki CuZn40 alaşım levhaların SKK Yöntemi ile birleştirilmesi incelenmiştir. Bu incelemeyle birlikte 2 mm kalınlığındaki CuZn40 alaşımlar için optimum kaynak parametreleri bulunmuştur (Park vd 2004).



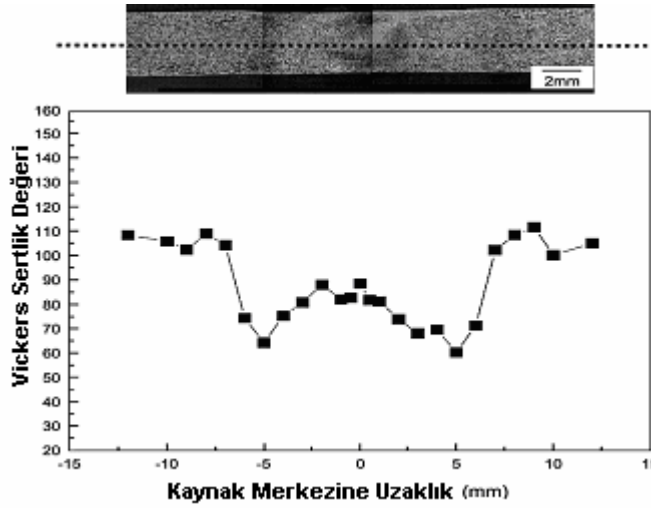
Şekil 4.44 Devir sayısı ve ilerleme hızı değişimine bağlı olarak kaynak uzunluğuna göre takım aşınması grafiği (Prado vd 2001).

Deneysel çalışmaları sonucu şekil 4.44’de görülen eğriler elde edilmiştir. Bu eğriler ile sabit yüksek devirli denemelerde ilerleme hızı düştükçe takımındaki aşınmanın arttığını, aşınma sonucu ulaşılan takım formu denemeler sürdükçe de daha az aşınmaya maruz kaldığını tespit etmişlerdir. Elde edilen form (şekil 4.45) ile daha iyi kaynak dikişi elde edilmiştir (Prado vd 2001).



Şekil 4.45 Takım ilk hali (solda) ve takım aşınması sonrası şekli (sağda) (Prado vd 2001).

SKK Yöntemi ile 4 mm kalınlığındaki bakır levha 61 mm/min ilerleme hızı ve 1250 min⁻¹ dönüş hızı parametrelerinde başarıyla birleştirilmiştir. Kaynak bölgesi incelendiğinde kaynak merkezinde (100µm) esas metal bölgesindeki tanecikli yapıya (210 µm) nazaran daha küçük ısı tesiri altındaki bölgede ise (230µm) daha büyük tanecikli yapı gözlenmiştir (Lee ve Jung 2004).



Şekil 4.46 1250 min⁻¹ ve 61 mm/min ilerleme hızında birleştirilen 4 mm kalınlığındaki bakır levhanın mikrosertlik eğrisi

DeneySEL çalışmalar sonucu elde edilen, Şekil 4.46'daki mikrovickers sertlik ölçümleri sonucu tespit edilen kaynak bölgesindeki sertlik artışının sebebi olarak artan dislokasyon yoğunluğu olduğu ileri sürülmüştür. Ayrıca kaynak merkezinin dikine mikro sertliği incelendiğinde kaynak yüzeyinden levha tabanına doğru gidildiğinde sertlik değerinde azalma gözlenmiş buna neden olarak da tanecikli yapının büyümesi gösterilmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda ulaşılan çekme dayanımı değeri esas malzemenin % 87'si kadar olduğu görülmüştür.

4.9.2 Çelik ve alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi

6 mm kalınlığında 304 L kalitesindeki paslanmaz çeliğin 550 min⁻¹ devir sayısı ve 1,3 mm/s ilerleme hızı 3,5° dalma açısı ile kaynağı gerçekleştirmiştir. Bu kaynak yönteminde PBCN takım kullanılmıştır. Bu çalışma ile kaynak dikişinin mikroyapısı ve

sigma fazı oluşumu incelenmiştir. Çalışma sonucunda paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesindeki içyapının alüminyumda elde edilen yapıya benzediği gözlemlenmiştir. Kaynak merkezinden pimin ayrılış kısmında (retreating side) sigma fazı oluşumu gözlenmedi. Sigma fazı oluşumunun delta-ferrit yapısının kaynak esnasında ısınma nedeniyle bozunması ile oluştuğu belirtilmiştir (Park vd 2003).

Park, önceki çalışmasında kullandığı parametreler ile kaynak bölgesinin korozyon direncini incelemiştir. Kaynak bölgesinde sigma fazı oluşumu nedeniyle korozyona ve paslanmaya karşı direncin azaldığını belirlemiştir(Park vd 2004).

Brigham Young Üniversitesi'nde yürütülen çalışmalarda 6 mm kalınlığındaki 304 kalite paslanmaz çeliğin, 15 mm çapında omuza , 2 mm pim uzunluğuna sahip PBCN takımı yardımıyla 800-900-1000-1100 min⁻¹ dönüş ve 50-75-100-130 mm/min ilerleme hızlarında kaynak yapılabilirliği ve içyapıları incelenmiş ve uygulama parametreleri elde etmiştir. Bununla birlikte PCBN takımların çok düşük aşınmaya uğraması göz önüne alınarak bu yöntem için en uygun takım malzemesi olduğu belirlenmiştir (Sterling vd 2004).

A.P. Reynolds çalışmasında 3,2 mm kalınlığındaki 304 kalitesindeki paslanmaz çeliği Tungsten alaşımı 19 mm omuz çapına sahip takımla 1,7 mm/s ilerleme hızında 300 ve 500 mm/mindönüş hızları elde edilen kaynak yapısını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Düşük basınç devir sayısı ile yapılan kaynağın -ilerme sabit- mm başına ısı girdisi daha düşük olduğu bulunmuştur. Isı girdisinin düşüklüğü beraberinde düşük sıcaklıkta kaynak, kaynak merkezinde daha küçük tanecikli yapı eldesine neden olmuştur. Uygulamalarda taneler daha küçüktür, çekme dayanımı daha yüksektir. Kaynaklı parçanın artık gerilimi ergitme kaynağında ulaşılan gerilmelere eşdeğerdir. Uzunlamasına artık gerilme oluşumu esas metalin sınırına yakın olan yerlerde görülmüştür (Reynolds vd 2003).

Chao ve arkadaşı, Reynolds A.P.'nin önceki çalışmasındaki 304 paslanmaz çelik kaynak parametrelerini kullanarak bir nümerik simulasyon oluşturulmuştur (Zhu ve Chao 2003).

Lienert ve arkadaşları 6,35 mm kalınlığındaki AISI 1018 çeliğin 0,42-1,68 mm/s ilerleme hızlarında ve 450-650 min⁻¹ devir sayılarında kaynak edilebilirliğini incelemiştir. Denemelerde tungsten ve molibden alaşımlı takımlar kullanılmıştır. Yapılan denemelerde kaynak metalinin ve takımın ulaştığı sıcaklık değeri 990°C, kaynak merkezinin ulaştığı sıcaklık değeri ise yaklaşık 1100°C -1200°C ölçülmüştür. Kaynak sırasında takım arası kızıl turuncu renge ulaşır. Takım üzerindeki aşınma izlenmiş ve en büyük aşınmanın ilk dalış esnasında yük altında tam ısınmamış soğuk metalin hareketi sırasında olduğu belirtilmiştir. Takım aşınmasının önüne, ön ısıtma, düşük dalış değeri, ön delik uygulamaları ile geçileceği belirtilmiştir. Takım sıcaklığı 180 saniyelik dalma periyodunun sonunda sabit bir sıcaklıkta kalmış, ilerleme ile birlikte sıcaklığı artmıştır (Lienert vd 2003).

Uzun çalışmada Al 6013-T4 ve X5CrNi18-10 levhalarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmesini incelemiştir. 4 mm kalınlığındaki malzemeler 800 min⁻¹ devir sayısında ve 80 mm/min ilerleme hızında kaynak yapılmıştır. Bu birleştirmenin mikroyapısı incelendiğinde kaynak bölgesinin yedi bölgeden oluştuğu gözlenmiştir (Paslanmaz çelik esas metal, paslanmaz çelik ısı tesiri altındaki bölge, paslanmaz çelik termomekanik etki altındaki bölge, kaynak merkezi, alüminyum termomekanik etki altındaki bölge, alüminyum ısı tesiri altındaki bölge, alüminyum esas metal). Kaynak bölgesinin sertliği gözlemlendiğinde; paslanmaz çelik kısmındaki termo mekanik etki altındaki bölgeden alüminyum esas metale doğru gidilirken kaynak merkezinde sertlikte büyük düşüş olduğu bulunmuştur. Kaynak merkezi bölgesinde ise sertlikte görülen büyük değişikliklerin nedeni olarak bu bölgedeki paslanmaz çelik taneciklerinin düzensiz dağılımı gösterilmiştir. Kaynaklı birleştirmenin yorulma özellikleri incelendiğinde Al 6013-T4 birleştirilmelerine göre %30 daha düşük değerler elde edilmiştir (Uzun 2004).

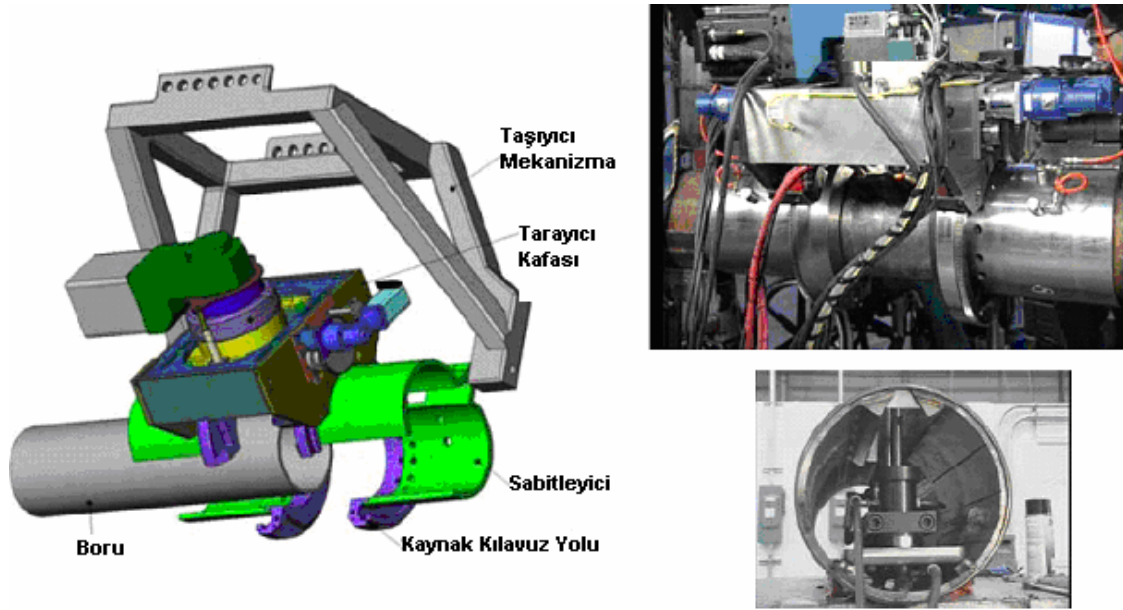
Yeni yapılan araştırmalarda farklı türde malzemelerin SKK ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Bu çalışmaların birinde 2mm kalınlığında SS400 çeliği ve A5083 (Al-0,5 Mg-0,5 Mn içerikli) alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Denemelerde SKH57 yüksek hız çeliği takım olarak kullanılmıştır. 15 mm çaplı omuz, 2 mm çap, 1,9 mm uzunluğunda pime sahip takım kullanılmıştır. İlerleme hızı da sabit tutularak 25 - 100-250-500-1250 min-1 devir

sayılarında denemeler yapılmıştır. Bu denemelerde karıştırıcı pim SS400 çeliğine teğet bir karıştırma olacak şekilde tamamen Alüminyum içine daldırılmıştır. Denemelerde devir sayısı optimum değer aralığında tutulmuştur (250 ve 500 min⁻¹). Düşük devir sayısında yetersiz ısınma nedeniyle takım çabuk kullanılmaz hale gelmiş (pime sarılma) ve kötü kaynak elde edilmiştir. Yüksek devirde ise oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle Alüminyum içindeki Mg oksitlenmiştir (Kimapong ve Watanabe 2004).

