

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEMİR ESASLI MALZEMELERİN SÜRTÜNME-KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA,
KAYNAK PARAMETRELERİNİN DİKİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

İLYAS İNCE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İMAL USULLERİ**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SELAHATTİN YUMURTACI**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİR ESASLI MALZEMELERİN SÜRTÜNME-KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA,
KAYNAK PARAMETRELERİNİN DİKİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

İlyas İNCE tarafından hazırlanan tez çalışması 17.10.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmamda bana her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen sayın danışmanım Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI, sayın hocam Prof. Dr. Numan DURAKBAŞA, Viyana Teknik Üniversitesi Malzeme ve Teknoloji Anabilim Dalı Başkanı sayın Prof. Ernst Kozeschnik, Graz Teknoloji Üniversitesi öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Norbert Enzinger ve Graz Teknoloji Üniversitesi araştırma görevlisi sayın Johannes Tendl'a teşekkürlerimi sunuyorum. Çalışmalarım boyunca sabrıyla ve anlayışıyla yanımda olan aileme desteklerinden ötürü teşekkür ediyorum.

Bu çalışmanın hazırlanması ve tesliminde benimle ortak gururu yaşayan herkese teşekkürlerimi sunuyorum.

Ağustos, 2011

İlyas İNCE

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Bulgular	2
BÖLÜM 2	
PASLANMAZ ÇELİKLER	4
2.1 Paslanmaz Çeliğin Tanımı ve Özellikleri.....	4
2.2 Paslanmaz Çelik Türleri.....	4
2.2.1 Ostenitik Paslanmaz Çelikler	5
2.2.2 Ferritik Paslanmaz Çelikler	6
2.2.3 Martenzitik Paslanmaz Çelikler	6
2.2.4 Ostenitik–Ferritik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler	6
2.2.5 Ayrışım Sertleştirmesi Yapılabilen Paslanmaz Çelikler	7
BÖLÜM 3	
PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI.....	9
3.1 Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti ve Özellikleri	9
3.2 Ostenitik Paslanmaz Çeliklerde Kaynak Kabiliyeti	10
3.2.1 Krom Karbür Oluşumu	10
3.2.2 Sıcak Çatlak Oluşumu	11
3.2.3 Sigma Fazı Oluşumu.....	12
3.3 Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Uygulanan Kaynak Yöntemleri ..	13
3.3.1 Gaz Ergitme Kaynağı	14

3.3.2 Örtülü Elektrot ile Ark Kaynağı.....	14
3.3.3 MIG Kaynağı	15
3.3.4 TIG Kaynağı.....	17
3.3.5 Plazma Arkı ile Kaynak	18
3.3.6 Tozaltı Kaynağı.....	19
3.3.7 Elektron Işını Kaynağı.....	20
3.3.8 Lazer Işını ile Kaynak	20
3.3.9 Nokta direnç kaynağı	21
3.3.10 Sürtünme kaynağı.....	21

BÖLÜM 4

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	26
4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Çalışma Prensipleri	30
4.2 Kaynağın Metalurjik Yapısı.....	32
4.2.1 Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)	33
4.2.2 Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB)	34
4.2.3 Isıdan Etkilenen Bölge (IEB)1.....	34
4.3 Kaynak Emniyeti.....	34
4.4 Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Avantajları.....	35
4.5 Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Dezavantajları	38
4.6 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulama Alanları	38
4.6.1 Gemi Yapım Endüstrisi	39
4.6.2 Raylı Taşıt Endüstrisi	41
4.6.3 Otomotiv Endüstrisi.....	43
4.6.4 Zırhlı Taşıt Endüstrisi.....	46
4.6.5 Havacılık ve Uzay Endüstrisi.....	47
4.6.6 Diğer Endüstrilerdeki Uygulamalar	52
4.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Donanımı	53
4.7.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Makinaları	53
4.7.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminde Kullanılan Takımlar	60
4.7.2.1 Alışılmış Silindirik Pimli Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımları	61
4.7.2.2 Whorl™ serisi Sürtünme karıştırma kaynağı takımlar	64
4.7.2.3 MX-Triflute™ serisi sürtünme karıştırma kaynağı takımları	65
4.7.2.4 Makara veya bobin biçimli sürtünme karıştırma kaynak takımları.....	65
4.7.2.5 Mikser türü sürtünme karıştırma kaynağı takımlar	67
4.7.2.6 Bindirme Birleştirmeler İçin Geliştirilen Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımları	67
4.7.2.6.1 Multistage™ Türü Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımlar	67
4.7.2.6.2 Skew-Stir™ Serisi Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımları	68
4.7.2.7 Trivex™ Serisi Takımlar	69
4.7.2.8 Pim Boyunu Otomatik Ayarlayan Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımlar	69
4.7.2.9 Kendinden Tepkili (Self-Reacting) Pimli Takımlar.....	70
4.7.2.10 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Takımları	71
4.7.3 Takım Malzemeleri	72
4.7.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminde Kullanılan Bağlama Tertibatları. 74	

BÖLÜM 5

ÇELİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ	78
5.1 Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi İle Birleştirilmesi	78
5.2 Çelik Sacların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yöntemi İle Birleştirilmesi ..	86
5.3 Çelik ve Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi Literatür Taraması	88

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA	94
6.1 Çalışmanın Amacı	94
6.2 Kaynak Donanımı.....	95
6.3 Kaynak İşleminin Yapılışı	99
6.4 Numunelerin Hazırlanması ve Sonuçların İrdelenmesi	101

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER	115
KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	123

KISALTMA LİSTESİ

ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölgede
TWI	İngiliz Kaynak Enstitüsü
FSW	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
DKB	Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge
TEB	Termomekanik Etkilenen Bölge
IEB	Isıdan Etkilenen Bölge
FSSW	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
PCBN	Polikristalin Kübik Bor Nitrür

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3. 1	Paslanmaz çeliğin tane sınırlarında oluşan karbür çökmesi.....	10
Şekil 3. 2	Örtülü elektrot ile ark kaynağı prensip şeması.....	13
Şekil 3. 3	Gazaltı kaynağı prensip şeması.....	14
Şekil 3. 4	TIG Kaynağı prensip şeması.....	16
Şekil 3. 5	Sürtünme kaynağının temel adımları	21
Şekil 3. 6	Sürtünme kaynağı	22
Şekil 4. 1	Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi Prensibi.....	27
Şekil 4. 2	Sürtünme Karıştırma Kaynağı şematik gösterimi	28
Şekil 4. 3	Sürtünme Karıştırma Kaynağı aşamaları a)FSW takımına ilk dönüş verilmesi b)FSW takımının malzemeye daldırılışı c)FSW takımının omuz kısmının plakaları ön ısıtması d)Yeterli ön ısıtmanın ardından FSW takımına ilerleme verilişi	30
Şekil 4. 4	Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımın mikroyapısı. A: Dinamik olarak yeniden kristallesen bölge (DKB), B: Termomekanik etkilenen bölge (TEB) C:, Isıdan etkilenen bölge(IEB), D: Esas malzeme	32
Şekil 4. 5	AA 7075 çiftinin kaynak sonrası mikro yapısal bölgeleri.....	32
Şekil 4. 6	Sürtünme Karıştırma Kaynağı 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	34
Şekil 4. 7	Gemi yapımında kullanılan alüminyum ekstrüzyon ürünlerinin FSW yöntemi ile üretilen panelleri	38
Şekil 4. 8	Hyro Marine Alüminyum tarafından üretilmiş "The World" yolcu gemisine ait güverte panelleri.....	39
Şekil 4. 9	FSW yöntemi ile üretilmiş güverte panellerine sahip Fosen Mek tarafından yapılmış "The World" yolcu gemisi	39
Şekil 4. 10	Avustralya ve Yeni Zellanda askeri tersanelerinde üretilen FSW kaynaklı 55m boyundaki karakol gemisi.....	40
Şekil 4. 11	Londra metroDa kullanılan ve FSW yöntemi ile kaynak edilmiş panellr	41
Şekil 4. 12	Danimarka demiryolları için üretilmiş FSW yöntemi ile kaynak edilmiş alüminyum paneller kullanılan tren ve İskandinav ülkelerindeki fabrikalarda üretilerek Almanya'ya gönderilen paneller	42

Şekil 4. 13 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş yüzey	43
Şekil 4. 14 FSW yöntemi uygulanarak üretilmiş otomobil jantları	43
Şekil 4. 15 FSW yöntemi ile kaynak edilmiş otomobil süspansiyon elemanı.....	44
Şekil 4. 16 Otomobil süspansiyon parçalarının FSW yöntemi ile kaynak edilmesi	44
Şekil 4. 17 FSW yöntemi ile kaynak edilerek üretilmiş oto motor taşıyıcı eleman	44
Şekil 4. 18 Alışılmış FSSW yöntemi ile oluşturulmuş numuneler ve bir otomobil gövde parçası.....	45
Şekil 4. 19 Ülkemizde FSW yöntemi kullanılarak üretimi planlanan zırhlı personel taşıyıcı.....	46
Şekil 4. 20 C-17 kargo uçağının rampa zemin döşemesindeki özel yapının sürtünme karıştırma kaynağı	47
Şekil 4. 21 Küçük tip yolcu uçağının gövde üretiminin gerçekleştirildiği FSW makinası ve parçaların bağlandığı aparatlar	48
Şekil 4. 22 TWI tarafından İngiltere'de FSW yöntemi kullanılarak üretilen ilk roket yakıt tankı	49
Şekil 4. 23 Boeing tarafından tasarlanan makinada FSW yönteminin kullanımı ile yakıt tanklarının boyuna kaynağı	49
Şekil 4. 24 Uzay mekiklerinin roketlerinin FSW yöntemi kullanılarak üretilmiş yakıt tankı	50
Şekil 4. 25 NASA için FSW yöntemi ile üretilen uzay aracı roket gövde ve yakıt tanklarının üretiminde kullanılan sistemler	50
Şekil 4. 26 FSW yöntemi ile kaynaklı üretilmiş soğutucu plakalar	51
Şekil 4. 27 Avrupa'da sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları için lisans alınarak modifiye edilmiş FSW makinası	53
Şekil 4. 28 Bir İsveç kuruluşu tarafından geliştirilmiş sabit yataklı sürtünme karıştırmakaynağı makinası	54
Şekil 4. 29 Bir İsveç kuruluşu tarafından geliştirilmiş sabit yataklı sürtünme karıştırma kaynağı makinası	57
Şekil 4. 30 ISTIR PDS model sürtünme karıştırma kaynağı makinası.....	57
Şekil 4. 31 Roket yakıt depolarının çevresel kaynağı için geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı makinası.....	58
Şekil 4. 32 Lockheed Martin tarafından tasarlanan ve uzay roketlerinin silindirik uç kısımlarının kaynağı için geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı makinası eskizgörünümü.....	58
Şekil 4. 33 Robotik sürtünme karıştırma kaynağı makinası	59
Şekil 4. 34 Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kullanılan vida açılmış pimli alışılmış omuzlu takım	61
Şekil 4. 35 Vidalı pim boyunun ayarlanabildiği dairesel kanallı omuza sahip basit bir vida pimli takım.....	62
Şekil 4. 36 Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kullanılan takımda omuz profili örnekleri	64
Şekil 4. 38 TWI tarafından geliştirilen kesik koni helisel pimin üç kanallı olduğu MX-Triflute™ takımı.....	64

Şekil 4. 39	Altlık kullanımını ortadan kaldırmak amacı ile karşı omuzlu olarak tasarlanmış bobin ya da makara biçimli (bobbin) takım	65
Şekil 4. 40	Çeşitli pim biçimlerinde tasarlanmış sürtünme karıştırma kaynağı takımlar	66
Şekil 4. 41	Skew-Stir™ takımın çalışma prensibi ve ilk geliştirilen asimetrik Skew-Stir takımın görünüşü	67
Şekil 4. 42	TWI tarafından geliştirilen A-skew™ takımın kaynak sırasındaki görüntüsü	68
Şekil 4. 43	Kendinden tepkili (self-reacting) pimli takım ve diğer takımlarla karşılaştırılması	70
Şekil 4. 44	Bir Japon otomobil üreticisi tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin prensibi.....	71
Şekil 4. 45	Sürtünme katıştırma kaynağı yönteminde kaynak edilecek parçaların rijit bir şekilde pabuçlar ile bağlanması	74
Şekil 4. 46	Sürtünme katıştırma kaynağı yöntemi uygulanacak küçük boyutlu parçaların bağlanmasında kullanılabilen mekanik bağlama elemanları	74
Şekil 4. 47	Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi uygulanacak küçük boyutlu parçaların bağlanmasında kullanılabilen pnömatik bağlama elemanları.....	75
Şekil 4. 48	Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi uygulanacak küçük boyutlu parçaların bağlanmasında kullanılabilen hidrolik bağlama elemanları	75
Şekil 5. 1	5 mm kalınlığında 316L ostenitik paslanmaz çeliğinin 30 mm omuz çaplı W-Re takım ile FSW kaynağında oluşan kaynak bölgesi.....	80
Şekil 5. 2	(a) 12 mm kalınlığında X80 boru çeliğinin PCBN takım ile sürtünme karıştırmaya kaynaklı bağlantısı, (b) 8 mm kalınlığında S355 çeliğinin seramik takım ile FSW yöntemi ile oluşturulmuş kaynak bağlantısı.....	81
Şekil 5. 3	(a) %12Cr'lu çelik, (b) Az karbonlu çelik, (c) %12Cr- az karbonlu çelik farklı metal çiftinin FSW bağlantılarında kaynak bölgeleri makro görünüşleri.....	81
Şekil 5. 4	AISI 1018 çeliğinin esas metal yapısı (a) ana faz olan eş eksenli ferrit taneleri ile bu taneler arasındaki ince dağılmış küçük perlit tanelerinin optik mikroskop görüntüsü; (b) perlitin ince lamelli yapısının SEM görüntüsü.....	82
Şekil 5. 5	FSW yöntemi uygulanmış AISI 1018 çeliğinin kaynak metal mikroyapıları, (a) kaynak metalinin orta kısmı: tane sınırlarındaki ferrit[PF(G)], ferrit-karbür çökeltisi [FC], ve ikinci fazlı ferrit [FS(A)], (b) karışım bölgesinin üst yüzeyi: ince ferrit	82
Şekil 5. 6	4 mm kalınlığında SAF 2507 super-duplex paslanmaz çeliği levhaların FSW yöntemi ile kaynak edilerek oluşturulmuş bağlantılarının kaynak bölgesi ...	84
Şekil 5. 7	FSSW yönteminin prensibi ve uygulanma aşamaları.....	86
Şekil 5. 8	FSSW bağlantılarının kesit görünüşü	87
Şekil 5. 9	SKK yöntemi ile boruların alın altına kaynağında kullanılan sabitleme mekanizması	91
Şekil 5. 10	SKK'da takım çıkış noktasındaki yarığı önlemek için alınan önlem	91
Şekil 6. 1	Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile yapılan birleştirmelerde kullanılan takım resmi.....	95
Şekil 6. 2	Farklı parametrelerde sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş malzemeler.....	95
Şekil 6. 3	Sürtünme karıştırma kaynağı makinası.....	97

Şekil 6. 4 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile yapılan birleştirmede kullanılan bağlama tertibatı	98
Şekil 6. 5 Kaynak dikişi çevresinde meydana gelen sıcaklıkları ölçmek amacı ile termokupllerin monte edilmesi	99
Şekil 6. 6 Paslanmaz çelik sacın sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi.....	100
Şekil 6. 7 Numuneye bağlanan dört termokupl ile zamana bağlı sıcaklık değerleri	102
Şekil 6. 8 Kaynak dikişinin sağına ve soluna monte edilen termokupller	103
Şekil 6. 9 Çelik sacın, 400 dev/dk devir sayısı 50 mm/dk ilerleme hızı ve 24 kN baskı kuvveti parametreleri ile yapılan sürtünme karıştırma kaynağı	104
Şekil 6. 10 Takım devir sayısına bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarındaki değişimler....	105
Şekil 6. 11 Takım ilerleme hızına bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarındaki değişimler....	107
Şekil 6. 12 7. numunenin kaynak dikiş görüntüsü	108
Şekil 6. 13 Tungsten karbür altlık malzemesinde yüksek ısıya bağlı olarak oluşan hasarlanma....	110
Şekil 6. 14 Numunenin altlık malzemesine yapışması.....	110
Şekil 6. 15 Yüzeyleri arasında yükseklik farklı olan saclar.....	111
Şekil 6. 16 Takımın, kaynak işleminden sonraki hali	112
Şekil 6. 17 Sağdan sola doğru numunelerde ısı girdisindeki artışa bağlı olarak kaynak dikişinin yanlarına doğru yığılmaların ve dikişteki pürüzlüklerin artması ...	113

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 Çeliklerin FSW yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılan değişkenler ve takım malzemeleri.....	78
Çizelge 5.2 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş çeşitli tür çeliklerin kaynak bağlantılarının çekme özellikleri	83
Çizelge 6. 1 Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi	96
Çizelge 6. 2 Deney malzemelerinin mekanik özellikleri.....	96
Çizelge 6. 3 Yirmi adet numune için uygulanan parametreler ve deney sonuçları....	101
Çizelge 6. 4 Takım devir sayısına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişimler	104
Çizelge 6. 5 Takım devir sayısına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişimler	105

**DEMİR ESASLI MALZEMELERİN SÜRTÜNME-KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA,
KAYNAK PARAMETRELERİNİN DİKİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

İlyas İNCE

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi 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. Farklı çalışmalarda alüminyum ve alüminyum alaşımları, magnezyum ve magnezyum alaşımları, çinko ve alaşımları, bakır ve bakır alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları ve çelikler üzerine sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile başarılı birleştirmeler yapılmaktadır.

Bu çalışmada, AISI 304 paslanmaz çelik sacların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmeleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde; karıştırıcı ucun dönme hızı, devir sayısı, geometrisi, kaynak ilerleme hızı, baskı kuvveti ve takım dalma açısı gibi parametreler, ilgili literatür ışığında belirli aralıklarda değiştirilerek, farklı mekanik ve mikroyapı özelliklerine sahip birleştirmeler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda işlem parametrelerinin, birleşme kalitesi üzerinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Çelik sacların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde, uygun devir sayısı, ilerleme hızı ve baskı kuvveti kombinasyonlarında kaynak kalitesini artırmak mümkün olabilmektedir.

Çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapılmış, ikinci bölümünde paslanmaz çelikler tanıtılmış, üçüncü bölümünde paslanmaz çeliklerin kaynağından ve kaynağında kullanılan kaynak yöntemlerden bahsedilmiş, dördüncü bölümünde sürtünme karıştırma kaynağı hakkında geniş bilgiye yer verilmiştir. Beşinci bölümde paslanmaz çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmeleri ve güncel literatürlerden örnekler verilerek yapılan çalışmaların amaçlarından bahsedilmiş, altıncı bölümde deneysel çalışmanın yöntemi, deneylere hazırlık aşamaları ve deney sonuçları ele alınmıştır. Yedinci bölümde sonuçlara genel olarak yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz çelik, Sürtünme karıştırma kaynağı

ABSTRACT

THE EFFECT OF WELDING PARAMETERS ON WELDING SEAM PROPERTIES DURING FRICTION STIR WELDING OF IRON-BASED MATERIALS

İlyas İNCE

Department of Mechanical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

Friction stir welding is a solid state welding process which has been invented in The Welding Institute (TWI) 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 different experiments, aluminium and aluminium alloys, magnesium and magnesium alloys, zinc and zinc alloys, titanium and titanium alloys and steels have also been welded by friction stir welding method.

In this study, two same AISI 304 stainless steel sheets were welded by friction stir welding process. Considering the literature the welding conditions, rotational speed, traverse speed, pressing force, plunge angle and tool geometry were chosen and, the joints having different mechanical and microstructural properties were produced. It was shown that the weld parameters played an important role on the welding quality. It is possible to increase the weld quality of friction stir welded joints of stainless steel sheets by using appropriate combination of the rotational speed and traverse speed.

In the first chapter of this study, the subject was introduced. In the second chapter, the stainless steels were introduced. In the third chapter, the welding of stainless steels and welding methods used for stainless steel were discussed. In the fourth chapter, the friction stir welding processes were extensively presented. In the fifth chapter, welding of stainless steels by friction stir welding and the place of this study in the literature was discussed. In the sixth chapter, the method of experimental study, the preparation phases of the experiments and experiment results were presented. In the seventh chapter, the experimental results were given.

Keywords: Stainless Steel, Friction Stir Welding

1.1 Literatür Özeti

Bilindiği üzere kaynak, birbirinin aynı veya ergime aralıkları birbirine yakın iki veya daha fazla metalik veya termoplastik parçayı ısı, basınç veya her ikisini birden kullanarak veya kullanmadan çözülemeyen bir bağlantı oluşturmak amacı ile birleştirmeye verilen genel tanım ile ifade edilir. Metal kaynağı yöntemleri; uygulanan enerjinin şiddetine ve türüne göre ergitme esaslı kaynak ve basınç esaslı kaynak yöntemleri olarak sıralanabilmektedir. Ergitme kaynağı, iki veya daha fazla metalik malzemeyi sıcaklığın etkisi ile yerel olarak ısıtarak, gerektiğinde ek kaynak metali ile birlikte ergitilip birleştirmektir. Basınç kaynağı ise, iki veya daha fazla metalik malzemeyi ısıtmadan ve ya ısıtarak ek kaynak metali kullanmadan basınç altında birleştirmek olarak tanımlanır. Ergitme kaynağında kaynak sıcaklığı, birleştirilen malzemenin ergime sıcaklığından daha yüksektir; buna karşın basınç kaynağında metal ergimeden kaynak işlemi gerçekleştirilir. Bu nedenle, bu kaynak yöntemleri katı faz kaynak yöntemleri olarak da adlandırılmaktadır.

İlk defa 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi, geleneksel ergitme kaynağı yöntemleriyle birleştirilmesi güç olan veya mümkün olmayan alüminyum alaşımlarının kaynağında başarıyla uygulanabilmektedir. Başlangıçta bu yöntemin, özellikle demir dışı metaller üzerinde uygulanmasına karşın, günümüzde demir esaslı bazı malzemelerin kaynağı için de kullanılmaya başlamıştır. Özellikle alüminyum alaşımlarında diğer kaynak tekniklerine göre daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmesi ve minimum sürede kaliteli

birleştirmelerin gerçekleştirilmesi gibi avantajlarından dolayı, bu yöntem günümüzde önemli kaynak işlemleri arasına girmiştir.

Günümüze kadar geliştirilen birçok elik türü endüstride çok yaygın olarak kullanılmaktadır. eliğın endüstride çok fazla kullanılmasının en önemli nedenlerinden bazıları; yüksek dayanıma sahip bir malzeme olması, temin edilebilirliğının kolay olması, eliğın bazı türlerinin birçok malzeme türüne kıyasla korozyona karşı dayanımının daha iyi olması, geniş üretim yöntemlerine sahip olması ve geri dnşebilirliklerinin iyi olması olarak sayılabilir. eliklere, birçok ergitme esaslı ve katı faz kaynak yöntemleri kolaylıkla uygulanabilmektedir. Endüstride özellikle hafifliğın istendiğı yerlerde ergitme esaslı kaynak yöntemleri, yerlerini katı faz kaynak yöntemlerine bırakmaktadırlar.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında ergitme oluşturmaksızın gerçekleştirilebilecek bir yöntem olan sürtünme karıştırma kaynağı yoğun bir biçimde kullanılır duruma gelmiştir. Uygulaması daha zor olduğundan dolayı elik için aynı durum söz konusu değildir. Uzun ömürlü makine ve araçların yapımına dönük projelerin son yıllarda artmasıyla sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirmenin önemi bir kez daha gündeme gelmiş ve bu konularda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları birçok gelişmiş ülkede sayıca artmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Yapılan birçok çalışmaya rağmen sürtünme karıştırma kaynağının çeliklerde uygulaması ve endüstriye aktarılması ile ilgili çok fazla ilerleme kaydedilememiştir. Ülkemizde bu yöntemin endüstriyel olarak çok iyi bilinmemesi ve uygulanmaması, bu konu üzerinde çalışma yapılmasının en önemli nedenlerindendir.

1.3 Bulgular

Bu çalışmada, 304 kalite paslanmaz elik sacın farklı kaynak parametreleri seçilmek suretiyle sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Takım devir sayısı başta olmak üzere, takım ilerleme hızı, baskı kuvveti ve bireştirilen saclar için kullanılan altlık malzemeleri parametre olarak seçilerek bunların

kaynak dikişinde meydana getirdikleri değışiklikler incelenerek kaliteli bir birleştirmenin sağlanabilmesi için optimum değerlerin saptanması amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2

PASLANMAZ ÇELİKLER

2.1 Paslanmaz Çeliğin Tanımı ve Özellikleri

Paslanmaz çelikler, içlerinde en az % 10,5 oranında(ağırlıkça) krom içerikli demir alaşımlar olarak tanımlanır. Paslanmaz çeliğin yüzeyinde oluşan ince fakat yoğun kromoksit tabakası korozyona karşı dayanım sağlar ve oksidasyonun daha derine doğru inmesini engeller. İçerdikleri diğer katkı maddelerine göre değişen ve tamamen östenitik ile tamamen ferritik özellikler aralığında sıralanan beş farklı çeşit paslanmaz çelik vardır.[1]

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.[28] 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.[2]

Paslanmaz elikler ile ilgili çıkan en son standart EN 10088'dir. Bu standartta paslanmaz çelikler aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır.

- Ostenitik Paslanmaz elikler
- Ferritik Paslanmaz elikler
- Ostenitik - Ferritik Paslanmaz elikler
- Martenzitik Paslanmaz elikler
- Ayrışım Sertleştirmesi Yapılabilen Paslanmaz elikler

2.2.1 Ostenitik Paslanmaz elikler

Ostenitik paslanmaz çeliklerde yapılan iyileştirmeler sonucunda karbon içeriğı % 0,03 seviyesine indirilmiştir. eliğın alaşımına Ti, Mo ve Nb elementleri katılarak sűrünme dayanımı ve taneler arası korozyon minimum seviyeye indirilmiştir.

Yüksek korozyon dayanımı, yüksek sıcaklıktaki mekanik dayanımından ötürü östenitik paslanmaz çelikler, kimyasal reaktörler ve ısı değıştiricileri gibi yüksek sıcaklık gerektiren komponentlerde kullanılmaktadır.[35]

Paslanmaz elik üretiminin yaklaşık % 75'ini ostenitik paslanmaz elik oluşturur. Korozyon dirençleri bakımından karşılaştırdığımızda; ostenitik krom nikelli paslanmaz çeliklerin korozyon direnci, martenzitik ve ferritik kromlu paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. İyapının 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 elik grubunun birçok alanda rakipsiz bir yapı çeliğı olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Ostenitik krom nikelli paslanmaz çelikler genellikle nemli ortamlarda kullanılır.

Paslanmaz eliklerin eşitleri 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 belirtildiğı gibidir:

- Mükemmel korozyon dayanımına sahiptirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri mükemmeldir.

- Sünek olduklarından kolay Őekillendirilebilirler.
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır.
- Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler.
- DŖk sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir.
- Manyetik değildirler (tavlanmış halde).
- Dayanımları sadece pekleŖme ile artırılabilir.

Bu eliklerin yaygın kullanım alanları;

- Bilgisayar disket sürücüleri, kapakları ve yayları
- Mutfak lavabosu
- Yemek hazırlama ekipmanları
- Mimari uygulamalar
- Bilgisayar klavyesi ve tuŖlarının yayları
- Kimyasal gübre hazırlama ekipmanlarıdır

2.2.2 Ferritik Paslanmaz elikler

Ferritik paslanmaz çelikler, dŖk bir karbon oranına sahiptir. Bunlardaki baŖlıca alaŖım elementi krom ve molibdendir.[3]

%11-30 Cr içeren hacim merkezli kübik (hmk) kristal yapısına sahip alaŖımlardır. Manyetikler, soğuk veya sıcak haddelenebilirler, ancak tokluk, süneklik ve korozyon dirençleri normalleŖtirilmiŖ hallerinde maksimum değeri gösterir. Bu elikler, pahalı ve stratejik bir element olan nikel içermemeleri nedeni ile de krom nikelli ostenitik paslanmaz çeliklerden daha ekonomiktirler Ferritik paslanmaz çeliklerin temel özellikleri kısaca aŖaĐıda belirtildiği gibidir:

- Korozyon dayanımı, krom miktarının artması ile iyileŖir,
- Isıl iŖleme dayanım artırılmaz ve sadece tavlanmış durumda kullanılır,
- Manyetikler,

- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür,
- Ostenitik çelikler kadar kolay şekillendirilemezler

Ayrıca ostenitik krom nikelli çeliklere nazaran şu üstün özelliklere sahiptirler;

- Klorürlü çözeltilerde gerilmeli korozyon çatlamasına karşı dirençlidirler,
- Daha yüksek akma mukavemetine sahiptirler,
- Daha az soğuk şekil değiştirme sertleşmesi gösterirler,
- 750 °C'ye kadar manyetikleşme özelliğine sahiptirler

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

- Otomobil eksozu (X2CrTi12) AISI 409),
- Bilgisayar sürücü disket göbeği (X6Cr17)(AISI 430),
- Otomobil sanayi (kalıplama, iç döşeme, şekil verme),
- Yüksek ısı tankları (X2CrMoTi18-2)(AISI 444),
- Kömür maden işletmesi ekipmanları

2.2.3 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, bileşiminde %11,5-18 Cr ve %0,15-1,2 C içeren sertleştirme koşullarında hacim merkezli kübik (hmk) kristal yapısına sahip ve ısı işlemi ile sertleştirilebilen martenzitik yapıya paslanmaz çeliklerdir. Martenzitik paslanmaz çelikler demir-krom çelikleridir. Diğer alaşım elementlerinin ilavesi düşük miktarlardadır. Yüksek alaşımlı çelikler gibi sertleştirilip temperlenen bu çelikler manyetikler ve oldukça üstün mukavemet özelliklerine sahiptirler. Ancak korozyon direnci diğer paslanmaz çeliklere göre daha düşüktür.

2.2.4 Ostenitik–Ferritik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler

Çift fazlı bir içyapıya sahip, ferrit taneleri içinde östenit veya östenit taneleri içinde ferrit içeren dubleks paslanmaz çeliklerin östenitik paslanmaz çeliklere nazaran en önemli üstünlükleri akma dayanımlarının iki kat kadar daha büyük olmasıdır. [31]

Bu eliklerin özelliği aynı anda çift yapıyı bünyelerinde bulundurmalarıdır. Ostenitik-ferritik paslanmaz çelikler yapılarında %50 ferrit ve %50 ostenit bulundururlar. Ostenitik eliklerle karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemet değerlerine, iyi sneklile, korozyon direncine ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı yüksek mukavemete sahiptir.

2.2.5 Ayrışma Sertleştirmesi Yapılabilen Paslanmaz elikler

Katı bir fazdan solvs çizgisinin geçilmesi sırasında başka bir katı fazın ayrışması kolayca engellenebilir. Böylece kristal kafesi gerilerek malzemenin dayanımı artar. Bu olay ayrışım (ekelme) sertleştirmesinin temelini oluşturur. Sertliğin artış nedeni, ekelen fazın taneciklerinin, dislokasyon hareketlerini engelleyici bir hareket göstermesidir. Bu elikler 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 ile iyi derecede korozyon dayanımı vardır.
- Çok yüksek mekanik dayanım gösterirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir
- Manyetikler

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 ısı genleşme katsayısı karbon çeliklerinkinden % 50 daha yüksektir ve çarpılmaları en aza indirmek için bu özelliğe dikkat edilmelidir. Ostenitik paslanmaz çeliklerin sahip olduğu düşük ısı ve elektrik iletkenliği kaynak açısından genellikle yararlıdır. Kaynak sırasında düşük ısı girdisi ile çarpılması önlenir. Çünkü oluşan ısı, bağlantı bölgesinden, karbon çeliklerinde olduğu kadar hızlı bir şekilde uzaklaşamaz.

Paslanmaz çelikleri kaynağında genellikle geleneksel gazaltı kaynak yöntemlerinden TIG ve MIG kullanılmaktadır.[43] 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. Ostenitik çeliklerin düşük ısı iletimi, yüksek elektrik direnci ve manyetik olmamaları sonucu, kaynak sırasında karbonlu çeliklerden daha düşük kaynak akımları yeterlidir. Ancak ısı genleşme 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.

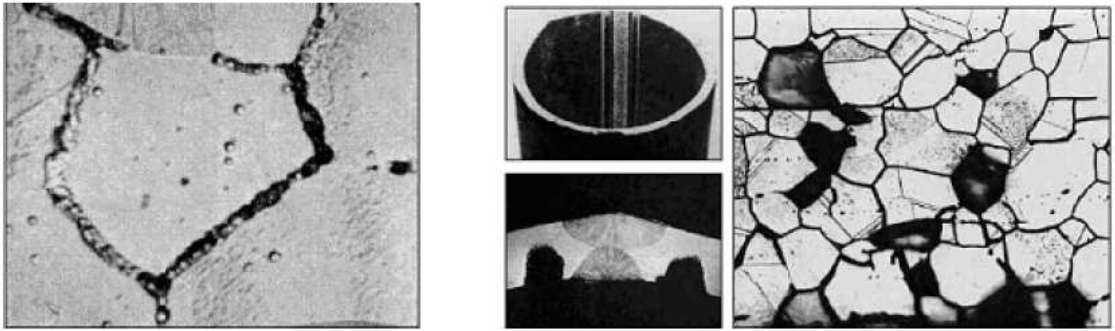
3.2 Ostenitik Paslanmaz Çeliklerde Kaynak Kabiliyeti

Ostenitik paslanmaz 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.

