

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**90/10 CuNi Alaşımının A-TIG ve FB-TIG Kaynak Tekniklerine
Uygun Aktif Örtü Bileşiklerinin ve Kaynak Parametrelerinin
Belirlenmesi**

Rıfki BAYRAM

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos, 2024

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

**90/10 CuNi Alaşımının A-TIG ve FB-TIG Kaynak Tekniklerine
Uygun Aktif Örtü Bileşiklerinin ve Kaynak Parametrelerinin
Belirlenmesi**

Rıfkı BAYRAM

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu Doktora Tezi 26/08/2024 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oybirliği ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Doç. Dr. Melik KOYUNCU (Danışman)
: Prof. Dr. Ali KOKANGÜL
: Prof. Dr. Abdülkadir YAŞAR
: Prof. Dr. Funda KAHRAMAN
: Dr. Öğr. Üyesi Selin SARAÇ GÜLERYÜZ

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır. Tez
No:**

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Bu doktora teziyle ilgili çalışmaların bir kısmı "KOSGEB" tarafından desteklenmiştir. (656284) 28.09.2020

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
SİMGELER VE KISALTMALAR	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Konvansiyonel TIG Kaynağı	2
1.2. Konvansiyonel TIG Kaynak Banyosunu Etkileyen Kuvvetler	3
1.3. ITAB Bölgesi ile Mikroyapı, Mikrosertlik ve Mekanik Mukavemet İlişkisi	10
1.4. A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemleri	11
1.5. TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinin Mukayesesi	14
1.6. A-TIG ve FB-TIG Kaynaklarındaki Aktif Örtü Seçim Kriterleri	15
1.7. A-TIG ve FB-TIG Kaynağında Penetrasyon Derinliğinin Oluşmasına Neden olan Mekanizmalar	20
1.8. 90/10 CuNi Alaşımının TIG Kaynağında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar	22
1.9. Çalışmanın Amacı ve Orijinal Katkısı	23
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	25
2.1. TIG ve FB-TIG Kaynak Tekniği Uygulanarak Karbon Çeliği, Paslanmaz Çelik ve Diğer Alaşımlı Çelikler Üzerinde Yapılan Çalışmalar	25
2.2. TIG ve FB-TIG Kaynak Tekniği Uygulanarak Alüminyum, Magnezyum, Nikel ve Diğer Demir Dışı Alaşımlar Üzerinde Yapılan Çalışmalar	35
2.3. A-TIG ve FB-TIG Kaynak Tekniği Uygulanarak Bakır ve Bakır Alaşımları Üzerindeki Yapılan Çalışmalar	37
3. MALZEME VE METOT	39
3.1. Malzemeler	39
3.1.1. Kaynak Edilecek Malzeme Cinsi	39
3.1.2. Aktif Örtü Malzeme Cinsleri	40
3.1.3. Kaynakta Kullanılan Dolgu Teli Malzemesi	41
3.2. Metot	41
3.2.1. Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi	42
3.2.2. Deney Öncesi Hazırlık Prosedürü	44
3.2.3. Deneylerde Kullanılan Kodlama Sistemi	49
3.2.4. Tahribatlı ve Tahribatsız Testler için Numune Alınması	50
3.3. Kaynak Dikişine Uygulanan Tahribatsız Testler	51
3.3.1. Kaynak Dikişinin Radyografik (GAMA-Ray) Yöntemle İncelenmesi	51

3.3.2. Dye-penetration (DP) Testi.....	52
3.4. Kaynak Dikişine Uygulanan Tahribatlı Testler.....	53
3.4.1. Çekme Testi	53
3.4.2. Kaynak Dikişi Bölgesinin Mikro Sertliklerinin Ölçülmesi.....	55
3.4.3. Kaynak Dikişinin Mikro Yapısının İncelenmesi.....	55
3.4.4. Kaynak Dikişlerinin Makro Yapısı (Kaynak Derinliği) İncelenmesi	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	59
4.1. 8 mm Kalınlığındaki Parçaların Kaynağında Kaynak Akım Şiddetinin Etkileri.....	59
4.1.1. S235 JR Kalite Karbon Çeliğine Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri	60
4.1.2. 5 mm S235 JR Kalite Karbon Çeliğine Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri.....	61
4.1.3. 5 mm AISI 304 Kalite Paslanmaz Çeliğine Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri.....	64
4.1.4. 5 mm 90/10 CuNi alaşımına Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri	66
4.1.5. 8 mm 90/10 CuNi Alaşımına Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri	69
4.1.6. 8 mm 90/10 CuNi Alaşımına Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinin Doğrulama Testlerinde Akım Şiddetinin Etkileri	79
4.2. Farklı Aktif Örtülerinin Etkileri	82
4.2.1. Aktif örtü tipine bağlı olarak kaynak penetrasyon derinliği (H) ile kaynak dikişi genişliğinin (W) oranının (H/W) değişimi	83
4.3. Aktif Örtü Bileşiklerinin Kaynak Dikişin Makroyapısı Üzerindeki Etkileri	86
4.4. Aktif Örtü Bileşiklerinin Kaynak Dikişinin Mikroyapısı Üzerindeki Etkileri.....	89
4.4.1. Farklı Aktif Örtü ve Akım Şiddeti ile Elde Edilen Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları.....	90
4.5. Aktif Örtü Bileşiklerinin Kaynak Dikişinin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri.....	93
4.5.1. Çekme ve Akma Mukavemeti / 265 Amp	94
4.5.2. Çekme ve Akma Mukavemeti / 280 Amp	95
4.5.3. Kaynak Dikişindeki ve Ana Malzemedeki Mikrosertlik Dağılımı.....	96
4.5.4. Kullanılan Aktif Örtülerin Kaynaklı Parçaların Yapısal Bütünlüğü Üzerine Etkisi ...	99
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	103
5.1. Sonuçlar.....	103
5.2. Öneriler	104
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	117

90/10 CuNi Alaşımının A-TIG ve FB-TIG Kaynağında Uygun Aktif Örtünün Belirlenmesi

Rıfki BAYRAM

Danışman: Doç. Dr. Melik KOYUNCU
2. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Durmuş Ali BİRCAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZ

Cupronickel olarak da bilinen 90/10 CuNi alaşımı, savunma, otomotiv, kimya, petrol ve doğalgaz, çelik üretimi, çevre teknolojileri, denizcilik ve enerji gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşım, olağanüstü mekanik özellikleri, çeşitli üretim yöntemleriyle uyumluluğu ve önemli ölçüde deniz suyundaki korozyona ve biyolojik kirlenmeye karşı yüksek direnci nedeniyle tercih edilmektedir. Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynağı, demir dışı ve paslanmaz çelikleri kaynaklamak için kullanılan ve daha düşük yatırımla yüksek kaliteli kaynaklar üreten birincil birleştirme yöntemidir. Bununla birlikte, nispeten sığ nüfuziyet kabiliyeti ve düşük verimlilik TIG kaynağının ana dezavantajlarıdır. Geleneksel TIG kaynağının sağladığı üstün kaynak kalitesine ek olarak yüksek üretkenliği garanti etmek için A-TIG ve FB-TIG gibi aktif örtü kullanan yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Ancak; ilgili literatür ve pratik uygulamalar incelendiğinde, 90/10 CuNi alaşımının A-TIG ve FB-TIG kaynağı için önerilen uygun aktif örtü malzemeleri ve ilgili kaynak parametreleri hakkında kapsamlı bilgi eksikliği olduğu açıktır.

Bu çalışmada, 8 mm kalınlığında 90/10 CuNi parçaların kaynak işlemi sırasında farklı aktif örtü kullanımının kaynak dikişi geometrisini ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Başlangıçta, çeşitli kalınlık ve farklı kalitelerdeki alaşımlar için A-TIG ve FB-TIG tekniklerinde çok sayıda aktif örtü bileşiği kullanılmıştır. Elde edilen kaynak dikişlerinin geometrik parametreleri, kaynak penetrasyon derinliği (H) kaynak penetrasyon derinliğinin genişliğine oranı (H/W), geleneksel TIG kaynaktan elde edilen ölçümlerle karşılaştırılarak analiz edildi. Deneysel çalışmalar sonucunda aktif örtü olarak Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MgO ve %50 SiO_2 + %50 Cr_2O_3 bileşikler öne çıkmıştır. Her bileşik farklı deney setlerinde farklı etkiler yapmıştır. Cr_2O_3 ile FB-TIG kaynağında tam penetrasyon (H=8,36 mm) sağlanırken, SiO_2 + Cr_2O_3 ile A-TIG kaynağında tam penetrasyon (H=8,10 mm) elde edilmiştir. Geleneksel TIG kaynağının H değerleri ile mukayese edildiğinde; Al_2O_3 ile A-TIG kaynağında %160, FB-TIG kaynağında ise %177 oranında; MgO ile A-TIG kaynağında %144, FB-TIG kaynağında %130 oranında; Cr_2O_3 ile A-TIG kaynağında %161, FB-TIG kaynağında %215 oranında ve SiO_2 + Cr_2O_3 ile A-TIG kaynağında %181, FB-TIG kaynağında ise %151 oranında penetrasyon derinliğinin arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara paralel olarak aktif örtü kullanımının kaynak derinlik/genişlik oranını dolayısıyla kaynak dikişi geometrisini ve sertlik ile çekme mukavemetinide iyileştirdiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: TIG, FB-TIG, A-TIG, Aktif Örtü, 90/10 CuNi Alaşımı