En iyi gerilme dayanımına sahip dikiş, pimin tabandan 0,2 mm mesafede olduğu pim uzunluğunda elde edilmiştir. Pim çapının minimum seçilmesi gerektiği ve en iyi sonuçların pim çapının 2-4 mm olduğu durumlarda olduğu görülmüştür (Kimapong ve Watanabe 2004).

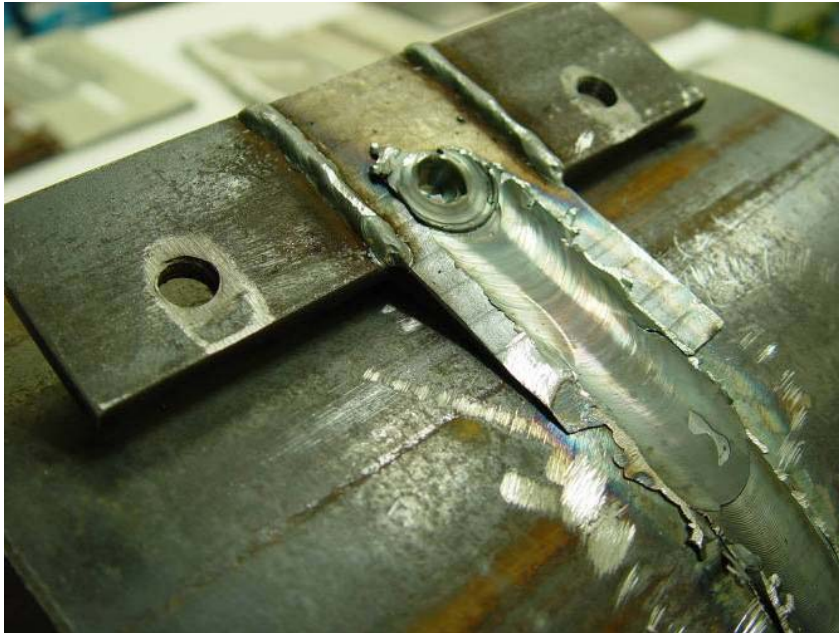
Orhan, “AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çeliğin Sürtünme Karıştırma Kaynağına Devir Sayısının Etkisi” üzerine yaptığı isimli çalışmasında, AISI 430 paslanmaz çelik sac levhalar 50 mm/min ilerleme hızı ve 450 min⁻¹ devir sayılı bağlantılarda üç farklı bölgenin oluştuğunu, ince taneli bölgede sertliğin yükseldiğini, güzel görünümlü ve dayanımı yüksek bir kaynağın meydana geldiğini tespit etmiştir. Yapılan çekme deneyi sonucunda kopmanın tamamen kaynak bölgesi dışından gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum, dikişin mukavemetinin ana metalinkinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuç elde edilen kaynaklı birleştirmenin istenen mekanik özelliklerde olduğunu göstermektedir. Bu malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile güvenle birleştirilebileceği belirlenmiştir (Orhan vd 2006).

Yağ ve gaz hatlarında kullanılan kimyasal bileşimine sahip bir borunun (0,08C-1,0Mn-0,235Si-0,04Al-0,016Nb) boruların sürtünme karıştırma kaynağı ile farklı kaynak pozisyonlarında birleştirilmesi incelenmiştir. Denemelerde kullanılan borunun dış çapı 324 mm olup et kalınlığı 6,35 mm'dir. Denemelerde 25 mm omuz çaplı 5,58 mm pim uzunluğunda PCBN takımlar 500 - 600 min⁻¹ devir sayısı ve 100-150 mm/min ilerleme ile hareket ettirilerek ve 29 kN yük altında hareket ettirilerek birleştirme gerçekleştirilmiştir. Denemelerde boruyu sabitleme ve birleştirme için özel aparatlar kullanılmıştır (Şekil 4.48) (Feng vd 2005).



Şekil 4.47 SKK yöntemi ile boruların alın altına kaynağında kullanılan sabitleme mekanizması (Feng vd 2005).

Boru kaynağının bitim noktasında oluşacak deliği önlemek için özel bir uygulama ile kaynağın devam etmesi sağlanmıştır (Şekil 4.49).



Şekil 4.48 SKK'da takım çıkış noktasındaki yarığı önlemek için alınan önlem (Feng vd 2005).

Kaynak bölgesini oksidasyondan korumak için argon gazı verilmiştir. Birleştirilen numunelere uygulanan çekme deneyleri iyi sonuçlar vermiştir. Esas metalin çekme dayanımı 530 MPa kaynak numunesinin çekme dayanımı 540 MPa bulunmuştur. Tüm denemelerde kopma esas metal bölgesinde meydana gelmiştir (Feng vd 2005).

5. MATERYAL VE METOD

Çalışmalarda SKK yöntemiyle paslanmaz çelik levhaların alın altına kaynağı gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin sanayide uygulanabilirliği düşünülerek çalışmalarda kaynak metali olarak, piyasada çokça kullanılan 2,5 mm kalınlığındaki X5CrNi18-10 paslanmaz çeliği kullanılmıştır. Bu birleştirme işlemlerinde kullanılan cihaz ve sistemler aşağıda verilmiştir. Ayrıca birleştirme işleminin nasıl yapıldığı, hangi safhalardan oluştuğu ve kaynak bölgesinde oluşan içyapının incelenmesi ile mekanik özelliklerin nasıl belirlendiği bu bölümde açıklanmıştır.

5.1 Deney Düzenegi

Deneylerde kullanılan düzenek 2 kısımdan meydana gelmiştir. Bunlar:

1. SKK'nin yapıldığı kalıpçı freze
2. Deney numunesi bağlama aparatı
3. SKK Uçları

5.1.1 SKK'nin yapıldığı kalıpçı freze

SKK uygulamalarında Şekil 5.1 de görülen Stanko marka Rusya yapımı kalıpçı freze kullanılmıştır. Tezgah $900-1400 \text{ min}^{-1}$ devir sayısı aralığında ve $25-1250 \text{ mm/min}$ ilerleme hızı aralığında çalışabilmektedir. Tezgah tablasını yatay hareket ettiren motorun gücü $2,26 \text{ kw}$ düşey hareket ettiren motorun gücü $1,67 \text{ kw}$ 'dir. Soğutuculu takım tutucusu kullanılmadığı denemelerde, tezgahın rulman ve yataklarının aşırı

ısınma nedeniyle hasar görmesini önlemek için denemeler kısa süreli yapılmış ve takım pensi yeterli soğumadan sökülmemiştir.



Şekil 5.1 SKK denemelerinde kullanılan freze tezgahı

5.1.2 Deney numunesi bağlama aparatı

Şekil 5.2 görüldüğü gibi kaynakla birleştirilecek olan sac levhaların tezgaha sıkıca sabitlenmesi için bağlama aparatı kullanılmıştır. Bağlama sırasında bazı noktalara dikkat edilmesi gerekir;

1. Sac levhanın bağlama aparatına, bağlama aparatının da tezgah tablasına sıkıca bağlandığından emin olunmalıdır.
2. Sac levhaların alın altına getirildiği çizgi, takımın bağlandığı tezgahın hareketli kafasının izlediği yola paralel olmalıdır.
3. Bağlama aparatının, sacların alın altına birleşeceği bölgenin altında kalan kısmının oyuk olmadığından emin olunmalıdır.



Şekil 5.2 SKK yapılacak parçaları tutan aparat

5.2 Deney Numunesi:

5.2.1 Deney numunesinin kimyasal ve mekanik özellikleri

Bu çalışmada 2,5x60x120 mm ölçülerinde kısa adı X5CrNi18-10 (Malzeme Numarası TS EN 1.4301) olan ostenitik paslanmaz çelikten numuneler (Şekil 5.3) kullanılmıştır. Malzeme kalınlığı olarak da gıda uygulamalarında çokça kullanılan 2,5 mm seçilmiştir. Kullanılan malzemenin çeşitli standartlardaki gösterimleri Tablo 5.1’de, kimyasal bileşimi Tablo 5.2’de, mekanik özellikleri Tablo 5.3’de, mekanik, fiziksel özellikleri ise Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Deneyde kullanılan numunelerin EN ve AISI Normlarında gösterimleri

EN Malzeme Gösterimi:		US Malzeme Gösterimi:	
Malzeme Kısa Gösterimi:	DIN (EN) Malzeme No:	Standart:	Tür:
X5CrNi18-10	1.4301	AISI	304

Tablo 5.2 X5CrNi18-10'nin kimyasal bileşimi

Kısa Gösterimi	EN Malzeme Numarası	Kimyasal Bileşim Ağı. % Maks.						
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
X5CrNi18-10	1.4301	0,08	2	1	0,045	0.03	18-20	8-10,5

Tablo 5.3 X5CrNi18-10'nin mekanik özellikleri

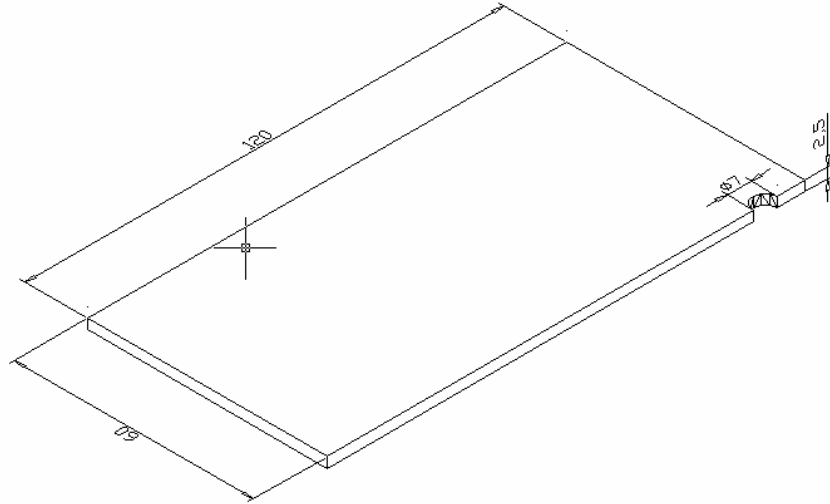
Çelik Türü	Isıl İşlem Şartı	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Akma sınırı % 0.2 (N/mm ²)	Uzama A, (%)	Kesit Daralması Z, (%)	Sertlik (HBS)
304	Tavlı	586	241	55	65	80

Tablo 5.4. X5CrNi18-10'nin fiziksel özellikleri

Elastisite Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Aralığı (°C)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Isıl Genleşme Katsayısı (mm/m°C)
195	8	1375-1450	15,7	16,6

5.2.2 Deney numunesinin boyutları

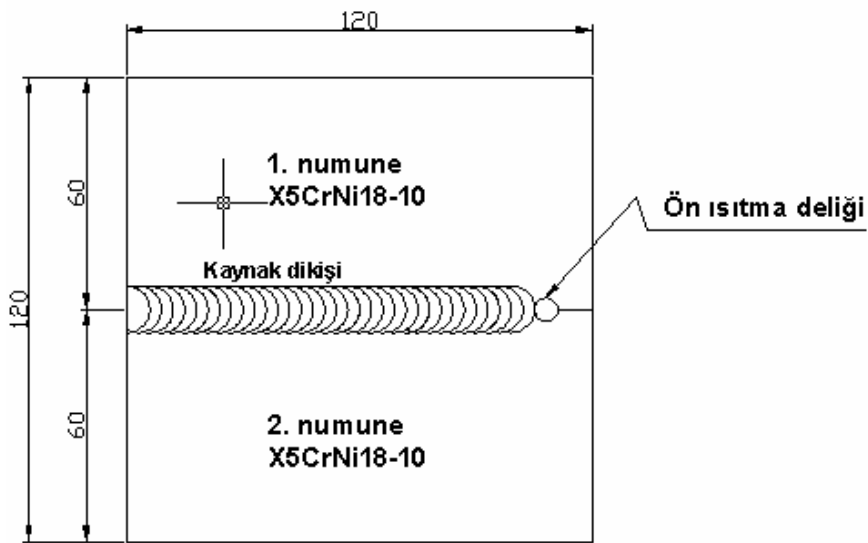
Deneylerde kullanılan paslanmaz çelik plaka boyutları 2,5x60x120 mm'dir (Şekil 5.3). Denemelerde kullanılacak plakalar ön ısıtma sırasında takımın piminin yük görmeden malzemeye daldırılması amacıyla şekilde verilen ölçüde delinmiştir.