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, 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

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.

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 çatlamaya hassas olabilir. Sıcak çatlamanın temel nedeni; kükürt (S) ve fosfor (P) gibi elementlerin oluşturduğu ve tane sınırlarında toplanma eğilimi yüksek olan düşük ergime 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 çatlamaya 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 çatlamayı 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. Çatlamayı önlemek için en çok uygulanan tedbir, kaynaktaki ergimiş metal bileşimini % 1-8 ferrit ihtiva edecek şekilde ayarlamaktır. Burada çatlama mukavemetini menfi olarak bozan elementler, ostenite nazaran ferrit içinde daha çok ergimektedir. Bu sorun "S" ve "P" miktarlarının çok düşük seviyelerde tutulması ile 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 kırılkanlığı 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 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 kırılkanlık riski önlenecektir. Buna karşın ferrit miktarının % 12'yi geçmesi ile birlikte esneklik kabiliyeti hızla azalacaktır.

3.3 Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Uygulanan Kaynak Yöntemleri

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**

3.3.1 Gaz Ergitme Kaynağı

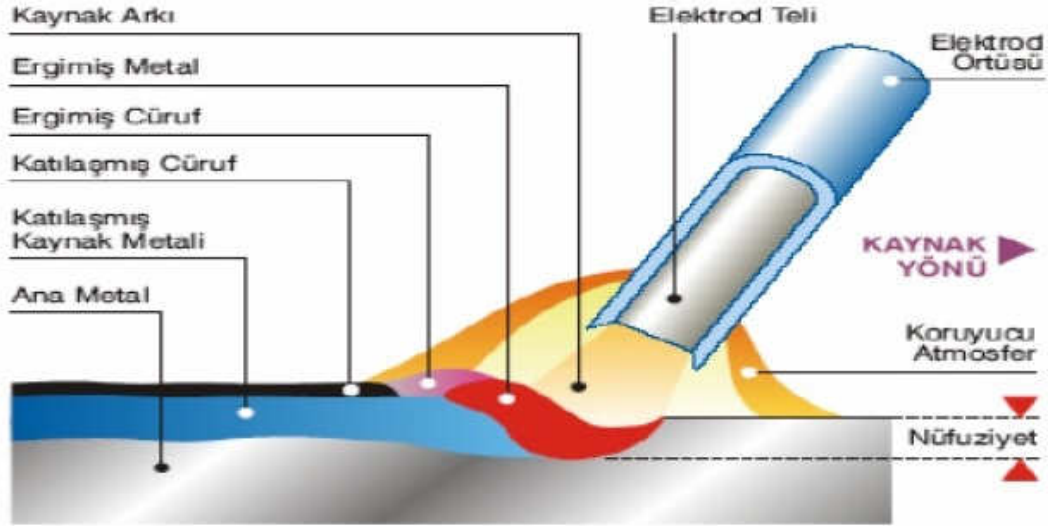
Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı için tavsiye edilen bir yöntem değildir. Genellikle tamir işlerinde kullanılan oksî-asetilen kaynağı, ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında özellikle ince sacların birleştirilmesinde nadiren kullanılır.

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 kaynakta cürufun temizliği önemlidir. Bu temizliğin dikkatle ve hassasiyetle yapılması gerekir.



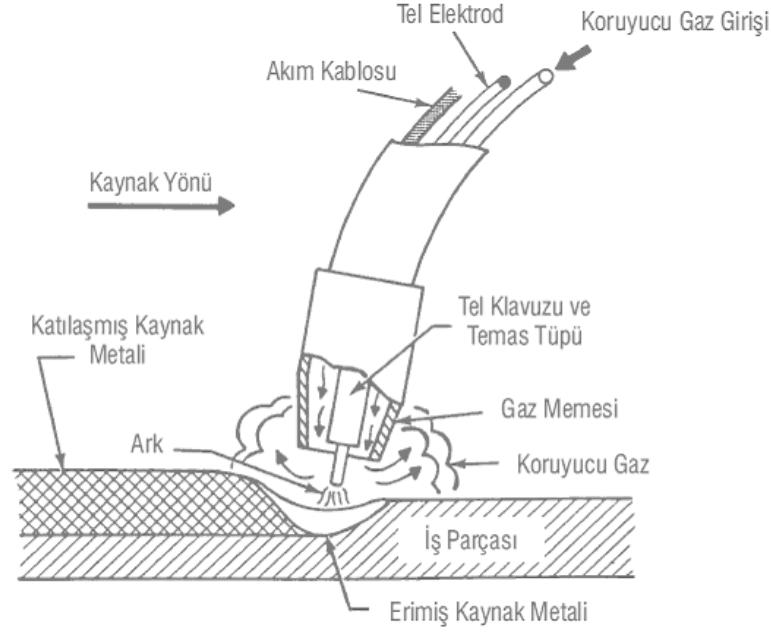
Şekil 3. 2 Örtülü elektrot ile ark kaynağı prensip seması

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

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

3.3.3 MIG Kaynağı

Soy gaz atmosferi altında ergiyen metal elektrodla yapılan MIG yönteminde kaynak dikişi, sürekli olarak ergiyen kaynak teli ile ergiyen ana malzemeden oluşur(Şekil 3. 3). Kaynak telinin sürekli bir akış halinde olması, elektrik ark kaynağına göre üstünlüklerini ortaya çıkarmaktadır. Çalışma tekniği olarak, MIG kaynak yöntemi ile yatay pozisyonundaki dikişler hem el hem de otomatik olarak kaynak edilebilir. Ancak zor pozisyonlarda yalnız el kaynağı kullanılır.



Şekil 3. 3 Gazaltı kaynağı prensip şeması

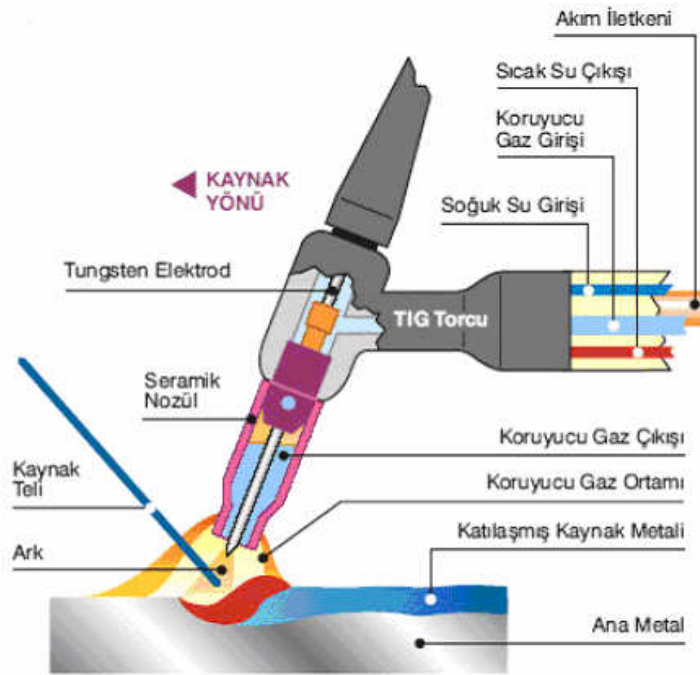
Kaynak dikişinin biçim ve boyutları, ark gücü, kaynak telinin ergime oranı ve ana malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkar. Kaynak dikişinin yüksekliği, genişliği ve nüfuziyet miktarı, aynı hamlaç tutulduğunda kaynak gerilimini, kaynak akım şiddetini ve kaynak hızını değiştirerek ayarlanabilir.

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. Argona, oksijen veya karbondioksit katılması arkın dengelenmesini sağlar. Argona 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.

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 3.4). 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 meteline gereksinim göstermeden birleştirilebilir.



Şekil 3. 4 TIG Kaynağı prensip şeması

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.

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 oluğu tehlikesi azalır.

3.3.5 Plazma Arkı ile Kaynak

Plazma ark torcu, ucunda küçük bir deliği bulunan meme ile bu memenin merkezindeki tungsten bir elektroddan 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.

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 gaz 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

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 ergiyen 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 kaynakta 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. Dolayısı ile alaşım elementlerinin segregasyonu ve mikro yapıda tane irileşmesi gibi problemler ile karşılaşılır.

3.3.7 Elektron Işını Kaynağı

Elektron ışını kaynağındaki ergitme 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 oluşturarak elektron demetinin üretimi tungsten veya benzeri elementlerden yapılmış bir flaman tarafından sağlanır. Elektronların çarpması sonucu elde edilen ısı enerjisi sonucu metal erimeye başlar Bu yöntemle birkaç µm kalınlığındaki folyolardan 100 mm kalınlığının üzerindeki levhalara kadar kaynak yapılabilen sac kalınlıklarına başka hiçbir yöntem ile erişilemez.

3.3.8 Lazer Işını ile Kaynak

Bu yöntemde, kaynak için zorunlu olan enerji optik bir sistemle, sac teli kalınlığındaki ışık demetinin kaynak alanına gönderilmesidir. Işık demetinin enerji miktarı oksigaz kaynağının yaklaşık on katı kadardır. Lazer ile aynı özellikteki veya ayrı özellikte olan malzemeler kaynak edilebilmektedir. Kaynak süresi olarak (yoğunlaştırılmış ısı iletim koşuluna bağlı olarak), metalurjik içyapı değişimlerinin oluşumu önlenerek 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 aşımlanması 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 ağzı hazırlığı gerektirir.

3.3.9 Nokta direnç kaynağı

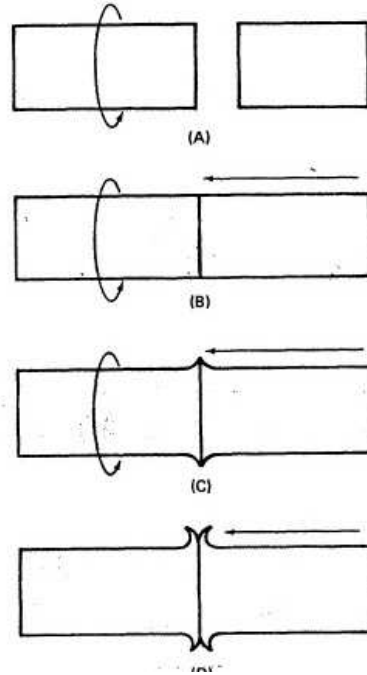
Elektrik direnç nokta kaynağı, elektrik akımının ısı etkisinden yararlanılarak, bir kaynak devresi içinde birleştirilecek metalleri direnç olarak kullanıp, basınç altında çözülmez birleştirme haline getirme yöntemidir. Bu yöntemde, kaynak yerinde çok az renk değişimi ve elektrod izlerinden başka bir 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.

3.3.10 Sürtünme kaynağı

Metallerin alın altına getirilerek mekanik olarak birbirlerine sürtünmeleri ile oluşan ısı enerjisinden yararlanılarak gerçekleştirilen sürtünme kaynağı, gelişen dünyamızda bir çok ülkelerde ve ülkemizde endüstriyel alanda kendine uygulama alanları bulmuş bir kaynak yöntemidir. Sürtünme kaynağının başlangıcı ve kullanımı 5.yy dayanmakla beraber patenti 1891 yılında J.Bowing tarafından alınmıştır. Bowing, sürtünmeden kaynaklanan ısı vasıtası ile metal boruların kaynak edilmesini sağlamış ve bu zamanında bir ilk olduğundan patentini almıştır. Daha sonraları ise yapılan farklı çalışmalar ile gerek Rusya’da gerek Almanya’da ve gerekse de İngiltere’de sürtünme kaynağı üzerine patentler alınmıştır. Türkiye’de de uygulama alanları bulmuş olan bu kaynak tüm dünyada endüstrilerde kullanılan bir kaynak yöntemi olmuştur.

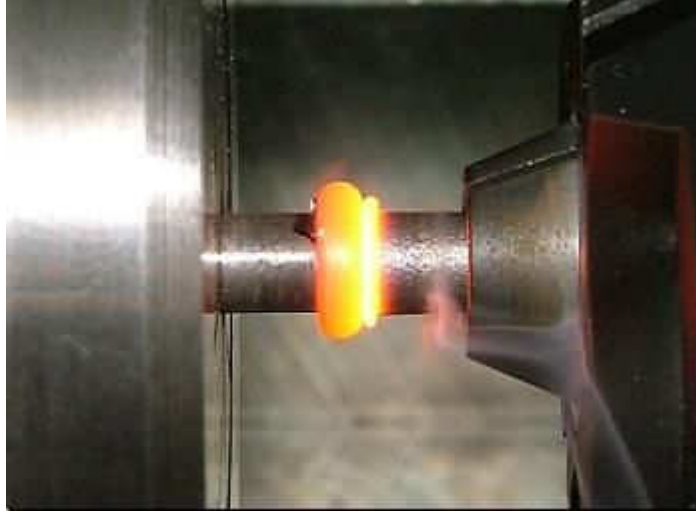
Katı-hal birleştirme tekniklerinden olan sürtünme kaynağında birleştirme ergimeye bağlı olmadan birleştirilecek parçaların ara yüzeylerinde meydana gelir. Sürtünme kaynağı üç aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada malzeme ara yüzeyleri düşük yük altında temas haline getirilir ve deformasyon işlemi sürtünme aşınması ile yönlendirilir. İkinci aşamada uygulanan yükler yavaşça artırılır, kaynaklanacak parçaların ara

yüzeyleri boyunca önemli ölçüde sürtünme ısısı oluşur ve gerilme sertleşmesi ve yumuşaması işlemlerinin bir değerine ulaşılır. [4]



Şekil 3. 5 Sürtünme kaynağının temel adımları

Üçüncü aşamada ise sürtünme ısısı üretimi sona erer, kaynaklanacak parçaların ara yüzeylerinin her iki tarafında ısınan malzemeye uygulanan gerilme yavaşça artırılır ve çapaklar alınır. Yöntemin başlangıcından bitimine kadar ara yüzey basınç altındadır. Kaynak esnasında uygulanan basınç sabit parça, hareketli parça veya dönen her iki parça tarafında sağlanır. Sürtünme kaynağı işleminde genelde sıcaklık arttığında kesme ve akma mukavemetleri düşer. Sürtünme kaynağında yüzey tabakaları kırılıp atıldığında önemli bir plastik akma olur. Sonuçtaki sıcaklık bölgesel ergimenin başladığı sıcaklığa ulaşır. Bu olayların hepsi saniyeler içerisinde meydana gelir. Bütün ergitme kaynakları kalıntı gerilmelerin üretilmesine sebep olmaktadır. Bu gerilmeler malzemenin ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklıklardaki ısıl çevrimlerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. 6 Sürtünme kaynağı

Genel olarak üç çeşit sürtünme kaynağı bulunmaktadır. Bunlar;

Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı, direk sürtünme kaynağı olarak da bilinmektedir. Gerekli olan enerji sürekli bir tahrik grubu tarafında sağlanır. Parçalardan biri motor ünitesine bağlanır ve sabit bir hızda döner, diğer parça eksenel bir basınçla temas ettirilir. Yeterli derecede ısı girdisi sağlandığında dönme frenleme etkisi ile mümkün oldukça kısa sürede durdurulur. Kaynak kuvveti yığılma maksadıyla artırılır ve numune soğumaya bırakılır. Bu yöntem genelde Avrupa'da kullanılmaktadır.

Volan tahrikli sürtünme kaynağı, atalet kaynağı olarak da bilinmektedir. Parçalardan biri volana bağlanır. Volan belirlenen hızda ivmelendirilir. Böylece dönme enerjisi bu volan üzerinde toplanmış olur ve sürtünme kaynağının kendi kendine frenlemesiyle parçaya iletilir. Kaynak kuvveti eksenel olarak uygulandığında dönmesi serbest bırakılan parça diğer parça ile döner ve volan enerjisi parça ara yüzeyinde sürtünmeye harcanır. Volan hızı azalırken, kaynak bölgesi ısınır ve ısı yayılır. Volan tamamen durdurulduktan sonra basınç etki ettirilir. Bu yöntem özellikle A.B.D. de uçak ve uzay sanayinde kullanılmaktadır.

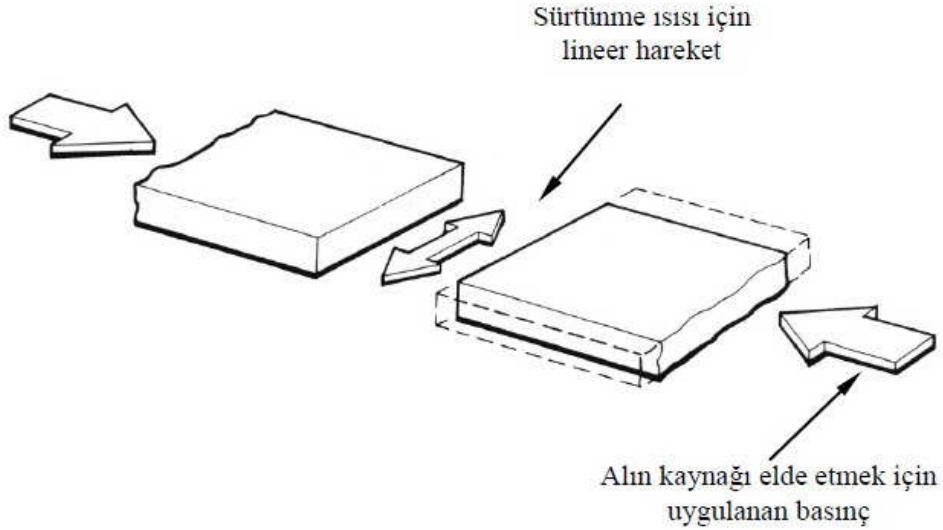
Kombine kaynak yöntemi, atalet kaynağıyla direk sürtünme kaynağının ortaklaşa kullanıldığı bir metoddur. Büyük kapasiteli parçaların birleştirilmesinde kullanılır Volan sürtünme kaynağında direk sürtünme kaynağına göre avantajları aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- Daha dar bir ITAB oluşur

- Daha seri üretim yapılır
- Daha düşük güç gerekir
- Daha basit ekipman gerekir.

Sürtünme kaynağında, sürtünme için kullanılan dönme hareketinin yanında, yörüngesel hareket veya açısall hareket de uygulanabilir. Özellikle silindirik olmayan parçalar için yörüngesel hareket uygulanır. Bu uygulamada, sabit duran parça üzerinde diğerr parça bir köşesi dairesel bir yörünge çizerek şekilde hareket eder. Doğrusal hareketli yöntemde de parçalardan biri diğerrine doğru uygulanan basınç altında ileri geri sürtünme hareketi yapar. Açısall sürtünme hareketli sürtünme kaynağında ise parçalardan biri uygulanan basınç altında bir açıyı gören yay parçası yörüngesinde hareket eder.[5]

Yöntemin en önde gelen sınırlamaları, birbirine kaynak yapılacak parçaların en az birinin dönemesinin gerekmesi, parçaların genellikle silindirik profilili olmaları ve kaynak yapılacak parçaların boylarının kısıtlı olmasıdır.



Şekil 3. 7 Doğrusal hareket ile sürtünme kaynağı

Yörüngesel, doğrusal ya da açısall hareketli sürtünme kaynağında da, parçaların düzgün şekilli olma koşulu çok aranmaz fakat birbirlerine karşı oluşturulan sürtünme hareketi çok önemlidir. Sürtünme kaynağının kısıtlamalarından biri de kaynak yapılacak

parçalardan en az birinin smetri ekseninde dönebilmesi ve ya doğrusal hareket yapabilmesi gerekmektedir.

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Al-alışımlannm klasik erğitme kaynağı yöntemleri ile kaynağında, kaynak bölgesinde (kaynak dikişı veya ITAB'de) çatlak oluşumu ve kaynak dikişinde tolere edilemeyecek düzeyde gaz boşluğu (porozite) oluşumu gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Çatlak oluşumunun nedeni, bu alışımların katılaşıma sıcaklık aralıklarının geniş olması ve ısıl genleşme katsayılarının yüksek olması ile birlikte ark kaynağında ısı girdisinin yüksek olmasıdır.[39] Porozite oluşumunun nedeni ise, alüminyumda hidrojen çözünürlüğünün sıvı halde katı halden yüksek olmasıdır. Özellikle son yıllarda alüminyum ve alüminyum alışımları, sürekli olarak artan oranda kullanıma giren metalik malzemeler olmuş ve bunların kaynağında erğitme esalı ve basınç esaslı kaynak yöntemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Özellikle alüminyum ve alışımlarının kullanıldığı yapısal uygulamalarda MIG, TIG ve Plazma ark kaynağı gibi erğitme esaslı kaynak yöntemleri en çok tercih edilen yöntemler olmaktadır. Ancak, alışımın metalurjik özellikleri ve oluşturulan kaynak bağlantısının kaynak bölgesinde ve özellikle ısı tesiri altındaki bölgede(ITAB) bazı metalurjik çökeltilerin oluşmasına yol açtığından bazı tür alüminyum ve alışımlarının ark kaynağı uygulamalarında bağlantıdan istenilen mekanik özelliklerde düşmeler orya çıkmakta ve bu durum bazı alüminyum alışımlarına ark kaynağı yöntemlerinin uygulanması zorlaşmaktadır. Bu nedenle gerek alüminyum ve gerekse de alüminyum alışımları için erğime olmaksızın yapılabilecek bir yöntem arayışı, araştırmacıları uzun yıllar meşgul etmiş ve sonunda yeni bir katı faz yöntemi olan Sürtünme Karıştırma Kayanağı (FSW) yönteminin bulunması ve geliştirmesine yönlendirmiş ve 1990'lı yıllarda alüminyum ve alüminyum

alaşımlarından yapılmış levhaların alın altına birleştirilmesi için yeni bir kaynak yöntemi olarak ortaya çıkmıştır.

Alüminyum alaşımlarının ergitme kaynak tekniği ile birleştirilmesinde, bazı kaynak problemleri ile karşılaşilmektedir. Bu problemlerin çözümü için yeni birleştirme tekniklerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu amaçla alüminyum alaşımlarının kolay ve problemsiz bir şekilde birleştirilmesini sağlayan sürtünme karıştırma kaynak tekniği geliştirilmiştir. Bu yöntem katı hal kaynak tekniği olup, malzemelerin ergime derecelerinden daha düşük bir sıcaklıkta birleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Amerika ve Avrupa'daki uçak, gemi, tren ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanılan bu birleştirme tekniği henüz ülkemizde kullanılmamaktadır. Bu çalışma ile sürtünme karıştırma kaynak yöntemin tanıtılması, avantaj ve dezavantajlarının değerlendirilmesi yapılarak, ilgili endüstri kuruluşlarının dikkatlerini çekmek amaçlanmıştır.[6]

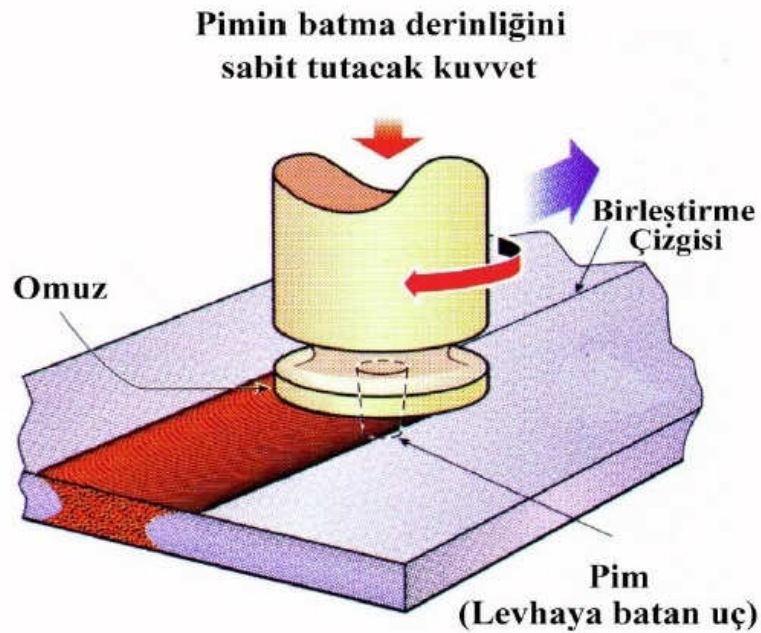
Al-alaşımlarında karşımıza çıkan yaygın uygulamasına karşılık diğer malzemeler için henüz araştırma safhasında olup literatürde endüstriye uygulamaya yönelik çok bilgi bulunmaktadır.[40]

MIG, TIG gibi ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde elde edilen bağlantı özelliklerine yakın ve hatta daha üstün özellikler sağlayan bu yeni kaynak yöntemi, birçok endüstriyel alanda devreye girerek gerek alüminyum ve gerekse de alüminyum alaşımlarından oluşan levhaların kaynağında yoğun kullanım alanları bulmuştur. Bu yöntem, üreticiye oldukça fazla kolaylıklar ve diğer kaynak yöntemlerine nazaran özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarında birçok avantajlar sağlamaktadır.

Bazı alüminyum alaşımları elektiriksiz direnç yöntemleri ile kaynak edilebilmektedir. Bunların kaynağında geniş yüzey temizlikleri ve oksidasyonu engelleyici önlemlerin alınması gerekmektedir. Buna karşı sürtünme karıştırma kaynağında ise alüminyum ve alüminyum alaşımlarında yüzeyde oksit oluşma riski yok denilecek kadar az ve yine kaynak öncesi yüzey temizliği de yok denilecek kadar azdır. [7]

Sürtünme karıştırma kaynağında parça kaynak sırasında ergime noktasına ulaşmaz. Bundan dolayı parçada oluşan süneklik ve dayanım klasik yöntemlere nazaran çok daha iyi olduğu görülmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağında az ısı girdisine bağlı

olarak daha düşük distorsiyonlara uğramaktadırlar. Ayrıca az ısı girdisine bağlı olarak oluşan az gözenekler sayesinde daha az hatalar gözlenmektedir. Geniş ölçekli üretim uygulamalarında sürtünme karıştırma kaynağının özellikle alümiyum ve alüminyum alaşımlarında, ark esaslı kaynaklarının yerini alacakları görülmektedir. İlerleyen süreç içerisinde sürtünme karıştırma kaynağının kullanım alanlarının genişleyeceği ve benzer malzemelerin kaynaklarının da yapılabileceği görülmektedir. Özellikle son zamanlarda bu alanda birçok çalışmalar yapılmakta ve daha da yoğunlaşacağı görülmektedir. Özellikle uçak sanayinde, eski ve klasik yöntemlere nazaran daha ucuz ve daha etkili olması hasebiyle sürtünme karıştırma kaynağının daha çok kullanılacağı yapılan çalışmaların göstergesidir.



Şekil 4. 1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi Prensibi

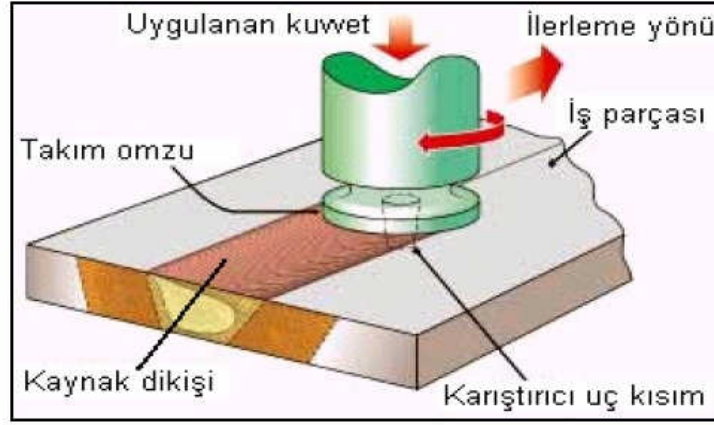
Sürtünme Karıştırma Kaynağı, 1991 yılında, İngiltere’de İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından bir katı-faz kaynak olarak ilk alüminyum alaşımlarına uygulanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağının işleyişi temelde çok basittir. Özel tasarlanmış dönen pimli bir takım ve omuz bölgesinin, alın altına getirilmiş yüzeylere daldırılıp ilerletilmesinden ibarettir. Takım temelde iki fonksiyonu yerine getirmektedir. Bunlar; iş parçasını ısıtmak ve malzemede birleştirmeyi sağlamak için hareketin sağlanmasıdır. Isı, takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeden ve parçadaki plastik deformasyondan sağlanır. [8]

Günümüze kadar İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde alüminyum ve alüminyum alaşımları için bu kaynak yöntemi ile oluşturulacak birleştirmeler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları, bu yöntemin gerek yaşlandırma sertleşmesi yapılmış gerekse yaşlandırma sertleşmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx serileri gibi) alüminyum ve alaşımlarında başarılı ve güvenli bağlantıların ortaya çıktığını göstermiştir. Ayrıca bakır-bakır alaşımları, kurşun-kurşun alaşımları, titanyum-titanyum alaşımları, magnezyum-magnezyum alaşımları, metal matrisli alüminyum kompozitlerde, metal matrisli kompozitlerde ve bazı tür paslanmaz çeliklerin hatta az alaşımlı çelik ile paslanmaz çelikler ya da alüminyum gibi farklı metallerin kaynağında ve bazı tür termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde de bu yöntemin uygulanmasına başlanmıştır. Ancak, yöntemin bir çok malzemeye uygulanabilirliğinin yanında bu yeni yöntemin bu malzemelere alışılmış kaynak yöntemlerinin uygulanması ile karşılaştırıldığında ne derece üstünlük ya da sınırlama getirdiği konusunun dikkate alınarak ilgili malzemelerin kaynağında bu yeni kaynak yönteminin kullanılabilirlik ölçüsünü teknolojik ve ekonomik anlamda değerlendirilmesidir. Zira bazı tür malzemelerin kaynağında alışılmış kaynak yöntemlerinin kullanımı daha elverişli, ekonomik ve avantajlı olmaktadır.

Sürtünme Karıştırma Kaynağı'nın diğer ergitme esaslı kaynaklarından en bariz farkı; kaynak edilen parçaların ağızlarının kaynak sırasında ergimemeleri, yani katı fazda bulunmalarıdır.

Yöntemin mükemmel kullanım imkanları vardır. Bundan dolayı birçok lisans alınmakta birçok yeni takım türü geliştirilmekte ve yeni uygulamalara yönelik araştırmalar yapılmaktadır.[33]

Bu metotla yapılan birleştirmelerde, mükemmel bir birleştirme mukavemeti elde etmek mümkün olduğu gibi, oldukça düşük bir malzeme çarpılması söz konusudur. Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen kademeli bir karıştırıcı ucun daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir. [9]



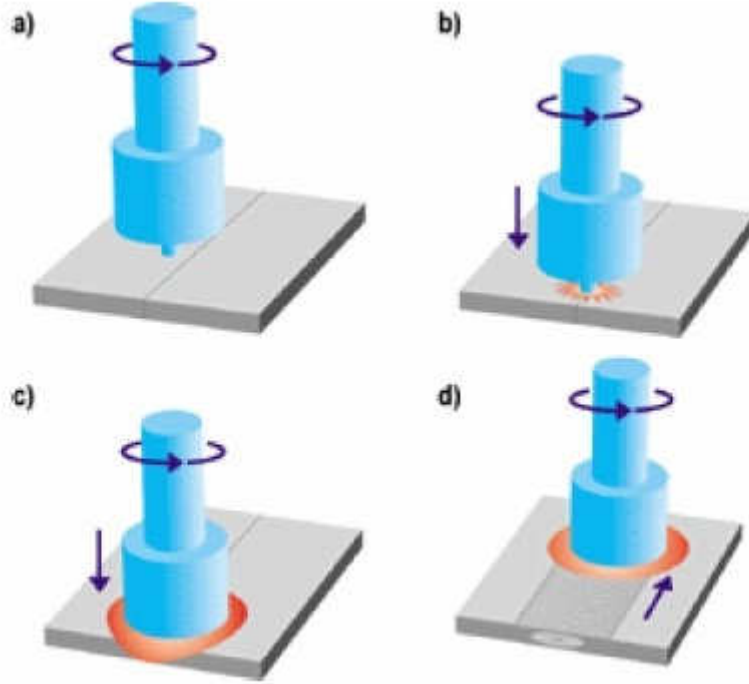
Şekil 4. 2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı şematik gösterimi

4.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Çalışma Prensibi

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirme yapmak için birleştirilecek olan parçaların, kaynak esnasında yana, yukarıya ve ileriye doğru hareket etmelerini önlemek amacı ile bir destek parçasının üzerine sıkıca bağlanmalı ve sabitlenmelidir. Çünkü birleştirme esnasında iş parçaları yukarıya doğru kalkmaya, yana doğru kaymaya ve ileriye doğru itilmeye maruz kalacaktır. Bu sabitleme işlemi çeşitli hidrolik baskı papuçları kullanılarak da yapılabilir. Ayrıca birleştirme hattındaki geometrik bozuklukların önüne geçebilmek için, karıştırıcı ucun her iki yanında ve önünde baskı bilyesi kullanmak da mümkündür. Ucu özel olarak imal edilmiş silindirik kademeli bir karıştırıcı ucun dönmekte olan bir karıştırıcısı yavaşça birleşme hattı üzerine bastırılır.

Karıştırıcı ucun boyu kaynak edilecek parçanın derinliğinden daha kısadır. Dönen karıştırıcının ucu istenen yüzeye temas ettiği zaman meydana gelen sürtünme, karıştırıcı ucun temas ettiği noktayı aniden ısıtır ve böylece malzemenin mekanik direnci azalır. Uygulanan kuvvet altında karıştırıcı uç malzemeyi, karıştırıcı uç omzu da izlenen yüzeye temas edinceye kadar karıştırıcı uç ve onun hareket ettiği yönde zorlanmakta ve yerinden oynatmaktadır. Bu işlemde, dönen karıştırıcı ucun meydana getirdiği sürtünme ısı, karıştırıcı ucu etrafında ve karıştırıcı omzu altında yumuşamış bir metal tabakası oluşturur. Birleştirilecek parçaların veya karıştırıcının ileriye ve geriye hareket etmesi halinde yumuşamış olan metal karıştırıcı ucun ön yüzü tarafından

kaldırılır ve karıştırıcı ucun mekaniksel dönüşü yönünde ve bastırma hareketi ile karıştırıcı ucun arkasından dönerek sürüklenir.