Determination of Active Flux Compounds Suitable for A-TIG and FB-TIG Welding Techniques of 90/10 CuNi Alloy

Rıfki BAYRAM

Advisor: Assoc Prof. Dr. Melik KOYUNCU
2. Advisor: Asst Prof. Dr. Durmuş Ali BİRCAN

Department of Industrial Engineering

ABSTRACT

90/10 CuNi alloy, known as Cupronickel, is widely used in various industries such as defence, automotive, chemical, oil and gas, steelmaking, environmental technologies, marine and energy. This alloy is favoured for its outstanding mechanical properties, compatibility with various production methods and, significantly, its high resistance to corrosion and biofouling in seawater. Tungsten Inert Gas (TIG) welding is the primary joining method used to weld non-ferrous and stainless steels, producing high quality welds with lower investment. However, relatively shallow penetration capability and low productivity are the main disadvantages of TIG welding. In order to guarantee high productivity in addition to the superior weld quality provided by conventional TIG welding, new technologies such as A-TIG and FB-TIG using active fluxes have been developed. However, when the related literature and practical applications are analyzed, it is evident that there is a lack of comprehensive information on suitable active flux materials and related welding parameters recommended for A-TIG and FB-TIG welding of 90/10 CuNi alloy.

In this study, the effect of different active fluxes on weld bead geometry and mechanical properties during welding of 8 mm thick 90/10 CuNi parts was investigated. Initially, a large number of active flux compounds were used in A-TIG and FB-TIG techniques for alloys of various thicknesses and different grades. The geometrical parameters of the weld beads obtained, depth of penetration (DOP) and the ratio of depth of penetration to weld width (DWR), were analysed in comparison with measurements obtained from conventional TIG welding. As a result of experimental studies, compounds such as Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MgO , and 50% SiO_2 + 50% Cr_2O_3 emerged as prominent active fluxes. Each compound has different effects in different sets of experiments. While full penetration (DOP=8.36 mm) was achieved in FB-TIG welding with Cr_2O_3 , full penetration (DOP=8.10 mm) was achieved in A-TIG welding with SiO_2 + Cr_2O_3 with a single pass. In comparison to the DOP of conventional TIG welding, DOP was observed to rise by 160% with Al_2O_3 in A-TIG welding and by 177% in FB-TIG welding; by 144% with MgO in A-TIG welding and by 130% in FB-TIG welding; by 161% with Cr_2O_3 in A-TIG welding and by 215% in FB-TIG welding; and by 181% with SiO_2 + Cr_2O_3 in A-TIG welding and by 151% in FB-TIG welding. In parallel with these results, it was also determined that the use of active flux improves the DWR of the weld, thus enhancing the weld geometry and mechanical properties.

Keywords: TIG, FB-TIG, A-TIG, Active Flux, 90/10 CuNi alloy

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını gerçekleştirme sürecimde bana yol gösteren, bilimsel önerileriyle çalışmalarımı şekillendiren ve ilham kaynağım olan kıymetli danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali KOKANGÜL, Sayın Prof. Dr. Abdülkadir YAŞAR, Sayın Doç. Dr. Melik KOYUNCU ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Durmuş Ali BİRCAN'a en derin şükranlarımı sunarım. Onların rehberliği ve desteği olmadan, bu tez çalışmasının başarıyla tamamlanması mümkün olmazdı.

Ayrıca değerli katkılarından dolayı jüri üyeleri Sayın Prof.Dr. Funda KAHRAMAN ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Selin SARAÇ GÜLERYÜZ'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamla bağlantılı olarak yürüttüğüm Ar-Ge projelerine olan inançları ve bu çalışmaları desteklemeye değer bulan KOSGEB'e teşekkür ederim. KOSGEB'in sağladığı destekler, bu çalışmanın daha ileriye taşınmasına büyük katkı sağlamıştır.

Deneysel çalışmalarım süresince tüm olanaklarını sonuna kadar kullanmama imkân sağlayan BOMAK Makina Ltd. Şti.'ne, Sn. Ümit ÖZER, Sn. Refik BAYRAM ve Sn. Hakan BAYRAM nezdinde, ayrıca BOMAK Makina'nın tüm değerli personeline teşekkürü bir borç bilirim. Onların sağladığı maddi ve manevi destekler, bu çalışmanın deneysel kısmının başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesinde büyük rol oynamıştır.

Son olarak, bu zorlu süreç boyunca her an yanımda olan, bana güç veren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Nilgün BAYRAM'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Eşimin sabrı, anlayışı ve manevi desteği, bu çalışmayı sürdürmemde ve tamamlamamda en önemli itici güç olmuştur. Bu başarı, onun da desteğiyle mümkün kılınmıştır.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kaynak Yöntemlerinin Mukayesesi	14
Çizelge 1.2. Deneysel Çalışmalarda Aktif Örtü Olarak Kullanılabilecek Muhtelif Bileşikler.....	19
Çizelge 3.1. 90/10 CuNi Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu	40
Çizelge 3.2. 90/10 CuNi Alaşımının Mekanik Özellikleri.....	40
Çizelge 3.3. 90/10 CuNi Kaynak Telinin Kimyasal Kompozisyonu	41
Çizelge 3.4. TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynağında Sabit ve Değişken Faktörler	44
Çizelge 3.5. Testlerden Sonra Yapılan Kesitlerden Alınan Ölçülerin Kayıt Tablosu.....	49
Çizelge 3.6. Deneysel Çalışmalarda Kullanılması Planlanmış olan Aktif Örtü Bileşikleri	50
Çizelge 4.1. Deneysel Çalışmalarda Kayıtların Yapıldığı Kayıt Formu.....	70
Çizelge 4.2. Deneysel Çalışmalarda Kayıtların Yapıldığı Kayıt Formu.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kaynak Havuzu Üzerinde ve Altında Gerçekleşen Sıvı Akışı	26
Şekil 2.2. A-TIG ve Geleneksel TIG Arklarının Karakteristik Görünümleri ve 6 mm Kalınlığındaki Paslanmaz Çelikteki Karşılaştırmalı Nüfuziyet Derinlikleri	26
Şekil 2.3. Aktif Örtü Kullanıldığında ve Kullanılmadığı Durumda Kaynak Kesit Alanı	27
Şekil 2.4. Aktif Örtünün Kalınlığının Kaynak Penetrasyonuna Etkisi	28
Şekil 2.5. Farklı Aktif Örtüler için TIG ve A-TIG Kaynağı Sırasında Gözlemlenen Ark Şekilleri	30
Şekil 2.6. Aynı Kaynak Koşulu Altında (a) TIG ve (b) A-TIG Kaynaklarının Kesitlerinin Karşılaştırılması (10X)	34
Şekil 2.7. Tek Bileşenli Aktif Örtüler ile Gerçekleştirilen A-TIG Kaynağı Kesitleri	36
Şekil 3.1. Cu- Ni İkili Faz Diyagramı	39
Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan çeşitli bileşikler ve süspansiyon sıvıları	41
Şekil 3.3. A-TIG ve FB-TIG Kaynağında Kaynak Prosesinin Sonucunu Etkileyen Faktörler Balık Kılçığı Diyagramı	42
Şekil 3.4. Ticari Olarak Satın Alınan Muhtelif Metal Oksit Bileşikleri	45
Şekil 3.5. Bileşiklerin (a) Havanla İnceltilmesi ve (b) Elekle Boyutlanması	45
Şekil 3.6. Hassas Terazide Tartım Yapılması	45
Şekil 3.7. Süspansiyonun (a) elle karıştırılması ve (b) Sodyum Silikat İlavesi	46
Şekil 3.8. Süspansiyon Homojenizasyonu için Kullanılan Manyetik Karıştırıcı Hazırlanan aktif örtü süspansiyonu, Şekil 3.9'da gösterildiği üzere kaynak bölgesine	46
Şekil 3.9. Aktif Örtü Uygulaması	47
Şekil 3.10. Kaynağı Yapılmakta Olan Test Parçası	48
Şekil 3.11. Tahribatlı ve Tahribatsız Testler için Numune Alınması	51
Şekil 3.12. Radyografik Test Cihazı	52
Şekil 3.13. Dye-penetration Uygulanmış Kaynak Bölgesinin Görseli	53
Şekil 3.14. Standartlara göre hazırlanmış çekme çubuğu	53
Şekil 3.15. (a) Çekme Testi Öncesi ve (b) Sonrası Test Çubukları	54
Şekil 3.16. Testlerde kullanılan Çekme Testi Makinesi	54
Şekil 3.17. Mikro Sertlik Ölçme Cihazı	55
Şekil 3.18. Mikro Sertlik Ölçümlerinin Yapıldığı Bölgenin Şematik Gösterimi	55
Şekil 3.19. Metalografi Mikroskobu	56
Şekil 4.1. 8 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri	60
Şekil 4.2. 8 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları	61