Şekil 5.3 Sürtünme Karıştırma Kaynağı numunesi

5.2.3 Deney numunelerinin birleştirilme şekli

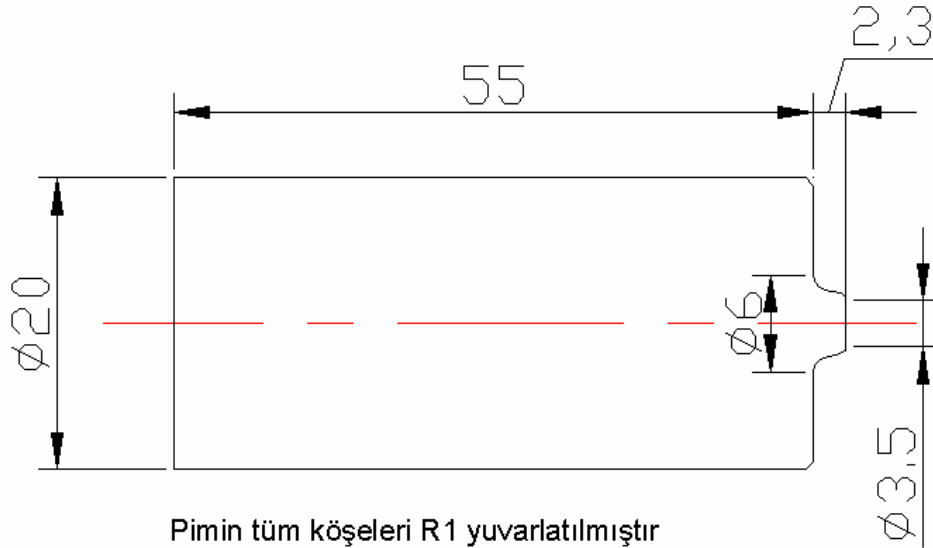
Kaynağı yapılacak olan 2,5x60x120 mm ebatında iki adet numune şekil 5.4’de görüldüğü gibi alın altına getirilerek kaynak yapılmıştır. Sağlıklı bir kaynak dikişi için numune kenarlarındaki çapakların oluşmaması için lazerle kesim yapılarak numuneler tam olarak alın getirilmiş ve kaynak yapılmıştır.



Şekil 5.4 Deney numunelerinin birleştirilme şekli

5.3 SKK Uçları

Paslanmaz çeliklerin SKK 'nda kullanılan takımların yüksek sıcaklıkta sertliğini koruyabilmesi ve aşınmaya karşı dirençli olması gerekliliği göz önüne alınarak takım malzemesi olarak oda sıcaklığında 1650 Vickers sertliğinde ölçülen tungsten karbür seçilmiştir. SKK'da kullandığımız kaynak uçlarının boyutları Şekil 5.5' te verilmiştir.



Şekil 5.5 SKK denemelerinde kullanılan batıcı uç şematik resmi

Takım omuz çapı ve pim çapları literatürde belirtilen ve denemelerde edinilen tecrübelerle bağlı kalınarak belirlenmiştir (Reynolds vd 2003).

Kullanılan tungsten karbür takımların kırılma direncini azaltmak amacıyla pim ve omuz kısmının keskin köşeleri yuvarlatılmış ve pim uca doğru konik yapılmıştır. Literatürde belirtildiği üzere takım pim uzunluğu 2,3 mm belirlenmiştir. Pim uzunluğu kritik bir ölçüdür. Yeterli uzunlukta olmayan pim nedeniyle kaynak nüfuziyeti yeterli olmamaktadır. Uzun pim nedeniyle ise pim ucu tezgah tablasına temas ederek zorlanmalara neden olabilmekte, ayrıca tablada boydan boya kanal açarak çamur kıvamındaki kaynak metalinin bu kanala dolması nedeniyle yeterli kaynak yapılamamaktadır (Ataoğlu 2002).

Denemelerde kullanılan takımların sertliğinin yüksek oluşu ve talaş kaldırma güçlüğü nedeniyle pim kısımlarına literatürde belirtildiği gibi diş açılmamıştır. Ancak diş hekimlerinin kullandığı el frezeleri ve özel elmas çakılar kullanılarak pime kanallar elle verilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 SKK denemelerinde kullanılan yarıklı pimli batıcı uç

6. DENEYLER

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin paslanmaz çeliklere uygulanması konusunda yurtdışında birkaç üniversitede, bazı özel araştırma kuruluşlarında ve büyük şirketlerde (Boeing, Eclipse, Nasa vb...) yeni araştırmalar yapılmaktadır.

Ülkemizde ise sadece alüminyum ve bakır alaşımlarının birleştirilmesi konusunda araştırmalar yapılmaktadır.

Dolayısıyla yurt içi ve yurt dışı kaynaklardan çok fazla bilgi ve doküman elde edilememektedir. Ayrıca yurt dışında denemelerde kullanılan ve Bölüm 4.8'de belirtilen soğutucu takım pensleri, PCBN ve Tungsten Renyum alaşımı özel şekilli takımlar ve takımın uyguladığı baskı kuvvetini ölçen cihazlar ve tezgahlar özel imal edildiği, ileri teknoloji gerektirdiği ve yüksek maliyetli olmaları nedeniyle temin edilememiştir. Bunun yanında Bölüm 4.4'te belirtildiği üzere sürtünme karıştırma kaynak yöntemine etki eden birçok parametre mevcuttur.

Belirtilen zorluklar ve sınırlamalar göz önüne alınarak deneysel çalışmalar 2 kısımda incelenmiştir. Birinci kısım ön çalışma niteliğinde olup deneylerde kullanılan cihazlara göre değişken parametreleri belirli sabitlemeler altına alarak kontrol edilmesi amaçlanmıştır. İkinci kısımda ise bu sabitlemeler ışığında 1000 min⁻¹ devir sayısı sabit tutulup değişen ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen birleştirmelerin nüfuziyetleri, kaynak dikişleri, uygulanan çekme deneyi sonuçları, mikro içyapıları, mikrosertlik ölçüm sonuçları incelenmiştir.

6.1 Paslanmaz Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İçin Ön Deneyler:

Literatür araştırması sırasında paslanmaz çelik malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi ile ilgili çok fazla çalışma bulunmadığı görülmüştür. Bu nedenle uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi uzun denemeler sonrası elde edilmiştir.

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kalitesine etki eden parametreler daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Tekrarlamak gerekirse bu parametreler:

Takımın ilerleme hızı, takımın devir sayısı, takımın uç dizaynı, takım baskı kuvveti, pim batma derinliği, takımın yüzeye dalma açısı, yüzey hazırlama, malzeme kalınlık farklılığı, kalıp ve sabitleme aparatlarıdır.

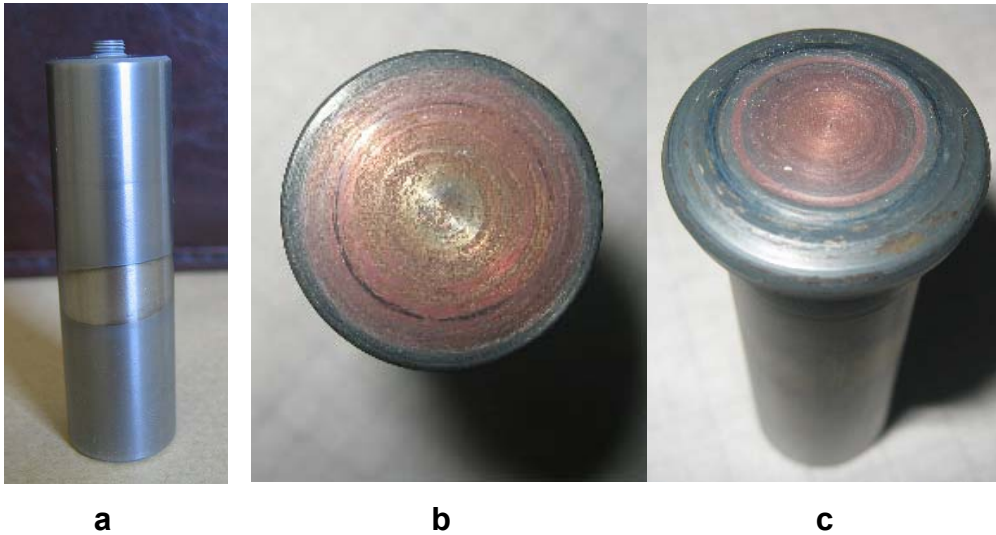
- Deneysel çalışmalar esnasında bu parametrelerden malzeme kalınlık farklılığı olmamış, aynı sabitleme aparatları kullanılmıştır. Birleştirilecek tüm numuneler lazer kesimi ile hazırlandığı için ek bir yüzey hazırlama yöntemi uygulanmamıştır.
- Deneylerde sabit uç dizaynı kullanılmıştır böylelikle takım uç dizaynı parametresi kontrol altına alınmıştır. Yapılan deneyler sırasında kullanılan kaynak takımında görülen kırılma, aşınma sorunları olumlu kaynak sonuçlarına ulaşılan karbür takımlar ile giderilmiştir. Karbür takımların sertliği ve zor işlenebilirliği yüzünden takım üzerine yarıklar açılmamış sabit şekilli uçlar kullanılmıştır (Bkz. Şekil 5.5).

İlk denemelerde kullanılan takım malzemesi Tablo 6.1’de gösterimi verilen X155CrVMo12-1 olarak bilinen soğuk iş takım çeliğidir.

Tablo 6.1 SKK ilk denemelerinde kullanılan batıcı uç malzemelerinin EN ve AISI normlarında gösterimleri

EN Malzeme Gösterimi:		US Malzeme Gösterimi:	
Malzeme Kısa Gösterimi:	DIN (EN) Malzeme No:	Standart:	Tür:
X155CrVMo12-1	1.2379	AISI	D2

Kullanılan takımların omuz çapı 18 mm'dir. Bu takım sertleştirme ısıl işlemi sonrasında 60-62 HRC sertliğe ulaşmış, kirojenik proses ile aşınma dayanımı kazanmış ve son olarak titanyum nitrür kaplanarak yüzeyde sert nitrür tabakası elde edilmiştir. Takım pim kısmına karıştırma için ancak literatürde belirtilen şekilde M5 diş açılmıştır. Takımlar ön ısıtmanın ardından daha ilk ilerleme noktasında pim kısmından kırılmış ve ilerlemeye devam edildiğinde ise takımın baskı ve sıcaklık etkisi ile sıvandığı görülmüştür. Bu deneme sonunda çok daha sert ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip takım malzemesi arayışına gidilmiştir. Şekil 6.1'de takımın ilk hali görülmekte, Şekil 6.1 b ve c'de takımın aşındıktan sonraki hali görülmektedir. Bu resimlerde takım omzunun sıvanıp şişmesi ve takım piminin tamamen yok olması dikkat çekicidir.



Şekil 6.1 SKK ilk denemelerinde kullanılan batıcı uçların uygulama öncesi ve sonrası durumları **a)** takımın ilk hali **b)** takımın deney sonundaki halinin üstten görünüşü **c)** takımın deney sonundaki sıvanmasını gösteren resim

İkinci denemelerde sert metal tungsten karbür takımlar kullanılmaya başlanmıştır. (Şekil 6.2) Ancak kullanılan takım pimi ilk ilerleme sırasında kırılmıştır. Bu kırılmanın 12 mm omuz çaplı takımın malzemeyi yeterli düzeyde ısıtamamasına bağlı olduğu düşünülmüştür. Kırılan takımın pim kısmının önceki denemelerdeki gibi tamamen silinmediği gözlenmiş ve takım malzemesinin türünün doğru olduğu düşünülerek çalışmalara yön verilmiştir.



Şekil 6.2 SKK ikinci denemelerinde kullanılan batıcı uçların uygulama sonrası görünümleri

Üçüncü denemelerde 20 mm omuz çaplı yaklaşık 1650 HV sertliğe sahip tungsten karbür takımlar kullanılmış ve takım pimlerindeki kırılmalar önlenmiştir. Ancak kullanılan takımlar çok çabuk aşınmış ve pim her denemede giderek küçülmüştür. Bununla birlikte malzeme dayanımı denemeler yapmaya elverişli olduğu için yeni malzeme arayışına gidilmemiştir.