Şekil 4. 3 Sürtünme Karıştırma Kaynağı aşamaları a)FSW takımına ilk dönüş verilmesi
b)FSW takımının malzemeye daldırılışı c)FSW takımının omuz kısmının plakaları ön ısıtması d)Yeterli ön ısıtmanın ardından FSW takımına ilerleme verilmesi

Sonuç olarak karıştırıcı uç birleşme hattı içine girdikçe oluşan sürtünme, birleşme yüzeylerini ısıtarak metali yumuşak hale çevirmekte, takiben birleşme hattını ezerek oksit filmini kırmakta, yumuşak metali karıştırarak birbirine birleştirmekte ve ileriye hareketi ile geride kalan birleşimin soğuyarak katı hal kaynağı oluşturmaktadır. Tüm bunlar alaşımın ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta meydana gelir.

Bu yöntemin uygulanmasında sarf malzemeleri ve ek kaynak metallerinin kullanılmasına gerek duyulmaz. Dolayısıyla elektrod, tel, gaz, toz gibi kaynaklı parçaların maliyetini arttıran giderler yoktur. Bir ark oluşumu ve yanma ürünleri de olmadığından kaynak ortamı daha rahattır. Amerika’da ark kaynak yöntemlerinin enerji sarfiyatına ve hava kirliliğine neden olan emisyonların azaltılması yönündeki enerji sarfiyatı ve hava kirliliğine neden olan emisyonların azaltılması yönündeki getirisi yönündeki yapılan

istatistiksel çalışmalarda bu yöntemin artan oranda kullanımının Amerikan ekonomise yıllık 5 milyar dolarlık yarar sağlayacağı öngörülmektedir.

Sürtünme Karıştırma Kaynağı yöntemi, ark kaynağı ile karşılaştırıldığında;

- Daha yüksek bağlantı mukavameti
- Artan yorulma ömrü
- Çok düşük açısal çarpılma
- Çok az artık gerilme
- Çok düşük korozyon hassasiyeti
- Hatasız bağlantılar elde edilmesi

Tarzında Sürtünme Karıştırma Kaynağı yönteminin ark kaynağına göre üstünlükleri sağlanabilmektedir. Kuşkusuz bu kıyaslamada en önemli faktör hatasız bağlantılar elde edilmesidir.

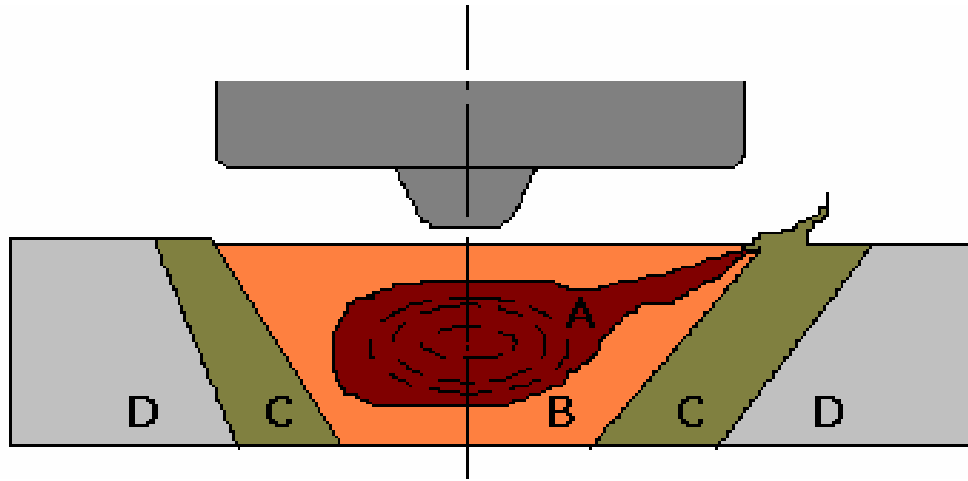
Sürtünme Karıştırma Kaynağı yönteminin uygulanmasında ergime oluşmadığından alüminyum, bakır ve NiAl bronzu alaşımları kaynağında koruyucu bir gaz kullanma gereği yoktur, buna karşın çok yüksek sıcaklıklarda kaynağı yapılan demir nikel esaslı alaşımlara uygulamada seramik ya da refrakter malzemeden yapılmış pimi oksidasyondan korumak için argon gazı koruyucu gaz olarak kullanılabilir. Bunun yansira titanyum ve titanyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile kaynağında da sıcaklığı yüksek olan kaynak metaline havadan geçen ve bağlantının mukavemetini etkileyen arayer elementleri olan azot ve karbon kapmasını ve çökelmelerden gelen kirliliğini önlemek amacı ile argon gazı kamarası içinde sürekli koruyucu gaz beslenerek işlem gerçekleştirilir.

4.2 Kaynağın Metalurjik Yapısı

Sürtünme karıştırma kaynağı, ergime derecesinin altında birleştirmeler üreten bir katıhal kaynak yöntemidir. Bu yöntemde ısıdan etkilenen bölge, ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık oluşmadığından, oldukça dardır. Kaynak dikişinden esas metale doğru bu bölgeler sıralanırsa, bunlar sırasıyla;

- dinamik olarak yeniden kristallesen bölge(DKB)
- termomekanik etkilenen bölge (TEB)
- ısıdan etkilenen bölge (IEB)
- esas malzemedan

oluşmaktadır. Şekil 4. 4’de sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımının mikro yapısındaki farklı bölgeler görülmektedir.[10]



Şekil 4. 4 Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımının mikroyapısı. A: Dinamik olarak yeniden kristallesen bölge (DKB), B: Termomekanik etkilenen bölge (TEB) C:, Isıdan etkilenen bölge(IEB), D: Esas malzeme.

4.2.1 Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)

Yoğun plastik deformasyonun olduğu ve yüksek sürtünme sıcaklıklarının meydana geldiği bu bölge “dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge” veya “kaynak merkezi” olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgede dislokasyon yoğunluğu daha düşüktür ve daha ince yönlenmiş tanelerden oluşmaktadır. Benzer tipteki alaşımların bazı FSW uygulamalarında bu bölge soğan halkalarından oluşan bir havuzu andırmaktadır. Benzer olmayan alüminyum alaşımlarında ise bölge, daha düzensiz ve karmaşık bir görünüm sergilemektedir.



Şekil 4. 5 AA 7075 çiftinin kaynak sonrası mikro yapısal bölgeleri

4.2.2 Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB)

Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge ile ısıdan etkilenen bölge arasında, yüksek deformasyon ve sıcaklığa maruz kalan bölgeyi temsil etmektedir. Ana metalin tanelerinin kaynak merkezinden bu bölgeye ekstrüze edilmesiyle, yoğun bir dövme olayı meydana gelmektedir. Karıştırma esnasında oluşan ısı, bu bölgenin mikro yapı ve mekanik özelliklerini değiştirir. Bunun sonucunda deformasyona uğrayan taneler, uzamış ve yassılaştırmış taneler haline gelmektedir

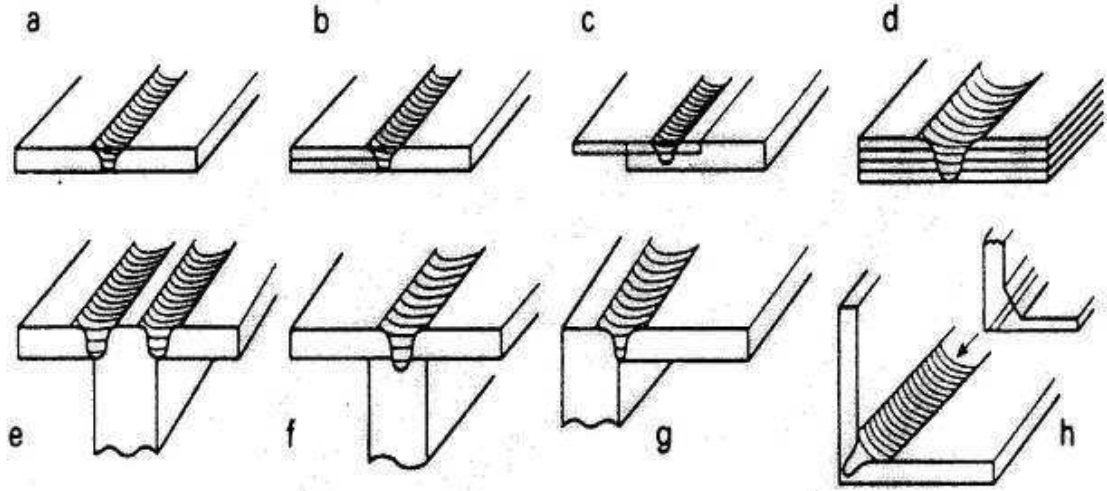
4.2.3 Isıdan Etkilenen Bölge (IEB)

Kaynak metaline daha yakın, ısıdan etkilenmeyen ana metale komşu olan bölgedir. Bu bölgedeki malzeme karıştırma esnasında meydana gelen ısıdan etkilenir ve malzemenin yapı ve özelliklerinde kısmi değişimler ortaya çıkar. Bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmez. Çökelme sertleşmesi ısı işlemi uygulanan bazı alüminyum alaşımlarında bu bölgenin sıcaklığı 250 C'yi geçmediği takdirde taneler, esas malzemenin özelliklerini göstermektedir. Fakat 250 C aşıldığı zaman bu bölgede tane irileşmesi ve tane sınırlarında çökelti meydana gelmektedir.

4.3 Kaynak Emniyeti

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde en önemli konu, yüksek kaynak kalitesi ve güvenilirliğidir. Kaynak operasyonu hassastır ve oluşacak hatalar mekanik olarak saptanabildiği için daha duyarlıdır. Bu bağlamda, kaynak parametrelerinin seçimi çok önemli olmaktadır. Kaynak parametreleri; kaynak dikiş kalitesine, metal alaşımın

türüne, parça boyutlarına, çevresel mil hızına bağlıdır. Bunun yanında ortam şartları da kaynağa etki eden bir faktördür.[11]



Şekil 4. 6 Sürtünme Karıştırma Kaynağı 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

4.4 Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Avantajları

- Kaynak operasyonu, enerji tasarrufu sağlayan basit bir işlemdir.
- Farklı özelliklerdeki malzemelerin birbirleri ile birleştirilmesine uygundur. Ergitme kaynağı ile birleştirilemeyen malzemeler ve kompozitler bu teknik ile kolaylıkla birleştirilirler.
- Uygun kaynak parametreleri ve karıştırıcı uç kullanıldığı takdirde güvenilir ve sağlam bir birleştirme elde etmek mümkündür. Ergitme tekniği ile birleştirilen malzemelerin mukavemet değerleri ile karşılaştırıldığında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçaların yorulma, çekme ve eğme mukavemetlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Birleştirme işlemi malzemenin ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklıktaki katı faz aşamasında gerçekleştirildiğinden, ergitme kaynağı ile birleştirilmesi zor olan 2000 ve 7000 serili alüminyum alaşımlarının birleştirilmesine uygun bir tekniktir.

- Kaliteli bir karıştırıcı ucun kullanılması ile 100 m uzunluğuna kadar alüminyum levhaların hatasız birleştirilmesi ile panel haline getirilmeleri mümkün olmaktadır.
- Alüminyum alaşımlarının yüzeyinde bulunan ince oksit tabakasını temizlemeden birleştirme yapılabilir.
- Katı hal birleştirme tekniği olan sürtünme karıştırma tekniği ile alüminyum alaşımlarını birleştirmede, sıvılaşma ve katılaşma çatlakları oluşmaz.
- Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde plastik deformasyon sayesinde, ana metale göre kaynak metalinde daha ince taneli bir yapı ve yeniden kristalleşme meydana gelir.
- Kaynak metali içerisinde buharlaşma olmadığı için alaşım elementi kaybı olmaz. Dolayısıyla malzemenin alaşım içeriği aynı kalır.
- Kaynak dikişi sonunda eğer otomatik karıştırma aparatı kullanılırsa anahtar deliği hatası oluşmamaktadır.
- İnsan sağlığına zararlı kaynak dumanı ve radyasyonun olumsuzlukları ile karşılaşılmaz.
- Ergitme kaynağında görülen ergiyik metal sıçrama problemi ve ark oluşumu yoktur.
- Kaynak dikişi uzun olsa bile, oldukça az malzeme çarpılması meydana gelir.
- Otomatik karıştırma aparatı sayesinde değişik kalınlıklardaki malzemelerin tek bir karıştırma aparatı kullanılarak birleştirilmesi mümkündür.
- Kaynak metalinde gözenek oluşumu problemi ile karşılaşılmaz.
- Tüm kaynak pozisyonlarına uygundur.
- Enerji tasarrufu sağlar.
- Ergiyen ilave metal kullanmaya gerek yoktur.
- Koruyucu gaz kullanımına gerek duyulmaz.
- El kabiliyeti iyi olan usta kaynakçıya gerek duyulmaz.

- Kaynak dikiş kenarında oluşabilecek çapakları temizlemek haricinde, taşlama ve fırçalamaya gerek yoktur.
- Yüksek kaynak enerjisine sahiptir. 3 KW'lık toplam güçle 6XXX alaşımında 12,5 mm derinliğinde kaynak yapılabilir.
- Özel profilden bağlantı kenarları önemsizdir.
- İdeal olarak teknik otomasyona uygundur.
- Al alaşımları durumunda, çatlamaya duyarlılıklarından dolayı ergitme kaynağı yapılamayan alaşımlar kaynak yapılabilir.
- Farklı yapıdaki malzemelerin kaynağını mümkün kılar.
- Normalde pratikte mümkün olmayan veya çıkarma veya dökümde maliyeti arttıran uzun, geniş, hac şeklinde, kutu şeklinde ve üretimden geldiği şekildeki gibi birçok bileşimin kaynağı mümkündür.
- 15-50 mm kalınlıkları arasındaki, parçalar istenirse her iki taraftan da kaynak yapılabilir.
- Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek yoktur.
- Ağızlarda ergime oluşmaz dolayısı ile IEB hemen hemen yoktur.
- Sıcrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir.
- Kaynak, ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme yoktur.
- Verimi yüksektir.
- Çok az bakım ister.
- Kaynaktan hemen sonra oksit tabakasının kaldırılmasına gerek yoktur.
- Ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmede çatlama hassasiyeti yüksek olan alaşımlara rahatlıkla uygulanabilir.
- Yüksek bağlantı mukavemetleri ısıtılarak elde edilir.
- Katı-faz kaynağı oluşumu alaşımın metalurjik özelliklerini saklamasına olanak tanır.

- Farklı koşullarda metaller birleştirilebilir.
- Ekstrüzyon ürünü veya döküm olan çoğu parçalar bu yöntemle kaynatılabilir.
- Işıksız, dumansız ve ozon oluşumu olmadan çevreye zararsız bir yöntemdir.

4.5 Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniğinin Dezavantajları

- Kaynak hızı ergitme kaynak yöntemlerine göre daha yavaştır. Örneğin; piyasada kullanılan makinelerle 5 mm kalınlığındaki 6000 serisi alüminyum alaşımı için maksimum 750 mm/dakikalık bir hızla çalışabilmektedir.
- Birleştirilecek parçalar oldukça düzgün sabitlenmelidir. Sabitleme işi için hidrolik baskı pabuçları veya mengeneler kullanmak gerekir.
- Kaynak dikişi sonunda oluşan ve özellikle boru kaynaklarında problem olan anahtar deliği oluşur.
- Kaynak dikişi sonunda karıştırıcı ucun çıkarılmasıyla oluşan kaynak sonu anahtar deliği probleminin çözümü için kaynak dikişi sonuna ek parça yerleştirilir ve kaynak işlemi bu parça üzerinde bitirilir.

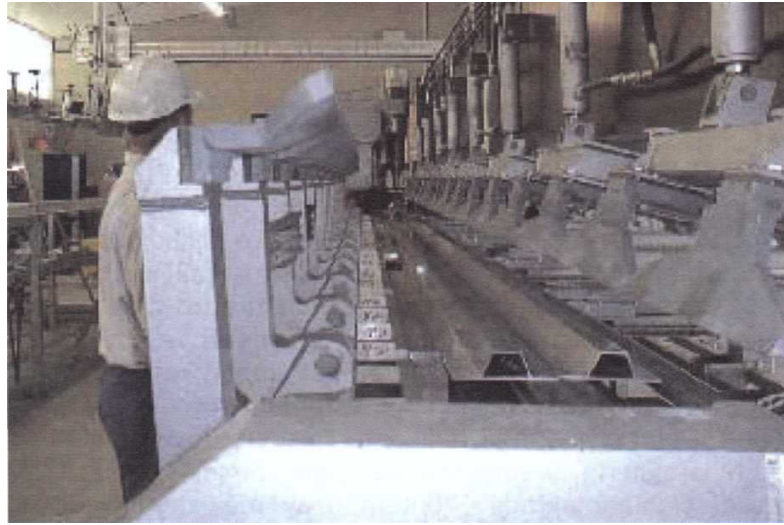
4.6 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulama Alanları

Sürtünme karıştırma kaynağı ilk bulunduğu yılları takiben özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının levha, ekstrüzyon ürünlerin, döküm alüminyum parçaların yaygın kullanıldığı endüstri alanlarında kullanıma girmiştir. Bu endüstri alanlarının başında gemi yapım, raylı taşıt yapım, havacılık ve uzay, zırhlı yapım endüstrileri gelmektedir. İlerleyen uygulamalarda otomotiv endüstrisi, kimya ve petro kimya endüstrileri, nükleer endüstri alanlarında kullanılan bazı parçaların ve ekipmanların üretimi bu yöntemin kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Yumuşak metal ve alaşımlarının kullanıldığı bu endüstrilerde takım aşınması olmaksızın binlerce metre kaynak dikişi gerçekleştirilmiştir. Gıda endüstrisinde kullanılan alüminyum derin dondurucular, derin dondurucu panelleri, yük güç elektroniğinde alüminyum soğutucular, elektrik motorlarının alüminyum gövdeleri, ses sistemlerindeki kolonlar, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak üretilmektedirler.

Yöntemin kullanıma girdiği endüstri alanları ve bu yöntemin kullanımı ile üretilen parçalardan örnekler aşağıda sırasıyla ele alınmaktadır.

4.6.1 Gemi Yapım Endüstrisi

Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminin en büyük üstünlüklerinden biri olan çarpılma oluşmayan güvenilir uzun ve doğrusal kaynakların yapılabilmesi ilk endüstriyel uygulamaların 1995'lerde İsveç ve Norveç gemi yapım endüstrilerinde kullanılan alüminyum alaşımlarından yapılmış levhaların ve ekstrüzyon ürünlerinin birbirlerine birleştirilmesinde olmuştur. Yöntemin tamamen mekanizasyona dayalı olması ile seri üretimde hız artarak daha ekonomik deniz taşıtlarının yapımı olanaklı duruma gelmiştir. Deniz taşıtlarında kullanılan alüminyum alaşımlarından yapılmış levha paneller, hafif içi boş olarak üretilen ekstrüzyon ürünü panellerin kullanıldığı güverteler, derin dondurucu panelleri, depolama tanklarının ara bölmeleri, tavan ve taban elemanları karmaşık eğrisel kaynaklar içermediğinden yöntemin ilk ticari uygulamaları olarak üretilmişlerdir.



Şekil 4. 7 Gemi yapımında kullanılan alüminyum ekstrüzyon ürünlerinin FSW yöntemi ile üretilen panelleri

Yöntem yolcu gemilerinde kullanılan hafif yapıların üretiminde de çığır açmış ve zaman içinde yolcu gemileri ve katamaran türü hızlı feribotların, hava yastıklı hovercraft türü feribotların yapımında da kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 4. 8 Hyro Marine Alüminyum tarafından üretilmiş "The World" yolcu gemisine ait güverte panelleri



Şekil 4. 9 FSW yöntemi ile üretilmiş güverte panellerine sahip Fosen Mek tarafından yapılmış "The World" yolcu gemisi

Avustralya ve Yeni Zellanda karasularında devriye gezen karakol teknelerinin yapımında büyük ölçüde FSW yönteminin kullanıldığı ve uygulamaların sivil amaçlı yolcu gemilerinin yapımına doğru genişlediği görülmektedir.



Şekil 4. 10 Avustralya ve Yeni Zelanda askeri tersanelerinde üretilen FSW kaynaklı 55 m boyundaki karakol gemisi

4.6.2 Raylı Taşıt Endüstrisi

Almanya'da 1998 yılı Haziran ayında ve İngiltere'de 1999 yılı Ekim ayındaki hızlı yolcu treni kazalarında, trenlerde kullanılan yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının kullanıldığı ve ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak edilerek üretilen enine kaynaklı panellerin kaynak bölgelerinde özellikle ITAB'larda mukavemet kaybının olduğu bunun da çarpışma sırasında katlanma problemleri yarattığı ve emniyeti azalttığı bilirkişi raporları ile belirtilmiştir. Bu olaylar trenlerde ergitme oluşturmaksızın kaynak edilmeyi sağlayacak kaynak yöntemlerinin kullanılması dolayısı ile FSW yöntemini ön plana çıkarmıştır.

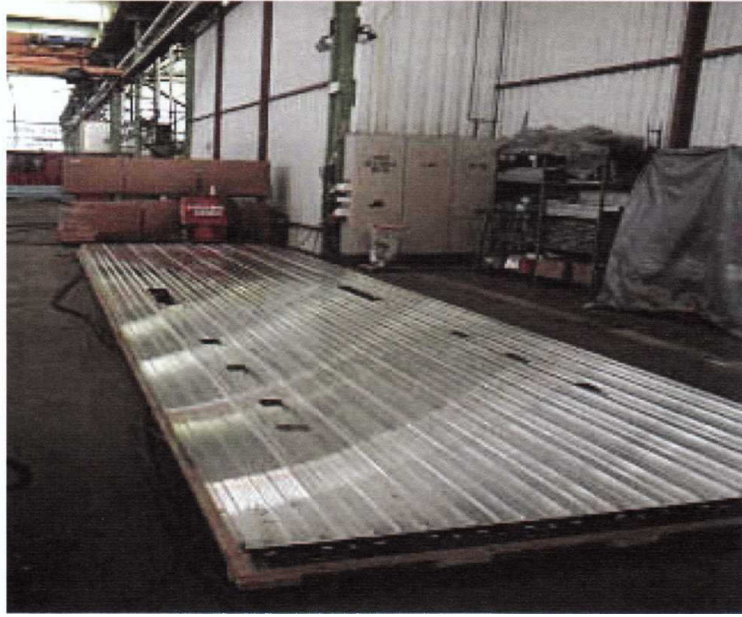
Zaten modern hızlı yolcu trenlerinde alüminyum ekstrüzyonlardan kaynaklı olarak üretilen petek yapılı paneller kullanılmaktadır. Ancak, kullanılan kaynak yöntemleri ergitme esaslı olduklarından ısı girdisi nedeni ile alüminyumun fiziksel özelliklerine bağlı olarak çarpılmalar oluşmakta dolayısı ile tren vagonu boyunca uzanabilen çok uzun boylu paneller yerine daha kısa paneller yan yana getirilip kaynak edilerek enine yapı oluşturulmaktadır. Bu durumda çarpışmalarda katlanmaya neden olmaktadır. Buna karşın FSW yöntemi ile ergitme oluşturmaksızın açılabilir ve tüm vagon boyunu oluşturacak uzun panel yapılar oluşturmak olanağı vardır. Bu durum alüminyum alaşımı panellerin kullanıldığı vagon üreticilerini bu yöntemi kullanmaya yönlendirmiştir.

Bu açıdan günümüzde Japonya, Almanya ve İngiltere'de hem metro ve banliyö trenlerinde hem de yüksek hızlı yolcu trenlerinde kullanılan alüminyum profillerden üretilen boylamasına panellerin kaynak işlemlerinde sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 4. 11 Londra metrosunda kullanılan ve FSW yöntemi ile kaynak edilmiş paneller Avrupa'da da tren lokomotif ve vagonlarının yapımında 1997'den bu yana tek duvarlı alüminyum tavan panelleri kullanılmaktadır. Bu trenlerde 2001 yılından bu yana yan duvarlar da FSW yöntemi ile kaynak edilmiş panellerin kullanıldığı modeller üretilmektedir. İskandinav ülkelerindeki fabrikalarda kaynak edilerek Almanya ve Danimarka'da kullanıma giren bu trenler ile ilgili uygulamalar Şekil 4. 12'de gösterilmiştir.

İngiltere'de çeşitli tür trenler üreten bir kuruluş daha önce MIG kaynak yöntemi ile üretimini yapmakta olduğu alüminyum panellerde sürtünme karıştırma kaynağı yöntemine uygun tasarımlar geliştirmiş ve daha önce MIG kaynaklı olarak üretilen araç şasilerinin bulunduğu alt bölümü tasarlanmakta olan çok kafalı FSW makinası ile üretmeyi planlayarak üretime başlamıştır.



Şekil 4. 12 Danimarka demiryolları için üretilmiş FSW yöntemi ile kaynak edilmiş alüminyum paneller kullanılan tren ve İskandinav ülkelerindeki fabrikalarda üretilerek Almanya'ya gönderilen paneller

4.6.3 Otomotiv Endüstrisi

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin otomotiv endüstrisindeki ilk uygulamaları yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının kullanıldığı otomobil jantlarının üretilmesi üzerine olmuştur. Bu amaç ile gerek Avrupa'da gerekse de Japonya'da bulunan kuruluşlar yöntemi uygulamaya almış ve seri üretime geçmişlerdir.



Şekil 4.13 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş yüzey

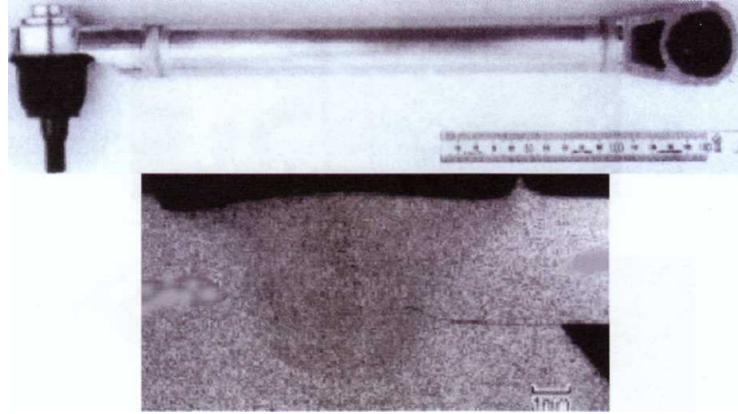


Şekil 4. 14 FSW yöntemi uygulanarak üretilmiş otomobil jantları

Gövde ağırlığını azaltarak yakıt tasarrufu sağlamaya dönük olarak alüminyum alaşımı saclardan üretilen otomobil gövde uygulamalarının yanı sıra spor otomobillerde de alüminyum sacların kullanıldığı gövde, şasi ve kapıların üretiminde FSW yönteminin kullanılabilirliği görülerek bu konudaki ilk uygulamalar gerektiğinde farklı alüminyum alaşımlarının biraraya getirilerek birleştirildiği alüminyum otomobil kapılarının üretiminin yapılmasına olanak sağlamıştır. Dolayısı ile otomotiv endüstrisindeki ikinci sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları da otomobil kapılarının üretime dönük olarak gerçekleştirilmiştir, bu uygulama yolcu oturma yerlerinin yani otomobil

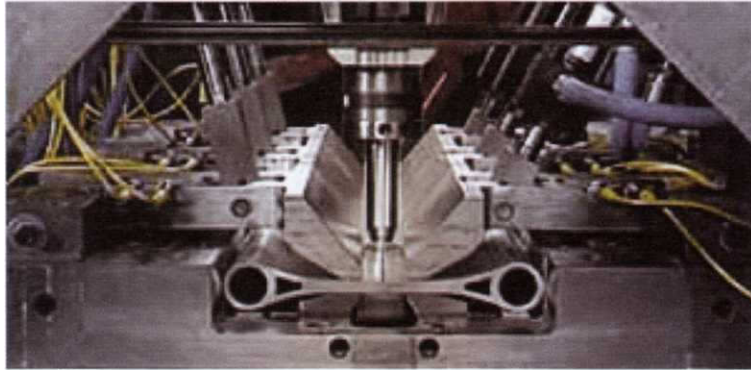
tabanının da bu yöntem ile üretilmesi yönünde genişlemiş olup çeşitli Avrupa otomobil üretici kuruluşlarında halen bu tür seri üretimler süregelmektedir.

Alüminyum gövdeli otomobillerde FSW uygulamaları süspansiyon elemanlarının üretiminde de kullanılmaktadır.



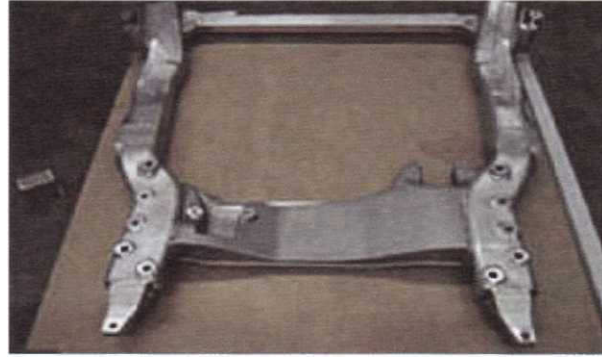
Şekil 4. 15 FSW yöntemi ile kaynak edilmiş otomobil süspansiyon elemanı

Yöntem diğer otomobil parçalarının da üretiminde kullanılmaya başlanmıştır.



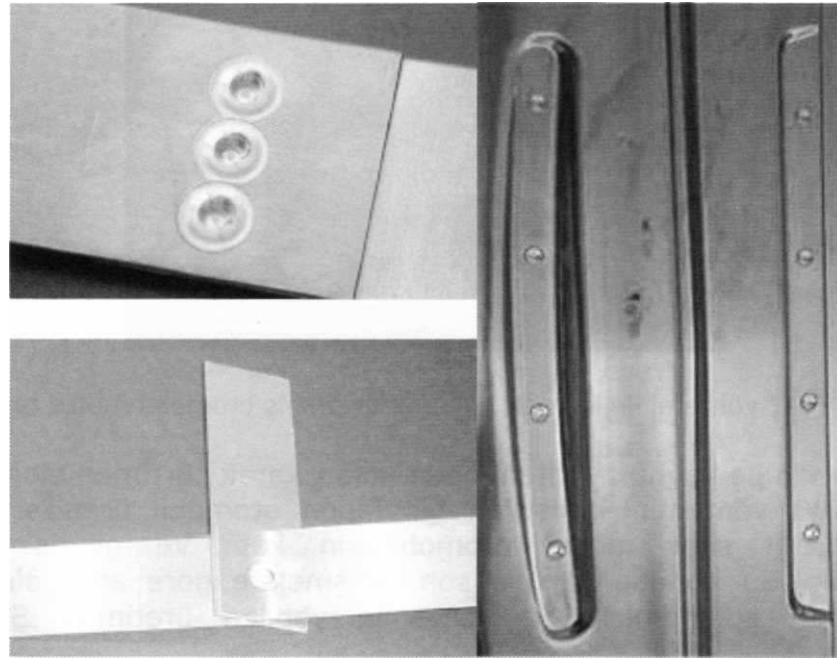
Şekil 4. 16 Otomobil süspansiyon parçalarının FSW yöntemi ile kaynak edilmesi

Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile otomobillerde kullanılan şasi parçalarının da üretimi rahatlıkla yapılabilmektedir.



Şekil 4. 17 FSW yöntemi ile kaynak edilerek üretilmiş otomobil motor taşıyıcı eleman

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminden yola çıkarak sürtünen eleman ile nokta kaynak (FSSW) yöntemini geliştiren bir Japon otomobil üreticisi bu yöntemi üretimini yaptığı spor model otomobillerin kapı ve gövde panellerinde kullanmaktadır. Bu konuda yapılan son gelişmelere göre artık alışılmış FSSW yöntemi olarak adlandırılan bu yöntemle yapılan üretimler Şekil 4.18'de görülmektedir.



Şekil 4. 18 Alışılmış FSSW yöntemi ile oluşturulmuş numuneler ve bir otomobil gövde parçası

4.6.4 Zırhlı Taşıt Endüstrisi

FSW yöntemi ayrıca; zırhlı taşıt yapımında da uygulama alanı bulmaktadır, bu amaçla korozyona dirençli 2XXX, 5XXX ve 7XXX serisi paslanmaz alüminyum alaşımlarının kullanıldığı zırhlı personel taşıma araçlarının alt ve yan panellerinin birbirine kaynağı

yapılmaktadır. Bu konuda Amerika'da gerçekleştirilmiş projeler sonucunda bu yöntem ile oluşturulmuş kaynak bağlantıları balistik deneyleri geçmiş ve bu tür taşıtların seri üretimine geçilmiştir. Ülkemizde de Ankara'da faaliyet gösteren ve zırhlı personel taşıyıcı üreten bir kuruluşumuz da bu yöntemin kendi üretmekte olduğu araçlara uygulanması üzerine çalışmalar yürütülmektedir.