Şekil 4.3.	5 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve A-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri	62
Şekil 4.4.	5 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve A-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları	62
Şekil 4.5.	5 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri	63
Şekil 4.6.	5 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları	64
Şekil 4.7.	5 mm AISI 304 Paslanmaz Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları (140 A).....	64
Şekil 4.8.	5 mm AISI 304 Paslanmaz Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları (160 A).....	65
Şekil 4.9.	5 mm AISI 304 Paslanmaz Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları (180 A).....	66
Şekil 4.10.	5 mm 90/10 CuNi Alaşımı Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve A-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri	67
Şekil 4.11.	5 mm 90/10 CuNi Alaşımı Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve A-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları.....	67
Şekil 4.12.	5 mm 90/10 CuNi Alaşımı Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri	68
Şekil 4.13.	5 mm 90/10 CuNi Alaşımı Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve FB -TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları.....	68
Şekil 4.14.	BOM4 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları	71
Şekil 4.15.	BOM4 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri.....	72
Şekil 4.16.	BOM4 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları	72
Şekil 4.17.	BOM4 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri.....	73
Şekil 4.18.	BOM7 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları.....	73
Şekil 4.19.	BOM7 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri.....	74
Şekil 4.20.	BOM7 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları.....	74
Şekil 4.21.	BOM7 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri.....	75
Şekil 4.22.	BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları	75
Şekil 4.23.	BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri.....	76
Şekil 4.24.	BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları.....	76
Şekil 4.25.	BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri.....	77

Şekil 4.26. BOM23 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları	77
Şekil 4.27. BOM23 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri	78
Şekil 4.28. BOM23 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları	78
Şekil 4.29. BOM23 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri	79
Şekil 4.30. BOM4/BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları.....	80
Şekil 4.31. BOM4/BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri	81
Şekil 4.32. BOM4/BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları	82
Şekil 4.33. BOM4/BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri	82
Şekil 4.34. Farklı Aktif Örtüler uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları.....	83
Şekil 4.35. Farklı Aktif Örtüler uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri	84
Şekil 4.36. Farklı Aktif Örtüler uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları.....	85
Şekil 4.37. Farklı Aktif Örtüler uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri	85
Şekil 4.38. Farklı Aktif Örtü ile elde edilen Makro yapılar.....	87
Şekil 4.39. Aktif Örtü ile elde edilen Makro yapılar	88
Şekil 4.40. 90/10 CuNi Haddelenmiş Sac Plakanın Orijinal Mikroyapısı	90
Şekil 4.41. BOM4 Aktif Örtü ve 265 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları x 200.....	91
Şekil 4.42. BOM4 Aktif Örtü ve 280 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları x 200.....	91
Şekil 4.43. BOM9 Aktif Örtü ve 265 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları x 200.....	92
Şekil 4.44. BOM9 Aktif Örtü ve 280 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları x 200.....	92
Şekil 4.45. BOM4, BOM9 Aktif Örtüler ve 265 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Çekme-Uzama Değişimi	94
Şekil 4.46. BOM4, BOM9 Aktif Örtüler ve 280 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Çekme-Uzama Değişimi	95
Şekil 4.47. Kaynak yönü boyunca sertlik ölçümü noktaları	97
Şekil 4.48. CuNi alaşımının 265 A için TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynaklarının sertlik profilleri.....	98
Şekil 4.49. CuNi alaşımının 280 A için TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynaklarının sertlik profilleri	98
Şekil 4.50. Boya-penetrasyon Uygulanan Kaynak Dikişi Görseli	100
Şekil 4.51. Kaynak Dikişinin Radyografik Film Görseli	101

SİMGELER VE KISALTMALAR

TIG (GTAW)	: Tungsten inert gaz kaynağı
A-TIG	: Aktif örtülü TIG kaynağı
FB-TIG	: Sınırlı bölgeli aktif örtülü TIG kaynağı
H (DOP)	: Kaynak penetrasyon derinliği
W	: Kaynak dikişi genişliği
H/W (DWR)	: Kaynak dikişi derinlik / genişlik oranı
R	: Kaynak omuz yüksekliği
90/10 CuNi	: Kupro Nikel / Nikel Bronzu
HAZ (ITAB)	: Isı tesiri altında kalan bölge
P	: Nüfuziyet / penetrasyon
v	: Kaynak ilerleme hızı
V	: Koruyucu gaz debisi
I	: Akım şiddeti
α	: 90/10 CuNi katı hal kristal yapısı – alfa
RT	: Radyografik test
DPE	: Girici boya testi
dy	: Yoğunluk farkı
ds	: Uzaklık farkı
dT	: Sıcaklık farkı
F	: Lorenz kuvveti
J	: Akım yoğunluğu
B	: Manyetik akım kuvveti
BOM1/B1	: TiO_2
BOM2/B2	: MnO_2
BOM3/B3	: SiO_2
BOM4/B4	: Al_2O_3
BOM5/B5	: Fe_2O_3
BOM6/B6	: CaO
BOM7/B7	: MgO
BOM8/B8	: CuO
BOM9/B9	: Cr_2O_3
BOM10/B10	: %50 TiO_2 +%50 MnO
BOM23/B23	: %50 Cr_2O_3 +%50 SiO_2
BOM15/B15	: %50 TiO_2 +%50 MgO
BOM16/B16	: %50 TiO_2 +%50 CuO

Cu : Bakır
Ni : Nikel
Mn : Manganez
Fe : Demir
Si : Silisyum
Cr : Krom
Ca : Kalsiyum
Mg : Magnezyum
AL : Aluminyum
Ti : Titanyum



1. GİRİŞ

Çeşitli imalat yöntemlerine (döküm, presleme, haddeleme, tel halinde çekme, ekstrüzyon, kesme, kaynaklı imalat vs.) uygun olması, estetik görünümü ve bilhassa deniz suyundaki tuza karşı olan yüksek korozyon direnci nedeniyle 90/10 CuNi- Nikel Bronzu endüstride çok geniş çapta kullanılmaktadır. Tüm bu üstün özelliklerinin yanında, kabuklu ve kabuksuz deniz organizmalarıyla deniz suyu kirliliğinin öne çıktığı koşullarda, 90/10 CuNi alaşımı en çok tercih edilen malzemelerden biri olmaktadır. Borulu tip ısı değiştiricilerden evaporatörlere, tuzsuzlaştırma tesislerinden termik santral soğutma ünitelerine, gemilerdeki deniz suyu boru tesisatlarından nükleer tesislere ve gemi endüstrisindeki pervanelerden şaftlara, yüzey kaplamalarına kadar, 90/10 CuNi alaşımından üretilmiş boru, levha ve profiller kullanılmaktadır. Şekil 1.1'de gösterilen ısı değiştirici örnekleri, 90/10 CuNi alaşımı kullanılarak üretilmiştir.

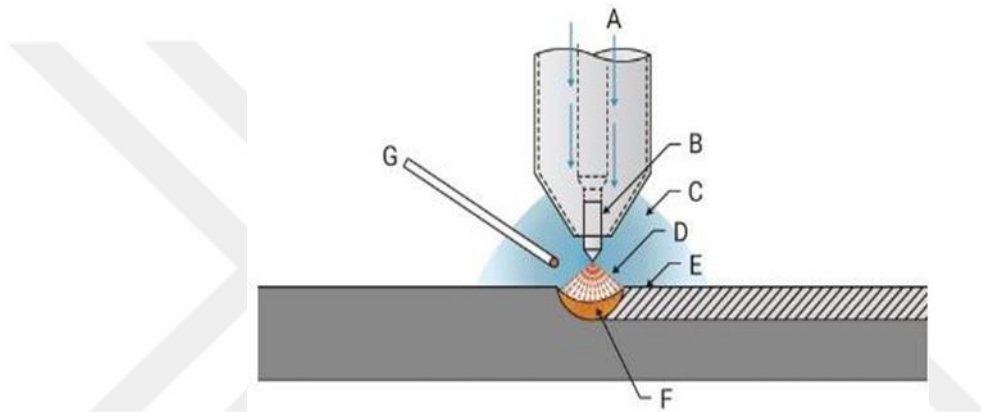


Şekil 1.1. 90/10 CuNi Alaşımı Kullanılarak İmal Edilmiş Isı Değiştiriciler (BOMAK Ltd.Şti.) 90/10

CuNi alaşımının kaynağında, örtülü elektrotlar (MMA-Manuel metal arc welding), gaz altı kaynağı (SMAW-Shielded metal arc welding) ve TIG kaynağı (Tungsten Inert gas) gibi yöntemler uygulanabilir. TIG kaynağı, yüksek mukavemet, dayanıklılık, kusursuzluk ve estetik görünüm sunan bir kaynak dikişi sağladığından, hem demir esaslı malzemelerde (karbon çeliği, paslanmaz çelik, duplex vb.) hem de demir dışı malzemelerde (bakır, bronz, alüminyum, magnezyum) tercih edilen bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. TIG kaynağı, iş parçasıyla erimeyen tungsten elektrot arasında oluşturulan ark sayesinde gerçekleştirilen bir füzyon kaynağıdır. Otojen olarak uygulanabileceği gibi, eriyen elektrotlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Kaynak dikişinin oksidasyonunu önlemek için, ergimiş metal yüzeyi kaynak işlemi boyunca Argon veya Helyum gibi inert gazlar koruyucu atmosfer sağlamak amacıyla kullanılır. Üstün beceri ve büyük yatırım gerektirmeksizin kusursuz kaynak dikişleri elde edilebilmesi nedeniyle, özellikle üstün kaliteli kaynak dikişi gerektiği 90/10 CuNi özellikle TIG kaynağında tercih edilmektedir.