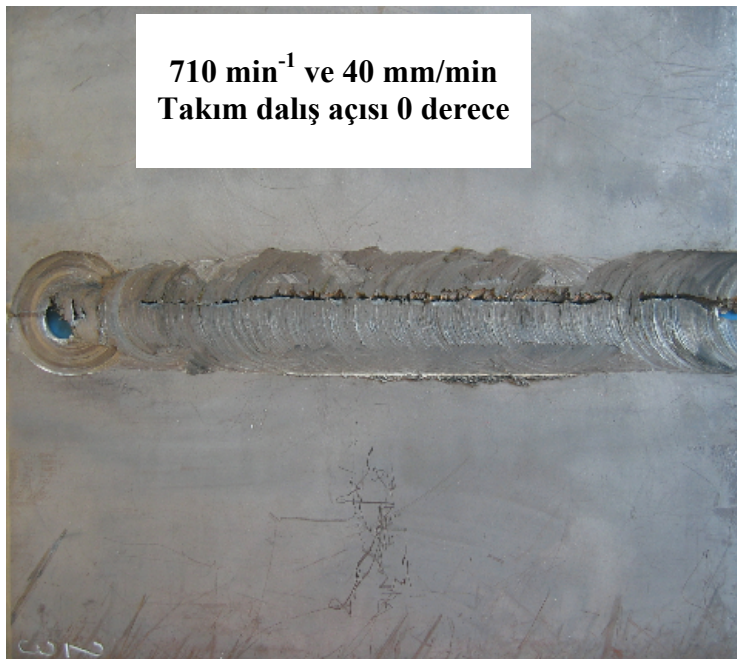


Şekil 6.3 SKK son denemelerinde kullanılan batıcı uçların uygulama sırası ve sonrasında takım aşınmaları

- Yapılan denemeler sırasında numune yüzeylerinde görülen problemleri aşmak için takım dalma açısında değişiklikler yapılmış, uygun sonuçlar alınmaya başlandığında açı belirli bir değerde sabit tutularak sonuçlar elde edilmiştir. Böylece takımın yüzeye dalış açısı parametresi sabitlenerek kontrol altına alınmış oldu.



Şekil 6.4 1000 min⁻¹ devir sayısı 40 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı -1 derece parametreleri ile elde edilen SKK denemesi üst yüzeyi

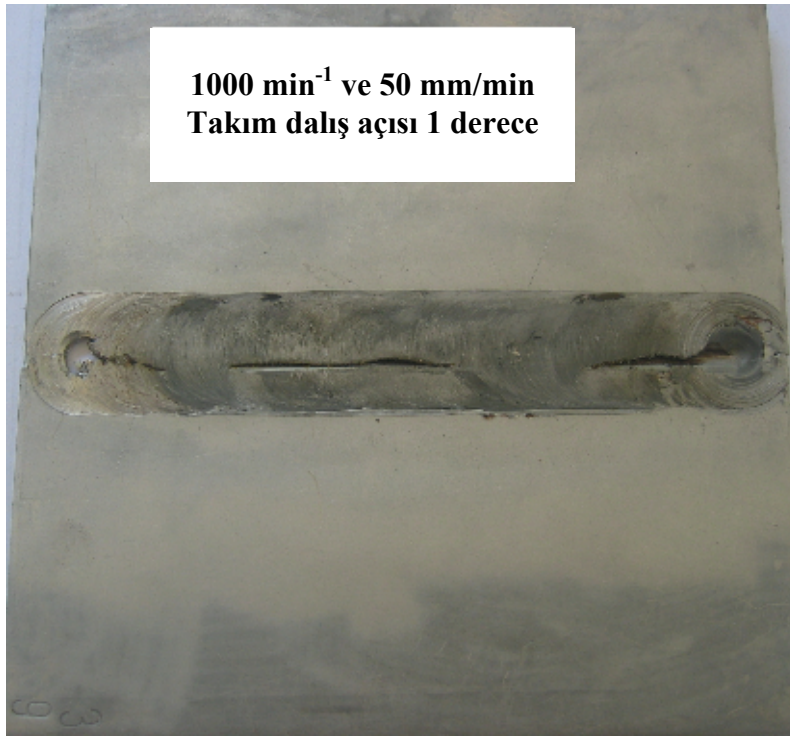


Şekil 6.5 710 min⁻¹ devir sayısı 40 mm/min ilerleme hızı ve dik takım dalışı parametreleri ile elde edilen SKK denemesi üst yüzeyi

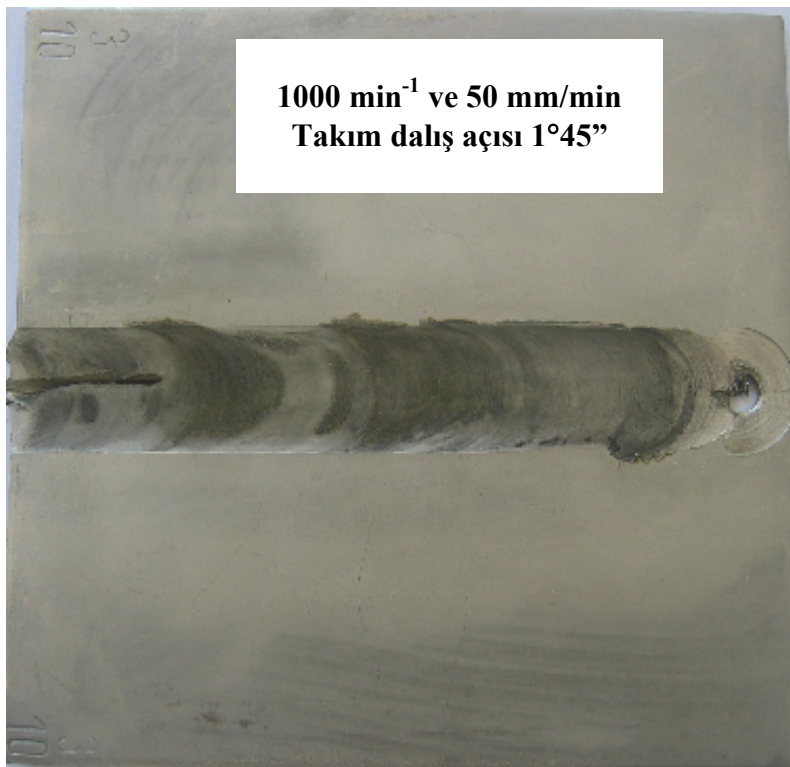


Şekil 6.6 710 min^{-1} devir sayısı 40 mm/min ilerleme hızı ve dik takım dalışı parametreleri ile elde edilen SKK denemesi alt yüzey nüfuziyeti

Şekil 6.4'da görülen kaynak denemesinde takımın literatürde belirtilen açıya ters verilen açı ile malzemeye daldırılması nedeniyle takım ilerleme sırasında numune yüzeyinden talaş kaldırıp dikiş dışına malzemeyi sıvadığı için yüzeydeki malzeme eksilmiş ve bu nedenle kaynak dikişinde boydan boya yarıklar gözlenmiştir. Bu problem takımın açısız (tam dik) olarak numuneye daldırılması durumunda (Şekil 6.5) da gözlenmiştir. Ancak bu numunenin (açısız takım dalışı) yüzeyinde, ters açılı takım dalışı ile elde edilen numuneye nazaran daha küçük yarıklar elde edilmiştir. Numunelerin tabanında iyi nüfuziyet görülmesine (Şekil 6.6) rağmen üst yüzeylerinde yarıklar görülmüştür.



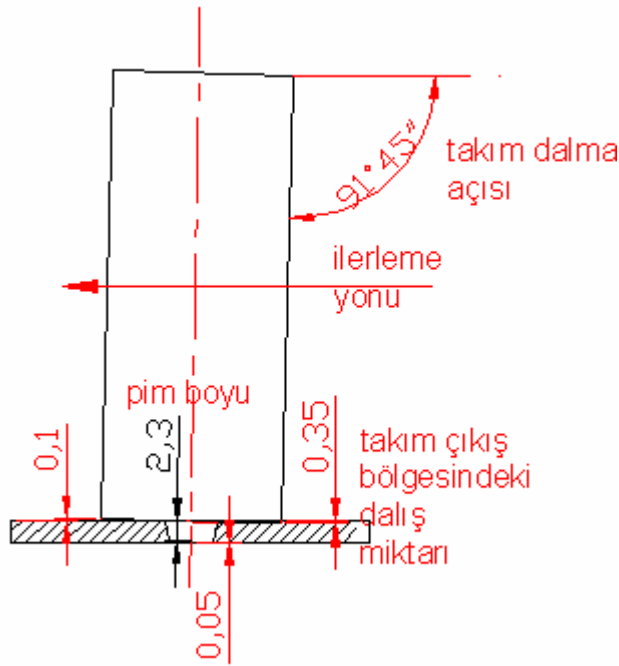
Şekil 6.7 1000 min⁻¹ devir sayısı 50 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1 derece parametreleri ile elde edilen SKK denemesi üst yüzeyi



Şekil 6.8 1000 min⁻¹ devir sayısı 50 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 4 SKK denemesi üst yüzeyi

Şekil 6.7 ve 6.8 iyi incelenecek olursa takım dalış açısının artırılması ile kaynak dikişinde gözle görülür düzelmeler sağlanmıştır. Numuneler incelendiğinde takım dalış açısı artırılarak daha iyi kaynaklar elde edilip sonraki denemelerde takım dalış açısı $91^{\circ}45''$ de sabit tutulmuştur.

- Deney düzeneği arasında takım baskı kuvvetini ölçecek cihaz bulunmadığı için takımın numuneye sabit ölçüde dalması sağlanarak baskı kuvveti parametresinin kontrol altına alınacağı düşünülmüştür.



Şekil 6.9 SKK da 20 mm çapındaki batıcı ucun dalış açısına bağlı dalış miktarı

Takım dalış açısının $91^{\circ}45''$ olduğu durumda dalış miktarı Şekil 6.9 'da görüldüğü gibi 0,35 mm olmaktadır. Bu durumda takım ilerleme esnasında arkasında bıraktığı bölgeye baskı uygulayarak temiz ve pürüzsüz bir yüzey bırakmaktadır.

İlk denemeler sırasında takımın, monte edildiği pense geri kaçması numune yüzeyine tam baskı uygulanamayıp iyi dikiş elde edilememiştir. Bu problemin nedeni aşağıda belirtilmiştir:

- 1) Pensin tam sıkılmadan tezgaha montajı.

2) Takım boyunun çok uzun olmaması nedeniyle takımı tutan konik pensin yüksek baskıya direnemeyip kalkışı. Bu durumu çözmek için takımın arka kısmına pensin tam kavramasını sağlayacak dayama parçası kullanılmıştır.

- Kaynak kalitesine etki eden parametrelerden devir sayısı, belirli değerde(1000min^{-1}) sabit tutularak son değişken parametre olan ilerleme hızının kaynak yapabilirlik üzerine etkisi incelenmiştir.

6.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulamaları

2,5x60x120 mm ölçülerinde olan paslanmaz çelik numunelerin (Şekil 5.3) yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak Tablo 6.2' de verilen parametrelerde sürtünme karıştırma kaynağı denemeleri yapılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında numuneler tezgaha Şekil 5.2' de verilen sabitleme aparatı ile sabitlenmiştir. Deney yapılacak olan parçalar daha önceden Şekil 5.3' deki gibi delinmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması pimin deliğe merkezlenmesi ve takım omzunun malzemeye belirtilen değerde daldırılarak o bölgede pime yük bindirilmeden ön ısıtma sağlanarak başlatılmıştır. Yeterli ısınma sağlanıncaya kadar ön ısıtma devam ettirilmiştir. Ön ısıtma 1000 min^{-1} için yaklaşık 45 saniye beklenecek gerçekleştirilmiştir. Bu süre zarfında temas bölgesinden duman çıkışı gözlenmiş ve ilerleme ile birlikte takım omzu kırmızı-turuncu arası renge (yaklaşık 900°C - 1000°C sıcaklığa ulaşılmıştır) bürünmüştür. Yukarıda verilen parametrelere ulaşmadan önce ilk uygulamalarda yeterli ısınmanın gerçekleşmesi sağlanamadığından dolayı oksiasetilenle ön ısıtma yapılmış ve bu denemelerde de başarı sağlanmıştır.