Şekil 4. 19 Ülkemizde FSW yöntemi kullanılarak üretimi planlanan zırhlı personel taşıyıcı

4.6.5 Havacılık ve Uzay Endüstrisi

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı havacılık teknolojilerinde sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin kullanımı özellikle bu teknoloji alanlarında kullanımda olan perçinleme ve yapıştırma bağlantılarının yerine daha hızlı ve tasarruflu olan bu yöntemin kullanımını gündeme getirmiştir. Özellikle, bazı uçaklarda alüminyum alaşımı parçalara uygulanan ergitme esaslı kaynak yöntemlerinin getirdiği problemler bu katı faz kaynak yönteminin kullanımı ile ortadan kalkmaktadır.

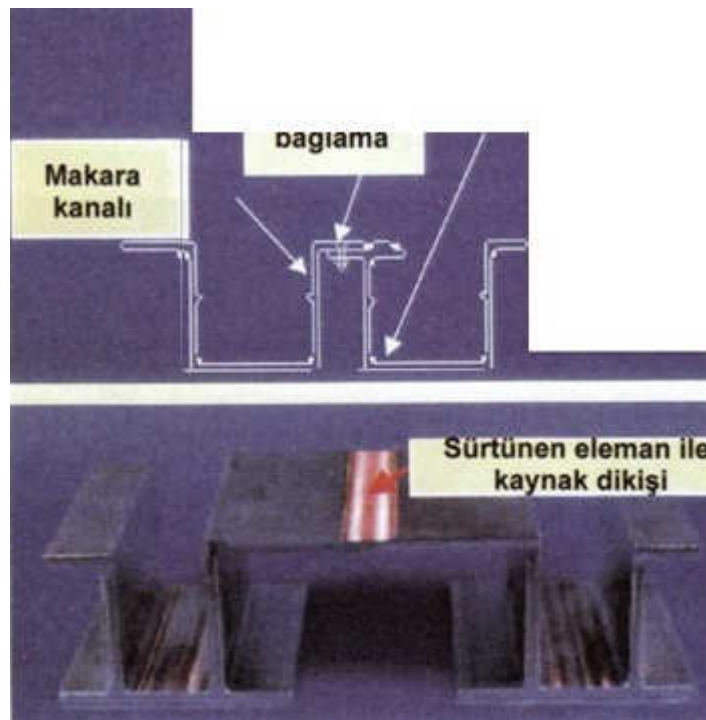
Uçak üreticisi kuruluşlar tarafından büyük bir ilgi ile uygulamaya alınan bu yöntem ile öncelikle Airbus ve Boeing kuruluşları uçaklarda kullanılan iniş takımlarının kapaklarında ilk yöntem uygulamalarını yaptıktan ve başarılı sonuçlar alındıktan sonra ana parçaların üretimine geçmişlerdir. Günümüzde yolcu uçaklarında kullanılan gövde ve kanat parçalarının üretimi sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile gerçekleştirilir duruma gelmiştir.

Airbus 380 serisi uçaklarda gövdeyi oluşturan bölmelerdeki alüminyum panellerin uzunlamasına ve çevresel kaynak dikişleri sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile

gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, aynı seri uçakların kanatlarında kullanılan panellerin kaynağında da sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılmaktadır.

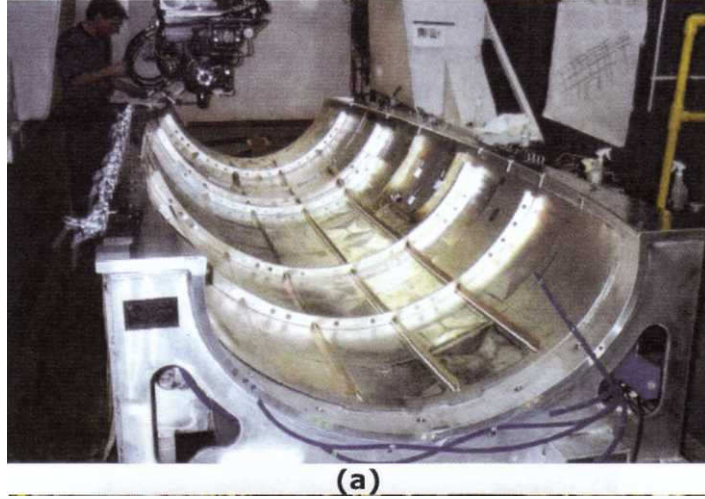
Yöntem zaman içinde kargo uçaklarının özel tasarlanmış alüminyum alaşımlarından yapılmış zemin sistemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır

FSW yöntemi kullanılarak üretilen savaş uçaklarının gövde ve kanatlarında kullanılması yönünde deneyler de yapılmaktadır. Başarılı olduğu bildirilen bu deneyler sonrasında sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi savaş uçağı üretim teknolojilerine hızla girecek bir konuma geleceğı belirtilmektedir.

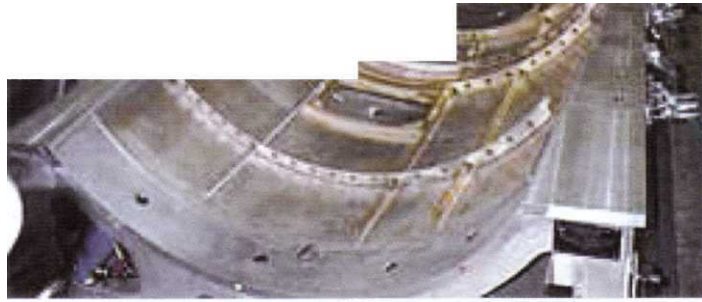


Şekil 4. 20 C-17 kargo uçağının rampa zemin döşemesindeki özel yapının sürtünme karıştırma kaynağı

Amerika'da küçük tip yolcu uçakları üreten bir sivil havacılık kuruluşu sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile kaynaklı gövdeye sahip ilk uçağın üretimini başarı ile gerçekleştirmiştir. Deneme uçuşlarının başarılı olması sonucunda Sivil Havacılık Kurumu'nca uçuş sertifikası alınarak 2003 yılından itibaren seri uçak üretimine geçilmiştir.



(a)



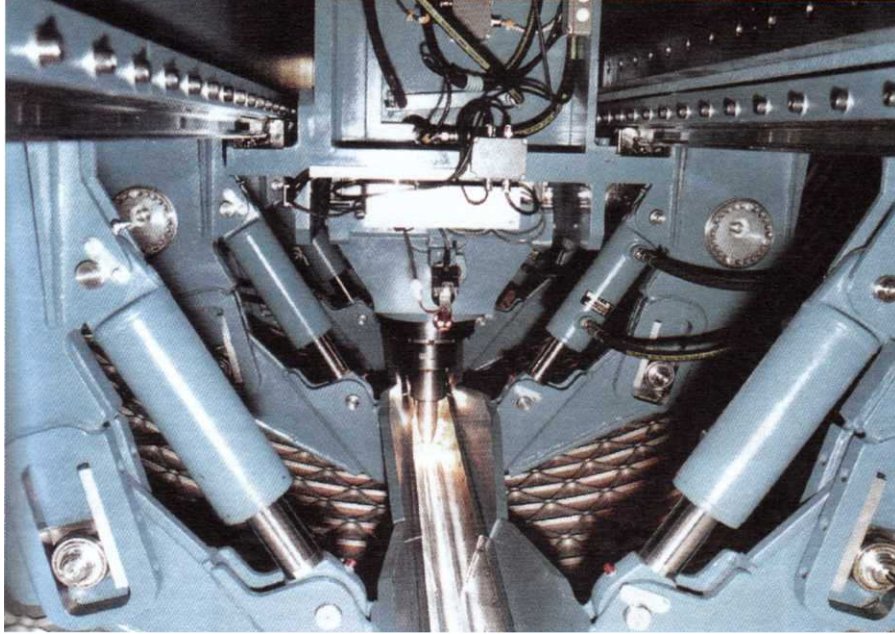
(b)

Şekil 4. 21 Küçük tip yolcu uçağının gövde üretiminin gerçekleştirildiği FSW makinası ve parçaların bağlandığı aparatlar

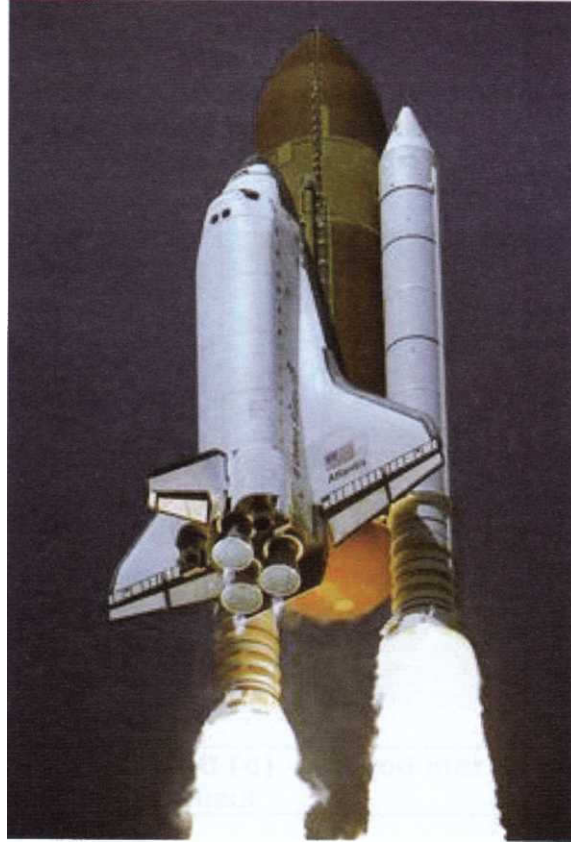
Alüminyum alaşımlarından yapılan roket yakıt tanklarının üretimine de giren FSW yöntemi, kaynak zamanının kısılmasını ve aynı zamanda daha güvenli tasarımların oluşturulmasını sağlamıştır. Yöntemin ilk uygulamalarının başarılı olduğunu gören NASA'nın talebi üzerine Boeing Delta II ve Delta III roketlerinin gövde ve yakıt tanklarının kaynağında FSW yöntemini kullanarak üretim yapmaya başlamıştır.



Şekil 4. 22 TWI tarafından İngiltere'de FSW yöntemi kullanılarak üretilen ilk roket yakıt tankı



Şekil 4. 23 Boeing tarafından tasarlanan makinada FSW yönteminin kullanımı ile yakıt tanklarının boyuna kaynağı



Şekil 4. 24 Uzay mekiklerinin roketlerinin FSW yöntemi kullanılarak üretilmiş yakıt tankı

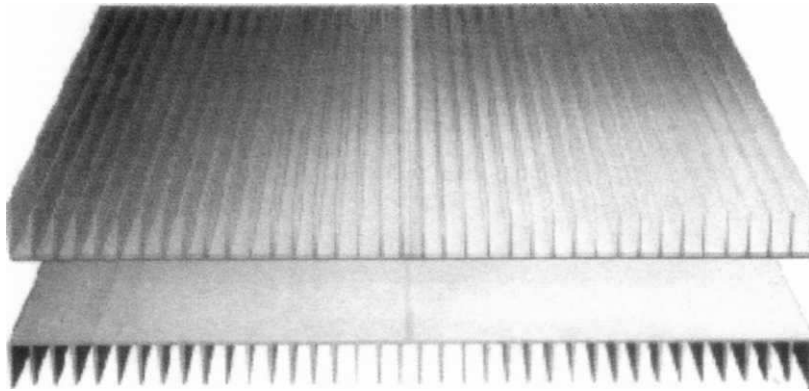


Şekil 4. 25 NASA için FSW yöntemi ile üretilen uzay aracı roket gövde ve yakıt tanklarının üretiminde kullanılan sistemler

4.6.6 Diğer Endüstrilerdeki Uygulamalar

Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi zaman içinde alüminyum alaşımlarından üretilmiş elektronik parçalarında kaynaklı üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Hoperlör gövdeleri ve elektronik aletlerdeki çeşitli alüminyum parçaların kaynağında kullanılmaktadır.

Radyatörlerde, soğutucularda ve ısı değiştiricilerde kullanılan alüminyum plakaların üretimine de giren FSW yöntemi nükleer reaktörlerde kullanılan kaynaklı tankların ve ekipman parçalarının da üretiminde kullanılmaktadır.



Şekil 4. 26 FSW yöntemi ile kaynaklı üretilmiş soğutucu plakalar

Nükleer endüstrisinde kullanılan yüksek seviyede radyoaktivite içeren atıkların depolanmasında kullanılan bakır zırhlı elemanlar ile derine gömülmede kullanılan depolama tanklarının üretiminde de FSW yöntemi ile kaynak edilmiş elemanlar kullanılmaktadır.

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin ticari kullanımları günümüzde sınırlı olsa da, ileriye dönük olarak çeliklerin birçok türüne, titanyum ve titanyum alaşımlarına, bakır ve bakır alaşımlarına, nikel ve nikel alaşımlarına, magnezyum ve magnezyum alaşımlarına ve hatta başka birçok metal ve alaşımına uygulanması üzerine çalışmalar süregelmektedir. Gelecekte robotik FSW makinalarının daha da geliştirilmesi ile birçok endüstri alanında seri üretimde kullanılarak getireceği bir dizi üstünlükten yararlanılacaktır.

4.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Donanımı

Tüm kaynak yöntemlerinde olduğu gibi sürtünme karıştırma kaynağında da özel bir kaynak donanımına ihtiyaç vardır. En genel anlamda freze tezgahına benzer bir yapısı vardır.

Sürtünme karıştırma kaynağı donanımı şu kısımlardan oluşur:

- Gerekli kaynak değişkenlerini sağlayan düzeneklere sahip kaynak makinası
- Uç kısmında çeşitli biçimlerde pim bulunduran omuzlu takım
- Parça bağlama tertibatı
- Kumanda ve kontrol donanımı
- Mekanize ve otomatik kaynak için yardımcı donanımlar.

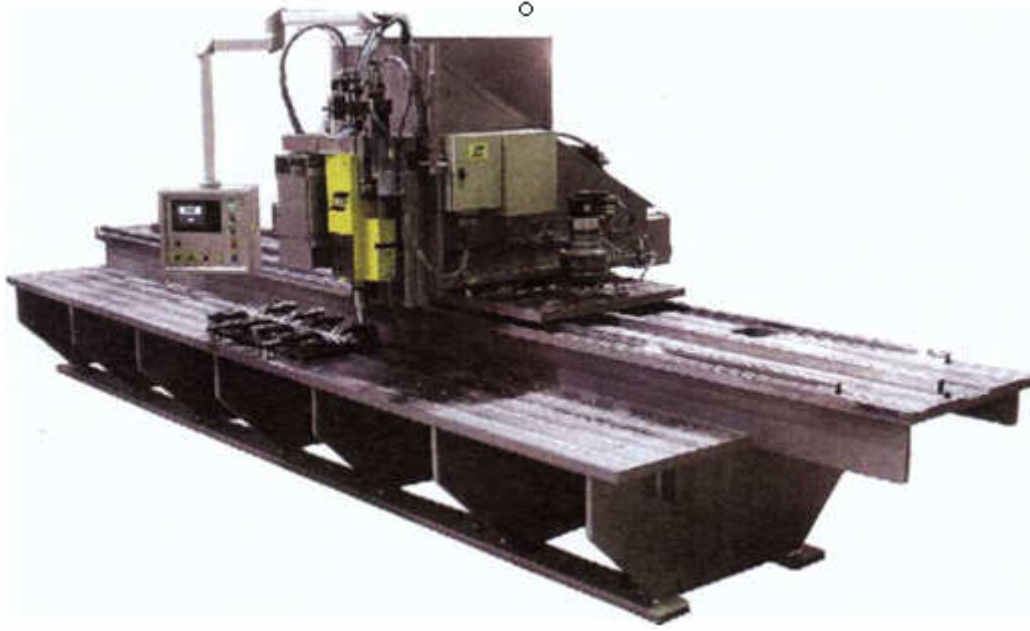
4.7.1 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Makinaları

Alışılmış sürtünme karıştırma kaynağı makinalarının ilk kullanılan türlerinde, konsollu dik freze tezgahlarına benzer şekilde ana milin düşey konumda belirli bir devirde dönmesi istenir. Bu tür alışılmış dik freze tezgahlarında (Şekil 4.27) sabit bir devirde dönen ve takım bağlanan ana mil aşağıya doğru hareket etmez; buna karşın parçanın bağlandığı tabla x,y,z koordinat eksenlerinde hareket ederek parçanın yukarıya hareketi, takım omuzunun parça yüzeyine değecek konuma gelmesi ve tablanın doğrusal hareketi ile birleştirilecek ağızlar boyunca hareket sağlanarak parça kaynak hızında ilerletilir ve kaynak işlemi gerçekleştirilir. Ancak, bu tür tezgahların FSW makinası olarak kullanımında düşük basma kuvvetlerinde ve düşük devirler ile yavaş kaynak hızlarında kaynaklı parçalar üretilebilirse de yöntemin ekonomik olarak üretimde kullanılabilme olanağı yoktur. Bu tür makinalar bu yöntem uygulamaları için modifiye edilmemişlerse zamanla fazla yük binen yataklarda oluşan aşınmalar ile hassasiyetleri bozulur hatta ciddi arızalar gösterebilirler. Bu açıdan ince kesitli ve küçük boyutlu alüminyum alaşımlarının kaynağı için sınırlı olarak kullanılabilirler, üretimde kullanılmaları sakıncalıdır.



Şekil 4. 27 Avrupa'da sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları için lisans alınarak modifiye edilmiş FSW makinası

Buna karşın, daha ağır parçaların işlenmesi için geliştirilmiş olan sabit yataklı dik freze tezgahları sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları için daha uygun olmaktadır. Bu tezgahlarda iş tablası konsol üzerine monte edilmiştir. Dolayısı ile düşey doğrultuda hareket edemezler. Bunlarda, düşey doğrultuda hareket eden takım yani iş milinin ve tahrik motorunun üzerinde bulunduğu ünitedir. Bunlar çok güçlü motorlar ile donatılmışlardır. Bazı türlerinde, iş mili diğer konsollu tezgahlarda olduğu gibi yatay ve düşey doğrultuda yerleştirilmiş olabilir. Bu tür tezgahların da sürtünme karıştırma kaynağı uygulamaları için özel olarak modifiye edilmiş olmaları gerekmektedir, zira bu kaynak yönteminde sürekli olarak kullanılmaları olanağı yoktur. Kuvvetler fazla zorlamalar dolayısı ile makina yataklarının aşınmasına neden olur. İsveç'te özel olarak geliştirilmiş kalın ve büyük boyutlu levhaların kaynağında kullanılan sabit yataklı sürtünme karıştırma kaynağı makinası görülmektedir. Bu tür sürtünme karıştırma kaynağı makinalarına gerekli donanımlar eklenerek tabla ve bazı türlerde de takım hareketleri programlanabilen bilgisayar destekli sürtünme karıştırma kaynağı makinaları geliştirilmiştir.



Şekil 4. 28 Bir İsveç kuruluşu tarafından geliştirilmiş sabit yataklı sürtünme karıştırma kaynağı makinası

Sürtünme karıştırma kaynağı patent ve lisans hakları alınarak üretilen ilk sürtünme karıştırma kaynağı makinaları, bir yandan dünyanın çeşitli araştırma merkezleri laboratuvarlarında üretime dönük olarak yapılacak araştırmalarda kullanılmak için, bir yandan da üretim amaçlı olarak çeşitli ülkelerdeki kuruluşlarda devreye alınmaktadır. Özellikle gemi yapım, deniz üstü yapılar, uzay ve havacılık, otomotiv ve raylı taşıt endüstrilerinde kurulan bu makinalar zaman içinde daha da geliştirilerek sadece doğrusal değil çevresel dikişlerin oluşturulmasında, çelik boruların kaynağında, lazer ışını ile birlikte kullanılan hibrid kaynak uygulamalarında, sürtünen eleman ile nokta kaynağı uygulamalarında kullanılan robotlar şeklinde bir, iki, üç ve daha çok boyutlu uygulamalarda çok eksenli programlanabilir türler olarak üretilip devreye alınmaktadır.

Öncelikle, İsveç'te tasarlanan, üretilen ve ilki 1996 yılında kurulan SuperStir™ kaynak makinaları, gemi yapımında kullanılan alüminyum ekstrüzyon elemanlarının kaynağını yapmak üzere Hydro Marine Aluminium'da kullanılmıştır. SAPA, Airbus, NASA, Boeing, Lockheed Martin, Hitachi- Rail, Ford, gibi diğer birçok uygulamalarda ve de yapı endüstrisinde kullanılacak makinaların geliştirilme aşamalarında oldukları bilinmektedir.

Hızlı feribotların alüminyum profil panellerinin tümünü üretmek amacı ile ilk olarak Hydro Marine Aluminium'a kurulan sürtünme karıştırma kaynağı makinası maks. 16 x 6 m boyutlarındaki elemanların üretimi için kullanılmaktadır. Bu tesiste daha sonraları turistik amaçlı kullanılan yolcu gemilerinin alüminyum güverte üstü panellerinin tümünün üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu panellerin üretimine günümüzde de devam edilmekte olup, hem Hydro Marine Aluminium hem de SAPA'da 1999 yılında kurulan sürtünme karıştırma kaynağı makinaları kullanılmaktadır. Düz ve çok az çarpılma oluşan, doğrusallığı düzgün panellerin verimli bir şekilde üretilmesi en büyük üstünlüğü sunmaktadır.

Danimarka DanStir ApS için geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı makinası, 3x5x0.6 m çalışma alanına sahip olup 5x10 m boyutlarındaki iş parçalarının 1,450 mm yüksekliğe kadar kaynağında kullanılmak amacı ile üretilmiştir. Bu makina hem araştırma geliştirme amaçlı hem de ön üretimlerin kaynak deneylerinde kullanılmaktadır. Ağır çalışma koşullarına uygun kaynak kafası ve 3 boyutlu kaynak kontrol sistemi ile donatılmış olup 2001 yılından bu yana hizmet vermektedir.

Geniş boyutlu parçaları kaynak etmek üzere tasarlanan ilk modüler sürtünme karıştırma kaynağı makinası 1996 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü(TWI) tarafından üretilerek devreye alınmıştır. Maksimum 3,4 m uzunluğunda 4 m genişliğinde ve 3 ile 15 mm kalınlıklardaki alüminyum levhaları 120 cm/dak kaynak hızında kaynak edecek şekilde tasarlanan bu makinanın maksimum çalışma yüksekliği 1,15 m'dir.

Ayrıca, 5 ile 50 mm' lik alüminyum levhaları tek taraftan tek paso ile 10-100 mm kalınlıklardaki alüminyum levhaları çift taraftan çift paso ile 5 mm kalınlığındaki titanyum parçaları tek taraftan tek paso ile kaynak edebilecek kapasitede, 22 kW gücünde, 100 cm/dak kaynak hızında kaynak yapabilecek ağır hizmet amaçlı sürtünme karıştırma kaynağı makinası da yine İngiliz Kaynak Enstitüsü(TWI) laboratuvarlarında kurularak yöntem üzerindeki endüstriyel araştırmalara hız verilmiştir.



Şekil 4. 29 Bir İsveç kuruluşu tarafından geliştirilmiş sabit yataklı sürtünme karıştırma kaynağı makinası

Dünyadaki en büyük sürtünme karıştırma kaynağı makinaları olan 130 kW ana mil gücünde 12 adet programlanabilir eksene sahip, 150 kN (15 ton) maksimum basınç sağlayan, 6x3 m'nin üzerinde çalışma alanlı yüksek güçlü ve çok eksenli iki farklı kuruluş tarafından üretilen sürtünme karıştırma kaynağı makinaları da İngiliz Kaynak Enstitüsü(TWI) laboratuvarlarında kurulmuş ve halen kullanılmaktadır. Bu makinalar 3 boyutlu kaynak kapasitesinde olup karmaşık şekilli parçaları hem yukarıdan hem de aşağıdan takım hareketi sağlayarak çift taraftan üst ve alttan iki pasoyu aynı anda yapabilmektedir. Bu sayede 100mm'ye kadar kalınlıklar tek paso geçişinde tamamlanabilmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynağı makinaları üretim ve kullanım lisansını İngiliz Kaynak Enstitüsü(TWI)'dan alan İsveç, Almanya, İngiltere, Avustralya, Amerika, Japonya, Çin gibi çeşitli ülkelerdeki kuruluşların üretim amacına uygun olarak birçok sürtünme karıştırma kaynağı makinasını geliştirmeyi ve ürün odaklı olarak kullanmayı başarmışlardır.

Bir diğer Amerikan kuruluşu Intelligent Stir Welding (ISTIR) olarak adlandırılan sürtünme karıştırma kaynağı makinalarının ISTIR PDS modelin, 1 mm'den daha ince ve 40 mm'ye kadar kalınlıkları rahatlıkla kaynak edebilen, birbirinden bağımsız üç eksenle

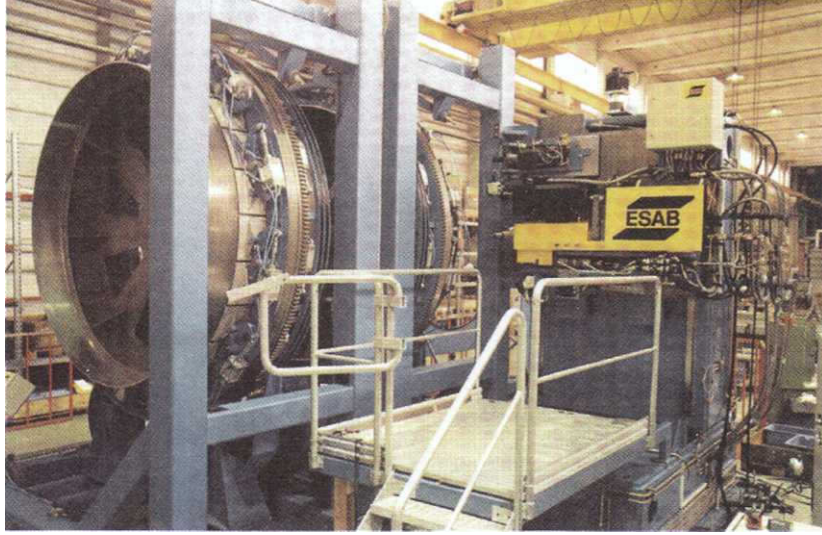
alışabilen tüm işlemelerin elektronik lme kontrollü olduğu ADAPT teknolojisi kullanan patentli makınayı hem araştırma hem de üretimde kullanılabilecek şekilde geliştirmiştir. Bu sürtünme karıştırma kaynağı makinası Amerika'da Güney Caroline niversitesi ve Kanada Ulusal Araştırma Konseyi laboratuvarlarında kurulmuş ve halen kullanımdadır (şekil 4.30)



şekil 4. 30 ISTIR PDS model sürtünme karıştırma kaynağı makinası

Yine aynı Amerikan kuruluşu tarafından yukarıda tanıtılan sürtünme karıştırma kaynağı makinasının daha küçük bir modeli ISTIR PDS Jr. adı ile pazara sunulmuştur. Küçük boyutlu parçalar üzerinde araştırma ve üretim amacı ile kullanılmaktadır. Ayrıca bu kuruluş, küçük boyutlu jet yolcu uçaklarının ince alüminyum gövde ve panellerinin üretimi amacı ile ISTIR 1.25 modelini geliştirmiş ve bu sürtünme karıştırma kaynağı makinası ile üretilen küçük jet uçakları uluslararası havacılık kurumu onayını almış ilk sürtünme karıştırma kaynağı ile üretime başlamıştır.

Uçak yapım ve havacılık teknolojilerine hızla giren sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi özellikle Boeing, NASA, Lockheed Martin tarafından kullanılmaya başlanmış ve gerek uçak gövdelerinin gerekse de uzay araçlarının itici gücünü sağlayan Delta II ve Delta IV roketlerinin gövde ve yakıt tanklarının yapımında kullanılan özel amaçlı sürtünme karıştırma kaynağı makinalarının geliştirilmesini sağlamıştır.



Şekil 4. 31 Roket yakıt depolarının çevresel kaynağı için geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı makinası



Şekil 4. 32 Lockheed Martin tarafından tasarlanan ve uzay roketlerinin silindirik uç kısımlarının kaynağı için geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı makinası eskiz görünümü

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin robotlar ile esnek üretim sistemlerine dönüştürülmesi, bu yöntemin uygulanmasındaki son teknolojik yeniliklerden bir tanesidir. Bu yenilik sayesinde her kaynak pozisyonunda karmaşık şekilli ve üç boyutlu birleştirmeler yapma olanağı vardır. Robotun çalışma alanına bağlı olarak 5m çapındaki bir alanda özel olarak yerleştirilmiş pozisyonerler büyük boyutlu elemanların kaynağı yapılabilir. Programlanabilir esnek robot sistemi üreticiye önemli sürtünme karıştırma kaynağı değişkenlerinin kolay ve gerekirse bilgisayar ekranına verilen kontrolünü sağlamaktadır.

Bu kaynak yöntemi ile daha önceden sürtünme karıştırma kaynak yönteminde yapılamayan çok yönlü kaynak yöntemine olanak sağlamaktadır. Karışık üç boyutlu kaynak yolu boyunca ve her türlü pozisyonda sürtünme karıştırma kaynağı bu yöntem ile yapılabilmektedir. [12]



Şekil 4. 33 Robotik sürtünme karıştırma kaynağı makinası

4.7.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminde Kullanılan Takımlar

Sürtünme karıştırma kaynağını etkileyen parametreler arasında en çok etkili olan parametrelerden biri de takım ve takım geometrisidir. Malzeme akışında ve ileri harekette takım önemli rol oynar.[29]

Sürtünme karıştırma kaynağı takımı, küçük çapta pin ve aynı merkezli olan daha büyük bir çapa sahip olan bir omuzdan oluşmaktadır. Takım parçaya indiğinde, pin parçaya temas eder ve parçanın kaynak yapılacak yerin ısınmasını sağlar. Omuz kısmı ise takım nüfuziyetinin ayarlanmasını ayarlamaktadır. [13]

Takım, bu yöntemin uygulanmasında iki önemli görevi yerine getirmektedir. Bunlardan ilki yerel ısı oluşturmaktır, diğeri de ısınarak plastikleşmiş olan malzemeyi takım arkasına doğru iterek yer değiştirmesini sağlamaktır.

Sürtünme karıştırma kaynağında aşınmaya (sürtünmeye) dirençli omuz ve uçtan (karıştırıcıdan) oluşan bir takım kullanılır.

- Omuz : Kaynak sırasında sürtünme sonucu ısı meydana getirir, malzemenin etrafa saçılmasını önler ve takımın etrafındaki malzeme hareketine yardımcı olur.

- Uç : Öncelikli görevi takımın etrafındaki malzemeyi deforme etmektir. Bunun yanında kaynak işlemi için ısı sağlar.

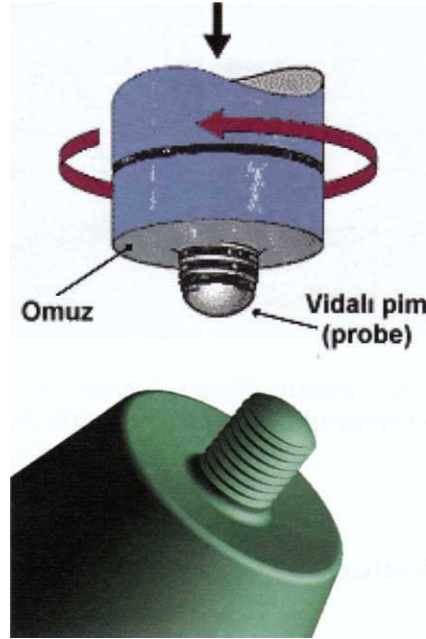
Belirli devirde dönen takım ucu alın altına birleştirilmiş levhaların birleşim çizgisinden uygun olan bir basınç kuvvetiyle daldırılır. Kaynak esnasında karıştırıcı uç, malzeme içinde dönme hareketi ile ilerlerken; omuz, kaynaklanan levhaların üst yüzeyi ile temas halinde kaynak yönünde hareket eder. Bu kaynak yönteminde geleneksel ergitme kaynağına göre daha az çarpılma ve artık gerilmeler oluşurken, esas metal mekanik özelliklerine daha fazla yaklaşılr. Ayrıca daha az kaynak hatası görülür ve kalın kesitler tek pasoda kaynaklanabilir.

Kaynak kalitesini belirleyen başlıca parametreler takım dönme hızı (takım devri), takım ilerleme hızı ve takım geometrisidir. Takım dönme hızı ve ilerleme hızı ile ilgili literatürde yeterince çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte son zamanlarda takım geometrisi üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir.

4.7.2.1 Alışılmış Silindirik Pimli Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımları

Takım kaynak edilecek malzemenin türüne, kalınlığına bağlı olarak tasarlanır ve özellikle kaynak dikişinin nüfuziyetinin yanı sıra kaynak dikiş genişliğini belirleyici bir geometriye sahiptir. Belirli bir devirde döndürülerek parçaların içine batırılan takım piminin istenen derinliğe inmesi takımın omuz kısmı ile sağlanır. Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kullanılan takımlarda pim, makinanın ana milinden aldığı hareket ile dönerek özellikle parçaların alın altına getirildiği birleştirme çizgisi boyunca genellikle düşey bir basma kuvveti ile bastırılarak döndürüldüğünden ilerleme kenarından süreklediği ısınan ve yer değiştirilen yumuşamış metalin arkaya doğru itilmesini dolayısı ile yığılmasını sağlar, buna karşın yumuşayan metalin hacimsel olarak yukarıya doğru da taşmasını önleyerek aşağıya yönlendirecek ve hapsedecek şekilde pim çapından daha büyük çapta bir omuz tasarlanır. Omuz, parçalara üst kısımdan değerek sürtünme ile ısınmasını, kaynağın dış görünümü ile çökme miktarınının yanı sıra yöntemde kullanılan basma kuvvetlerinin de etkisiyle özelliklerin ve mikroyapının düzgün olmasını da etkilediğinden genellikle iç bükey biçimde tasarlanmıştır. Buna karşın omuz içine yumuşamış malzemenin aşağıya hareketini daha rahat sağlayacak ve daha

düzgün kaynak dikiş görünümü vermesi için dairesel veya başka geometrik biçimlerde kanallar da açılabilir.