1.1. Konvansiyonel TIG Kaynağı

TIG sembolü “Tungsten Inert Gas” kelimelerinin baş harflerinden oluşturulmuştur. Yöntem olarak “Elektrik Ark” kaynağıdır. TIG kaynağında öncelikle Tungsten elektrot ile kaynak edilecek iş parçası arasında ark oluşturulur. Oluşan arkın ısısı ile ilave elektrot (iş parçası ile aynı özellikte metal çubuk) ile aynı zamanda kaynak bölgesindeki metal eritilir ve böylece kaynak gerçekleştirilir. Ark bölgesindeki erimiş kaynak banyosunu atmosferin zararlı etkilerinden korumak için Argon ve/veya Helyum gazı koruyucu gaz olarak kullanılır. Helyum’ un yoğunluğu, argona göre daha hafiftir. Çabucak uçtuğundan saf halde koruyuculuğu argona göre azdır. Her iki gazın karışım halde kullanılmasıyla Helyumun uçuculuğundan gelen olumsuzluk azaltılır. Aşağıdaki Şekil 1.2’ de TIG kaynağının öğeleri şematik olarak gösterilmiştir.



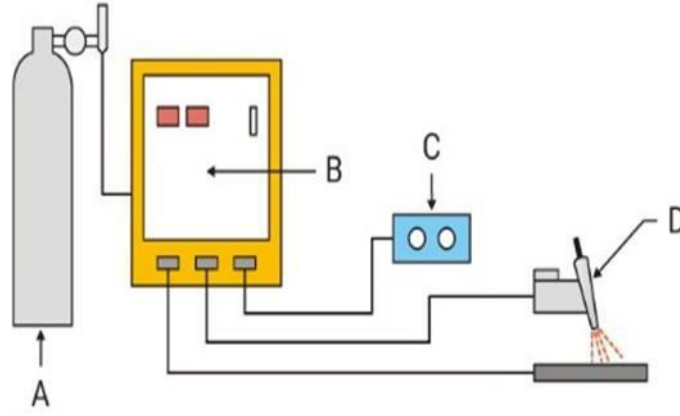
A- Koruyucu Gaz (Ar, He, Ar+He vs.), B- Tungsten Elektrot, C- Plazma, D- Ark Demeti, E-Kaynak Dikışı, F- Kaynak Banyosu, G- Dolgu Teli

Şekil 1.2. TIG Kaynağının Elemanları

(<https://www.keyence.com/ss/products/measure/welding/arc/tig.jsp>)

Isı iletkenliği yüksek olan Bakır (Cu) gibi malzemelerin TIG kaynağında, aynı akım şiddetinde daha yüksek ark gerilimi ve dolayısıyla “Isı girdisi” verdiği için Helyum tercih edilebilir. Alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynağında genellikle alternatif akım kullanılır. Alternatif akımdaki yön değişimi ile kaynak banyosunun yüzeyinde oluşan oksit tabakası parçalanabildiği için kaynak mümkün olabilmektedir.

Belirtilen metal ve alaşımları dışındaki tüm metal ve alaşımlarının TIG kaynağında doğru akım kullanılır. Genellikle iş parçası artı (+) kutba, elektrot ise erimemesi için (-) kutba bağlanır. Aşağıdaki Şekil 1.3’ te TIG kaynağında kullanılan ekipmanlar şematik olarak gösterilmiştir.



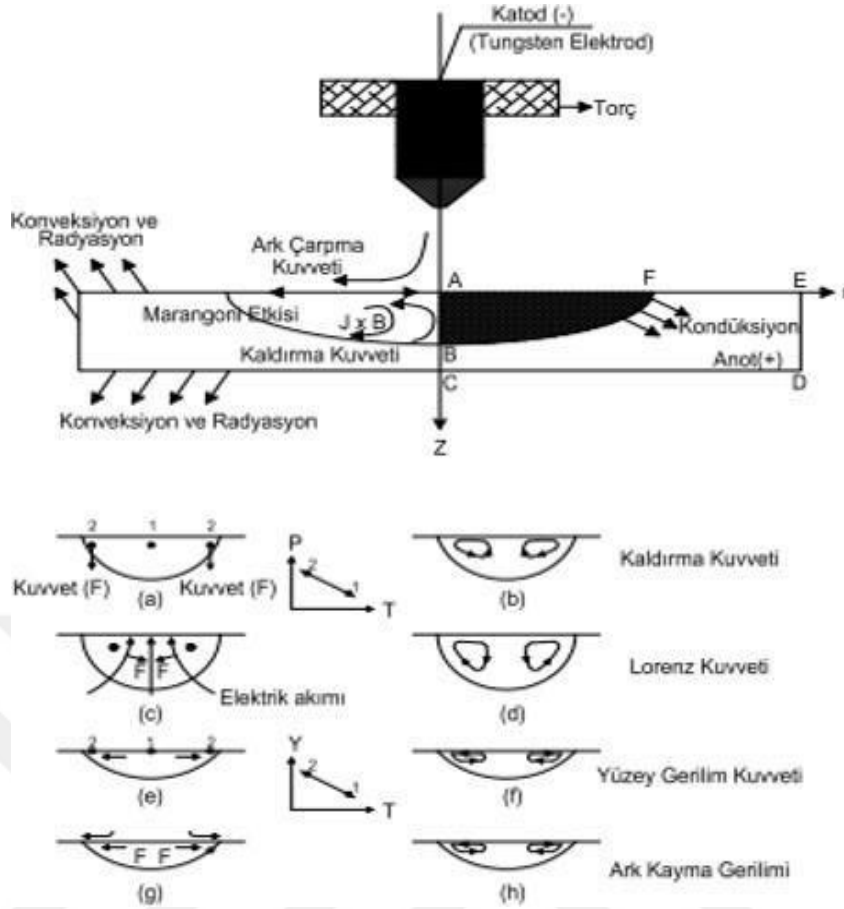
A- Koruyucu Gaz Tüpü, B- Kaynak Makinesi, C- Kumanda Panosu, D- Tig Kaynak Torcu

Şekil 1. 3. TIG Kaynağının Şematik Gösterimi

(<https://www.keyence.com/ss/products/measure/welding/arc/tig.jsp>)

1.2. Konvansiyonel TIG Kaynak Banyosunu Etkileyen Kuvvetler

TIG kaynak banyosuna etki eden başlıca kuvvetler; Kaldırma (bouyaney) kuvveti, Lorenz Kuvveti, Yüzey gerilimi ile Uyarılmış kayma gerilimi, Plazma ile uyarılmış kayma gerilimi, Marangoni Kuvveti ve Aerodinamik çekme kuvvetidir. Lorenz kuvveti, Kaldırma kuvveti, yüzey gerilimi ile uyarılmış kayma gerilimi banyonun içerisindeki akış yönünü belirlerken ark basıncı (özellikle 200 A' dan yüksek akım şiddetinde) kaynak banyosunun yüzeyindeki akımı etkiler. Kaynak banyosundaki mekanizmaları anlayabilmek için TIG kaynağındaki füzyon olayı sırasında kaynak banyosuna etki eden kuvvetleri bilmek gerekir. Şekil 1.4' te kaynak banyosunu etkileyen başlıca kuvvetler şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.4. TIG Kaynağında Kaynak Banyosunu Etkileyen Kuvvetlerin Şematik Gösterimi (53)

a- Marangoni Konveksiyonu (Yayınımı)

Marangoni etkisi, yüzey gerilimindeki farklılıkların sıvı hareketine yol açtığı bir olgudur ve özellikle sıvıların yüzeyinde veya ara yüzeylerinde gözlemlenir. TIG kaynağında bu etki, kaynak banyosunun şekillenmesi ve kaynak kalitesinin belirlenmesi açısından büyük öneme sahiptir.