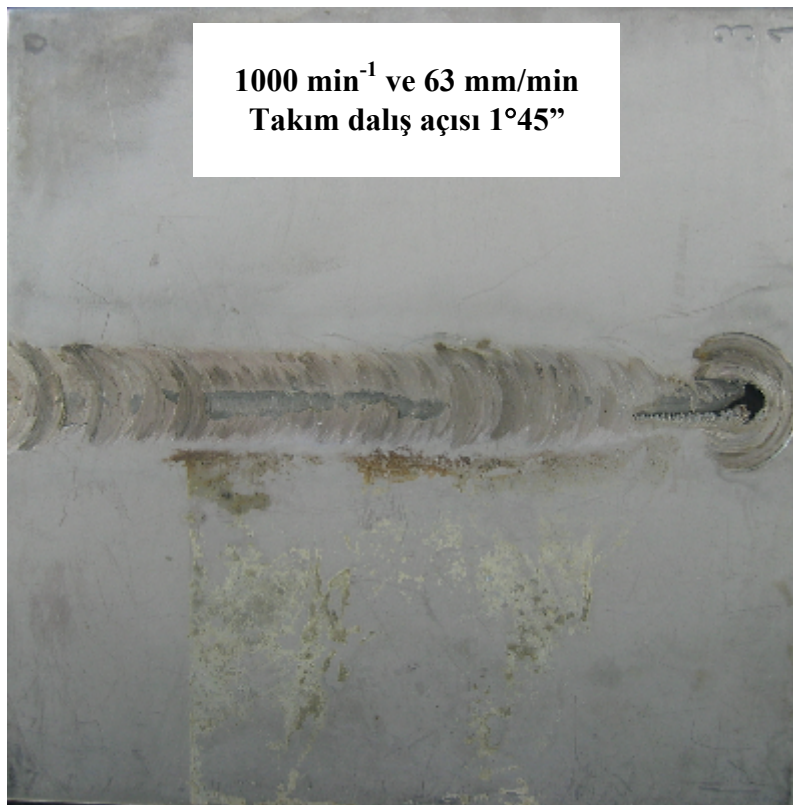
Değişik parametrelerde (ilerleme hızı, devir sayısı,) yapılan SKK deneyleri aşağıda verilmiştir(Tablo 6.2).

Tablo 6.2 304 Paslanmaz çelik deney numunelerinin SKK'nda uygulanan parametreler

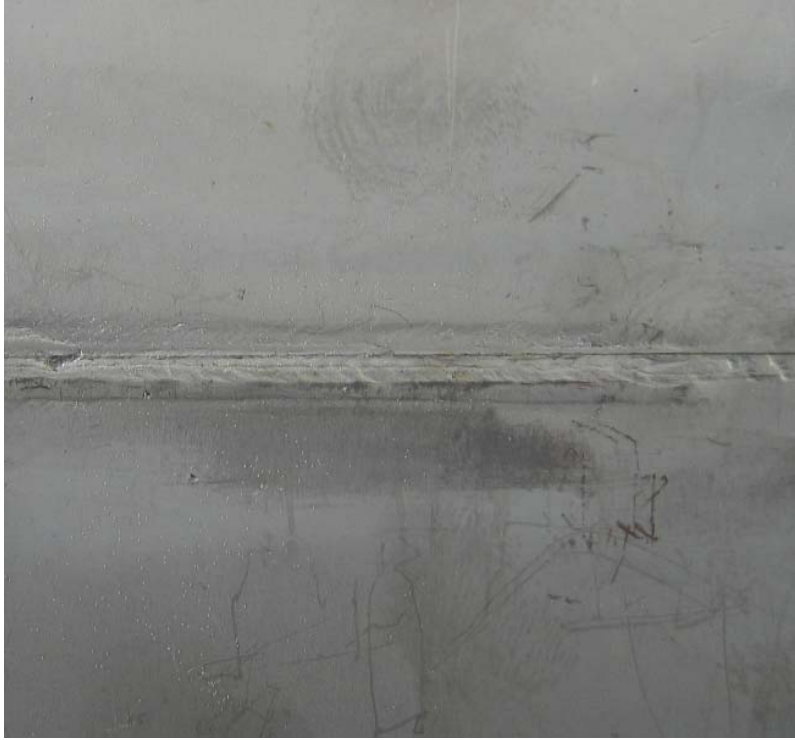
Numune No	Takım devir sayısı (min^{-1})	Takım ilerleme hızı (mm/min)	Takım dalma açısı (Düşey eksenle açısı) ($^{\circ}$)	Takım dalış miktarı (mm) (çıkış bölgesindeki) (mm)
1,2, 3	1000	40	$1^{\circ}45''$	0,35
4,5, 6	1000	50	$1^{\circ}45''$	0,35
7,8,9	1000	63	$1^{\circ}45''$	0,35
10,11,12	1000	80	$1^{\circ}45''$	0,35
13,14,15	1000	100	$1^{\circ}45''$	0,35

Daha önce belirtildiği üzere numune 4 Şekil 6.8'de görülmektedir.

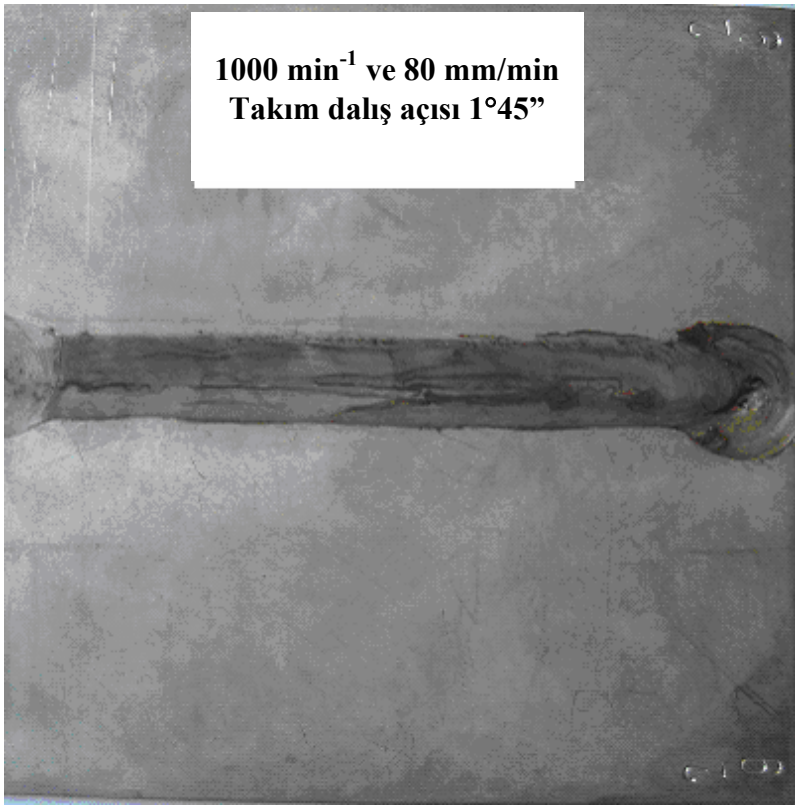
Tablo 6.2'deki kaynak parametrelerine bağlı kalınarak yapılan deneylerin fotoğrafı aşağıda verilmiştir (Şekil 6.10, 6.11, 6.12, 6.13).



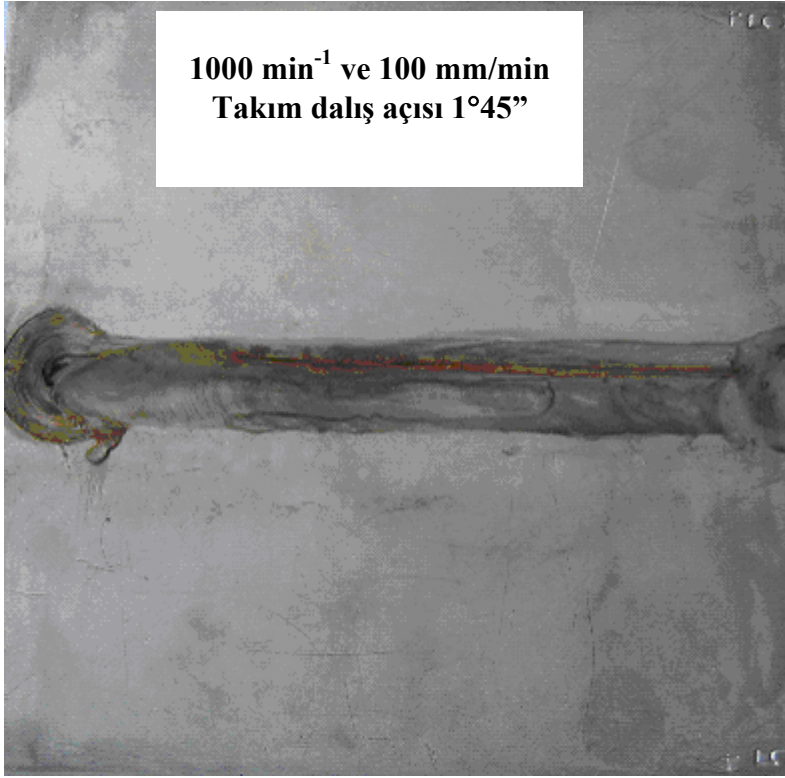
Şekil 6.10 1000 min^{-1} devir sayısı 63 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı $1^{\circ}45''$ parametreleri ile elde edilen Numune 7 SKK denemesi üst yüzeyi



Şekil 6.11 1000 min^{-1} devir sayısı 63 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı $1^{\circ}45''$ parametreleri ile elde edilen Numune 7 SKK denemesi alt yüzey nüfuziyeti



Şekil 6.12 1000 min^{-1} devir sayısı 80 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı $1^{\circ}45''$ parametreleri ile elde edilen Numune 10 SKK denemesi üst yüzeyi



Şekil 6.13 1000 min⁻¹ devir sayısı 100 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı 1°45'' parametreleri ile elde edilen Numune 13 SKK denemesi üst yüzeyi

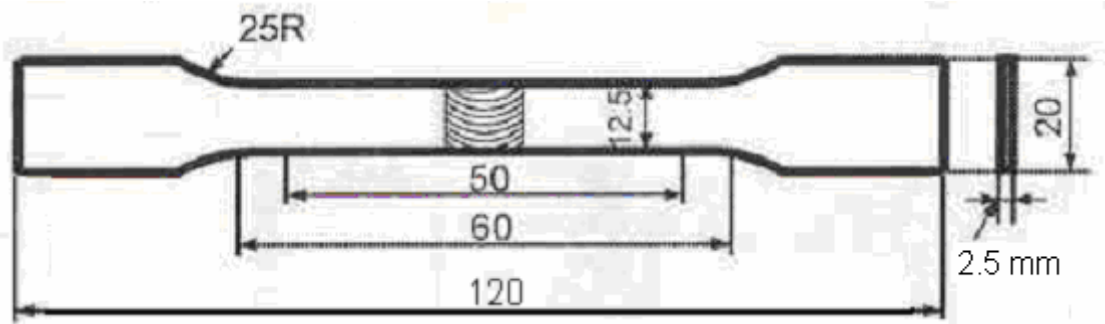
Numune 13'e ait Şekil 6.13'de görüldüğü gibi üst yüzeydeki yarık yapılan denemelerde giderilememiştir.

40 mm/min ilerleme hızında yapılan kaynakta kaynak dikişi üzerine boydan boya yarık oluşmuştur. Bunun sebebinin ilerleme hızının takımın dönme devrine göre düşük kalmasından dolayı ortaya çıkan yüksek ısı girişinden olduğu düşünülmektedir. 50 ve 80 mm/min ilerleme hızlarında yapılan kaynak dikişlerinin görünümü fena olmamakla birlikte dikiş üzerinde az da olsa yarıklar ve eksik nüfuziyet görülmektedir. Şekil'den görüleceği üzere en iyi görünüme sahip kaynak dikişi ve nüfuziyeti 63 mm/min ilerleme hızında elde edilmiştir. 100 mm/min ilerleme hızında ise yüksek hızdan dolayı kaynak banyosunda istenilen sıcaklığa ulaşılamamış bunun neticesinde eksik nüfuziyet ortaya çıkmıştır. Bu arada kaynak esnasında herhangi bir ilave metal ve koruyucu gaz kullanılmamıştır. Koruyucu gaz kullanılması halinde kaynak dikişinin makroskobik görünümünün daha iyi olacağı açıktır.