Şekil 4. 34 Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kullanılan vida açılmış pimli alışılmış omuzlu takım

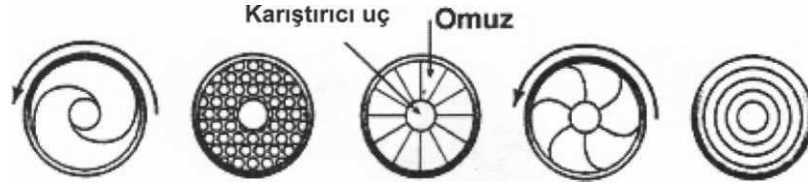
Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin uygulanmaya başladığı ilk yıllardan itibaren geliştirilen takımlar, vida görünümlü olmakla birlikte, ilerleyen yıllarda kaynaklı bağlantılardan istenen çeşitli özelliklere de bağlı olarak değişik profillerde takımlar geliştirilmiş ve uygulamalarda kullanılmıştır. Bu yeni geliştirilen takımlar çok özel biçimlerde pime sahiptirler ve kaynak edilecek malzemenin türüne bağlı olarak takım malzemeleri de özel alaşımlardan yapılmaktadır, üretilmeleri kolay değildir ve patent hakları da saklı tutulduğundan üretimde ilgili kuruluştan izin almadan kullanılmaları yasaktır. Dolayısı ile pim kısmının alaşımlı çeliklerden yapılabildiği ve istenen derinlikte sağ ya da sol vida dişi açılmış takımlar daha ucuz ve ekonomik olduklarından basit işlerde halen kullanılmaktadırlar. Vidalı pimin boyunun ayarlanmasını sağlayacak biçimde tasarlanmış ve bir altıgen L-anahtar ile pimin boyunun kısaltılıp uzatılabileceği alışılmış vidalı pimli, omuz kısmına dairesel biçimli kanal açılmış Sürtünme karıştırma kaynağı takımı Şekil 4.35 örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4. 35 Vidalı pim boyunun ayarlanabildiği dairesel kanallı omuza sahip basit bir vida pimli takım

Takımın, kaynak edilecek malzemeye ilk daldırılması aşamasında pim ve iş parçası arasında sürtünme yoluyla ısı oluşmaktadır. Takımın sürekli olarak bastırılarak dönmesiyle ısının artması ve yumuşayan malzemede plastik deformasyon sağlanmaktadır. Dolayısı ile, ısı girdisi açısından düşünüldüğünde, takım pim ve omuz boyutları önemli olmaktadır. Takımın ikinci fonksiyonu da dönme ve ilerleme yoluyla malzemede plastik deformasyon yoluyla hareketi ve karışımı sağlamaktır. Takımda omuz yüzeyine açılan çeşitli geometrideki kanallar, malzemeye dönerek daldırılan pimin sürtünme etkisiyle ısıtarak yumuşattığı ve kaynak sırasında dışarı çıkmaya çalışan plastik deformasyona uğramış malzemeyi yakalarken takımda birleşme ağzı boyunca dönerek ilerler. Takımın omuz kısmına açılan bu kanallar yumuşamış malzemeyi radyal doğrultuda aşağıya doğru iterek takım pim dişlerinin üst kısmının sıkıştırma etkisini artırarak mekanik üstünlük sağlar. Takım geometrisindeki bu değişiklik 6 mm kalınlığındaki AVV5083 alüminyum alaşımında denenmiş ve kanallı omuza sahip takımların kullanımıyla omuz kısmında kanal açılmamış takımlara göre iki kat daha yüksek hızlarda kaliteli dikişler veren kaynak işlemi yapılabildiği görülmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında alışılmış vidalı pim bulunan ve omuzda kanal açılmamış takımların kullanımı durumunda takım parçaya girerken düşeyle 1 ile 3° arasında açı verilip eğilerek

parçaya daldırılması ve ilerletilmesi esas alınır. Omuzun kanallı olması durumunda ise takımın eğilmeden tam dik konumda kullanımına olanak sağlanmıştır. Şekil 4. 36'da uygulamada kullanılan takım omuz geometri örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 4. 36 Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kullanılan takım omuz profili örnekleri

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kullanılan takımlar üzerindeki deneyimlerinin artması ve malzeme akışının daha iyi anlaşılması sayesinde, takım geometrisi konusunda gelişmeler sağlanabilmektedir. Malzeme hareketini, plastik deformasyonu ve malzemenin kaynak sırasında birbiri içinde karışımını artıran ve yöntem yüklerini azaltan karmaşık unsurlar da takımlara eklenmiştir

4.7.2.2 Whorl™ serisi Sürtünme karıştırma kaynağı takımları

1.5 ile 12mm kalınlıklardan alüminyum levhaların kaynağında ucunda vidalı pim bulunan alışılmış takımlarla iyi sonuçlar alınmasına karşın, malzeme kalınlığı arttıkça daha çok ısıya gerek duyulmaktadır. Dolayısı ile takımın istenen nüfuziyet derinliğinde daha fazla malzemenin yumuşamasını ve takım arkasına doğru yönelmesini ve yumuşamış malzemenin takımın ilerleme kenarından yığılma kenarına doğru yönelmesini homojen olarak sağlamak gerekmektedir. Bu konuyu ele alan araştırmacılar İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI), iki tür pim tasarımına sahip takım geliştirmişlerdir. Whorl™ adlandırılan ve adını aynı biçimli deniz kabuğundan alan bu takım kesik koni biçimli olup üzerinde helisel vida dişleri bulunmaktadır. Buna karşın MX-Triflute™ olarak adlandırılan diğer takım da pim kesik koni biçiminde olup üzerinde matkap ucuna benzer biçimde kanallara sahip helisel dişler bulunmaktadır.

İlk geliştirilen ve 75 mm kalınlığındaki alüminyum levhaların üstten ve alttan birer paso ile (çift pasolu) kaynak edilebildiği Whorl™ türü takımın biçimi, aynı takımda kullanılabilecek değişik pim geometrileri Şekil 4.37’te gösterilmiştir.

Whorl™ takımı kullanılarak 75 mm kalınlığındaki AW6082-T6 levhalar, çift pasoda her bir paso 38 mm nüfuziyet verecek biçimde Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak edilmiştir



Şekil 4. 37 Çeşitli pim profillerinde üretilen Whorl™ takımlar

4.7.2.3 MX-Triflute™ serisi sürtünme karıştırma kaynağı takımları

Yapılan araştırmalarda, bu takımlardaki pim yapılarının, aynı çaptaki alışılmış vida profiili silindirik bir takıma göre daha az malzemeyi yer değiştirdiği belirtilmiştir. Whorl™ türü takımda yer değiştiren malzeme hacmi %60, MX- Triflute™ takımda ise %70 oranında azalmaktadır. Bu durumda da bu tür takımların basma kuvvetini azalttığına, malzeme hareketini kolaylaştırdığına, ayrıca pim ve plastikleşerek yumuşamış malzeme arayüzeyinde ısı oluşumunu artırdığı belirtilmektedir.



Şekil 4. 38 TWI tarafından geliştirilen kesik koni helisel pimin üç kanallı olduğu MX-Triflute™ takımı

4.7.2.4 Makara veya bobin biçimli sürtünme karıştırma kaynak takımları

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, üstten parçaya bastıran takımın plastikleşmiş malzemeyi aşağıya doğru birleştirmenin kök kısmına

sıkıştırmasından dolayı, kökün düzgün biçimlenmesi için kullanılan altlık levhalar gerekli reaksiyon kuvvetini sağlamalarına karşın yöntemin esnek uygulanmasını sınırlarlar. Bu açıdan, altlık gereksinimini ortadan kaldıracak özel bir takım geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. Bobin ya da makara görünümüne benzediği için İngilizce adı ile bobbin takım olarak adlandırılan bu tür takım (Şekil 4. 39).



Şekil 4. 39 Altlık kullanımını ortadan kaldırmak amacı ile karşı omuzlu olarak tasarlanmış bobin ya da makara biçimli (bobbin) takım

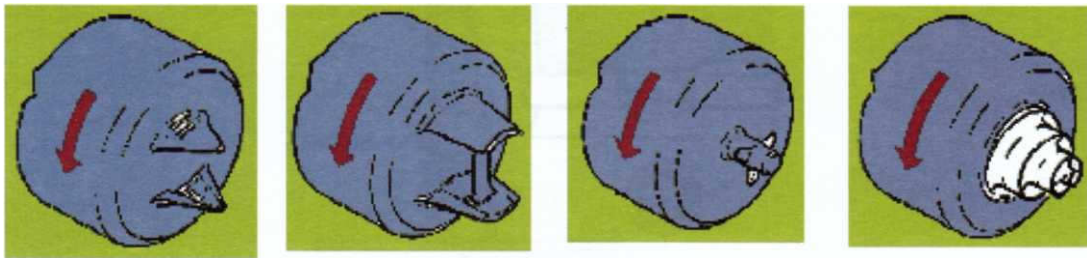
Bu tür takım daha uzun vidalı pime sahiptir ve karşı tarafında da bir takım omuzu daha bulunmaktadır. Bu şekilden dolayı görünümü makarayı andırmaktadır. Bu karşı omuz altlık görevi yapmaktadır. Bu takımın geliştirilmesi ile özellikle sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin doğrusal uygulanabilme sınırı ortadan kaldırılmış böylece dairesel yani yörüngesel kaynak dikişinin uygulanabilme olanağı sağlanmıştır. Bu takımın geliştirilmesi ve robotik sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında başarılı sonuçlar alınmıştır.

Yukarıda bahsedilen takımların geliştirilmesi sayesinde kalın alüminyum levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile kaynak edilebilmesi sorun olmaktan çıkmış hatta ince alüminyum saclarda kaynak hızı 300 cm/dak'ya

kadar çıkarılabilmektedir. Alaşımsız çeliklerde 12mm'ye kadar, çeşitli tür paslanmaz çelikler ve titanyum alaşımlarında 6 mm'ye kadar kalınlıklarda hızlı ve verimli kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir ve bu sayede sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi birçok endüstri kolunda uygulama alanı bulmuştur.

4.7.2.5 Mikser türü sürtünme karıştırma kaynağı takımlar

Malzemenin daha iyi karıştırmasını sağlamak amacı ile çeşitli biçimlerde pimler tasarlanmıştır. Bunlar toplu halde Şekil 4.40'da verilmiştir. Bu tür takımların mikser türlerinde pim kısmının içinin boşluklu olması şekil değiştiren yumuşamış malzemenin takım içinden geçmesini sağlayacağı, bu sayede dolu takımlara göre sürtünme etkisinde kalan bölge hacminin arkaya yığılarak yer değiştiren malzeme hacminden daha büyük olacağı göz önüne alınmıştır. Bunlar bazı araştırmalarda denenmişlerdir, ancak büyük bir bölümü yalnızca tasarım aşamasında kalan bu takımlar çok yaygın olarak kullanılmamaktadırlar.



(a) Mikser tür (b) Kanatlı mikser (c) Pervane tür (d) Konik kanallı

Şekil 4. 40 Çeşitli pim biçimlerinde tasarlanmış sürtünme karıştırma kaynağı takımları

4.7.2.6 Bindirme Birleştirmeler İçin Geliştirilen Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımları

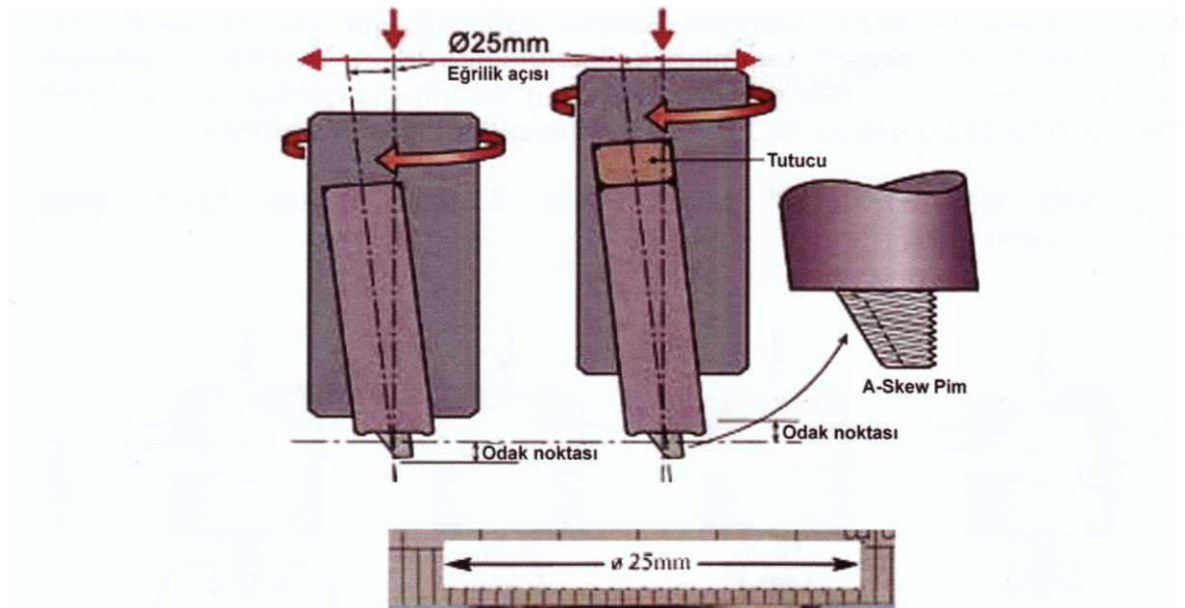
4.7.2.6.1 Multistage™ Türü Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımlar

Alın birleştirmelerindeki kaynak kalitesini artırmayı amaçlayan takım geliştirme çalışmalarının yanı sıra bindirme birleştirmelerde de kaliteli kaynak dikişi oluşturmaya dönük takım iyileştirme çalışmaları sonucunda öncelikle Multistage™ takım olarak adlandırılan takımlar geliştirilmiştir.

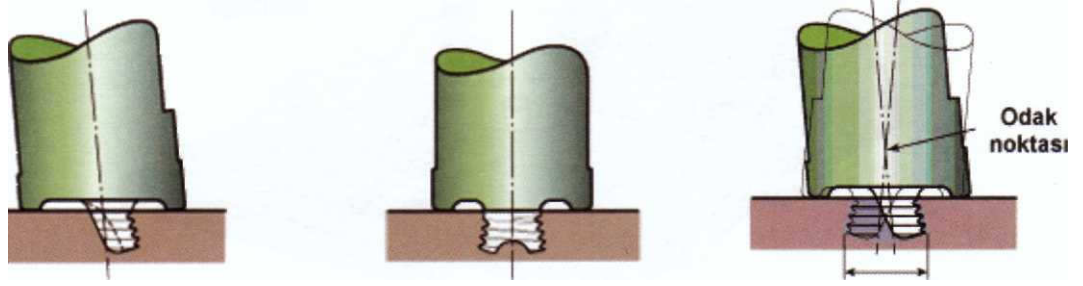
Bu tür takımların geliştirilmesinin amacı özellikle alışılmış takımlar ile oluşturulan bindirme kaynaklarında üst sacda takım omzunun basmasından dolayı oluşan çöküklüğü ortadan kaldırmak ya da en az seviyeye indirmektir. Multistage™ takımda, bindirme birleştirmelerde iki sac arayüzüne temas eden ana omuz çapından daha küçük çaplı bir ikinci omzun bulunmasıdır. Pimin bu alt parçasında çap düşürülmüş ve malzeme akışını düzeltmek ve de oksitlerin karışımını sağlamak için beşgen düz bir profil tasarlanmıştır.

4.7.2.6.2 Skew-Stir™ Serisi Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımları

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde takım piminin kaynak sırasında ısınarak yumuşamış metalin pim arkasına itelerek yığılmasını sağlayacak yeterli metal akışında önemli olan ve dinamik hacmin statik hacme oranı üzerine yapılan araştırmalar sonucunda eğik pim tasarımına sahip takımlar geliştirilmiştir.



Şekil 4. 41 Skew-Stir™ takımın çalışma prensibi ve ilk geliştirilen asimetrik Skew-Stir takımın görünüşü



Şekil 4. 42 TWI tarafından geliştirilen A-skew™ takımın kaynak sırasındaki görüntüsü

Takım geometrisinin, kaynak edilecek malzemenin hareketi üzerindeki etkisi düşünüldüğünde, malzeme hareketi ile çeşitli türlerdeki takımlarla elde edilen mikroyapı özelliklerinin de takım tasarımına bağlı olarak değişeceği görülmelidir.

Sürtünme karıştırma kaynağı yöntem parametreleri ve takım tasarımı ile yöntem detayları hakkında, günümüzde bu yöntemi kullanma lisansına sahip kuruluşlarda araştırma-geliştirme çalışmaları yapılmakta ve literatüre nispeten sınırlı bilgi sunulmaktadır. Takım tasarımının yapılabilmesi için de malzemenin mikroyapısal özelliklerinin oldukça iyi bilinmesi ve anlaşılması gerekmektedir.

4.7.2.7 Trivex™ Serisi Takımlar

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde plastikleşmiş malzemenin takım pimi tarafından sürüklenerek akması üzerine yapılan çeşitli araştırmalar sonucunda üçgen biçimli konveks kenarlara sahip düz veya vida açılmış dişleri bulunan pim yapısında Trivex™ ve MX-Trivex™ türü takımlar da geliştirilmiştir

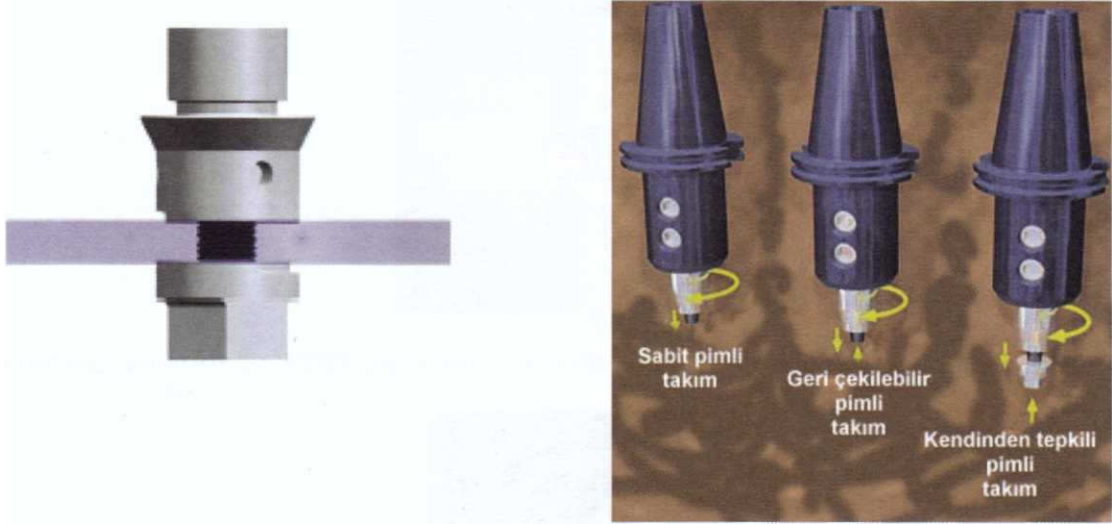
4.7.2.8 Pim Boyunu Otomatik Ayarlayan Sürtünme Karıştırma Kaynağı Takımlar

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde bağlantıda başlangıç ve bitiş plakaları kullanılmadığı durumlarda, özellikle kaynağın bitiminde pimin kaynaklı parça üzerinden yukarıya kaldırılması sonucunda pimin boşluğuna eşit boyutlarda bir delik kalır. Bu durum yöntemin sınırlamalarından biri olarak karşımıza gelir. Bu deliğin sonradan doldurulması yani tıpa kaynağı yapılması olanağı olmasına karşın ek bir işçilik gideri ve zaman kaybı ile karşılaşılır. Özellikle bu durum silindirik parçaların kaynağında ortaya çıkan ve istenmeyen bir durumdur.

Yöntemin uygulanmasını sınırlayan diğer bir konu da, parçaların kalınlığı değiştikçe yeni pim boyuna sahip bir takımın yeniden makineye bağlanması ve iş bittiğinde başka bir kalınlık için yeniden uygun takımın değiştirilmesi gibi takım bağlama ve sökme kayıp zamanlarının artmasıdır. Bunları önlemek üzere J. Ding ve P. Oelgoetz tarafından 1999 yılında patenti alınan otomatik olarak pim boyu ayarlanabilir takım geliştirilmiştir. Özellikle, NASA'da Marshall Uzay Uçuş Merkezi'nde üretilmekte olan silindirik roket yakıt tanklarının çevresel kaynağı için geliştirilen ve patenti alınan bu takımla tekrar başlangıç noktasına gelindiğinde, takımın içinde bulunan motor ve dişli sistemi pimi otomatik olarak yavaş bir hareketle omzun içine çekilmeye başlar, kademeli olarak boyu kısalan pim daha az nüfuziyette kaynak yaparak delik kapanana kadar bölgeyi doldurur ve tamamen geri çekildiğinde işlem sonlandırılır. Bu takım aynı zamanda gerektiği durumlarda farklı malzeme kalınlıkları için pim uzunluğunun değişmesine de olanak sağlar. Bu takım zaman içinde birçok endüstri kolunda kullanıma girmiştir, ancak alışılmış dolu takımlara göre ilk yatırım maliyeti açısından daha pahalı kalmaktadır.

4.7.2.9 Kendinden Tepkili (Self-Reacting) Pimli Takımlar

2001 yılında Cambell, Fullen ve Skinner tarafından geliştirilen ve patenti alınan kendinden tepkili pime sahip takımlarda diğer takım aslında makara ya da bobin (bobbin) takıma benzer bir takımdır ve karşı tarafında omuz kısmı bulunmaktadır (Şekil 4.43). Bu tür takımın kullanımında da birleştirmenin arka tarafında bir altlık ya da mengeneye gerek yoktur.

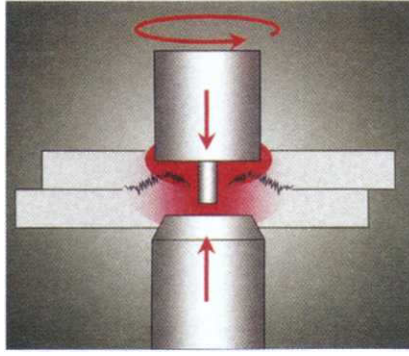


Şekil 4. 43 Kendinden tepkili (self-reacting) pimli takım ve diğer takımlarla karşılaştırılması

4.7.2.10 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Takımları

Spor tür otomobil modelin daha önce direnç nokta kaynaklı olarak birleştirilen alüminyum panellerden oluşan kapıları, bagaj kapağı ve motor kapağı elemanları sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak edilmişlerdir.

Bu panellerin birleştirilmesinde robot kontrollü sürtünme karıştırma nokta kaynağı makinası kullanılmıştır. Bindirme birleştirmesi türündeki bu bağlantılarda özel bağlama aparatına bağlanmış parçalar dönel üst takım ile düz alt takım arasına sıkıştırılarak gerekli basma kuvveti uygulanmakta, belirli devirde dönen üst takım pimi kaynak bölgesini ısıtarak metalin yumuşamasını ve noktasal olarak kaynağın oluşmasını sağlamaktadır.



Şekil 4. 44 Bir Japon otomobil üreticisi tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin prensibi

Burada, tek parçalı dönel takım yerine üç parçalı bir üst takım ve alttan basmayı sağlayan tek parçalı bir alt takım kullanılmaktadır. Üst takım en dışta parçalara baskı kuvveti uygulayan kalın cidarlı bir dış bilezikten oluşur, bu kısmın içinde dönen bir bilezik ve bu bilezik içinde de yine dönen pimi bulunduran iki parçalı takım vardır.

4.7.3 Takım Malzemeleri

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kaynak edilecek malzemenin türüne bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip yukarıda bahsedilen değişik tasarımlarda takımlar kullanılır. Yöntem önceleri alüminyum ve alüminyum alaşımları için kullanıldığından alaşımsız ve alaşımlı çeliklerden yapılmış takımlar ile iyi sonuçlar alınmıştır. Ancak, yöntemin ısı işlem görmüş bazı alüminyum türlerinde ve alüminyum metal matrisli malzemeler arasında belirli miktarda karbür tozları katılmış kompozitlerde kullanılması takımın aşınmasına ve kısa sürede kırılmasına neden olmuştur. Zaman içinde alaşımsız çelik takımlar, yerini alaşımlı çelik takımlara bırakmıştır. Son yıllarda bazı tür alaşımlı çeliklerin ve titanyum alaşımlarının kaynağında ise sert metal karbür takımların geliştirilmesine gerek duyulmuştur. Hatta omuz kısmı farklı pim kısmı farklı malzemelerden üretilmiş takımlar da geliştirilerek endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum alaşımlarının normal türlerinde alaşımlı AISI 4140 ve AISI 4340 türü tansmisyon (mil) çelikleri kullanılabilmesinin yanı sıra AISI H13 (X40CrMoV5.1) takım çeliği ve bazı tür yüksek hız çelikleri kullanılabilir.

Takım malzemeleri olarak alaşımlı takım çelikleri ve MP159 gibi sert nikel-kobalt alaşımları dışında sert metal karbürler (tungsten karbür), polikristalin kübik bor nitrürler (PCBN) ve nikel esaslı diğer süper alaşımlar da sayılabilir. Amerika'da DARPA programı olarak bilinen 13 üniversitenin ve birçok endüstriyel kuruluşun katılımı ile gerçekleştirilen ve amacı Al, Cu, Mn ve Fe esaslı malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmelerinin araştırıldığı tamamlanmış projede, polikristalin kübik bor nitrür takımlar kullanılmıştır

Çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde takım malzemesi seçimi, çözülmesi gereken başlıca problem olarak görölmektedir. Yapılan denemelerde 1200°C gibi çok yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalma sonucunda oluşan yüklere dayanacak olan malzeme sayısının birkaç tane olduğu saptanmıştır.

Başlangıçtaki çalışmalar tungsten-renyum (W-Re) alaşımları gibi refrakter alaşımlar üzerinde olmuştur. Bu alaşım, mukavemetini servis sıcaklıkları gibi yüksek sıcaklıklarda korumasına karşın düşük sıcaklıklardaki mukavemet değerleri iyi değildir. Buna karşın 1200°C gibi yüksek sıcaklıklarda kullanılacak birkaç alaşım vardır ki bunlar da daha deneme aşamasındadırlar.

Alternatif bir yaklaşım, polikristalin kübik bor nitrür takımlardır. Bilindiğı üzere bu malzeme dünyadaki sert malzemeler arasında ikinci en sert malzemedir. Ancak, çok gevrek olduğundan kırılıgandır, titreşim ve darbelere dayanıksızdırlar. Bu açıdan bu takımların kullanılacağı sürtünme karıştırma kaynağı makinalarının özellikle titreşimleri önleyecek şekilde özel olarak tasarlanmış olmaları gerekmektedir. Ayrıca kolay işlenmeleri de takım pim biçiminin istendiğı gibi olmasını sınırlamaktadır. Bu malzemenin başlıca yararı yüksek mukavemetli olmasının yanı sıra çok yüksek aşınma direncine sahip olmasıdır. Takım aşındığında ya da kırıldığında yeniden işlenme olanağı yoktur. Buna karşın W-Re takımlar daha toktur ve aşınan takımlar yeniden işlenerek kullanılabilir, bu nedenle de daha ekonomiktirler.

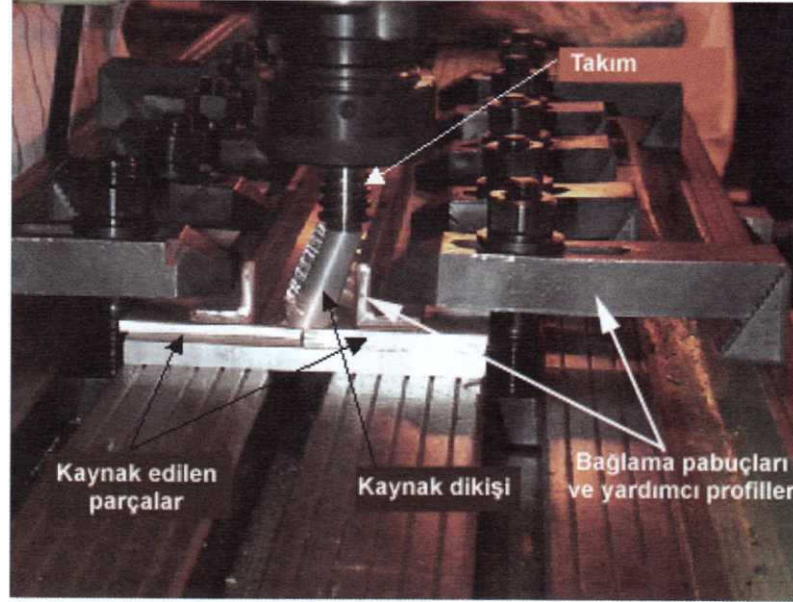
Seramik takımların kullanılmaları da diğer bir çözümdür, bu tür malzemelerin ömrü PCBN takımlara göre daha düşüktür ancak aşınmaları durumunda yeniden işlenebilirler.

Takım seçimi açısından problem sadece çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağında değildir. Titanyum ve titanyum alaşımlarının kaynağında da PCBN takımlar ile iyi sonuçlar alınamamaktadır. Bu açıdan öncelikle Güney Caroline üniversitesinde W-Re takımların titanyumun kaynağına uygun olduğu belirtilmiş ancak, Ti-6Al-4V alaşımının kaynağı sırasında pimin aşınmayla karşı karşıya kaldığı ve aşırı metal yapışması olduğu saptanmıştır. Bu da titanyum alaşımında bulunan vanadyumun ve pim alaşımındaki renyumun reaksiyonu sonucu olabileceği kanaatine varılmıştır. Diğer bir refrakter yüksek sıcaklık sürtünme karıştırma kaynağı takım malzemesi olarak tungsten-iridyum (W-Ir) alaşımı düşünülmektedir ve bu alaşım daha geliştirme aşamasındadır. 2005 yılında Lockheed Martin'deki uzmanlar 5 mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesini dispersiyon mukavemetlendirmeli takım kullanarak yapışma olmaksızın oldukça uzun kaynak dikişleri gerçekleştirdiklerini açıklamışlardır. Bu bağlantılardan -196°C ile 260°C arasındaki sıcaklıklarda yapılan mekanik deneyler sonucunda esas metal mukavemetine yakın, %98-%100 bağlantı verimi alındığı rapor edilmiştir.

4.7.4 Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yönteminde Kullanılan Bağlama Tertibatları

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kullanılan makinelerin büyük bir kısmı sabit tablalı dik freze tezgahlarının modifiye edilmesi ile geliştirildiği ve bu tür tezgahlarda da standart T- kanallı bağlama tablaları bulunduğu için başlangıçta takım tezgahlarında kullanılan cıvata ve pabuçlu bağlama sistemlerinin yeterli olacağı düşünülmüştür. İlk araştırmalarda denenmiş olan bu standart bağlama tertibatlarının seri üretim için yeterli olmadığı, daha rijit bağlama tertibatlarına gerek duyulduğu görülmüştür. Buna karşın küçük boyutlu parçaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmelerinde çeşitli kuruluşlar tarafından üretilen standart hale gelmiş basit pabuçlu, mekanik, pnömatik ve hidrolik olarak parça bağlama tertibatları kullanılabilmektedir.

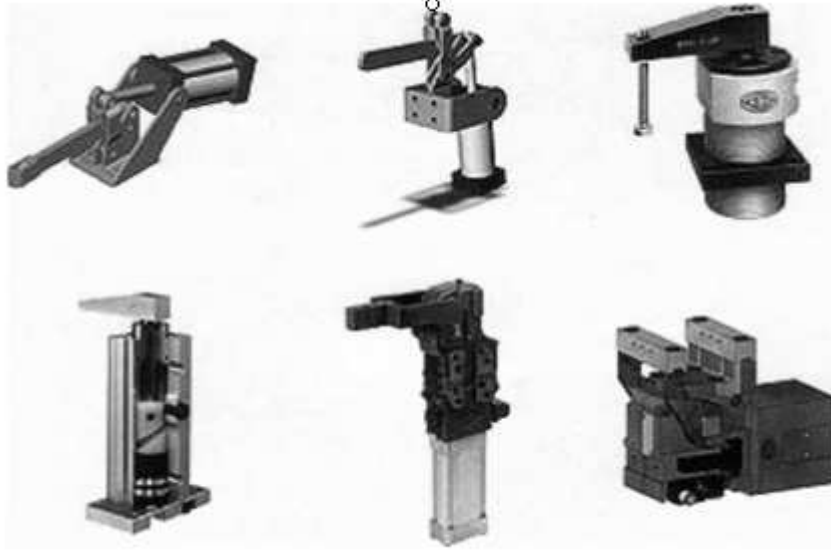
Tabladaki kanallara takılan ya da önceden hazırlanmış rijit bir bağlama tertibatına takılmış olan bu elemanlar ile özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımı küçük boyutlu parçaların hızlı bir şekilde bağlanması ve çözülebilmesi üretimde oluşabilecek bağlama kayıp zamanlarını en aza indirmektedir.