Kaynak banyosunda Marangoni etkisi, sıcaklık gradyanlarından kaynaklanır. Kaynak sürecinde, kaynak banyosunun merkezinde, yani arkın altındaki metal daha sıcaktır ve kenarlara doğru ilerledikçe soğur. Yüksek sıcaklık, metalin yüzey gerilimini düşürürken, soğuk bölgelerde yüzey gerilimi artar. Bu durumda, sıvı metal, düşük yüzey geriliminden yüksek yüzey gerilimine doğru hareket eder. Bu akış hareketi, sıvı metalin kaynak banyosu içinde belirli bir yönde ilerlemesine yol açar.

Marangoni etkisi, kaynak banyosunun iç yapısını ve dolayısıyla oluşan kaynak dikişini önemli ölçüde etkiler. Eğer sıvı metal, sıcak bölgelerden soğuk bölgelere doğru akarsa, bu kaynak banyosunun genişlemesine ve yüzeyde daha homojen bir dağılım oluşmasına neden olur. Bu durum, geniş ve düzgün bir kaynak dikişi elde edilmesini sağlar. Bununla birlikte, bazı metallerde Marangoni etkisi ters yönde çalışabilir ve sıvı metal, soğuk bölgelerden sıcak bölgelere doğru hareket edebilir. Bu durumda, kaynak banyosu daralır ve derinleşir. Bu etki aynı zamanda kaynak dikişinin nüfuziyetini de belirler. Marangoni etkisi, sıvı metalin yüzeyde kalması yerine daha derinlere nüfuz

etmesine yol açabilir, bu da derin bir kaynak dikişı oluşturur. Kaynak mühendisleri, Marangoni etkisini kontrol ederek, istenilen derinlik ve genişlikte kaynak dikişleri elde edebilirler. Örneğin, kaynak ortamındaki gazın bileşimi (oksijen veya azot gibi) Marangoni etkisini değiştirebilir. Bu değişiklik, yüzey gerilimindeki gradyanları etkileyerek sıvı metalin hareket yönünü kontrol edebilir. Ayrıca, kaynak hızı ve akım yoğunluğu gibi parametreler de bu etkiyi doğrudan etkileyebilir. Kaynak banyosundaki sıcaklık gradyanlarının değişmesi, Marangoni etkisini ve dolayısıyla kaynak dikişinin oluşumunu kontrol etme olanağı sunar.

Yüzey geriliminin sıcaklık değişimi nedeniyle değiştiği durumlardaki Marangoni etkisine “Termokapiler etki”; konsantrasyon nedeniyle değiştiği durumlardaki Marangoni etkisine ise “Solotokapiler Etki” adı verilir. Her iki etkinin aynı anda gerçekleşmesi mümkündür.

Limmaneevichitr ve Kou (2000), kaynak banyosunda oluşan bu akışı matematiksel olarak modellemişlerdir.

$$\partial\gamma / \partial s = (\partial\gamma / \partial T) \times (\partial T / \partial s) \quad [1]$$

Formüllerde kullanılan;

s= Arkın oluşturduğu alanın merkezi ile kaynak banyosu yüzeyindeki herhangi bir noktanın uzaklığını,

∂s = Mesafe değişimi

γ = Yüzey gerilimini,

C= Kaynak banyosu yüzeyindeki aktif örtü malzemesinin konsantrasyonunu, T= Yüzeydeki sıcaklığını,

∂T = Sıcaklık değişimini,

∂C = Konsantrasyon değişimini temsil etmektedir.

Bu formülde kaynak banyosundaki yüzey gerilim eğrisi pozitifdir. Zira yüzey geriliminin sıcaklığa bağlı değişimi negatiftir. Yine sıcaklık değişiminin uzaklığa bağlı değişimi de negatiftir. Her iki negatif değerın çarpımı pozitifdir. Bunun anlamı yüzey gerilimi merkezden uzaklaştıkça artmaktadır. Dolayısıyla metal akışı merkezden dışarıya doğru olacaktır.

Limmaneevichitr ve Kou (2000) aynı zamanda aktif örtü kullanıldığı halde kaynak banyosundaki yüzey gerilimi dağılımı (gradient) oluşumunu da matematiksel olarak modellemişlerdir.

Kaynak banyosu içerisinde oluşan yüzey gerilimi dağılımı;

$(\partial\gamma / \partial T)$ = Sıcaklıkla ilişkilidir ve sıcaklık arttıkça yüzey gerilimi düşmektedir. (-)

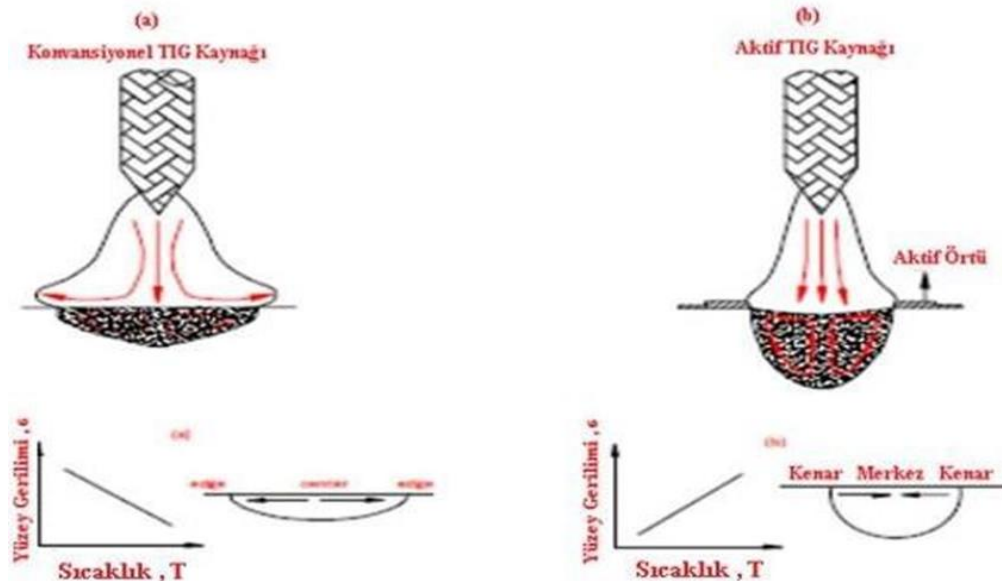
$(\partial T / \partial s)$ = Sıcaklık ile mesafe arasındaki ilişkidir ve merkezden uzaklaştıkça sıcaklık düşer. (-)

$(\partial \gamma / \partial C)$ = Aktif örtü konsantrasyonu ile yüzey gerilimi ilişkisi olup konsantrasyon arttıkça yüzeygerilimi düşmektedir. (-)

$(\partial C / \partial s)$ = Konsantrasyon ile uzaklık arasındaki ilişki olup arkın merkezinden uzaklaştıkça konsantrasyon artmaktadır. (+)

$$\partial \gamma / \partial s = [(\partial \gamma / \partial T) \times (\partial T / \partial s) \text{ (aktif örtüsüz)} + (\partial \gamma / \partial C) \times (\partial C / \partial s) \text{ (aktif örtülü)}] \quad [2]$$

Formül 2’de ki sağdaki ilk iki terim aktif örtü kullanılmamış haldeki kaynak banyosu için geçerlidir. Daha sonraki iki terim ise aktif örtüsünün etkisini göstermektedir. İlk iki terimin çarpımı pozitif iken son iki terimin çarpımı negatiftir. Dolayısıyla Aktif Örtü etkisinin büyüklüğü Aktif Örtü miktarıyla doğrudan doğruya ilişkili olup yüzey geriliminin yönünü (akış yönünün içeriye veya dışarıya doğru) belirler. Şekil 1.5a ‘da aktif örtüsüz TIG kaynağında Marangoni etkisiyle akışım içeriden dışarıya doğru olduğu görülmektedir. Kaynak banyosunun yüzeyinde aktif örtü bulunması halinde ise (Şekil 1.5b) kaynak banyosundaki erimiş metal tersine Marangoni etkisiyle kenarlardan merkeze doğru akmaktadır. Yüzey gerilim katsayısının işaretine (pozitif, negatif) bağlı olarak kaynak banyosundaki metal akışının yönünün nasıl değiştiği Şekil 1.5’ te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. A-TIG/FB-TIG ile TIG Kaynaklarında Kaynak Banyosu İçindeki Hareketlerin Yönünün ve Ark Kolonunun Şeklinin Şematik Olarak Gösterimi (A.İ. Yükler ve Ark.) (2019)

b- Lorenz Kuvveti

TIG kaynağında, Lorenz kuvveti, kaynak banyosundaki sıvı metalin hareketini etkileyen önemli kuvvetlerden biridir. Kaynak sırasında, yüksek akım yoğunluğu nedeniyle kaynak bölgesinde güçlü bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan, elektrik akımı ile etkileşime girer ve sıvı metal üzerinde bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvet, metalin kaynak banyosu içinde belirli bir yönde hareket etmesine neden olur. Bu hareket, kaynak banyosunun şekillenmesine, derinliğine ve genişliğine etki eder. Lorenz kuvveti, sıvı metalin kaynak banyosunda nasıl dağıldığını belirler. Örneğin, manyetik alanın yönü ve şiddeti, sıvı metalin kaynak banyosunun merkezine mi yoksa kenarlarına mı hareket edeceğini belirleyebilir. Bu, kaynak dikişinin homojenliğini ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen bir faktördür. Formül 3' te Lorenz Kuvvetinin bileşenleri verilmiştir. (J. Sivakumar ve Ark., 2022).