7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

7.1 Çekme Deneyi Sonuçları

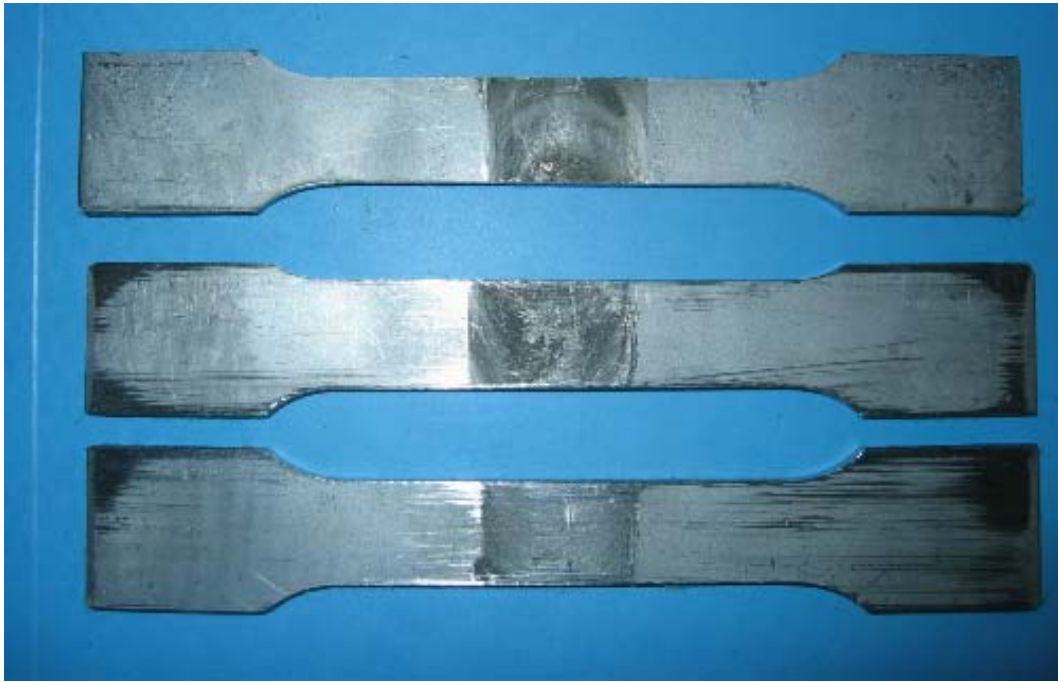
Önceki bölümlerde parametreleri belirtilen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 numaralı numunelerin çekme dayanımları ve kopma uzamaları incelenmiştir. Şekil 7.1’ de gösterildiği gibi işlenmiş olan çekme deneyi numuneleri (Şekil 7.2 ve Şekil 7.3) çekme deneyine tabii tutulmuştur. Çekme deneyleri Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.



Şekil 7.1 Çekme deneyi numunesi boyutları



Şekil 7.2 1000 min^{-1} devir sayısı 63 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı $1^{\circ}45''$ parametreleri ile elde edilen Numune 7'e ait çekme deneyi numuneleri görülmektedir



Şekil 7.3 1000 min^{-1} devir sayısı 80 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı $1^{\circ}45''$ parametreleri ile elde edilen Numune 10'a ait çekme deneyi numuneleri görülmektedir

Tablo 7.1 DIN EN 10002'e göre yapılan çekme deneylerinin sonuçları

Deneý Numarası	Kaynak Devir Sayısı ayısı (min^{-1})	İlerleme Hızı (mm/min)	R_m (N/mm^2)	$R_{p0.2}$ (N/mm^2)	A (%)
Esas Metal			505	215	20
1,2,3	1000	40	210	110	2
4,5,6	1000	50	235	125	8
7,8,9	1000	63	485	350	16
10,11,12	1000	80	320	195	12
13,14,15	1000	100	290	140	4

Yapılan çekme deneyleri göstermiştir ki her ne kadar makroskobik görünümü fena olmasa da 40, 50, 80 ve 100 mm/min ilerleme hızlarında elde edilen kaynak dikişlerinin mukavemeti istenilen seviyede değildir. Bu parametrelerle yapılan kaynakta tam bir birleşme sağlanamamıştır. Ayrıca 63 mm/min ilerleme hızı dışındaki tüm kaynaklarda kopma kaynaklı bölgede olmuştur. Ancak 63 mm/min ilerleme hızında yapılan kaynakta ise kopma kaynak dikişi ile esas malzeme arasındaki bölgede olmuştur. 63 mm/min ilerleme hızında yapılan kaynağın mukavemeti esas malzemeye yakın olarak elde edilmiştir. Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'de çekme deneylerinin sonrası fotoğrafları verilmiştir



Şekil 7.4 1000 min^{-1} devir sayısı 50 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı $1^\circ45''$ parametreleri ile elde edilen Numune 4 çekme deneyi sonrası



Şekil 7.5 1000 min^{-1} devir sayısı 63 mm/min ilerleme hızı ve takım dalış açısı $1^\circ45''$ parametreleri ile elde edilen Numune 7 çekme deneyi sonrası

Bununla birlikte 40 ve 63 mm/min ilerleme hızı ile 1000 min^{-1} devir sayısında yapılan kaynakların şekillenebilme kabiliyetleri Şekil 7.6'da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. En iyi görünüm ve mekanik özelliklerin elde edildiği 63 mm/min ilerleme hızında elde edilen kaynaklı yapının kopma uzaması % 16 olarak elde edilirken 40 mm/min ilerleme hızında ise % 2'lik bir kopma uzaması ancak elde edilebilmiştir.



Şekil 7.6 Numune 4 ve 7 çekme deneyi sonrası uzama karşılaştırılması

Tablo 7.1 incelendiğinde 50 ve 100 mm/min ilerleme hızlarında elde edilen kaynak numunelerinin çekme deneyi sonuçları esas metale göre çok düşük çıkmıştır. 80 mm/min ile elde edilen numunenin çekme dayanımı öncekilere nazaran daha iyi ama yetersiz çıkmıştır. Yapılan denemelerde en iyi sonuca ulaşılan 63 mm/min ilerleme hızı ile elde edilen numunelerin çekme dayanımı ise esas metal çekme dayanımına çok yakın çıkmıştır. Bu sonuçlar irdelendiğinde, 1000 min^{-1} devir sayısı sabit alındığı takdirde en iyi sonuç 63 mm/min ilerleme hızında elde edilmiştir.

7.2 Kaynak Bölgesinde Oluşan İçyapının İncelenmesi

Kaynak bölgesinde oluşan içyapıyı incelemek amacıyla MECATOME T255/300 (Şekil 7.7) marka makine ile kaynaklı levhalardan metalografi numuneleri kesilmiştir. Daha sonra kesilen bu parçalar kaynak kesiti yüzeyde olacak şekilde MECAPRESS II (Şekil 7.8) marka makine ile bakalite(kalıp) alınmıştır(Şekil 7.9).



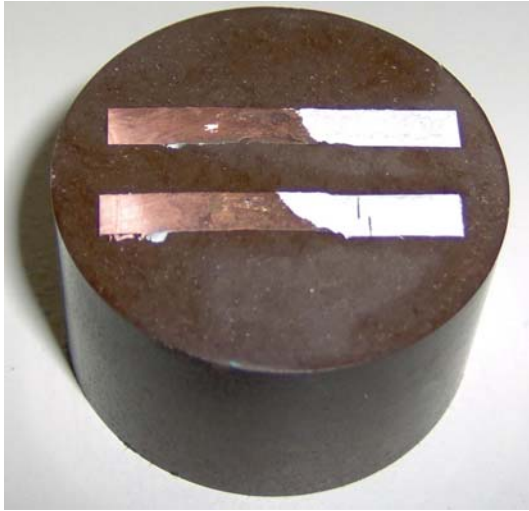
Şekil 7.7 Mecatome T 255/100 Marka sulu testere.



Şekil 7.8 MECAPRESS II Marka bakalite alma makinesi

Bakalite aldığımız parçaların yüzeylerinin pürüzsüz olması için 400, 600, 800, 1000 ve 4000 numaralı zımpara kağıtları ile sulu olarak zımparalanmıştır. Zımparalanmış olan kalıp SiO_2 solüsyonu kullanılarak parlatma disklerinde parlatılmıştır. Bakalite gömülmüş numuneler mikroskopta içyapılarının gözükmesi için hazırlanan solüsyonda dağlanmıştır. Solüsyon 85ml Etanol, +10 ml hidroklorik asit ve +5 ml nitrik asitten oluşmuştur. Hazırlanan bu numuneler üzerinde kaynak bölgesinde oluşan mikroyapı ve

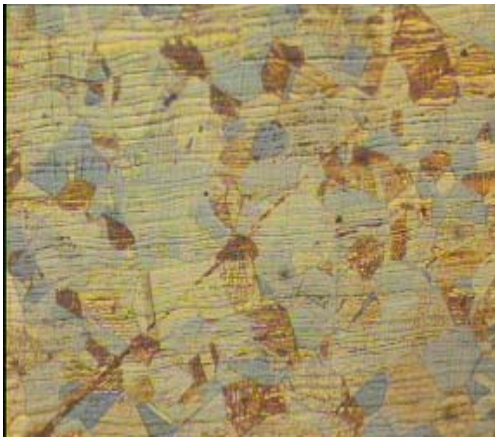
herhangi bir kaynak hatasının olup olmadığının belirlenmesi için optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır (Şekil 7.10).



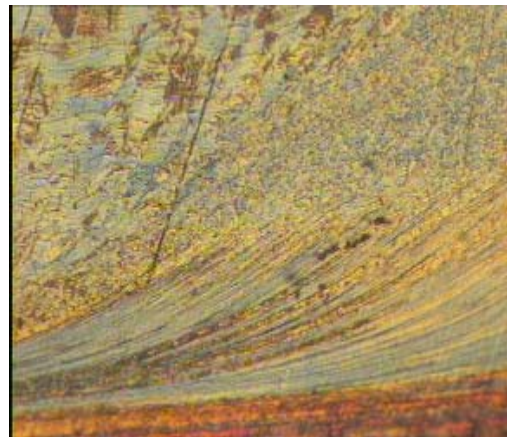
Şekil 7.9 Kaynak edilmiş numuneden kesilmiş parçaların bakalitlenmiş durumu.



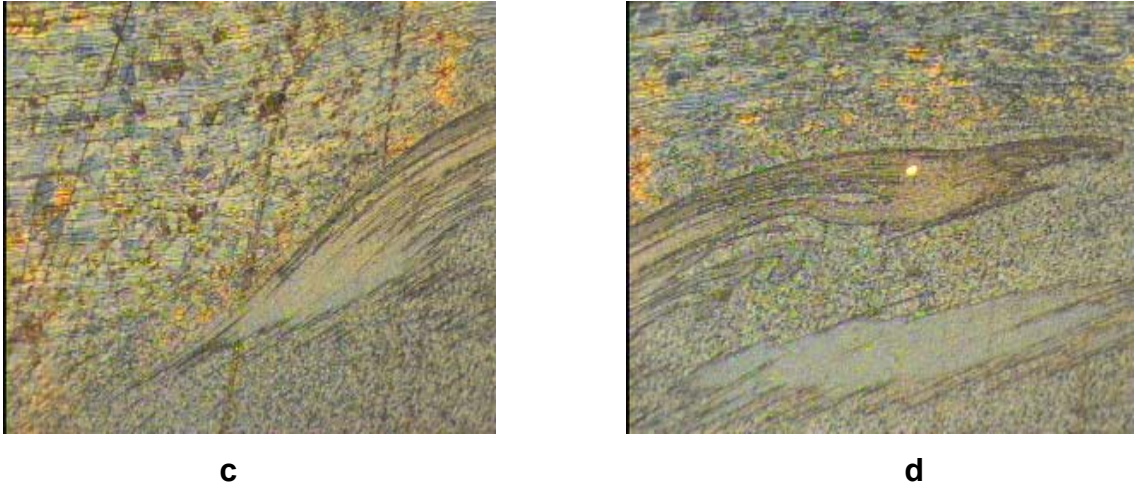
Şekil 7.10 Kaynak bölgesinin mikroskoptaki görünümü



a



b

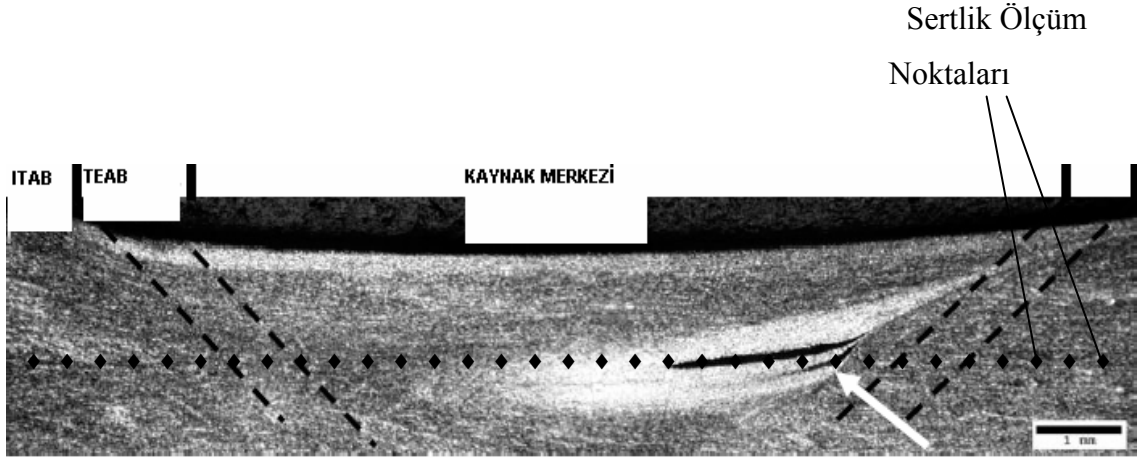


Şekil 7.11 Kaynak bölgesi mikro içyapı incelenmesi (200X) **a)** Esas metal bölgesinin **b)** Esas metal bölgesinden kaynak merkezine geçiş **c)** Esas metal bölgesinden kaynak merkezine geçiş **d)** Kaynak merkezi