Şekil 4. 45 Sürtünme katıştırma kaynağı yönteminde kaynak edilecek parçaların rijit bir şekilde pabuçlar ile bağlanması



Şekil 4. 46 Sürtünme katıştırma kaynağı yöntemi uygulanacak küçük boyutlu parçaların bağlanmasında kullanılabilen mekanik bağlama elemanları



Şekil 4. 47 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi uygulanacak küçük boyutlu parçaların bağlanmasında kullanılabilen pnömatik bağlama elemanları



Şekil 4. 48 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi uygulanacak küçük boyutlu parçaların bağlanmasında kullanılabilen hidrolik bağlama elemanları

Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilecek malzemelerin türüne ve kalınlığına bağlı olarak daha rijit bağlama tertibatlarına gerek duyulur. Kaynak sırasında ısınan kaynak ağızlarının ön kısımlarındaki çarpılmaların önlenmesi kaynak kalitesi açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla parçaların daha rijit bağlanmaları için önceden tasarlanmış çelik lamalar kullanılır. Bu lamalar makinanın tablasına özel olarak bağlanırlar ve parçaların kaynak sırasında hareket etmesini sınırlarlar. Bu tür parça bağlama elemanlarının takılmaları ve çözülmeleri biraz zaman alsa da kullanılmaları gereklidir. Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi tek takım ile sadece üstten bir pasoda gerçekleştirilecek ise parçaların alttan da çok rijit bir biçimde desteklenmesi kök nufuziyeti için önemlidir.

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin içi boş olarak üretilen alüminyum ekstrüzyon ürünlerine uygulanması durumunda üretim hızını artırmak amacıyla geliştirilen yüksek güçlü büyük tablalı özel sürtünme karıştırma kaynağı makinalarında alttan ve üstten aynı yönde ya da zıt yönde dönen iki takım ile kaynak işlemi gerçekleştirilebilir. Burada da parçaların alttan ve üstten sıkıca bağlanmaları gereklidir.

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin seri üretim uygulamalarında yüksek güçlü tezgahlar ile gerçekleştirilmesinde ya da esnek otomasyon sistemleri ile robotik uygulamalarında kaynak ağızlarındaki çarpılmalar sonucu oluşabilecek kaymaların önlenmesi için rulolu baskı tertibatları kullanılmaktadır. Tablaya yerleştirilen ve hidrolik olarak kenarlarından sıkıştırılan parçalar, kaynak sırasında da sadece kaynak edilecek kısımlara basma uygulayan rulolar ile de sıkıştırılırlar. Pimli takımın önünden ilerleyen, hem önden hem de arkadan ilerleyerek oluşmuş dikişi ezerek sıkıştırma yapan rulolu tertibatlar tasarlandığı gibi takımın her iki yanında yer alan ve pimin parçaya giriş uzunluğunun ayarında kullanılan rulolu basma tertibatları da kullanılmaktadır.

Seri üretimde kaynak kalitesinin artırılmasında gerekli basıncın sağlanması ve kaynak hızlarının artırılmasına dönük olarak geliştirilen bu düzenekler dünyanın çeşitli ülkelerinde özellikle gemi panellerinin, otomobillerde ve trenlerde kullanılan panellerin, çeşitli amaçlarla birleştirilen ekstrüzyon ürünlerinin sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarında yaygın olarak kullanılır duruma gelmişlerdir.

ÇELİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

5.1 Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi ile Birleştirilmesi

Kaynak bağlantısı, aynı özelliğe sahip iki parçanın birbiriyle birleştirilmesidir.[32] Sürtünme karıştırma kaynağı düşük ergimeli malzemelere yönelik üzerine araştırmalar yapılması ile başlanılmış bir yöntem olsa da ergime noktası yüksek olan çelik gibi malzemelere de takım malzemesinde yapılan değişiklikler ile uygulanabilmektedir.[34] Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanmasına yönelik birçok çalışma yapılmış olmasının yanı sıra yöntemin çeşitli tür çeliklere uygulanması üzerine de dikkate alınacak birçok çalışma yapılmıştır. Ergitme kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında FSW yönteminin bir katı faz kaynak yöntemi olmasından dolayı düşük ısı girdisi ile kaynağın gerçekleştirilmesi, çeliklerin kaynak edilmelerinde ortaya çıkan aşırı çarpılmaları ve artık kaynak gerilmelerini en aza indirmektedir. Esasında en önemli olay özellikle kalın kesitli çeliklerin ısıdan etkilenmiş bölgelerindeki metalurjik dönüşümlerin de en aza indirilmekte olmasıdır. Bu açıdan yöntem henüz endüstriyel olarak çeliklerin kaynağında kullanılmamasına karşın öncelikle gemi yapım, ağır makina ve teçhizat üretim endüstrilerinde çok önemli bir konuma gelecektir. Bunun yanı sıra, çeliklerin ergitme kaynağında karşılaşılan sıcak çatlaklar, gözenek oluşumu, sıçramalar, nüfuziyet azlığı ve de önemli olan hidrojen çatlaması problemleri FSW yönteminin katı faz kaynak yöntemi olmasından dolayı oluşmayacaktır. Ayrıca, bir katı faz kaynak yöntemi olduğundan kaynak sırasında metal

buharları içeren kaynak dumanlarının oluşumu yoktur. Tüm bu üstünlükler yöntemi çeliklerin kaynağında kullanılacak alternatif bir yöntem konumuna getirmektedir.

Çeliklerin FSW yöntemi ile birleştirilmesi üzerine şimdiye kadar yapılmış çalışmalardan bazıları az karbonlu çelikler, AISI 1010, AISI 1018 yumuşak çelikler, %12Cr alaşımlı ferritik paslanmaz çelik, 304L ve 316L türü ostenitik paslanmaz çelikler, Al 6XN süper-ostenitik paslanmaz çelik, HSLA-65, DH-36, S70C (AISI 1070) yüksek karbonlu çelik ve bazı C- Mn çelikleri üzerinde odaklanmıştır. Takım Çeliklerinden yapılmış karıştırıcı takımlar Al, Cu ve bunların alaşımları rahatlıkla kaynak edilebilmektedir. Ancak yumuşama sıcaklığı yüksek olan çelikler gibi metallerin sürtünme karıştırma kaynağında takım çelikleri yeterli gelmemekte, kaynak esnasında dağılmaktadır. Bu sebeple paslanmaz çeliklerin kaynağında piyasada sert metal olarak geçen K10, K30, K44 serisi karbür takımlardan uçlar en çok kullanılmaktadırlar. Piyasada hazır bulunan PCBN takımları ise çok yüksek malittedir.(3000 dolar kadar)[42] Çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmelerinde batıcı uç malzemesi 1000 derecenini üzerindeki sıcaklıklara dayanıklı olmalıdır. Bu sıcaklıklara dayanıklı batıcı uç üretimindeki güçlükler bu metodun çeliklere uygulanmasını engelleyen en önemli etkindir.[41] Çeşitli tür ve kalınlıklardan çeliklerin FSW yönteminde kullanılan kaynak değişkenleri ve takım malzemeleri Tablo 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 Çeliklerin FSW yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılan değişkenler ve takım malzemeleri

Kaynak edilen malzemeler	Parça kalınlığı (mm)	Takım dönme hızı (d/d)	Kaynak hızı (mm/dak)	Takım malzemesi
Az karbonlu çelik	12,15		102	-
AISI 1010	6.4	450- 650	25- 102	IMo ve W esaslı
X2CrNi12	12	-	240	-
304L	3.2, 6.4	300, 500	102	W alaşımı
304	6.0	550	78	PCBN
304L, 316L	5, 10	300- 700	150- 180	-

Al 6XN	6.4, 12.7	-	102	W alaşımı
HSLA-65	6.4, 12.7	400- 450	99- 120	W alaşımı
DH-36	6.4	-	102- 457	W alaşımı
C-Mn	6.4	-	-	PCBN
AISI 1070	1.6	100- 800	25- 400	WC alaşımı

Yukarıda sıralanan ve kaynak edilmiş çeliklerin yanı sıra, yöntemin S355 ince taneli yapı eliği, X80 ile X100 türü boru çeliklerine, duplex ve super-duplex paslanmaz çeliklere, %9Ni'li çeliklere, %13Cr'lu supermartenzitik paslanmaz çeliklere de uygulandığı ve başarılı sonuçlar alındığı bildirilmektedir.

Tablo 5.1'de belirtilen elik türlerinin FSW yöntemi ile birleştirilmesi uygulamalarında saptanan önemli konular şu şekilde sıralanabilir.

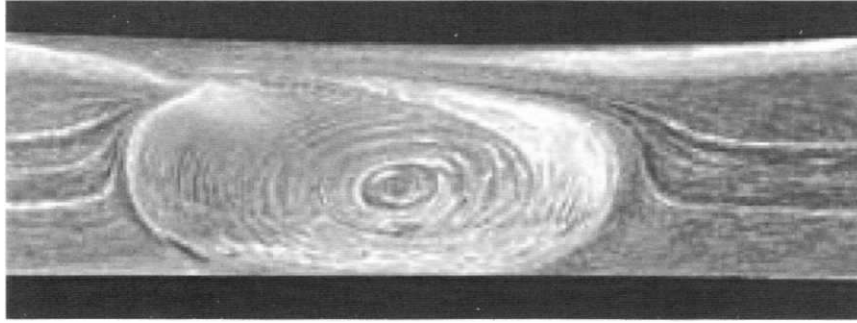
Bazı çalışmalarda bir koruyucu gazın kullanımı belirtilmemiş olmasına karşın yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde genel olarak eliklerin FSW yöntemi ile birleştirilmesinde hem iş parçalarını hem de takımları oksidasyondan korumak amacı ile koruyucu gaz olarak argon kullanılmıştır.

Kaynak sırasında belirli bir kaynak hızında dönen takımın omuz kısmında sıcaklık 1000°C'yi aşmaktadır. Hatta parçada karışım bölgesi olan kaynak metalinde sıcaklık 1200°C'ye kadar çıkmaktadır.

3.2 mm ile 6.4 mm kalınlık aralığındaki elik levhalar tek pasoda başarı ile kaynak edilebilmektedirler. 6.4 mm kalınlığındaki 304L eliği ile 6.4 mm'den daha kalın elik levhalarda kaynak iki pasoda ve iki taraftan yapılabilmektedir. Takım ve levhanın yaklaşık 300°C ön tavlanması ile 6.4 mm kalınlığındaki HSLA-65 eliği levhaların tek pasoda kaynağı yapılabilmektedir.

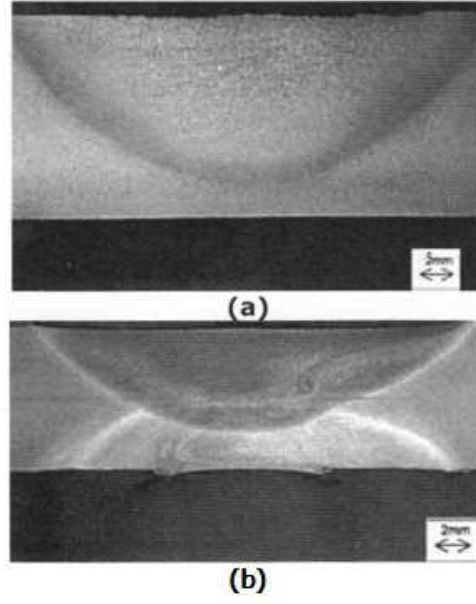
Çeliklerin FSW kaynağındaki ısı çevrim ile oluşan dönüşümler alüminyum alaşımlarında oluşandan farklı bir ITAB yapısının ortaya çıktığını göstermektedir. Ancak, 304 ve 316L paslanmaz eliklerinin FSW kaynağında oluşan ITAB yapısında 304 çeliğinde mikroyapının düzelmiş olduğu, 304L ve 316L'de de kısmen yeniden kristalleşmiş bir

yapıda ITAB olduğu belirtilmektedir. Şekil 5.1'de 316L çeliğinin FSW yöntemi ile oluşturulan kaynak bağlantısının makro yapı görünüşü verilmiştir.

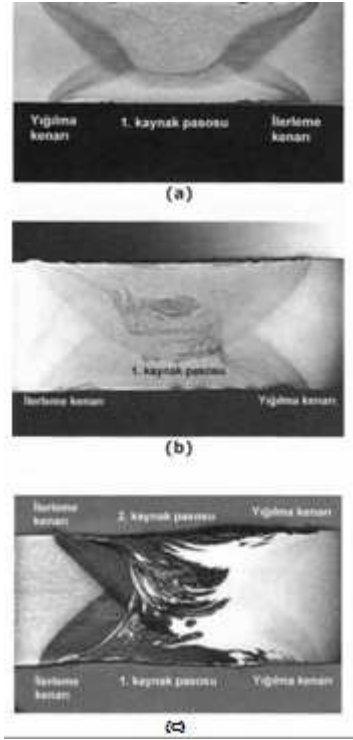


Şekil 5. 1 5 mm kalınlığında 316L ostenitik paslanmaz çeliğinin 30 mm omuz çaplı W-Re takım ile FSW kaynağında oluşan kaynak bölgesi

1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kaynak işlemi sırasında çeliklerin mikroyapılarındaki dönüşümlerin oluşumu, yeniden kristalleşme ve tanelerin irileşmesi alüminyum ve alüminyum alaşımlarında kaynak sırasındaki oluşumlara göre çok daha karmaşıktır. Bu dönüşümlerde alaşımının kimyasal bileşiminin etkisi büyüktür. Ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak metallerinde tanelerin küçülmesinin yanı sıra eş eksenli tane yapısının olduğu da görülmektedir. Buna karşın, yumuşak çelik, %12Cr'lu çelik ve ince taneli HSLA-65 çeliğinin FSW yöntemi ile oluşturulan bağlantıların kaynak bölgelerinde sıcaklık, kimyasal bileşime bağlı olarak farklı yapıların olduğu izlenmektedir. Örneğin, HSLA-65 ince taneli çeliğin esas metal yapısındaki küçük bir miktardaki perlit ile ince taneli eş eksenli ferrit, FSW kaynağından sonra iri ferrit kümeleri, Widmanstâten ferrit ve karışım bölgesinde yani kaynak metalinde ferrit/karbür çöktelterine dönüşmektedir. Dolayısı ile, ince ve gelişigüzel dağılmış perlit kümeleri ile ince eş eksenli ferrit tane yapısı esas metal ve kaynak metali arasındaki ITAB'de ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan, DH-36 çeliğinin kaynak metali beynit ve martenzitten oluşmaktadır. ITAB'de kaynak metali sınırlarında küçük miktarda perlit ve martenzit ile taneleri incelmış bir ferritik yapı bulunmaktadır. ITAB'in dışında etkilenmemiş esas metal ve ITAB içinde esas metalinkinden biraz daha geniş ve ITAB içindekinden de daha geniş eş eksenli bir tane yapısı oluşmaktadır.



Şekil 5. 2 (a) 12 mm kalınlığında X80 boru çeliğinin PCBN takım ile sürtünme karıştırmaya kaynaklı bağlantısı, (b) 8 mm kalınlığında S355 çeliğinin seramik takım ile FSW yöntemi ile oluşturulmuş kaynak bağlantısı

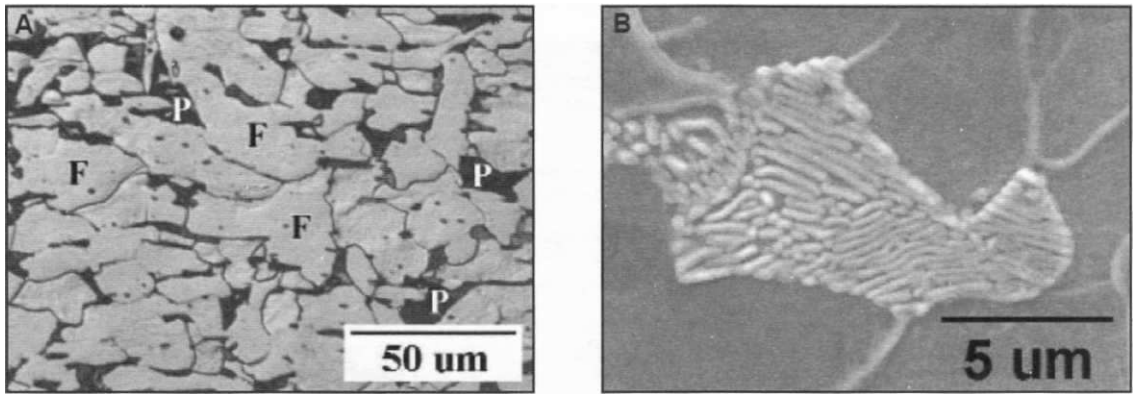


Şekil 5. 3(a) %12Cr'lu çelik, (b) Az karbonlu çelik, (c) %12Cr- az karbonlu çelik farklı metal çiftinin FSW bağlantılarında kaynak bölgeleri makro görünüşleri

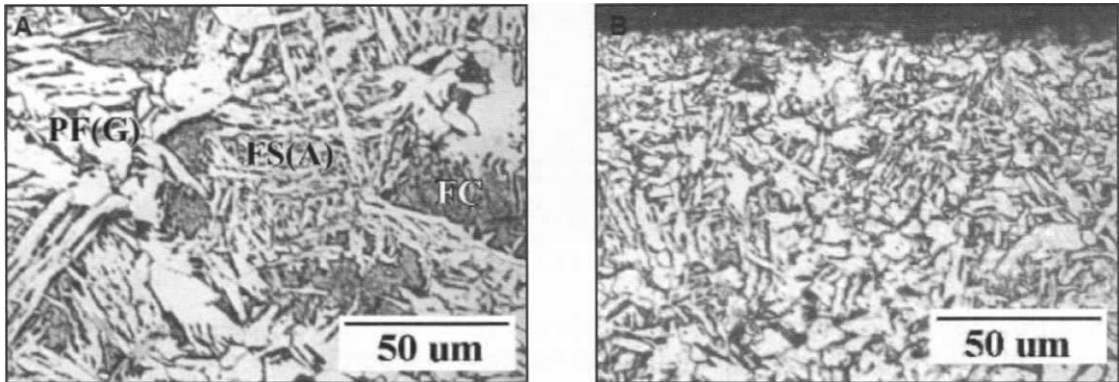
Çeşitli tür çeliklerin FSW yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak bölgesinde oluşan metalurjik dönüşümleri daha iyi anlayabilmek açısından bu yöntemin uygulandığı bazı

tür çeliklerin kaynak bölgelerinde ortaya çıkan mikro yapılardan örnekler aşağıda verilmektedir.

6.3 mm kalınlığında AISI 1018 yumuşak çeliğinin FSW yöntemi ile oluşturulan bağlantılarının kaynak bölgelerinde oluşan mikro yapılar Şekil 5. 4 ve 5. 5'de gösterilmiştir. Buradan da görüleceği üzere, ergitme esaslı yöntemlerinde oluşanlara göre farklı yapılar oluşmakta olup bu yapısal dönüşümler bağlantının mekanik özellikleri üzerinde etkilidir.



Şekil 5. 4 AISI 1018 çeliğinin esas metal yapısı (a) ana faz olan eş eksenli ferrit taneleri ile bu taneler arasındaki ince dağılmış küçük perlit tanelerinin optik mikroskop görüntüsü; (b) perlitin ince lamelli yapısının SEM görüntüsü



Şekil 5. 5 FSW yöntemi uygulanmış AISI 1018 çeliğinin kaynak metali mikro yapıları, (a) kaynak metalinin orta kısmı: tane sınırlarındaki ferrit[PF(G)], ferrit-karbür çökeltisi [FC], ve ikinci fazlı ferrit [FS(A)], (b) karışım bölgesinin üst yüzeyi: ince ferrit

Çeşitli tür çeliklerden FSW yöntemi ile birleştirilerek oluşturulan kaynak bağlantıları sertlik, çekme mukavemetleri, eğme özellikleri ve çentik darbe mukavemetleri

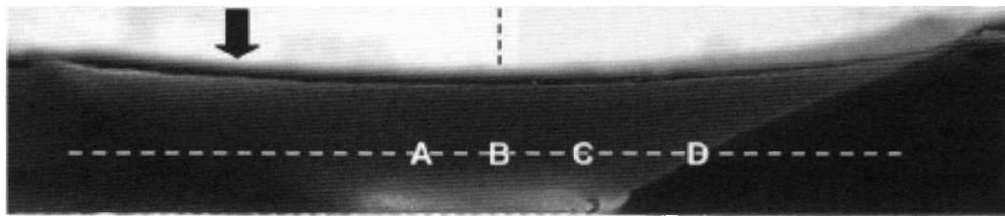
yönünden yeterli sonuçlar vermektedirler. Kaynaklı bağlantıların akma ve çekme mukavemetleri esas metallerinkinden daha iyi değerler vermekte ve kopmaların tümü ITAB'den oldukça uzakta esas metal tarafından oluşmaktadır. 180° eğilen eğme numunelerinde kaynak bölgesinde çatlama oluşmamaktadır. Kaynaklı parçaların kaynak bölgelerinde yapılan sertlik taramalarında kaynak metali sertlik değerlerinin esas metale göre daha yüksek olduğu ve bunun da çekme mukavemetini artırdığı ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan, ıslah edilmiş C-Mn çeliklerinin FSW uygulaması sonrasında kaynak metali sertliğinin azaldığı, dolayısı ile bağlantının çekme mukavemetinin de düştüğü ancak; aynı çeliğin ER100S-1 teli ile yapılmış olan MAG kaynaklı bağlantıların kaynaklı durumda verdikleri çekme mukavemeti değerlerine göre çok daha üstün sonuçlar alındığı belirtilmiştir. Çeşitli tür çeliklerin FSW yöntemi ile oluşturulan bağlantılarının çekme özellikleri özet olarak Tablo 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.2 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş çeşitli tür çeliklerin kaynak bağlantılarının çekme özellikleri

Kaynak edilen çelikler	Deney uygulama koşulları	Çekme mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Azkarbonlu çelik	Esas metal	-	-	-
	FSW bağlantısı	453- 457	-	-
AISI 1010	Esas metal	463	310	33.9
	FSW bağlantısı	476	331	22
X2CrNi12	Esas metal	-	-	-
	FSW bağlantısı	539- 541	-	-
304L	Esas metal	483	172	-
	FSW bağlantısı	621	340	-
DH-36	Esas metal	579	428	-
	FSW bağlantısı	624	566	-
HSLA-65	Esas metal	537	448	20

	FSW bağlantısı	569	493	30
	FSW bağlantısı	569	483	18.5
C-Mn'lı çelik	Esas metal	248	204	9.5
	FSW bağlantısı	179	151	2.6
	MAG bağlantısı	136	126	5.5

Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak paslanmaz çeliklerin bazı türlerinin başarı ile kaynak edildikleri görülmektedir. Bu türler uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ostenitik krom-nikelli paslanmaz çeliklerdir. Ancak son yapılan çalışmalar incelendiğinde ferritik paslanmaz çeliklerin en tanınan türü olan AISI 430 paslanmaz çeliğinin de FSW yöntemi ile başarılı bir şekilde kaynak edildiği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, %25Cr, %7Ni içeren ve yüksek korozyon direncinden dolayı petrol, doğalgaz, petro kimya, kağıt üretimi ve kirlilik kontrol üniteleri üretim endüstrilerinde kullanılan ve kısaca SAF 2507 olarak simgelendirilen süper-duplex paslanmaz çeliğinin de bu yöntem ile kaynak edilmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, 4 mm kalınlığında levhalar 25 mm omuz çaplı, 3.8 mm pim boylu olan PCBN takım ile (takımın sap ve omuz kısmı tungsten karbür alaşımlı sert metal karbürden olmak üzere pim kısmı PCBN olarak tasarlanmıştır), takım düşeyle 3.5° açı yapacak şekilde 450 d/d dönme hızı ile 60 mm/dak kaynak hızında kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan kaynak bağlantısının kaynak bölgesinin kesit makro görünüşü Şekil 5.6'da verilmektedir.



4 mm

Şekil 5. 6 4 mm kalınlığında SAF 2507 super-duplex paslanmaz çeliği levhaların FSW yöntemi ile kaynak edilerek oluşturulmuş bağlantılarının kaynak bölgesi

Üretimlerinde; yapılarında %50 ferrit ve %50 ostenit faz dengesi olacak şekilde metalurjik yapısı ayarlanan bu tür paslanmaz çeliklerin kaynağında, kaynak

bölgesindeki faz dönüşümleri ile bağlantıların mekanik özelliklerinin incelendiği bu çalışmanın sonucunda yüksek kaliteli FSW bağlantıları elde edilmiştir.

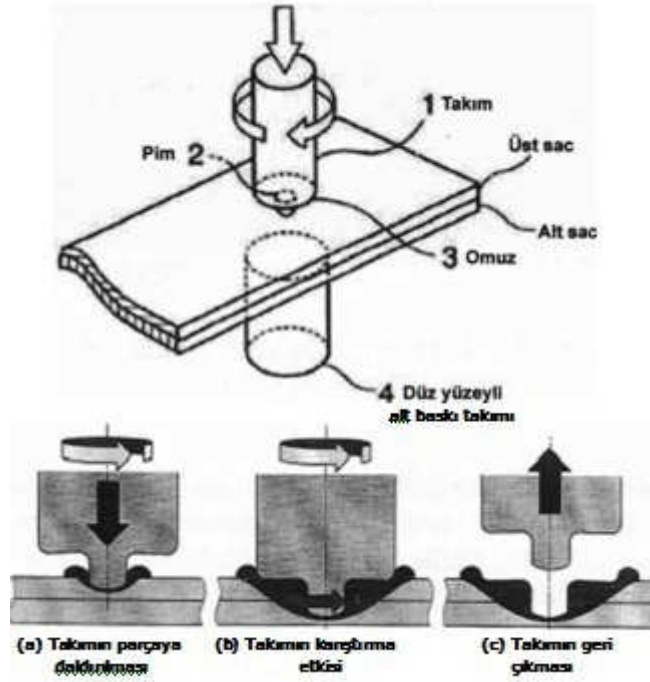
FSW yöntemi etkin bir şekilde ferrit ve ostenit fazlarının dinamik olarak yeniden kristalleşmesini ve yapının daha incelmesini sağlamıştır. Boyutları küçülen ferrit ve ostenit taneleri kaynak metalinin sertlik ve mukavemetinin artmasını sağlamıştır.

Çeliklerin FSW yöntemi ile birleştirilmesinde en önemli yöntem değişkenlerinden biri takım malzemesidir. Zira, çelikler yüksek sertlik ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahip olduklarından takım malzemesinin seçimi çok özenli olmaktadır, özellikle takımın 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda iyi tokluk ve iyi aşınma direnci göstermesi gerekmektedir. Bu nedenle, çeliklerin FSW yöntemi ile kaynağında tungsten alaşımları (WC, W-Re, vb.), molibden alaşımları ve polikristalin kübik bor nitrür (PCBN) takımlar kullanılmaktadır. Çalışmalar takımın aşınmasında her kaynağa başlamada takımın parçalar içine ilk daldırılmasının yani ilk kaynak başlangıcındaki aşınmanın etkili olduğunu göstermiştir. Bu açıdan 1.5 ile 2 m kaynak işleminden sonra takımın değiştirilmesi gerekmektedir. Ancak, ıslah edilmiş C-Mn çeliğinin FS kaynağında PCBN takım ile çok düşük takım aşınması ile 6 m kaynak yapmak olanağı vardır. Bu yüzden günümüzdeki çalışmalar uygun takım malzemelerinin geliştirilmesinin yanı sıra uygun geometrik yapılarda takımların da geliştirilmesi üzerine sürdürülmektedir. Bazı çalışmalar, iş parçasının ön tavlamaının takım aşınmasını en aza indirdiğini göstermiştir.

5.2 Çelik Sacların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yöntemi İle Birleştirilmesi

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı plastik akışkanlar dinamiğini kullanan bir katı-hal kaynak tekniğidir. Geleneksel yöntemlerle birleştirilmesi zor ve masraflı olan demir dışı metallerin birleştirilmesi amacıyla ortaya çıkan bir birleştirme çeşididir. Kaynak yapılması çoğu zaman zor olan alüminyum, magnezyum ve diğer hafif metal alaşımlarının birleştirilmesinde başarılı bir performans göstermektedir [4–6]. Bu kaynak yöntemi 6 mm kalınlığa kadar aynı cins ve farklı cins malzemelerin kaynaklı birleştirmelerinde kullanılmaktadır.[38]

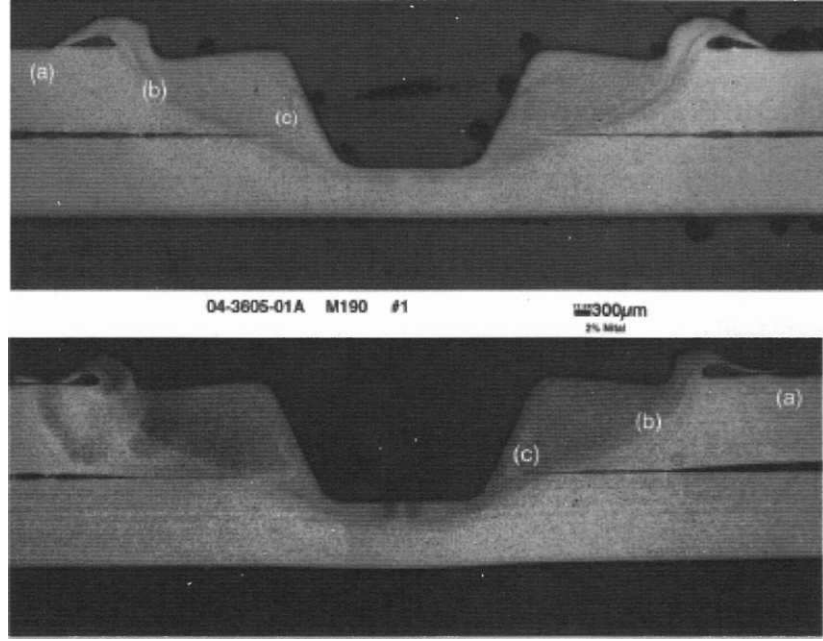
FSSW yönteminden yola çıkılarak geliştirilen FSSW (sürtünme karıştırma nokta kaynağı) yönteminin otomobillerde gövde üretiminde kullanılmasının olasırlığı üzerine yapılmış bir çalışmada, 1.6 mm kalınlığında DP600 ve M-190 çeliğı saclar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan alışılmış FSSW yönteminin prensibi Şekil 5. 7'de verilmektedir.



Şekil 5. 7 FSSW yönteminin prensibi ve uygulanma aşamaları

Ele alınan FSSW yönteminde takım, kaynak bölgesinden dışarı çekildiğinde kaynak bölgesinde pimin derinliğine bağılı olarak bir çukur kalmaktadır. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere bu oluşumun önlenmesi için yeniden doldurmalı FSSW yöntemi geliştirilmiştir. Bu açıdan buradaki yöntem alışılmış FSSW yöntemi olarak adlandırılmıştır. Burada tıpa biçiminde 2 mm boyunda bir pim içeren 10 mm omuz çaplı takım kullanılmış, takım dönme hızı 1500 d/d olarak sabit tutulmuş kaynak süresi 1.6 s- 3.2 s aralığında değiştirilmiştir. Oluşturulan nokta kaynak bağlantılarının kesit görünüşleri Şekil 5. 8'de gösterilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan çeliklerden DP600 çeliğı çift fazlı, M-190 çeliğı de martenzitik yapılı çelikler olup özellikle otomobil gövde yapımında kullanılmaktadırlar.



Şekil 5. 8 FSSW bağlantılarının kesit görünüşü

Bu çalışmanın sonucunda her iki çelik türü için de 3 s'lik kaynak süresinin yeterli metalurjik bağlantı oluşumunu sağladığı, kullanılan PCBN takım ile aşınma ve bozunma oluşmadan yüzden fazla kaynak yapılabildiği, her iki çeliğin kaynak bölgelerindeki TMEB yapılarının aynı mikroyapısal dönüşümler şeklinde oluştuğu, bağlantıların çekme makaslama deneyinde yumuşama bölgesi olan kaynak metaline uzak bölgelerden koptuğu ve bağlantı mukavemetlerinin artan kaynak süresine bağlı olarak arttığı saptanmıştır.

5.3 Çelik ve Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi Literatür Taraması

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 gözlenmemiştir. Sigma fazı oluşumunun delta-ferrit yapısının kaynak esnasında ısınma nedeniyle bozunması ile oluştuğu belirtilmiştir[14].

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[15].

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/min dönüş 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 [16].

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 [17]

Uzun çalışmasında 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 bileştirmenin yorulma özellikleri incelendiğinde Al 6013-T4 birleştirilmelerine göre %30 daha düşük değerler elde edilmiştir [18]

Yeni yapılan araştırmalarda farklı türde malzemelerin FSW 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 [19].