$$F=J \times B$$

[3]

F= Lorenz Kuvveti

J= Elektrik akış doğrultusundaki akım yoğunluğu B= Manyetik akım vektörü (kuvvetidir)

Elektrik akımının yönü, elektrotun ucundan kaynak banyosuna dik doğrultudadır. Uç ile kaynak banyosu arasında akan elektrik akımı bir manyetik alan oluşturur. Hem elektrik akımı hem de manyetik alan kaynak banyosunda aşağıya ve içeriye doğru kuvvetler tatbik eder. Bu kuvvetlere maruz kalan iyonize olmuş olan koruyucu gaz, kaynak banyosunun yüzeyine çarparak yüzey boyunca dışa doğru döner. Elektrot ucunun geometrisine bağlı olarak Lorenz kuvveti kaynak banyosunun şeklini belirler. Sivri uçlu Tungsten elektrot ucu daha fazla aşağıya doğru hareket ve çanşeklindeki ark şekli oluşturur. Küt uçlu tungsten elektrot ucu daha az aşağıya doğru hareket ve dahadar bir ark oluşturur.

Elektrot ucundan iş parçasına doğru akan elektriğin akım çizgileri simetrik ise kaynak banyosunun içerisinde çift sirkülasyon oluşturur (Şekil 1.4d). Akım çizgilerinin asimmetrik olduğu koşullarda ise çift sirkülasyonun yarısı (tek) baskın hale gelerek saf bir rotasyon meydana gelir. Yüksek erime sıcaklığına sahip olan demir, çelik, paslanmaz çelikte kaynak banyosundaki hareketin hızı, daha düşük ergime sıcaklığına sahip olan Alüminyum, Bakır, Gümüş vs.'dekinden daha yüksektir.

c- Kaldırma Kuvveti

TIG kaynağında kaldırma kuvveti (buoyancy force), kaynak banyosundaki sıvı metalin yoğunluğuna ve kaynak banyosundaki sıcaklık gradyanlarına bağlı olarak oluşan yukarı yönlü bir kuvvettir. Bu kuvvet, sıvı metali yukarıya doğru iter ve kaynak banyosunun şekillenmesinde önemli bir rol oynar.

Kaynak banyosunda, sıcaklık farklılıkları nedeniyle yoğunluk farklılıkları oluşur. Kaynak banyosunun alt kısmı genellikle daha sıcaktır ve bu nedenle daha düşük yoğunluğa sahiptir. Üst kısımlar ise daha soğuktur ve daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Bu sıcaklık ve yoğunluk farkları, sıvı metalin yukarı doğru bir hareketine yol açar; bu hareket kaldırma kuvveti ile desteklenir. Kaldırma kuvveti, özellikle büyük ve derin kaynak banyolarında önemli bir rol oynar. Bu kuvvet, sıvı metalin yukarı doğru hareketini teşvik ederek, kaynak banyosunun daha geniş bir alana yayılmasını sağlayabilir. Sonuç olarak, bu kuvvet, kaynak dikişinin düzgünlüğünü ve homojenliğini artırabilir.

Kaldırma kuvveti, genellikle diğer kuvvetlerle (örneğin, Marangoni etkisi, Lorentz kuvveti) birlikte çalışır ve bu kuvvetlerin etkileşimi, kaynak banyosunun nihai şekillenmesini belirler. Kaldırma kuvvetinin doğru bir şekilde anlaşılması ve yönetilmesi, kaynak dikişinin kalitesini optimize etmek ve istenilen kaynak özelliklerini elde etmek için kritik öneme sahiptir.

Banyo sıcaklığı arttıkça erimiş metalin yoğunluğu düşer. Isı kaynağı banyonun merkezinde olduğundan Şekil 1.4a'da ki (1) noktasında (merkezdeki sıcaklık), (2) noktasındaki (kenardaki) sıcaklıktan daha yüksek olduğundan yoğunluk daha düşüktür. (2) noktasındaki sıvının yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle Şekil 1.4b' de görüldüğü üzere sıvı kenarlarda aşağıya doğru yönelirken merkezde yukarıya doğru yükselir.

d- Yüzey Gerilimi Gradyanın Neden Olduğu Kayma Gerilimi

Yüzey gerilimi, bir sıvının yüzeyindeki moleküller arasındaki çekim kuvvetlerinin bir sonucudur ve sıvı yüzeyinin mümkün olan en küçük alanı kaplamasına neden olur. TIG kaynağı sırasında, kaynak banyosunun sıcaklığı, sıvı metalin yüzey gerilimini doğrudan etkiler. Yüksek sıcaklık, yüzey gerilimini azaltırken, düşük sıcaklık yüzey gerilimini artırır. Bu farklılıklar, kaynak banyosunun farklı bölgelerinde farklı yüzey gerilimleri oluşturur ve bu da bir yüzey gerilimi gradyanı (eğim) oluşturur. Yüzey gerilimi gradyanı, kaynak banyosundaki sıvı metalin yüzeyinde bir kayma gerilimi oluşturur. Bu kayma gerilimi, sıvı metalin akışını yönlendirir ve kaynak banyosunun şekil ve boyutunu etkiler. Sıcak bölgeden (düşük yüzey gerilimi) soğuk bölgeye (yüksek yüzey gerilimi) doğru oluşan bu kayma gerilimi, sıvı metalin kaynak banyosu içinde hareket etmesine neden olur.

Yüzey aktif maddenin yokluğunda sıcaklık arttıkça sıvı metalin yüzey gerilimi azalır. Şekil 1.4a'da ki (1) numaralı noktada gösterildiği gibi, daha düşük yüzey gerilimine sahip sıvı metali dışarı doğru sürükler. Başka bir deyişle, dışarıya doğru kayma gerilimi kaynak banyosu yüzeyi üzerindeki yüzey gerilimi farkından kaynaklanmaktadır. Sıvı metal, Şekil 1.4b'de gösterildiği gibi kaynak banyosu yüzeyinin ortasından kenara doğru akar ve daha sonra kaynak banyosu yüzeyinin altından geri döner.

e- Plazma Jetinin Neden Olduğu Kayma Gerilimi

TIG kaynağında, tungsten elektrot ile iş parçası arasında bir elektrik arkı oluşturulur. Bu ark, yüksek sıcaklıklara ulaşarak çalışma ortamındaki inert gazı (genellikle argon veya helyum) iyonize eder ve plazma oluşturur. İyonize olmuş bu gaz, yani plazma, yüksek hızda iş parçasının yüzeyine doğru hareket eder. Bu hareket, plazma jetini oluşturur. Plazma jetinin yüksek hız ve sıcaklıkta olması, iş parçasının yüzeyindeki sıvı metal üzerinde önemli bir etki yaratır. Plazma jeti, sıvı metalin yüzeyinde kayma gerilimi oluşturur ve bu da metalin kaynak havuzu içinde belirli bir yönde hareket etmesine neden olur. Kayma gerilimi, plazma jetinin merkezinden dışarıya doğru yayılan bir etki gösterir. Plazma jetinin doğrudan temas ettiği bölgede, sıvı metal yüksek bir gerilime maruz kalır ve bu bölgedeki metal, kaynak havuzunun kenarlarına doğru itilir. Bu süreç, kaynak banyosunun şekillenmesinde önemli rol oynar. Plazma jetinin neden olduğu kayma gerilimi, genellikle kaynak banyosunun merkezini derinleştirir ve kenarlarda sıvı metalin birikmesine neden olur.

f- Aerodinamik Çekme/Sürüklenme Kuvveti

Aerodinamik çekme veya sürüklenme kuvveti, bir akışkanın (koruyucu gazın) hareketi sırasında oluşan direnç kuvvetidir. TIG kaynağında, genellikle argon veya helyum gibi asal gazlar, kaynak bölgesini atmosferik kirleticilerden korumak amacıyla kullanılır. Bu gazlar, kaynak torcu tarafından belirli bir hızla kaynak banyosu üzerine üflenir. Gazın akışı, metal yüzeyi boyunca bir sürüklenme kuvveti yaratır ve bu kuvvet, sıvı metalin hareket etmesine neden olabilir.