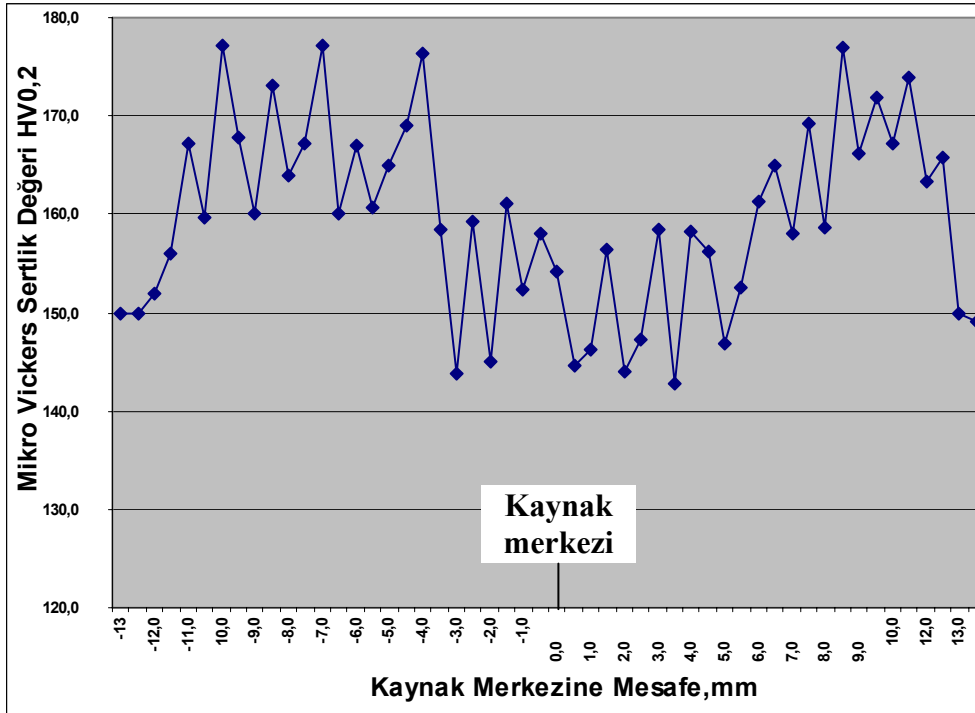
Kaynak kesiti mikro içyapıları incelendiğinde esas metal bölgesine kıyasla kaynak merkezi bölgesinde çok daha ince taneli ve homojen yapılı bölge oluştuduğu gözlenmiştir. Isı tesiri altında kalan bölgede ise esas metale göre daha küçük , ince ve uzun taneli yapı görülmektedir. Bu yapılar göz önüne alındığında Bölüm 4.3'te açıklanan şekilde bir içyapı yapı oluşumu görülmektedir. Ayrıca Park ve arkadaşlarının yaptığı CuZn40 malzemesinin SKK yöntemi ile birleştirilmesi ile elde edilen mikro içyapı ile benzerlik taşımaktadır(Bkz. Şekil 4.6).

7.3 Sertlik Profili

Metalografi için hazırlanmış numuneler, ayrıca kaynak kalitesini belirlemek amacıyla mikrosertlik ölçümleri yapmak için de kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri mikro vickers sertlik cihazı kullanılarak kaynak bölgesi ortada olacak şekilde yaklaşık 25 mm'lik bir uzunluk boyunca 0,5 mm aralıklarla 200 g yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.(Şekil 7.12).



Şekil 7.12 Mikrosertlik ölçümlerinin yapıışının şematik gösterimi



Şekil 7.13 SKK numunelerinin birleşme hattına dik doğrultuda yapılmış olan mikrosertlik ölçüm sonuçları

Kaynak dikişinin mikrosertlik dağılımı Şekil 7.13’de görülmektedir. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarından kaynak dikişinin sertliğinin esas malzemenin sertliğine yakın olduğu, bununla birlikte kaynak dikişinden esas malzemeye geçiş bölgesinde ise sertliğin bir

miktar arttığı görülmektedir. Bu sertlik artışının kaynak esnasında takım omzunun temas ettiği bölgedeki termomekanik şekillenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

7.4.Röntgen Muayenesi

1000 min⁻¹ devir ve 60, 80, 100 mm/min ilerleme hızlarında elde edilen kaynak dikişlerinin nüfuziyetinin tüm dikiş boyunca nasıl devam ettiğini tespit etmek amacıyla kaynaklı levhaların röntgenleri çekilmiştir. Şekil 7.14'den görüleceği üzere 63 ve 80 mm/min ilerleme hızlarında elde edilen kaynak dikişlerinin nüfuziyetinin kesit boyunca iyi olduğu, bunun yanında 100 mm/min ilerleme hızında ise yeterli nüfuziyetin sağlanamadığı görülmektedir. Röntgen sonuçları kaynaklı dikişlerin çekme deneyi verilerini desteklemektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada piyasada AISI 304 (DIN EN 1.4301) olarak bilinen 2,5 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Deneylerde kullanılan ilk takımlar DIN EN 1.2379 takım çeliğinden yapılmıştır. Ancak bu takımlar ön ısıtmanın ardından daha ilk ilerleme noktasında pim kısmından kırılmış ve ilerlemeye devam edildiğinde ise takımın baskı ve sıcaklık etkisi ile sıvandığı görülmüştür. Bu yüzden daha iyi dayanıma sahip tungsten karbür uçlar kullanılmaya başlanmıştır.

Kullanılan takım omuz çapı 20 mm olarak belirlenmiştir. Bu sonuca hem literatürden hem de tecrübelerden faydalanılarak varılmıştır. Çünkü daha düşük çapta (12mm) omuza sahip takımlar pim kısmından kopmuştur.

Yapılan denemelerde takım pim kısmının kırılması sonucu pim şeklinde oynamalar yapılmış son olarak kırılmasını önleme için pime konik ve dipleri radyüslü şekil verilmiştir.

Denemelerde ısı kaçışını önlemek ve daha hızlı ısınmayı sağlamak amacıyla yalıtkan olarak numuneler ile tabla arasına seramik malzeme konulmuş ancak seramik malzemenin parçalanması sonucu numunenin yumuşayan kısmı tabandan akma yapmıştır. Bu olumsuz sonucun ardından seramik kullanılmamıştır.

Yapılan ilk denemelerde yeterli ön ısınmayı sağlamak amacıyla oksijenle ısıtma gerçekleştirildikten sonra kaynak yapılmıştır. Ancak sonrasında uygun parametreler elde edildikten sonra bu uygulamaya ihtiyaç olmadığı gözlenmiştir.

Diğer bir kritik nokta olan pim uzunluğudur. İlk denemelerde elde edilen yetersiz nüfuziyet ve tablanın oyulması problemleri batıcı uç pim uzunluğu 2,3 mm alındıktan sonra önlenmiştir.

İlk denemelerde batma açısı verilmeden takım dik olarak daldırılmıştır. Ancak takım omzunun dalışla birlikte numuneler üzerinden çapak aldığı görülmüş ve yarıklı, çatlaklı kaynak dikişi elde edilmiştir. Bu sorun daha sonraki denemelerde batma açısı artırılarak ve son olarak 91°45” ‘de sabit tutularak giderilmiştir. Çizim yoluyla da bu açı ile batıcı ucun numuneye ne kadar dalacağı (0,35 mm) da belirlenmiştir.

Yapılan son denemelerde pim kısmı numuneler arasındaki deliğe değil de direk numuneye batırılmış ve kaynak yapılmıştır. Bu uygulama numunelerin daha iyi ısınmayı sağladığı için olumlu sonuçlar vermiş ancak takım aşınması çok fazla olduğu için sonrasında tercih edilmemiştir.

Bu çalışmada devir sayısı 1000 min⁻¹ sabit tutularak 40-50-63-80-100 mm/min ilerleme hızlarında birleştirmeler yapılmıştır. 40 mm/min ilerleme hızı ile elde edilen kaynak dikişi çok kötü olduğu için sonuçlar arasında verilmemiştir.

Farklı ilerleme hızlarında elde edilen sonuçlar gözle ve röntgen ile kontrol edilmiştir. Gözle yapılan kontroller sonucu 50, 63,80 mm/min ilerleme hızı ile elde edilen kaynak dikişleri görünüm ve nüfuziyet açısından sorun görülmemiştir. Röntgen sonuçlarını değerlendiren kuruluş tarafından verilen belgede de 50,63,80 mm/min ilerleme hızı ile elde edilen kaynak dikişleri onaylanmıştır. 100mm/min ilerleme hızı ile elde edilen kaynak dikişi ise yetersiz nüfuziyet nedeniyle onay alamamıştır (Bkz. Ek-1).

50, 63 ve 80 mm/min ilerleme hızı ile elde edilen birleştirmelerin çekme deneyleri

yapılmıştır. Çekme deneyi sonuçları değerlendirildiğinde 63 mm/min ilerleme hızı ile elde edilen kaynak esas metal dayanımına yakın dayanıma sahip çıkmıştır. Elde edilen en yüksek çekme dayanımı değeri 558 N/mm² elde edilmiştir.

Numunelerin mikro yapıları incelenmiş ve kaynak geçiş bölgeleri fotoğraflanmıştır. Kaynak merkezi bölgesinde esas metal içyapısına nazaran çok daha ince taneli yapı görülmüştür.

Son olarak numunelerin mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır ve bu değerler ışığında kaynak merkezinden uzaklığa bağlı olarak mikrosertlik grafikleri çizilmiştir. Grafik incelendiğinde esas metal ve ITAB Bölgesi geçişinde yaklaşık 20-25 HV yakın artış, ITAB bölgesinden kaynak merkezine geçişte ise yaklaşık 30-35 HV yakın düşüş gözlenmiştir. Kaynak merkezi esas metale göre daha düşük sertliğe sahip olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Aldemir, Ü. (2000) Paslanmaz çeliklerin Türkiye’de tercihli uygulama alanlarına göre optimum kullanım önerilerinin hazırlanması., Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 98s.
- Anık, S., ve Vural, M. (1991) Gazaltı Ark Kaynağı (TIG, MIG, MAG), İstanbul, *İTÜ Yayınevi*, 157s.
- Anık, S. (1991) Kaynak Tekniği El Kitabı ve Yöntemler ve Donanımlar, *Gedik Hold. Yayını*, İstanbul, 200s.
- Anık, S. (1993) 100 Soruda Kaynak Tekniği El Kitabı, İstanbul, *İTÜ Yayınevi*, 365s.
- Anonymous (2001) Finding Strength In New Technology, *Inside Delta*, 5(6): 4.
- Aran, A. ve Temel, M.A. (2004) Paslanmaz Çelik Yassı Mamül Üretimi Kullanımı Standartları, *Sarıtaş Teknik Yayın No:1*, İstanbul, 113s.
- ASM International (1980) Properties And Selection; Stainless Steel, Tool Materials And Specials-Purpose Metals, *ASM*, Ohio, 123s.
- ASM International (1990) Stainless Steels, *ASM International*, Ohio, 93s.
- Ataoğlu, H. (2002) Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Bir Al-Alaşımının İyapı Ve Mekanik Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, 49s.
- Bargel, H.J. , and Schulze, G. (1987) Malzeme Bilgisi, Cilt 2, Çeviren: Güleç S., Aran A., *İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi*, İstanbul, 99s.
- Boz, M. ve Kurt, A. (2004) The Influence Of Stirrer Geometry On Bonding And Mechanical Properties İn Friction Stir Welding Process, *Materials and Design* , 25: 343-347.
- Bradley, G. R. and James, M. N. (2000) , Geometry And Microstructure Of Metal Inert Gas And Friction Stir Welded Aluminium Alloy 5383-H321, *Metalurgical and Materials Transactions* , 30: 121-125.
- Burns, F. (2004) Capabilities And Needs At Anniston Army Depot, *Aerospace Friction Stir Welding Symposium*, Alabama, s.102-103.