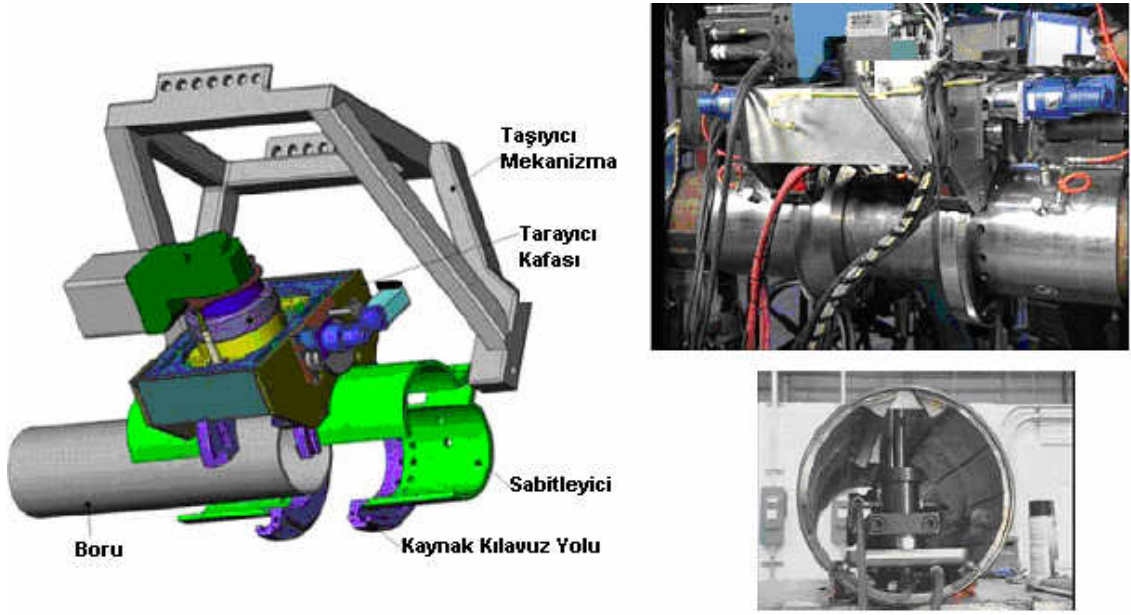
Y.D. Chung, H. Fujii, R. Ueki ve N. Tsuj'in yapmış olduğu "Yüksek Karbon çeliklerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynağı" araştırmalarında yüksek karbon çeliklerinin şekil değiştirmeden uygun parametrelerin kullanımı ile sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilebileceği görülmüştür. Bu yöntem ile yapılan çalışmada kaynak bölgesindeki yumuşaklığın ve homojenliğin arttığı görülmüştür.[30]

Takehiko Watanabe ve Hirofumi Takayama'nın yapmış olduğu alüminyum alaşımının çelikle sürtünme karıştırmakaynağı yöntemi ile birleştirilmesi çalışmasında

bileştirtme için gerekli optimum dönme ve ilerleme hızları araştırılmış ve çelik yüzeydeki oksit tabakası incelenmiştir. Sonuç olarak bu yöntem ile alüminyum ve çeliğin birleştirilmesi çok rahat sağlanmıştır. [36]

“AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çeliğin Sürtünme Karıştırma Kaynağına Devir Sayısının Etkisi” üzerine yaptığı isimli çalışmasında Orhan, 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 [20].

Yağ ve gaz hatlarında kullanılan(0,08C- 1,0Mn-0,235Si-0,04Al-0,016Nb) kimyasal bileşimine sahip AISI 409 Ferritik paslanmaz çelik bir borunun 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 5. 9) [21].



Şekil 5. 9 SKK yöntemi ile boruların alın altına kaynağında kullanılan sabitleme mekanizması

Boru kaynağının bitim noktasında oluşacak deliği önlemek için özel bir uygulama ile kaynağın devam etmesi sağlanmıştır (Şekil 5. 10).



Şekil 5. 10 SKK'da takım çıkış noktasındaki yarığı önlemek için alınan önlem.

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.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Çalışmanın Amacı

Günümüze kadar geliştirilen birçok çelik türü endüstride çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeliğin endüstride çok fazla kullanılmasının en önemli nedenlerinden bazıları; yüksek dayanıma sahip bir malzeme olması, temin edilebilirliğinin kolay olması, çeliğin bazı türlerinin bir çok malzeme türüne kıyasla korozyona karşı dayanımının daha iyi olması, geniş üretim yöntemlerine sahip olması ve geri dönüşebilirliklerinin iyi olması olarak sayılabilir. Çeliklere, bir çok ergitme esaslı ve katı faz kaynak yöntemleri kolaylıkla uygulanabilmektedir. Endüstride özellikle hafifliğin istendiği yerlerde ergitme esaslı kaynak yöntemleri, yerlerini katı faz kaynak yöntemlerine bırakmaktadırlar.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında ergitme oluşturmaksızın gerçekleştirilebilecek bir yöntem olan sürtünme karıştırma kaynağı, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının birleştirmesinde yoğun bir biçimde kullanılır duruma gelmiştir. Uygulaması daha zor olduğundan dolayı çelik için aynı durum söz konusu değildir. Uzun ömürlü makine ve araçların yapımına dönük projelerin son yıllarda artmasıyla sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirmenin önemi bir kez daha gündeme gelmiş ve bu konularda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları birçok gelişmiş ülkede sayıca artmıştır.

Yapılan birçok çalışmaya rağmen sürtünme karıştırma kaynağının çeliklerde uygulanması ve endüstriye aktarılması ile ilgili çok fazla ilerleme kaydedilememiştir.

Ülkemizde bu yöntemin endüstriyel olarak çok iyi bilinmemesi ve uygulanmaması, ayrıca çeliklerin bu yöntem ile kaynak edilebilirliği üzerine yeteri kadar araştırma yapılmamış olunması bu konu üzerinde çalışma yapılmasının en önemli nedenlerindendir.

Bu çalışmada, 304 kalite paslanmaz çelik sacın farklı kaynak parametreleri seçilmek suretiyle sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Takım devir sayısı başta olmak üzere, takım ilerleme hızı, baskı kuvveti ve birleştirilen saclar için kullanılan altlık malzemeleri parametre olarak seçilerek bunların kaynak dikişinde meydana getirdikleri değişiklikler incelenerek kaliteli bir birleştirmenin sağlanabilmesi için optimum değerlerin saptanması amaçlanmıştır.

6.2 Kaynak Donanımı

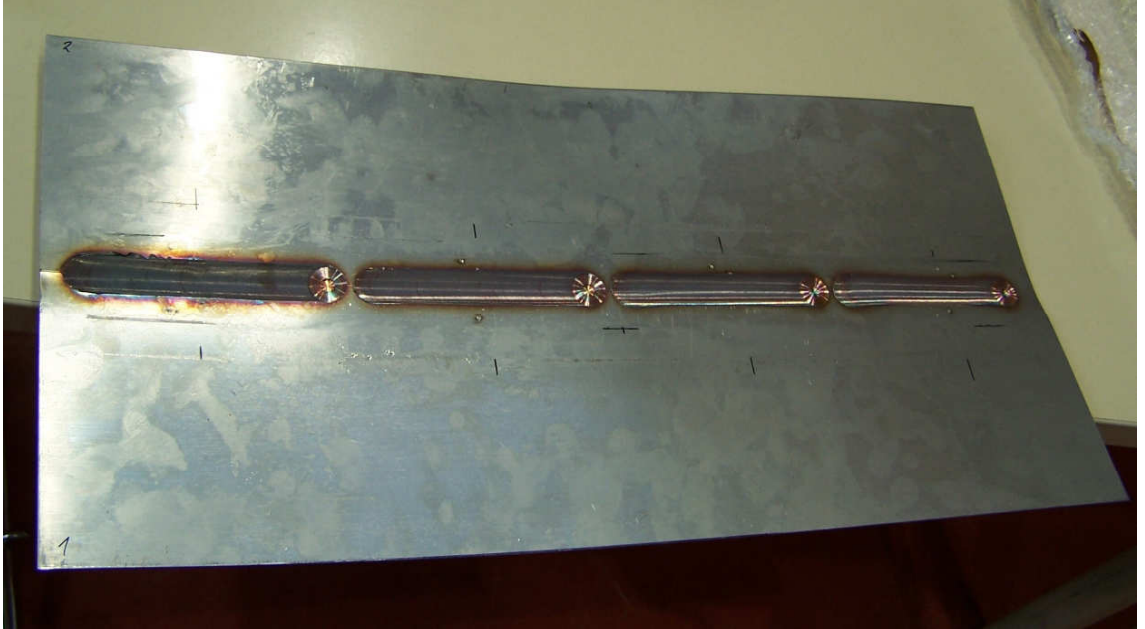
Çeliğin, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılacak takım malzemesi, yüksek baskı dayanımına, oda ve proses sıcaklığı sırasında iyi darbe dayanımına sahip olmalıdır. [22]

Prensip olarak ilk başlarda kullanılan takımlar alüminyum gibi ergime noktası düşük ve çok sert olmayan malzemelerde kullanılmaktaydı. Fakat daha sonra takım malzemesi olarak yüksek sıcaklığa daha dayanıklı malzemelerin takım malzemesi olarak kullanılması ile çelik, titanyum gibi ergime noktası daha yüksek olan malzemelerin bu yöntem ile birleştirilmesi sağlanmış oldu.[37] Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirmede, kaynağın kalitesini en çok etkileyen faktörlerden biri olan takım malzemesi, yüksek sıcaklıkta sertliğini koruyabilmesi ve aşınmaya karşı dirençli olması gerekliliği göz önüne alınarak oda sıcaklığında 1650 Vickers sertliğinde ölçülen tungsten karbür seçilmiştir. Birleştirme için kullanılan takım, kaynak edilen numunenin kalınlığına bağlı olarak, 0,57 mm pim boyu, 6,1 mm pim çapı ve 19 mm takım omuz çapı ölçülerinde seçilmiştir. Ayrıca takım omuz kısmı iç bükey özelliğe sahiptir. Kullanılan tungsten karbür takımların kırılgenliğini azaltmak amacıyla pim ve omuz kısmının keskin köşeleri yuvarlatılmış ve pim uca doğru konik olarak seçilmiştir. (Şekil 6.1)



Şekil 6. 1 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile yapılan birleştirmelerde kullanılan takım resmi

Deneysel çalışmada 1.2 mm kalınlığında 500 mm uzunluğunda ve 120 mm genişliğinde AISI 304 paslanmaz çelik saclar, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir.



Şekil 6. 2 Farklı parametrelerde sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş malzemeler

Çizelge 6. 1 Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi

AISI	%C max	%Mn max	%P max	%S max	%Si max	%Cr	%Ni	%N max	Ti max
304	0,08	2,0	0,045	0,030	0,75	18,0-20,0	8,0-10,5	0,1	-

Çizelge 6. 2 Deney malzemelerinin mekanik özellikleri[27]

Yoğunluk(g/mm ³)	Elastisite Modülü(GPa)	Çekme dayanımı(MPa)	Akma Sınırı(MPa)	Kopma uzaması(%)	Sertlik(HRB)
8	193	515	205	40	88

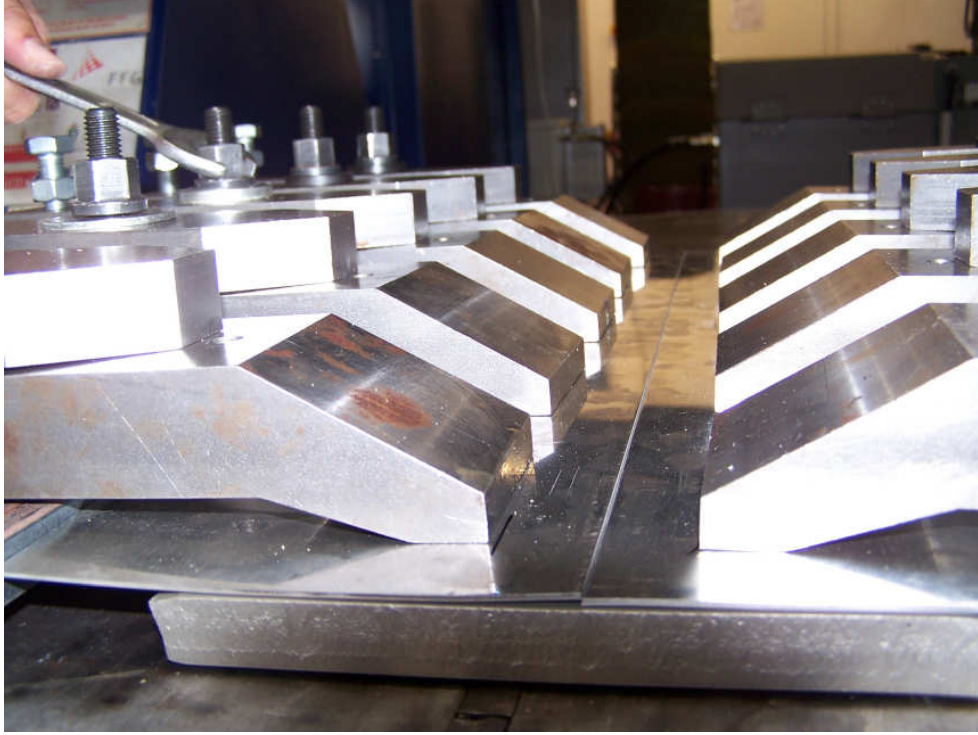
Çelik sacların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirme işlemleri Graz Teknoloji Üniversitesi'nin laboratuvarında MTS I-Stir BR4 sürtünme karıştırma kaynağı makinası kullanılarak yapılmıştır. Kanak makinesinin genel özellikleri;

- X yönünde 2540 mm, Y yönünde 1270 mm Z yönünde 737 mm hareket kabiliyeti
- 800 mm/dk ya kadar ilerleme hızı
- Maksimum 3200 dev/ dk dönme hızı
- Tipi MTS şeklindedir.(Şekil 6.3)



Şekil 6. 3 Sürtünme karıştırma kaynağı makinası

Ülkemizde sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde kullanılan makinaların büyük bir kısmı sabit tablalı dik freze tezgahlarının modifiye edilmesi ile geliştirilmiştir. Bu tür tezgahlarda da standart T- kanallı bağlama tablaları bulunmaktadır. Deney çalışması yapılan sürtünme karıştırma kaynağı makinasının bağlama şekli de yine benzerdir. T kanallar ve yardımcı tertibatı ile deneyi yapılacak malzeme, Şekil 6. 4 de olduğu gibi sabitlenmiştir.



Şekil 6. 4 Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile yapılan birleştirmede kullanılan bağlama tertibatı

6.3 Kaynak İşleminin Yapılışı

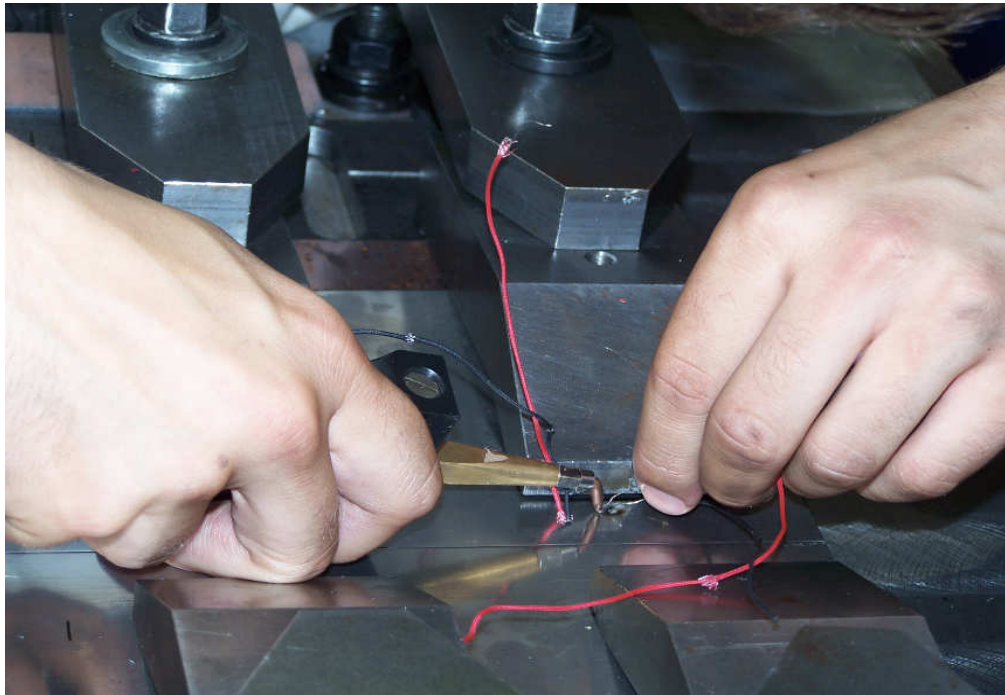
Graz Teknoloji Üniversitesi'nin laboratuvarında MTS I-Stir BR4 sürtünme karıştırma kaynağı makinası kullanılarak yapılan AISI 304 paslanmaz çelik sacın sürtünme karıştırma kaynağında, ilk olarak kaynağın istenilen parametreler çerçevesinde yapılması için kaynak işleminin programlaması yapılmıştır. İstenilen verimde çalışması ve ısınması için sürtünme karıştırma kaynağı makinası kısa bir süre boştaki çalıştırılmıştır. İstenilen ölçülerde hazırlanmış olan malzeme çifti, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi yapılmak üzere alın altına getirilip bağlama tertibatı ile sabitlenmişlerdir. Bu işlemi yaparken özellikle malzeme çiftinin alın altına gelmesine ve yüzeyler arasında kaçıklık olmamasına dikkat edilmiştir. Bağlama tertibatının, kaynak dikişine olabildiğince yakın noktalarda sabitlenilmesine de özen gösterilmiştir. Böylece birleştirilecek malzemenin, birleştirme işlemi sırasında oluşabilecek ileri-geri, sağa-sola ve yukarı hareketlerine karşı koyulmuştur.

Bağlama sırasında aşağıdaki hususlara özellikle dikkat edilmiştir;

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

Kaynak kalitesini etkileyen faktörlerden biri olan yüzey temizliğini sağlamak amacı ile malzemelerin yüzeyleri kaynak işlemi öncesinde aseton ile temizlenmiştir.

Karıştırıcı uç malzemeye daldıktan ve ilerlemeye başladıktan sonra kaynak işlemi sırasında kaynak dikişinde meydana gelen sıcaklıkları ölçmek amacı ile kaynak dikişine en yakın bölge başta olmak üzere sırayla ve mesafe artacak şekilde kaynak dikişinin her iki tarafına ikişer adet termokupl monte edilmiştir. (Şekil 6. 7)

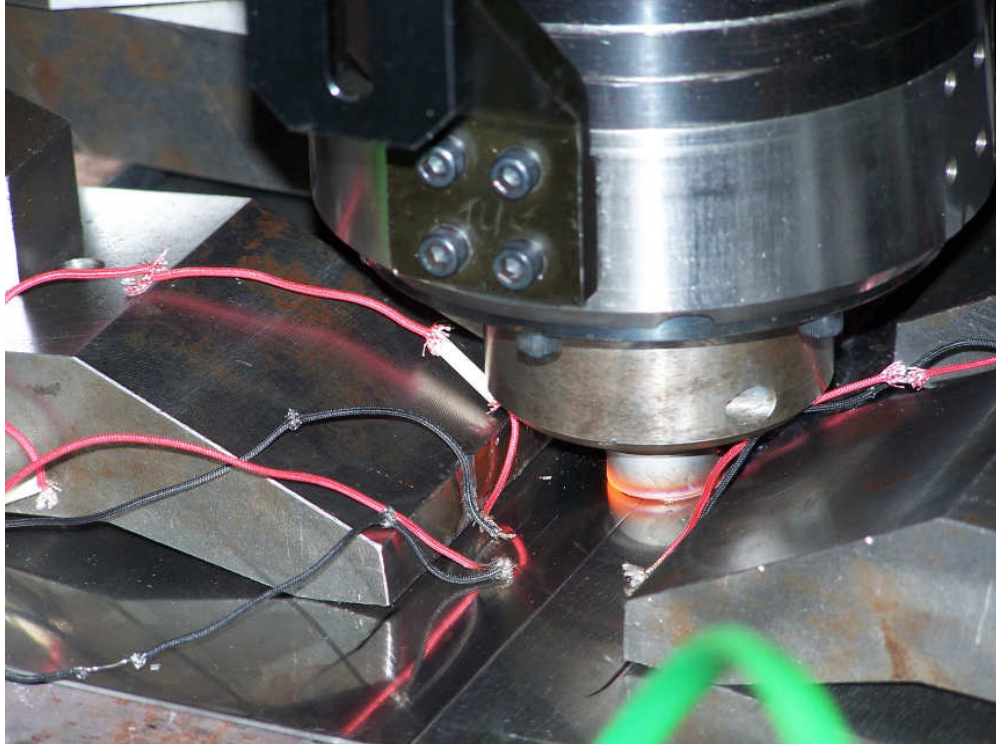


Şekil 6. 5 Kaynak dikişi çevresinde meydana gelen sıcaklıkları ölçmek amacı ile termokupllerin monte edilmesi

Termokupller, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi yapılacak malzemeye monte edildikten sonra takım istenilen devirde döndürülür ve aynı zamanda birleştirilmesi yapılmak üzere alın altına getirilmiş malzeme çiftinin birbirine temas ettiği noktadan daldırılır. Takımın daldığı noktada yerel ısınma ve malzemede

yumuşama sağlandıktan sonra istenilen devir, ilerleme hızı ve baskı kuvvetine bağlı olarak birleştirme işlemi yapılmış ve istenilen boyda kaynak işlemi yapıldıktan sonra karıştırıcı uç yine dönerek mazemeden çıkarılıp ilk konumuna geri dönmüştür. Böylece malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi sağlanmış olmuştur.

Aynı işlem her numune için tekrar edilmiş böylece yirmi adet malzeme çiftinin farklı parametrelerdeki sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi yapılmıştır.



Şekil 6. 6 Paslanmaz çelik sacın sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi

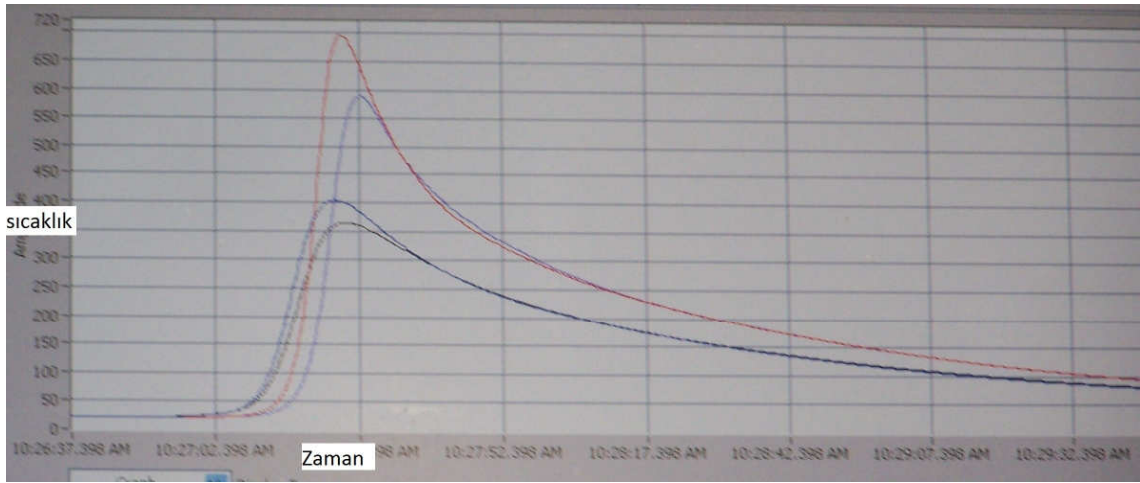
6.4 Numunelerin Hazırlanması ve Sonuçların İrdelenmesi

Farklı parametreler ile yirmi adet malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilme işlemi yapılmıştır. Farklı parametrelere bağlı olarak malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmelerinde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Uygulanılan parametreler ve buna bağlı olarak elde edilen sonuçlar Çizelge 6. 3'te verilmiştir.

Çizelge 6. 3 Yirmi adet numune için uygulanan parametreler ve deney sonuçları

Numune No	Takım devir sayısı(d/dk)	Takım ilerleme hızı (mm/dk)	Takım baskı kuvveti (kN)	En yüksek sıcaklık değeri(°C)	Takım altlık malzemesi	Deney sonucu
1	400	50	24	800	WC	<u>Olumsuz</u>
2	400	100	24	720	WC	Olumlu
3	400	150	24	700	WC	Olumlu
4	400	200	19	415	WC	Olumlu
5	400	300	19	410	WC	Olumlu
6	550	50	19	780	WC	Olumlu
7	550	80	19	740	WC	Olumlu
8	550	100	19	670	WC	Olumlu
9	550	150	19	470	WC	Olumlu
10	550	200	19	420	WC	Olumlu
11	550	100	19	580	Inconel	Olumlu
12	550	150	19	450	Inconel	Olumlu
13	550	200	19	410	Inconel	Olumlu
14	550	300	19	400	Inconel	Olumlu
15	800	50	19	850	Inconel	<u>Olumsuz</u>
16	800	100	24	830	Inconel	<u>Olumsuz</u>
17	800	100	19	750	Inconel	Olumlu
18	800	150	19	600	Inconel	Olumlu
19	800	200	19	450	Inconel	Olumlu
20	800	300	24	410	Inconel	Olumlu

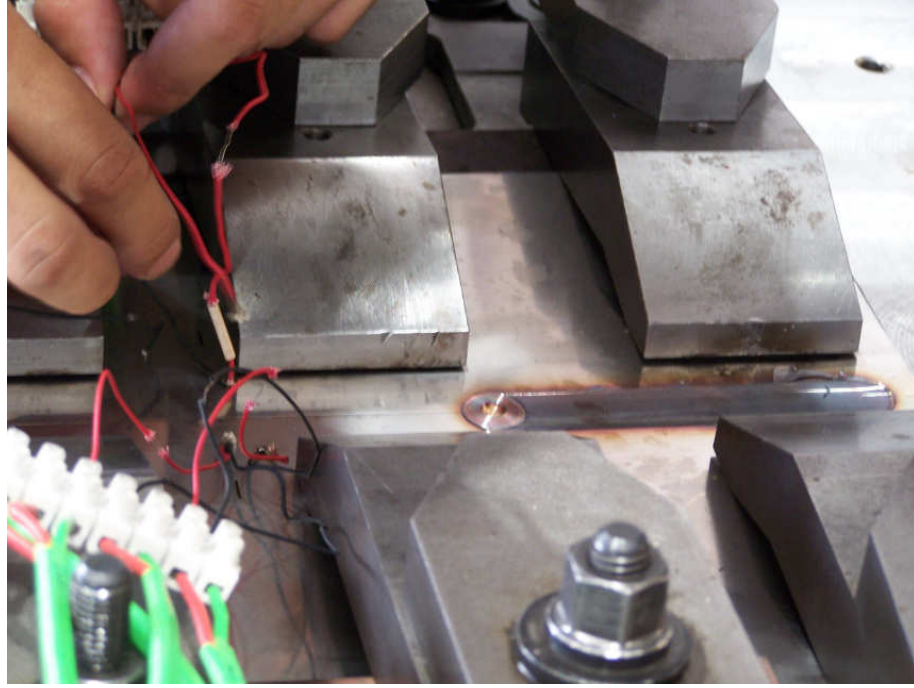
Numunelerin hazırlanması sırasında 400, 550 ve 800 dev/dk olmak üzere üç farklı devirsayısı; 50, 80, 100, 150, 200 ve 300 mm/dk olmak üzere altı farklı ilerleme hızı; 19 ve 24kN olmak üzere iki farklı takım baskı kuvveti ve takım altlık malzemesi olarak da tungsten karbür ve nikel krom(inconel) süperalaşım malzemeleri kullanılmıştır. Uygulanılan farklı parametreler doğrultusunda ve kaynak dikişinin yakın bölgelerine monte edilen termokupller sayesinde kaynak dikişi çevresinde meydana gelen en yüksek sıcaklık değerleri ölçülmüş ve bu parametreler ile sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin çelik saca uygulanabilirliği incelenmiştir.



Şekil 6. 7 Numuneye bağlanan dört termokupl ile zamana bağlı sıcaklık değerleri

Üçüncü numune için kaynak dikişinin her iki tarafına ikişer adet yerleştirilen termokupller ile ölçülen sıcaklık değerleri şekil 6. 10'daki gibidir. Kaynak dikişinin sol tarafında ve kaynak dikişine yakın olan termokupl ile ölçülen değer 700 °C derece ile en yüksek sıcaklık değeri olurken, hemen karşısında kaynak dikişin sağ tarafında ve kaynak dikişinin hemen bitişiğine yerleştirilen termokupl ile ölçülen en yüksek sıcaklık değerinin 590 °C derece olduğu gözlemlenmiştir. Yine kaynak dikişinin sol tarafında ve kaynak dikişinin 4 mm uzaklığına monte edilen termokupl ile ölçülen sıcaklık değeri 400°C derece okunurken sağ tarafa monte edilen termokupl ile ölçülen sıcaklık değerinin 360°C derece olduğu görülmüştür. Başlangıçta 0 °C derecede dört termokuplde okunan sıcaklık değerleri aynı iken kaynak işlemi başladıktan sonra ilk bir dakika içerisinde termokupllerde okunan sıcaklık değerleri arasındaki fark hızlı bir şekilde artmış ve bir dakikadan sonra sıcaklık değerleri yavaş yavaş birbirilerine yaklaşmaya başladıkları görülmüştür. Kaynak işleminin sonuna doğru ise yine dört termokuplden okunan

değerler birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. İlk bir dakikadan sonra kaynak dikişine yakın olan termokupllerden okunan değerler ve kaynak dikişine aynı uzaklıkta monte edilen termkupllerden okunan değerler arasındaki fark daha çabuk kapanmıştır.



Şekil 6. 8 Kaynak dikişinin sağına ve soluna monte edilen termokupller.

İlk olarak ele alınan malzeme çifti, 400 dev/dk devir sayısı, 50 mm/dk ilerleme hızı ve 24 kN baskı kuvveti parametreleri kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmiştir. Düşük ilerleme hızına ve yüksek baskı kuvvetine bağlı olarak kaynak dikişinde meydana gelen yüksek ısıdan ötürü kaynak işlemi olumsuz sonuç vermiştir. Düşük kaynak hızına bağlı olarak malzemede yüksek ısı girdisi olmuş ve yüksek takım baskı kuvveti yüzünden de yumuşamış malzeme, kaynak dikişinin yanlarına doğru taşmıştır. Bu yüzden kaynak işlemi olumsuz sonuç vermiştir. Böylece paslanmaz çelik sacın sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinin bu parametrelerde yapılamayacağı görülmüştür.(Şekil 6. 9)



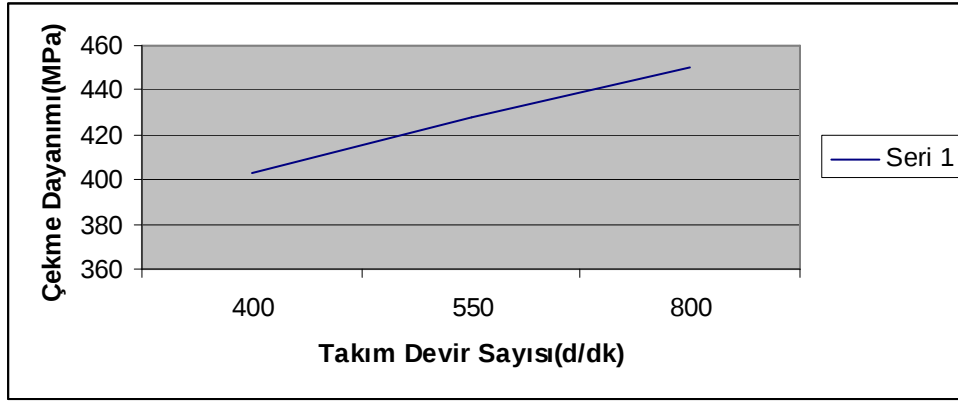
Şekil 6. 9 Çelik sacın, 400 dev/dk devir sayısı 50 mm/dk ilerleme hızı ve 24 kN baskı kuvveti parametreleri ile yapılan sürtünme karıştırma kaynağı

Çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağında daha düşük enerji girdisine bağlı olarak daha iyi kaynak kalitesi elde edilmiş olduğu yapılmış olan benzer çalışmalar sayesinde tespit edilmiştir. [23] Yapılan bu çalışmada da yine yüksek ısı girdisine bağlı olarak birleştirilmeleri yapılan numunelerin bazılarının olumsuz sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Yirmi adet aynı özelliklere sahip malzeme çifti farklı parametrelerde sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmeleri sağlanmıştır. Böylece farklı parametrelerin, paslanmaz çelik sacın sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi üzerindeki etkisinin incelenmesi sağlanmıştır.

Çizelge 6. 4 Takım devir sayısına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişimler

Numune No	Takım devir sayısı(d/dk)	Takım ilerleme hızı (mm/dk)	Takım baskı kuvveti (kN)	Çekme Dayanımı(MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
4	400	200	19	403	302
10	550	200	19	428	325
19	800	200	19	450	344

Takım ilerleme hızı sabit ve 200 mm/dk, takım baskı kuvveti sabit ve 19 kN ve 1,5 derecelik takım dalma açısı olan 4, 10 ve 19. numunelerin sırayla 400, 550 ve 800 d/dk takım devirleri parametrelerine bağlı olarak elde edilen numunelerin çekme dayanımları incelenmiştir.



Şekil 6. 10 Takım devir sayısına bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarındaki değişimler

Diğer tüm parametreleri sabit olan üç numunenin takım devir sayılarındaki artışa bağlı olarak çekme dayanımlarında da artış olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen çekme dayanım test sonuçları ana malzemenin çekme dayanımına yakın değerler olması ile beraber üç numune arasında en iyi dayanım takım devir sayısı en yüksek olan 19. numunede ve en düşük dayanım da takım devir sayısı en düşük olan 4. numunede gözlemlenmiştir. 4. numunede 400d/dk takım dönme hızı ile elde edilen birleştirmede numunenin çekme dayanımı 415 MPa çıkarken 19. numunede 800 d/dk takım dönme hızı ile elde edilen birleştirmede numunenin çekme dayanımının 450 MPa çıktığı görülmüştür. Çekme testi yapılan numunelerde kopmanın kaynak dikişinde değil kaynak dikişinin hemen yanında olduğu görülmüştür.

Yapılan test sonucunda, 200 mm/dk ilerleme hızı, 19 kN takım baskı kuvveti, 1,5 derecelik takım dalma açısı sabit parametrelerinde ve 400 ile 800 d/dk takım devir sayıları arasında ve devir sayısındaki artışa bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarında da artış olduğu gözlemlenmiştir.