TIG kaynağında bu kuvvetin etkisi, koruyucu gazın sıvı kaynak banyosu üzerindeki etkisiyle kendini gösterir. Gazın akışı, kaynak banyosundaki sıvı metali belirli bir yönde itebilir veya çekebilir. Bu, kaynak banyosunun şekli, genişliği ve derinliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olabilir. Özellikle yüksek hızla üflenen gazlarda, bu sürüklenme kuvveti daha belirgin hale gelir. Gaz akışının yönü, kaynak banyosundaki sıvı metalin akış yönünü değiştirebilir veya kaynak banyosunun yüzeyinde dalgalanmalar oluşturabilir. Bu durum, kaynak işleminin stabilitesini etkileyebilir ve istenmeyen şekil bozukluklarına veya dikiş kusurlarına yol açabilir.

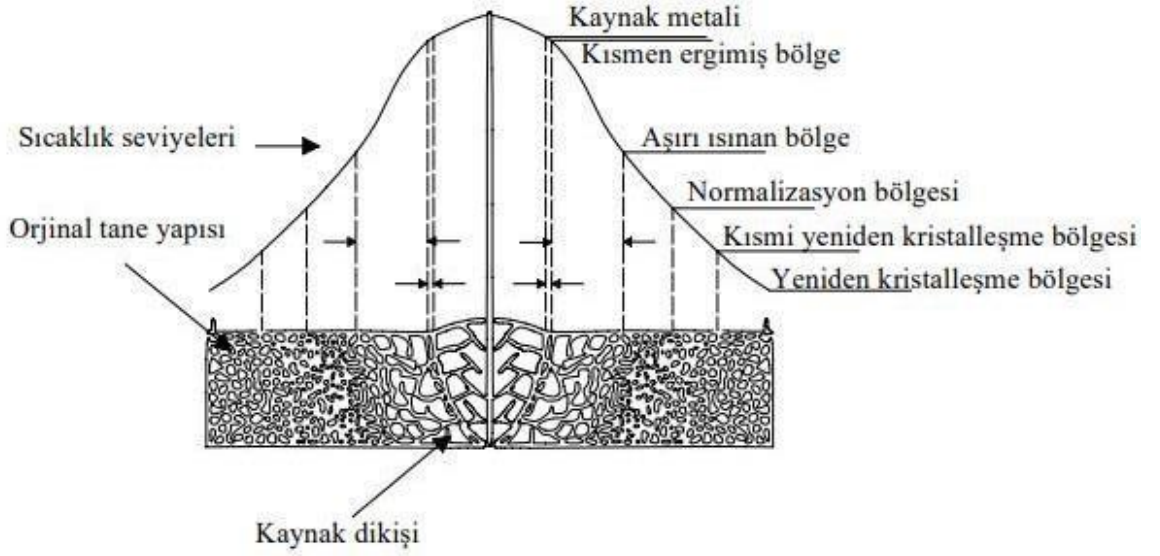
Sonuç olarak; Marangoni etkisi kaynak banyosundaki akışın yönünü belirleyen en etkin kuvvetlerden birisidir. Kaynak dikişi yüzeyindeki aktif örtü bileşiği kullanılmamış ise ve/veya kaynak banyosu içerisinde erimiş halde O_2 , N_2 vs. mevcut değilse Marangoni etkisi sıcaklık gradyanlarına bağlı olarak oluşur. Bu durumda kaynak banyosu içindeki metal akışı sıcaklığın yüksek olduğu merkezden, sıcaklığın daha düşük ve dolayısıyla yüzey geriliminin daha yüksek olduğu dış çeperlere doğru ve oradan aşağıya doğru gerçekleşir. Bu şartlarda, yüzeysel geriliminin mesafe ile ilişkisi doğru orantılı olup işareti pozitifdir. Diğer taraftan, kaynak banyosunun yüzeyinde aktif örtü bulunduğu ve/veya banyonun içerisinde erimiş halde O_2 , N_2 vs. gaz olduğu (Liu (2003), Snow (2002)) durumlarda ise kaynak banyosunun merkezindeki aktif örtü ayrıştığından kenar bölgelerdeki aktif örtü konsantrasyonu daha fazla olacaktır. Bu durumda sıcaklık daha yüksek olmasına rağmen merkezdeki yüzey gerilimi kenarlarındakinden daha yüksek olacaktır. Böylece

kaynak banyosu içerisindeki metal akışı kenarlardan merkeze ve aşağıya doğru gerçekleşecektir. Bu olguya Tersine Marangoni etkisi adı verilmektedir. Tersine Marangoni etkisi oluştuğunda genişliği dar ve derin nüfuziyetli kaynak dikişi elde edilebilmektedir. Tersine Marangoni etkisi oluştuğunda yüzey geriliminin mesafe ile ilişkisi ters orantılı olup işareti negatiftir.

1.3. ITAB Bölgesi ile Mikroyapı, Mikrosertlik ve Mekanik Mukavemet İlişkisi

TIG kaynağında Isıl Tesir Altında Kalan Bölge (ITAB), kaynak işlemi sırasında ısı etkileriyle yapısal değişikliklere uğrayan bir bölgedir. ITAB, kaynak metalinin hemen yanında yer alır ve burada, malzemenin mikroyapısı, mikrosertliği ve mekanik mukavemeti, kaynak işleminin parametrelerine ve malzemenin türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişir.

ITAB bölgesinde, sıcaklık dağılımı nedeniyle mikroyapıda farklı değişiklikler meydana gelir. Kaynak dikişine yakın bölgelerde sıcaklık çok yüksektir ve malzeme tamamen yeniden kristalleşebilir veya tane büyümesi gerçekleşebilir. Bu bölgelerde martenzit, ferrit, perlit veya bainit gibi farklı fazlar oluşabilir. Kaynaktan uzaklaştıkça sıcaklık düşer ve bu bölgelerde ince taneli yapılar veya kısmi dönüşümler gözlemlenebilir. Mikroyapısal değişiklikler, ITAB'nin farklı alt bölgelerinde farklı şekilde oluşur. Örneğin, kaynak dikişine en yakın bölgede, yüksek sıcaklıklar nedeniyle tane büyümesi görülebilir. Bu, malzemenin sertliğini ve mukavemetini azaltabilir. Diğer yandan, daha uzak bölgelerde ince taneli yapılar oluşabilir ki bu da malzemenin sertliğini artırabilir. ITAB'nin mikrosertliği, mikroyapısındaki değişikliklere bağlı olarak değişir. Tane büyümesinin olduğu bölgelerde sertlik genellikle düşer çünkü daha büyük taneler, malzemenin deformasyon direncini azaltır. Mikrosertlik dağılımı, ITAB'nin farklı bölgelerinde farklılık gösterir ve bu, kaynak dikişinin performansını etkileyebilir. ITAB'nin mekanik mukavemeti, mikroyapıdaki değişiklikler ve mikrosertlik profiline göre belirlenir. Genellikle, ITAB'nin mekanik mukavemeti kaynak metalinden ve ana metalden daha düşük olabilir, bu da kaynak bağlantısının en zayıf halkası olmasına yol açar. Mukavemet kayıpları, genellikle tane büyümesi, sert fazların oluşumu veya belirli bölgelerdeki mikroçatlaklar gibi mikroyapısal nedenlerden kaynaklanır.



Şekil 1.6. TIG Kaynağından Sonraki ITAB Bölgesinin Parametrelerinin Şematik Gösterimi

Şekil 1.6'da TIG kaynak uygulamasından sonra oluşan ITAB bölgesinin parametreleri şematik olarak gösterilmiştir. Burada, füzyon bölgesine yakın olan bölgelerde daha kaba (iri) tanelerin oluştuğu görülmektedir. Tanelerin iri olması kaynağa yakın bölgedeki sertliğin ana malzemeye göre daha düşük olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bu bölgedeki çekme mukavemeti ana malzemenin çekme mukavemetinden daha düşüktür. Normal koşullarda sertlik ve mukavemet ilişkisi doğru orantılıdır. Bir kaynak dikişinin mukavemetini en zayıf bölgenin mukavemeti belirleyeceğinden kaba taneli yapıdan kaçınılması gerekir.

1.4. A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemleri

Tek pasoda en fazla 2,5- 3,5 mm derinliğinde kusursuz bir kaynak dikişi talep edilen birçok uygulamada TIG kaynağı benzersiz bir yöntemdir. Elektrik arkının düşük ısı yoğunluğu, dikişin estetik görüntüsü, yatırım maliyetinin düşüklüğü TIG kaynağının en önemli avantajlarıdır. Ancak TIG kaynağının sık kaynak penetrasyonu ile tek pasoda çok az miktarda metal eritilebilmesi nedeniyle verimliliği oldukça düşüktür. Bu nedenle belli kalınlıkların üzerindeki malzemelerin kaynağında birden çok paso ile dolgu yapılması gerekmektedir. Bu uygulama sonucunda iş parçasına istenenden çok ısı girişi olmaktadır. Isı girdisinin yüksekliği ITAB bölgesinin genişlemesine, açılmalık kaynak distorsiyonlarına ve ana metalin mekanik özellikleri ile mikro yapısının olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır.