- Cebekan, F. (1988) Farklı Metallerin Kaynağı, **Böhler Seminer Notları**, İstanbul, 58s.
- Çam, G. (2003) Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, **Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre Ve Sergisi**, Kocaeli, s. 95-97.
- Çam, G., ve Koçak, M. (1998) Progress In Joining Of Advanced Materials. **Int.Mater.Rev.**, 43: 44-46.
- Çam, G. (2005) Al-Alaşımları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri, **Kaynak Teknolojileri III.Ulusal Kongresi**, İstanbul, s. 267-277.
- Dawes, J. (1999) Friction Stir Welding, **The Welding Institute**, <http://www.twi.co.uk/bestprac/datashts/fswintro.html> (05.09.1999)
- EWI Insights. (2003) High-Productivity Methods For Joining Magnesium Sheet, **Oxidefall**, 16(4): 4-5.
- Feng, Z. (2003) Friction Stir Processing Of Advanced Material, **High Strength Weight Reduction Materials FY 2003 Progress Report**, Tennessee, s. 101-107.
- Feng, Z. and Stan A.D. (2002) Suppression Of Helium Bubble Growth In Friction Stir Welding Of Irradiated Materials, **Oak Ridge National Laboratory**, Tennessee, s. 134-138.
- Feng, Z., Steel, R., Packer, S., and David, S.A.(2005) Friction Stir Welding Of API Grade X65 Steel Pipes, **Brigham University Friction Stir Research Laborator**, <http://www.byu.edu> (08.03.2006).
- Fernandez, G.J., and Murr, L.E. (2004) Characterization Of Tool Wear And Weld Optimization In The Friction-Stir Welding Of Cast Aluminum 359+20% Sic Metal-Matrix Composite. **Materials Characterization**, 12: 4-10.
- Fırat, M. (1998) Isıl İşlemlerin AISI 304,310,316 ve 430 Tip Paslanmaz Çeliklerin Sulu Ortamdaki Korozyon Davranışlarına Etkileri., Yüksek Lisans Tezi, **Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Niğde, 101s.
- Gerken, J.M. and Kotechki, D. (1990) Stainless Steels Properties How To Weld Them Where to Use Them, **Lincoln Electric Co**, Ohio, 128s.
- Harvey, P. D. (1982) Engineering Properties Of Steel, **Metals Park**, Ohio, 430s.
- Johnson, R. and Kallee, S.W. (1999) Recent Innovation in Automotive Industry, **Materials World**, 7(12): 751-753.
- Kallee, S. and Mistry, A.(1999) Friction Stir Welding İn The Automotive Body İn White Production, **Proclaim Of The 1st International Symposium On Friction Stir Welding, USA**, s:73-78.
- Kallee, S. and Mistry., A.(2002) Friction Stir Welding: Invention, innovations and industrialisation, Seminar At Schweisstechnische Lehr- Und Vursuchsanstallt (SLV), Berlin-Brandenburg, Germany, s:101-104.

- Kallee, S. and Mistry., A. (2001) Friction stir welding - invention, innovations and applications, Proc. Of 8th International Conference On Joints In Aluminium, Munich, Germany, s. 16-22.
- Kaluç, E., ve Bozduman, B. (1998) Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak Yöntemi. *Makina Magazin*, 27: 54-61.
- Kanbollu, S.(1996) Ostenitik Krom Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Özellikleri., Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 73s.
- Kayır, Y. Z. (2003) Türkiye paslanmaz çelik üretebilir mi?, **2.Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi**, Zonguldak, s. 98-101.
- Kimapong, K., and Watanabe, T. (2004) Friction Stir Welding Of Aluminum Alloy To Steel, *Welding Journal* ,10: 277-282.
- Kurt, A., Özdemir, M. ve Boz M. (2002) Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi, **8.Malzeme Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler CD'si**, Denizli, s.72-75.
- Külekcı, M. K. ve Şık A. (2004) Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum alaşımı levhalarının birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri., *Mühendis ve Makine*, 406: 30-35.
- Lahti K. E. (2002) Wider Extrusions At Lower Cost By Friction Stir Welding. *Esab Co.*, <http://www.esab.com> (20.04.2004).
- Lee, W. B. and Jung, S. B. (2004) The Joint Properties Of Copper By Friction Stir Welding., *Materials Letters*, 58: 1041–1046.
- Lienert, T. J., Stellwag, W. L., Grimmitt JR., and Warke R. W.(2003) Friction Stir Welding Studies On Mild Steel., *Welding Journal*, 1: 1-8.
- Liu, H.J., Fujii, H., Maedaa, M., and Nogi K.(2003) Tensile Properties And Fracture Locations Of Friction-Stir-Welded Joints Of 2017-T351 Aluminum Alloy., *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 692-696.
- Mendez, P.F. and Eagar , T.W.(2002) Welding Processes For Aeronautics, *Advanced Materials & Processes*, 5: 39-43.
- Meran C. (2001) Pirinç Malzemelerin Kaynak Edilebilirliği ve Uygun Kaynak Parametrelerinin Tespiti., Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 192s.
- Meran, C. (2004) Paslanmaz Çelikler, Ders Notları, **Pamukkale Üniversitesi**, s.22.
- Mukaibo, N. (2004) Development Of Lightweight Fuel Container For Adsorbed Natural Gas Vehicle, *Honda R&D Co., Ltd. Tochigi R&D Center* ,Japan, s. 12-15.

- Nicholas, E. D., and Kallee, S. W. (2000) Friction Stir Welding – A Decade On, *IIW Asian Pacific International Congress*, Sydney, s. 92-97.
- Nickel Development Institute (1974) Standart Wrough Austenitic Sainless Steels, Materials Engineering, **Nidi Technical Series**, Toronto, 125s.
- Odabaş, C. (2004) Paslanmaz Çelikler Temel Özellikleri, Kullanım Alanları Kaynak Yöntemleri, Kaynak Tekniği San. ve Tic. A.Ş., İstanbul, 76s.
- Ohba, H., Ueda, C., and Agatsuma, K. (2001) Innovative Vehicle — the “A-train”, *Hitachi Review*, 50(4): 130-133.
- Orhan, N. ve Kurt, B., ve Ertuğrul, E. (2006) AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çeliğin Sürtünme Karıştırma Kaynağına Devir Sayısının Etkisi., *11.Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, Denizli, s. 1-4.
- Önal, E. (1997), Paslanmaz çeliklerin kaynağında Schaeffler, Delong ve WRC-92 diyagramlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 55s.
- Özdemir, N., ve Taşkın, M. (2004) Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmiş AA 7075 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *10.Malzeme Sempozyumu Ve Sergisi Bildiriler CD’si*, s 971-972.
- Pan Tsung-Yu (2001) Friction Stir Welding In Automative Applications-Present And Future”, *FORD Motor Company Research and Advanced Engineering*, Dearborn, s.11-12.
- Park, H.S., Kimura, T., Murakamic, T., Naganod, Y., and Nakata K. (2004) Microstructures And Mechanical Properties Of Friction Stir Welds Of 60% Cu–40% Zn Copper Alloy. *Materials Science and Engineering*,371: 160-169.
- Park Seung Hwan, C., Yutaka, S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano, S.and Inagaki, M. (2003) Rapid Formation Of The Sigma Phase İn 304 Stainless Steel During Friction Stir Welding. *Scripta Materialia*, 49: 1175-1180.
- Park Seung Hwan, C., Yutaka, S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano and S., Inagaki, M. (2004) Corrosion Resistance Of Friction Stir Welded 304 Stainless Steel. *Scripta Materialia*, 51: 101–105.
- Prado, R.A., Murr, L.E., Shindo, D.J. and Soto, K.F. (2001) Tool Wear İn The Friction Stir Welding Of Aluminum Alloy 6061+20%Al₂O₃. *Scripta Materialia*, 45: 75-80.
- Posada, M., Jennifer P., Forrest D.R. and Deloach J.J.(2003) MD Ships Navy Experts Explain the Newest Material &Structural Technologies-Friction Stir Welding Advances Joining Technology., *Amptiac*, 7(7): 13-16.
- Reynolds, A. P., Tang, W., Gnaupel-Herold, T. and Prask, H. (2003) Structure, Properties, and Residual Stress Of 304L Stainless Steel Friction Stir Welds. *Scripta Materialia*, 48: 1289-1294.

- Rothman, M. F. (1989) High-Temperature Property Data: Ferrous Alloys, **ASM International**, Ohio, 161s.
- Sato, Y.S., Urata, M., Kokawa, H. and Ikeda, K. (2003) Hall_Petch Relationship In Friction Stir Welds Of Equal Channel Angular-Pressed Aluminium Alloys. *Materials Science and Engineering*, 354:298-305.
- Sharma, S. R., Ma, Z. Y. and Mishra, R. S. (2004) Effect Of Friction Stir Processing On Fatigue Behavior Of A356 Alloy. *Scripta Materialia*, 45: 1-5.
- Shepherd, G. (2004) The Evaluation Of Friction Stir Welded Joints On Airbus Aircraft Airframe Structure”, **SAE Aerospace Friction Stir Welding Symposium Albuquerque**, New Mexico, s. 13-14.
- Sorensen C. D. (2004) Progress In Friction Stir Welding High Temperature Materials , *Center For Advanced Joining Of Materials*, <http://www.byu.edu> (08.03.2006)
- Sterling, C. J., Nelson, T. W., Sorensen, C. D. and Posada, M. (2004) Effects Of Friction Stir Processing On The Microstructure And Mechanical Properties Of Fusion Welded 304L Stainless Steel, *Brigham Young University Edu*, <http://www.byu.com> (08.03.2006)
- Thomas, W. M., Nicholas, E. D., and Smith, S. D. (2001) “Friction Stir Welding – Tool Developments”, *Aluminum Joining Symposium 2001 TMS Annual Meeting*, New Orleans, Louisiana, s.350-355.
- Thomas, W. M. and Dolby, R. E. (2002) *Proc. Of 6th International Conference On Trends In Welding Research*, Georgia, s. 263-268.
- Tülbentçi, K. (1995) Paslanmaz Çelikler ve Kaynatılabilirliği, Seminer Notları, *Kocaeli Üniversitesi*, 48s.
- Tülbentçi, K. (1990) MIG-MAG Eriyen Elektrod İle Gazaltı Kaynağı, *Gedik HoldingA.Ş. Yayınları*, İstanbul, 168s.
- Uzun, H. (2004) Friction Stir Welding Of Dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 Stainless Steel. *Materials and Design*, 26: 41-46.
- WEB_1. (2004). <Http://www.assda.asn.au/asp/index.asp?pgid=18041> (07.09.2004)
- WEB_2 (2001)[www.2.hitachi-cable.co.jpappshnews. Mass-Producing Copper Backing Plates Using Friction Stir Welding.htm](http://www.2.hitachi-cable.co.jpappshnews.Mass-Producing-Copper-Backing-Plates-Using-Friction-Stir-Welding.htm) (02.11.2004)
- WEB_3 (2005) <http://www.Weldingengineer.Com/1tig.Htm> (05.01.2005)
- WEB_4 (2004) <http://www.Askaynak.com.tr/Asp/Katalog/Katalogbrosur2.Asp> (18.12.2004)
- WEB_5 (2004) www.Nidi.Org (02.11.2004)
- WEB_6 (2004) <http://www.Weldingengineer.Com/Htm> (30.12.2004)

WEB_7 (2004) <http://www.edax.com> (20.04.2004)

WEB_8 (2004) Weld Morphology, <Http://www.edax.com> (20.04.2004)

WEB_9 (2003) Joining of Commercial Aluminium Alloys: some recent innovations, www.msm.cam.ac.uk/phase-trans.com (24.05.2004)

WEB_10 (2001) XMC Powers Robotic Welding Application For NASA Space Shuttles, www.Rockwellsotware.Com (24.05.2004)

WEB_11 (2004) Eclipse Aviation Opens New Friction Stir Weld Center, <http://www.equitekcapital.com/articleseclipseaeronews031104.htm> (30.06.2004)

Yüksel, M. (2002), Malzeme Bilgisi, Cilt 1, Yayın No:2002/271-1, **TMMOB Makine Mühendisleri Odası**, Ankara, 547s.

Zinkle, S .J.(2004) Fusion Materials Science Compatibility And Welding Program, **Oak Ridge National Laboratory**, Santa Barbara, s: 29-30.

Zhu X. K. and Chao Y. J. (2003) Numerical Simulation Of Transient Temperature And Residual Stresses In Friction Stir Welding Of 304 Stainless Steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 146: 263-272.

ÖZGEÇMİŞ

Artunç ALPTEKİN, 17.04.1980 tarihinde Denizli Merkez’de doğdu. İlkokul öğrenimini Hacı Halil Bektaş İlkokulu’nda, ortaokul öğrenimini Denizli Yunus Emre Anadolu Lisesi’nde tamamlayıp Denizli Lisesi’nden mezun oldu. 2003 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu ve aynı yıl Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Orta düzeyde İngilizce bilmektedir. Halen Germetal Makine San.& Müh. Tic. Ltd. Şti.’de çalışmakta olup bekardır.