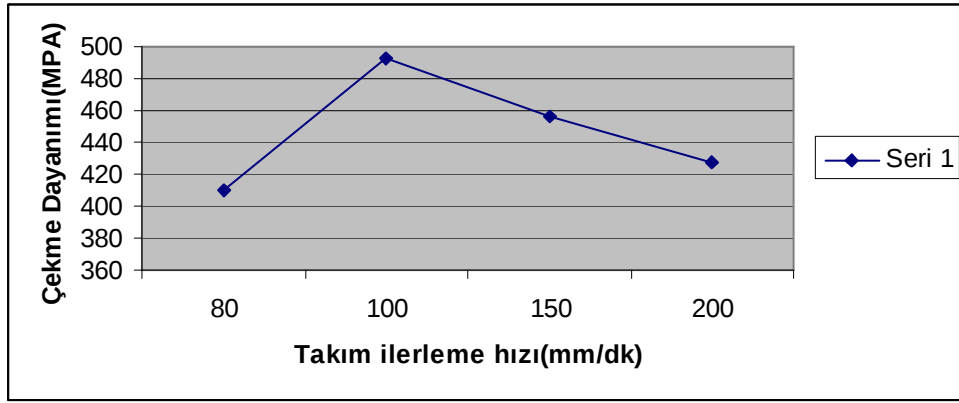
Devir sayısındaki artışa bağlı olarak enerji girdisinin arttığı da gözlemlenmiştir. Diğer tüm parametrelerin sabit kalması ile beraber devir sayıları 550 dev/dk ile 800 dev/dk olan 11. ve 17. numuneler karşılaştırıldıklarında 17. numunede gözlenen en yüksek

sıcaklığın 11. numuneden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. 16. numunenin olumsuz sonuç vermesinin en büyük nedeninin de yine takım devir sayısının yüksek olmasına bağlı olarak kaynak dikişinde yüksek ısı girdisinin oluşması ve buna bağlı olarak kaynak dikişinde yanlara doğru taşma olduğu görülmüştür.

Malzemeye ısı girdisinde, önemli rol oynayan faktörlerin başında takım ilerleme hızı gelmektedir. Takım dönerek malzemeye daldıktan sonra birim bölgede kaldığı sürüce o bölgedeki ısı girdisinde de artış olduğu gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak gerek 2. ve 3. numunelerde ve gerekse de 12. ve 13 numunelerin karşılaştırılmasında görüldüğü gibi diğer tüm parametrelerin sabit kalması ile beraber takım ilerleme hızının artışına bağlı olarak ölçülen en yüksek sıcaklık değerlerinde de düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir. 1. numunenin olumsuz sonuç vermesinin en büyük nedeninin, uygulanan baskı kuvveti ile beraber düşük takım ilerleme hızı olduğu görülmüştür.

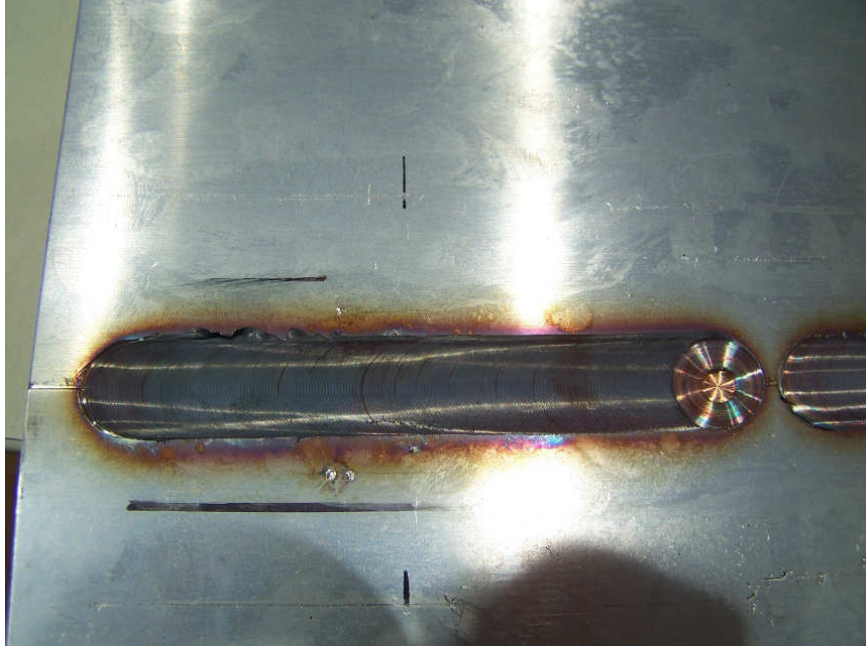
Çizelge 6. 5 Takım devir sayısına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişimler

Numune No	Takım devir sayısı(d/dk)	Takım ilerleme hızı (mm/dk)	Takım baskı kuvveti (kN)	Çekme Dayanımı(MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
7	550	80	19	410	313
8	550	100	19	492	359
9	550	150	19	456	348
10	550	200	19	428	325



Şekil 6. 11 Takım ilerleme hızına bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarındaki değişimler

Takım devir sayısı sabit ve 550 d/dk, takım baskı kuvveti sabit ve 19 kN ve 1,5 derecelik takım dalma açısı olan 7, 8, 9 ve 10. numunelerin sırayla 80, 100, 150, 200 mm/dk takım ilerleme hızları parametrelerine bağlı olarak numunelerin çekme dayanımları incelenmiştir. Diğer tüm parametreleri sabit olan dört numunenin takım ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak çekme dayanımlarında da önce artış sonra da azalış olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen çekme dayanım test sonuçları ana malzemenin çekme dayanımına yakın değerler olması ile beraber dört numune arasında en iyi dayanım 8. numunede ve en düşük dayanım da takım ilerleme hızı en düşük olan 7. numunede gözlemlenmiştir. Dört numune arasında en iyi dayanıma sahip olan 8. numunenin takım ilerleme hızı 100 mm/dk olup buna bağlı olarak çekme dayanımı da 492 MPa olduğu görülmüştür. Yine dört numune arasında en düşük dayanım da 80 mm/dk ile 7. numunede olup çekme dayanımının da 410 MPa olduğu görülmüştür. 100 mm/dk ilerleme hızı ile kaynak dikişindeki dayanımın ana malzemenin dayanımına yakın bir değerde olduğu görülmüştür. 410 MPa dayanıma sahip 7. numune dahil diğer üç numunenin de her ne kadar dayanımlarını 8. numuneye göre daha düşük olsa da daha önceden yapılmış olan çalışmalar göz önünde bulundurulunca, iyi ve ana malzemenin dayanımına yakın değerlerde dayanımlara sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 6. 12 7. numunenin kaynak dikiş görüntüsü

550 d/dk takım devir sayısı, 19 kN takım baskı kuvveti, 1,5 derece takım dalma açısı sabit parametrelerinde ve takım ilerleme hızındaki 80'dan 200 mm/dk artışa bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarında 100 mm/dk'ya kadar artış ve 100 mm/dk sonra da azalış olduğu gözlemlenmiştir. Çekme testi yapılan numunelerde kopmanın kaynak dikişinde değil kaynak dikişinin hemen yanında olduğu görülmüştür.

Paslanmaz çelik sacın sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde önem arzeden faktörlerden bir diğeri de takım baskı kuvvetidir. Takım baskı kuvvetine bağlı olarak malzemeye giren ısı miktarında da artış olmuştur. 16. ve 17.numunelerde, diğer tüm faktörler sabit tutularak takım baskı kuvvetinin artırılması ile numunede ölçülen sıcaklıkta da artış gözlemlenmiştir. Diğer tüm faktörlerin aynı olmasına karşın sadece takım baskı kuvvetinde yapılan artışa bağlı olarak 16. numunede yüksek ısı girdisine bağlı olarak kaynak dikişinde aşırı yumuşama ve takım baskı kuvveti nedeniyle de kaynak dikişinde yanlara doğru taşmalar yaşanmasından ötürü olumsuz sonuç alınmıştır.

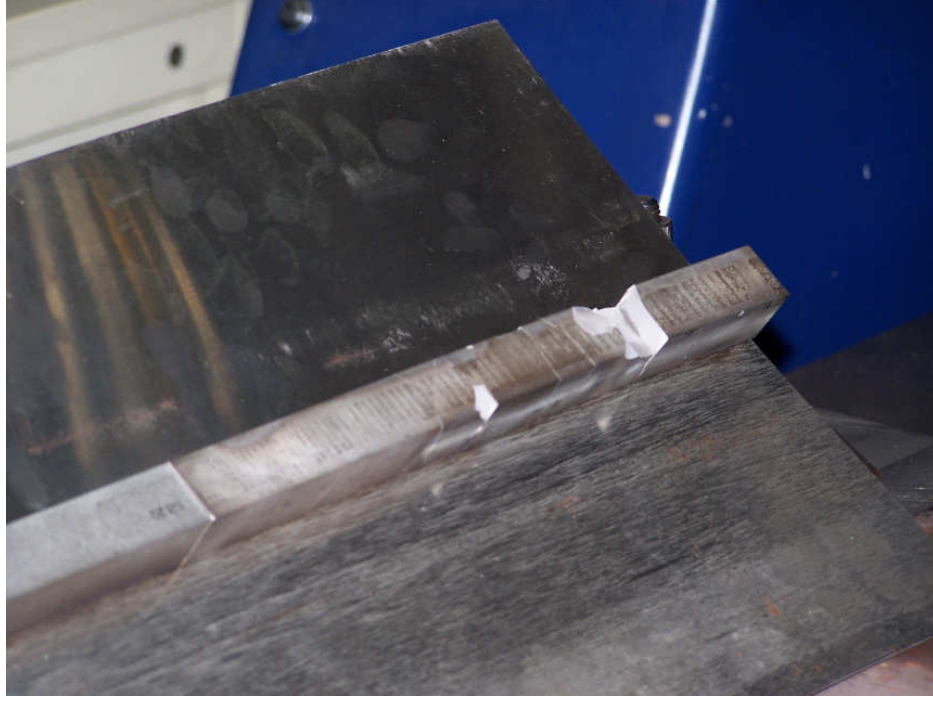
Sakarya üniversitesinde yapılan “Tıg Ve Mıg Gazaltı Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilmiş Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikler” tez konusu incelendiğinde ve bu çalışma ile mukayese edildiğinde paslanmaz çeliklerin çekme dayanımlarının sırasıyla TIG, MIG ve sürtünme karıştırma kaynağı şeklinde olduğu görülmüştür.[26] Her ne

kadar çekme dayanımı TIG ve MIG kadar olmazsa ve şuanda bu yöntemlere alternatif bir yöntem olmasa da sürtünme karıştırma kaynağının birçok üstün özellikleri sayesinde önümüzdeki yıllarda bu yöntemlere alternatif olarak paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılacağı düşünülmektedir.

Çelik sacın sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmelerinde tüm numunelerde aynı takım kullanılmış fakat altlık malzemesi olarak tungsten karbür ve Inconel alaşım olmak üzere iki çeşit altlık malzemesi kullanılmıştır. Inconel genel olarak nikel esaslı bir süperalaşımın kimyasal içeriğinde hacimsel olarak; % 38–76 oranında nikel (Ni), % 27’den fazla krom (Cr) ve % 20 kobalt (Co) bulunmaktadır . Bu malzemeler yüksek korozyon dayanımı ya da yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanımın gerekli olduğu uygulamalarda kullanılırlar.

Takım altlık malzemesi hariç diğer tüm faktörlerin aynı olması ile beraber takım malzemesi WC olan 10. numune ile takım malzemesi inconel olan 13. numuneler karşılaştırıldıklarında, tungsten karbürün ısı iletkenliğinin daha iyi olmasına bağlı olarak 10. numunenin en yüksek sıcaklığının 13. numuneden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu da takım altlık malzemesinin çok fazla olmasa da çeliğin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde rol oynadığını göstermiştir.

Kaynak dikişinde oluşan yüksek ısı girdisine bağlı olarak takım altlık malzemesinde hasarlanma olduğu da gözlemlenmiştir. Tungsten karbür malzeme olarak kullanılan numunelerden özellikle yüksek ısı girdisine bağlı olarak 6. numunenin altlık malzemesinde hasarlanma tespit edilmiştir. (Şekil 6.13)



Şekil 6. 13 Tungsten karbür altlık malzemesinde yüksek ısıya bağlı olarak oluşan hasarlanma

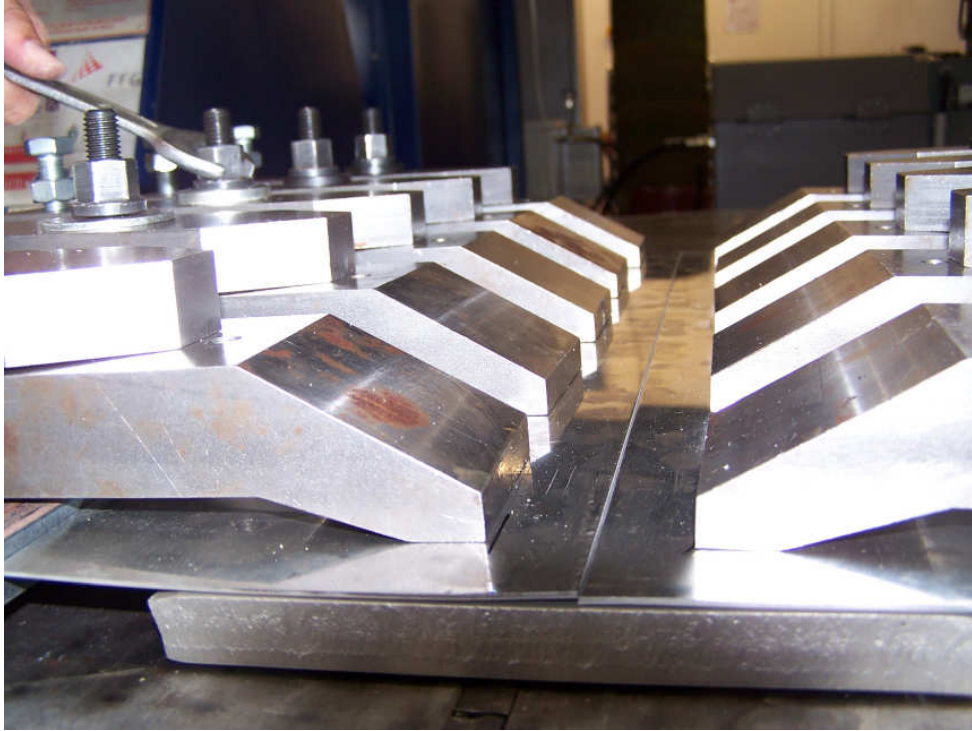
Yine takım altlık malzemesi Nikel-krom, (Inconel) olan 17. numunede de numunenin altlığa yapışma sorunu görülmüştür. Yapışmada en önemli rol oynayan faktörlerin ise yüksek ısı girdisine neden olan takım dönme ve ilerleme hızları ve takım baskı kuvveti olduğu görülmüştür.(Şekil 6. 14)



Şekil 6.14 Numunenin altlık malzemesine yapışması

Çeliğin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi ile ilgili olarak daha önceden yapılmış olan çalışmalardan, takımın belli bir açı ile malzemeye dalmasının ve ilerlemesinin kaynak kalitesini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Buna bağlı olarak yapılan deneysel çalışmada, takım dalma açısı 1,5 derece olarak alınmış ve tüm malzemeler aynı açı ile kaynak edilmişlerdir.

Yüzeyin düzgünlüğü, temizliği ve alın altına bindirmelerde alınların birbirlerine düzgün bir şekilde temas etmeleri sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirmeyi etkileyen bir diğer faktördür. Çelik sacın sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde yüzey temizliğini sağlamak için yüzey, kaynak işlemiden önce aseton ile silinmiştir. Yine yüzeylerin birbirine tam temas etmelerine ve yüzeyler arasında kaçıklık olmamasına dikkat edilmiştir. Birbirleri ile tam olarak temas etmeyen veya birleştirilecek yüzeyler arasında yükseklik farkı olan sacların kullanılmamasına da önem gösterilmiştir.



Şekil 6.15 Yüzeyleri arasında yükseklik farklı olan saclar

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 [24].

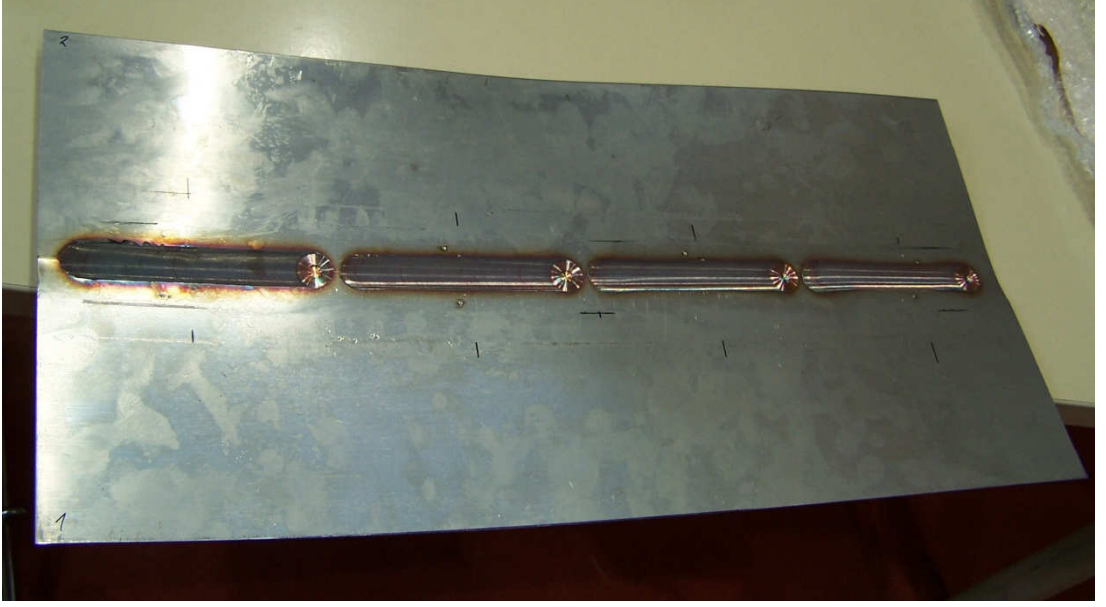
Yirmi adet malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi aynı takım ile yapılmıştır. Tezgahın rulman ve yataklarının maruz kalacağı yüksek sıcaklıktan olumsuz etkilenmesini önlemek için soğutmalı tutucular kullanılmıştır. İçindeki termo-eleman ile takım sıcaklığı ölçülerek içinden geçen akışkan sayesinde sıcaklığın belirli bir değerin üzerine çıkması önlenir. Tezgahın rulman ve yataklarının aşırı ısınması bu sayede önlenmiş olunur. Tungsten karbür takım, kaynak işlemi sırasında su ile soğutulduğundan dolayı aşınmaya fazla maruz kalmaması ile beraber takım üzerindeki aşınma izlenmiş ve en büyük aşınmanın ilk dalış esnasında yük altında tam ısınmamış soğuk metalin hareketi sırasında oluştuğu literatür ışığında öğrenilmiş ve yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir. Yirmi adet malzeme çiftinin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmeleri sonrasında kullanılan takımın son hali şekil 6. 16'te verilmiştir.



şekil 6.16 Takımın, kaynak işleminde sonraki hali

Çeliğin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi sırasında ısı girdisine ve uygulanan baskı kuvvetine bağlı olarak bazı numunelerin kaynak dikişinin yanlarına doğru yığılmalar olmuş ve kaynak dikişinin pürüzlülüğünde artışlar görülmüştür. şekil 6.17 de sağdan sola doğru numunelerde ısı girdisinde artış olmasına bağlı olarak dikiş

yanlarına doğru yığılmalar artmış ve kaynak dikişinde de pürüzlenmeler artmıştır. Bunlar da kaynak dikişini olumsuz yönde etkilemiştir.



Şekil 6. 17 Sağdan sola doğru numunelerde ısı girdisindeki artışa bağlı olarak kaynak dikişinin yanlarına doğru yığılmaların ve dikişteki pürüzlüklerin artması

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmada, farklı parametreler kullanılarak 304 kalite paslanmaz çelik sacların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilme işlemi yapılmıştır. Farklı parametrelere bağlı olarak sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilen numunelerde farklı sonuçlar elde edilmiştir.

Numunelerin hazırlanması sırasında 400, 550 ve 800 dev/dk olmak üzere üç farklı devirsayısı; 50, 80, 100, 150, 200 ve 300 mm/dk olmak üzere altı farklı ilerleme hızı; 19 ve 24kN olmak üzere iki farklı takım baskı kuvveti ve takım altlık malzemesi olarak da tungsten karbür ve Inconel (Ni-Cr süper alaşım) malzemeleri kullanılmıştır. Uygulanılan farklı parametreler doğrultusunda ve monte edilen termokupller sayesinde kaynak dikişi çevresinde meydana gelen en yüksek sıcaklık değerleri ölçülmüş ve bu parametreler ile sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin paslanmaz çelik saca uygulanabilirliği incelenmiştir.

Takım ilerleme hızı sabit ve 200 mm/dk, takım baskı kuvveti sabit ve 19 kN ve 1,5 derecelik takım dalma açısı olan 4, 10 ve 19. numunelerin sırayla 400, 550 ve 800 d/dk takım devirlerine bağlı olarak çekme dayanımları incelenmiştir. Diğer tüm parametreleri sabit olan üç numunenin takım devir sayılarındaki artışa bağlı olarak çekme dayanımlarında da artış olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen çekme dayanım test sonuçları ana malzemenin çekme dayanımına yakın değerler olması ile beraber üç numune arasında en iyi dayanım, takım devir sayısı en yüksek olan 19. numunede ve en düşük dayanım da takım devir sayısı en düşük olan 4. numunede gözlemlenmiştir. 4.

numunede 400d/dk takım dönme hızı ile elde edilen birleştirmede numunenin çekme dayanımı 415 MPa çıkarken 19. numunede 800 d/dk takım dönme hızı ile elde edilen birleştirmede numunenin çekme dayanımının 450 MPa çıktığı görülmüştür. Çekme testi yapılan numunelerde kopmanın kaynak dikişinde değil kaynak dikişinin hemen yanında olduğu görülmüştür.

Yapılan test sonucunda, 200 mm/dk ilerleme hızı, 19 kN takım baskı kuvveti, 1,5 derecelik takım dalma açısı sabit parametrelerinde ve 400 ile 800 d/dk takım devir sayıları aralıklarında, devir sayısındaki artışa bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarında da artış olduğu gözlemlenmiştir.

Devir sayısının artmasına bağlı olarak enerji girdisinin arttığı da gözlemlenmiştir. Diğer tüm parametrelerin sabit kalması ile beraber devir sayıları 550 dev/dk ile 800 dev/dk olan 11. ve 17. numuneler karşılaştırıldıklarında 17. numunede gözlenen en yüksek sıcaklığın 11. numuneden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. 16. numunenin olumsuz sonuç vermesinin en büyük nedeninin de yine takım devir sayısının yüksek olmasına bağlı olarak kaynak dikişinde yüksek ısı girdisinin oluşması ve buna bağlı olarak kaynak dikişinde yanlara doğru taşma olduğu görülmüştür.

550 d/dk takım devir sayısı, 19 kN takım baskı kuvveti, 1,5 derece takım dalma açısı sabit parametrelerinde ve takım ilerleme hızındaki 80'dan 200 mm/dk artışa bağlı olarak numunelerin çekme dayanımlarında, 100 mm/dk hıza kadar artış ve 100 mm/dk sonra da azalış olduğu gözlemlenmiştir. Çekme testi yapılan numunelerde kopmanın kaynak dikişinde değil kaynak dikişinin hemen yanında olduğu görülmüştür.

Takım baskı kuvvetindeki artışa bağlı olarak malzemeye giren ısı miktarında da artış olmuştur. 16. ve 17.numunelerde, diğer tüm parametreler sabit tutularak takım baskı kuvvetinin arttırılması ile kaynak dikişinde ölçülen sıcaklıkta da artış gözlemlenmiştir. Diğer tüm faktörlerin aynı olmasına karşın sadece takım baskı kuvvetinde yapılan artışa bağlı olarak 16. numunenin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde, kaynak dikişinin yanlara doğru taşmasına bağlı olarak olumsuz sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Düşük ilerleme hızına ve yüksek baskı kuvvetine bağlı olarak kaynak dikişinde meydana gelen yüksek ısıdan ötürü kaynak dikişinde yüksek ısı girdisi oluşmuş ve yine yüksek

takım baskı kuvvetine bağılı olarak kaynak dikişinde yanlara doğru taşmalar oluşmasından ötürü kaynak işlemleri olumsuz sonuç verdiğı gözlemlenmiştir. Çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağında daha düşük enerji girdisine bağılı olarak daha iyi kaynak kalitesi elde edilmiş olduğı yapılmış olan benzer çalışmalar sayesinde tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada da yine yüksek ısı girdisine bağılı olarak birleştirilmeleri yapılan numunelerin bazılarının olumsuz sonuç verdiğı gözlemlenmiştir.

Çelik sacların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmelerinde tüm numunelerde aynı takım kullanılmış fakat altlık malzemesi olarak tungsten karbür ve Inconel süperalaşım olmak üzere iki çeşit altlık malzemesi kullanılmıştır. Takım altlık malzemeleri hariç diğer tüm parametrelerin aynı olması ile beraber, tungsten karbürün ısı iletkenliğinin daha iyi olmasına bağılı olarak tungsten karbür altlık kullanılan 10. numunenin en yüksek sıcaklığının, inconel altlık kullanılan 11. numuneden daha fazla olduğı görülmüştür. Bu da takım altlık malzemesinin çok fazla olmasa da çeliğin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinde rol oynadığını göstermiştir. Kaynak dikişinde oluşan yüksek ısı girdisine bağılı olarak takım altlık malzemesinde hasarlanma olduğı da gözlemlenmiştir. Tungsten karbür malzeme olarak kullanılan numunelerden özellikle yüksek ısı girdisine bağılı olarak bazı numunelerde altlık malzemesinde hasarlanma tespit edilmiştir.

Çeliğin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesi ile ilgili olarak daha önceden yapılmış olan çalışmalardan, takımın belli bir açı ile malzemeye dalmasının ve ilerlemesinin kaynak kalitesini olumlu yönde etkilediğı görülmüştür. Buna bağılı olarak yapılan deneysel çalışmada, takım dalma açısı 1,5 derece olarak alınmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

304 Kalite paslanmaz çeliğin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilme işlemi sırasında ısı girdisine ve uygulanan baskı kuvvetine bağılı olarak kaynak dikişinin yanlarına doğru yığılmalar olmuş ve kaynak dikişinde pürüzlülükler görülmüştür. Isı girdisindeki artışa bağılı olarak kaynak dikişinin yanlarına doğru yığılmalar artmış ve kaynak dikişinde de pürüzlenmeler artmıştır. Bu durumlar da kaynak dikişinin kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir.

TIG ve MIG yöntemleriyle birleştirilmiş östenitik paslanmaz çelikler incelendiğinde ve bu çalışma ile mukayese edildiğinde paslanmaz çeliklerin çekme dayanımlarının sırasıyla TIG, MIG ve sürtünme karıştırma kaynağı şeklinde olduğu görülmüştür.[26] Her ne kadar çekme dayanımı TIG ve MIG kadar olmasa ve şuanda bu yöntemlere alternatif bir yöntem olmasa da sürtünme karıştırma kaynağının birçok üstün özellikleri sayesinde önümüzdeki yıllarda bu yöntemlere alternatif olarak paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Odabaş, C., (Mart 2002)., Paslanmaz Çelikler Temel Özellikleri, Kullanım Alanları Kaynak Yöntemleri, 1. Baskı
- [2] Alptekin, A., (Temmuz 2006) Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Paslanmaz Çeliklere Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [3] Pierre-Jean, C., Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Malzemeler ve Kullanımları Serisi , Cilt III, sayfa 2
- [4] Ateş, H., Sürtünme Kaynağı, Kaynak Teknolojisi Iı. Ulusal Kongresi, 125
- [5] Kaluç, E ve Taban, E (2007)., Sürtünme Elemanı ile Kaynak(FSW) Yöntemi, Ankara
- [6] Uzun H., Yılmaz, R., ve Fındık F., (2003 Mart)Alüminyum Alaşımları İçin Süper Birleştirme Yöntemi: Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği Ve Uygulamaları, Metal Dünyası Dergisi
- [7] Cavalierea P. ve Nobile R. (4 April 2005)., Mechanical And Microstructural Behaviour Of 2024–7075 Aluminium Alloy Sheets Joined By Friction Stir Welding, 588
- [8] Mishraa, R.S., (18 August 2005)., Friction stir welding and processing
- [9] Büyükarıslan, S.,(2006)., Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi
- [10] Sarsılmaz, F., (2004)., Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi
- [11] Özsoy, M. ve Kaluç, E., (2007) Sürten Eleman İle Birleştirme Kaynağının Esasları
- [12] İngiliz Kaynak Enstitüsü sitesi <http://www.twi.co.uk/content/fswequip.html>, 12.05.2011
- [13] Packer, S. M.(2003)., Friction Stir Welding Equipment and Method for Joining X65 Pipe, Advanced Metal Products, Inc. West Bountiful, Utah, USA, 55

- [14] Park Seung Hwan, C., Yutaka, S., Kokawa, H., Okamoto, K., Hirano, S. and Inagaki, M. (2003) Rapid Formation Of The Sigma Phase In 304 Stainless Steel During Friction Stir Welding. Scripta Materialia, 49: 1175-1180.
- [15] Sterling, C. J., Nelson 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
- [16] Reynolds, A. P., Tang, W. and Prask, H. (2003) Structure, Properties, and Residual Stress Of 304L Stainless Steel Friction Stir Welds. Scripta Materialia, 48:1289-1294.
- [17] Lienert, T. and Warke R. W.(2003) Friction Stir Welding Studies On Mild Steel., Welding Journal, 1: 1-8.
- [18] Uzun, H. (2004) Friction Stir Welding Of Dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 Stainless Steel. Materials and Design, 26: 41-46.
- [19] Kimapong, K., and Watanabe, T. (2004) Friction Stir Welding Of Aluminum Alloy To Steel, Welding Journal ,10: 277-282.
- [20] 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, 1-4.
- [21] 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,
- [22] Weinberger T. and Enzinger N., Microstructurel And Mechanical Characterisation Of Friction Stir Welding 15-15PH steel, TU Graz, 1
- [23] Weinberger, T., Führer, B. and Enzinger N. Analysis Of Tool Wear And Failure Mechanism During Friction Stir Welding Of Steel, Graz Universty Of Technology, Graz, Austria
- [24] 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.
- [25] Motorcu, A. R., (2009)., Nikel Esaslı Süperalaşımların Ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 25 (1-2) 302 - 330
- [26] Yılmaz, R., Uzun, H., (2002)., Tıg Ve Mıg Gazaltı Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilmiş Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikler, Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Sakarya - Türkiye
- [27] Paslanmaz Çelik Özellikleri <http://www.budinoks.com/aisi304.htm> 23.06.2011
- [28] Odabaş, C.(Şubat 2004). Paslanmaz Çelikler, Temel özellikleri, Kullanım alanları, 2. baskı, 1-50
- [29] Mishra, R.S, (18 August 2005). Friction stir welding and processing, USA, 3
- [30] Chung, Y.D, Ueji, R. (31 March 2010)., Friction stir welding of high carbon steel with excellent toughness and ductility, Japan, 226

- [31] Durgut, E., Kaçar, R. (9 mart 2011), Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağına Akım Şiddeti Ve Kaynak Zamanının Etkisi, Karabük, Gazi Üniversitesi, Müh. Ve Mimarlık Fakültesi Der., 26(2), 341-348
- [32] Kutay G.(Mart 2011) Kaynak Bağlantıları 5-6
- [33] Thomas W. Advances In Tooling Materials For Friction Stir Welding, TWI Cambridge 3-11
- [34] Miyano Y. (2011), Mechanical properties of friction stir butt welds of high nitrogen-containing austenitic stainless steel, Japan, Materials Science and Engineering A 528 (2011) 2917–2921
- [35] Park S., Sato Y.(23 April 2004), Corrosion resistance of friction stir welded 304 stainless steel, Scripta Materialia 51 (2004) 101–105
- [36] Watanabe T. (21 April 2006) Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding, Journal of Materials Processing Technology 178 (2006) 342–349
- [37] Zhu XK. (30 October 2003) Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel, Journal of Materials Processing Technology 146 (2004) 263–272
- [38] Kaçar R.,Emre E. (16 Şubat 2011) Al-Cu-Al Malzeme Çiftinin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Kabiliyeti, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 26(2): 349-357, 2011
- [39] Çam G. (25 Ekim 2003), Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi, 47-99
- [40] Çam G. (2009) Prinç Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi VII Ulusal Kongre ve Sergisi, 13-14 Kasım 2009, 45-55
- [41] Meran C., Çam G. (2009) Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi VII Ulusal Kongre ve Sergisi, 13-14 Kasım 2009, 57-67
- [42] Meran C., Çam G., Canyurt O. (2009) Paslanmaz Çeliklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri, Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi VII Ulusal Kongre ve Sergisi, 13-14 Kasım 2009, 143-155
- [43] Canyurt O. Meran C.(2009) Takım Devir Sayısı İle İlerleme Hızının AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yapılabilirliği Üzerine Etkisi, Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi VII Ulusal Kongre ve Sergisi, 13-14 Kasım 2009, 157- 167

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı İlyas İNCE
Doğum Tarihi ve Yeri :22.04.1986
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :ilyas.ince@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Sayısal	Bahçelievler Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010	Spheros Termo Sist. A.Ş	Kalite Kontrol

Proje

İklimlendirme odası

ÖDÜLLERİ

TEV üstün başarı ödülü