Tüm bu olumsuzluklar TIG kaynağının iyileştirilmesi gereksinimini doğurmuştur. Örneğin Keyhole TIG (K-TIG), activated TIG (A-TIG), flux bounded TIG (FB-TIG), advanced activated TIG (AA-TIG), strengthening activated TIG (SA-TIG), laser-assisted TIG (LA-TIG), TIP-TIG ve benzeri kaynak yöntemleri geliştirilmiştir.

A-TIG ve FB-TIG kaynağında kaynak dikişi için 8-10 mm'ye kadar kaynak ağızı açılmasına gerek yoktur. Doğada bol miktarda bulunan oksit, florür, sülfür ve klorür bileşiklerinden sadece

birisinin veya birden fazla bileşiklerin belli oranda karışımı aktif örtünün ana maddesi olarak kullanılmaktadır.

1960' lı yıllarda E.O. Paton Institute of Electric Welding kurumu tarafından ilk defa denenilen Aktif örtülü TIG kaynağı (A-TIG) konusunda birçok araştırmalar yapılmıştır. İnce bir aktif örtü bileşeninin bir fırça vasıtasıyla kaynak bölgesine uygulanmasıyla kaynak penetrasyonunda çok ciddi bir artış sağlanmaktadır. Araştırmacıların birçoğu kaynak penetrasyon derinliğinin aktif örtü bileşenleri kullanımıyla arttırılmasını, ark demetinin kısılması (daralması) ve/veya tersine Marangoni Etkisi ile açıklamışlardır. Başka görüşler olmasına rağmen bahsedilen bu iki görüş en fazla taraftar bulan görüşlerdir.

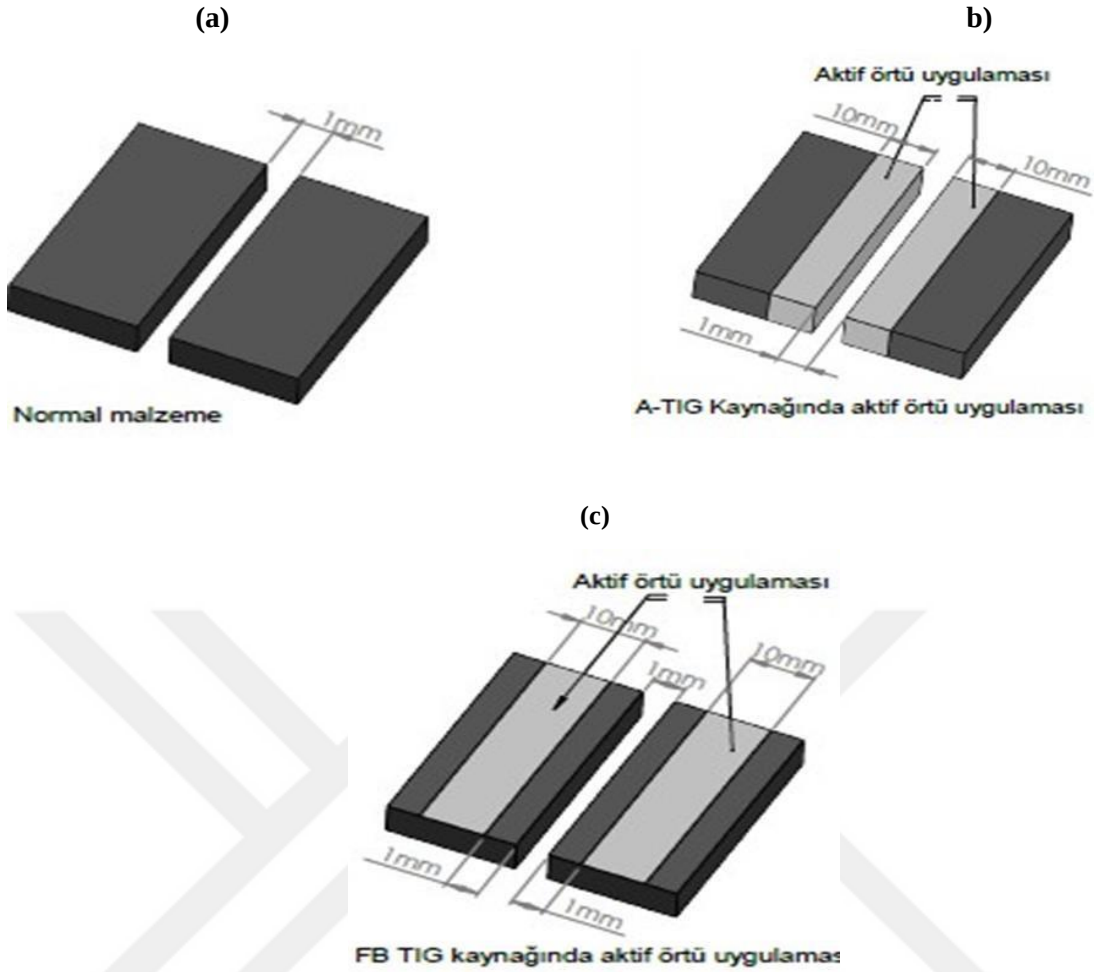
S. Sire ve arkadaşları (2002), kaynak dikişi üzerine aktif örtü kullanmak yerine kaynak dikişinin sağındaki ve solundaki sınırlı bölgelere aktif örtü uygulanmasının daha uygun olacağını ileri sürmüşlerdir. Bu uygulamaya da FB-TIG adını vermişlerdir.

FB-TIG kaynak tekniğinin A-TIG kaynak tekniğine göre en önemli avantajları aşağıdaki gibidir;

- Kaynak dikişi üzerinde aktif örtü bulunmaması nedeniyle arkın tutuşması için gerekli akım şiddetidaha düşüktür.
- A-TIG kaynağında, kaynak dikişi üzerindeki aktif örtü bileşiği eridiğinde, kaynak banyosu içerisine girerek inklüzyon oluşturma ihtimali vardır. FB-TIG tekniğinde kaynak birleşim çizgisiüzerinde aktif örtü bileşiği olmayacağından inklüzyon riski yoktur.
- Kaynak dikişinde ve ITAB bölgesinde kalan düzensiz artık çekme gerilimleri kaynakta ve/veya ana malzemede çatlak oluşturma riskini arttırmaktadır. Bu olgu birçok uygulamada asla istenmeyen bir olumsuzluktur.

A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında tercih edilen bileşik ve/veya bileşikler 30-60 mikron büyüklüğünde ince toz haline getirildikten sonra saf alkol, aseton, etanol, metanol ve saf su gibi sıvılarla karıştırılarak süspansiyon haline getirilmekte ve bir fırça vasıtasıyla kaynak dikişi bölgesine uygulanmaktadır. Uygulama şekline bağlı olarak kaynak yöntemi A-TIG veya FB-TIG olarak adlandırılmaktadır. Aşağıda ki Şekil 1.7(a, b, c)'de TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında aktif örtünün uygulama yöntemleri şematik olarak gösterilmiştir.

A-TIG ve FB-TIG kaynağındaki temel fark aktif örtü malzemesinin kaynak dikişi bölgesine uygulama yöntemidir. Şekil 1.7a'da geleneksel TIG kaynağı için hazırlanan parça, Şekil 1.7b'de A-TIG, Şekil 1.7c'de ise FB-TIG kaynağı için hazırlanan parçalar gösterilmiştir. Her iki yöntemde de konvansiyonel TIG kaynağının aksine 8 mm kalınlığına kadar malzemelerde kaynak ağzı açılmasına gerek bulunmamaktadır.



Şekil 1.7. Kullanılan kaynak yöntemleri; (a) TIG, (b) A-TIG, and (c) FB-TIG

A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde uygulanan aktif örtünün kuru film kalınlığı (30/80 mikron) veya (30- 60 gr/m²) civarında olmaktadır. Daha ince uygulamalarda yeteri kadar aktif örtü banyoda beklenen değişimlerin yetersiz olmasına, daha kalın kaplamaları ise eritilebilmesi için daha yüksek akım şiddeti uygulanmasına neden olmaktadır. Uygulama kalın yapılırsa kaynak banyosuna daha fazla ısı girdisi olmakta bu da aşılma çarpılma ve sıcak yırtılmalara neden olabilmektedir.

A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde uygun kaynak parametreleri ile birlikte uygun aktif örtü cinsi seçimi ve uygulaması gerçekleştiğinde kaynak penetrasyonu konvansiyonel TIG kaynağına göre daha derin kaynak genişliği daha dar olmaktadır. Tek pasoda kaynak ağzı hazırlanmaksızın 8-10 mm derinliğine kadar penetrasyon elde edilebilmiştir. FB-TIG kaynağında ITAB genişliği daha dar olduğundan kaynak dikişine yakın bölgedeki mekanik özellikler (çekme, akma, mukavemeti, çentik test değeri, mikro sertlik) iyileşmekte ve metalürjik yapılarıdaki değişim daha az olmaktadır. Buna karşılık A-TIG’te kaynak dikişine ayrılmamış aktif örtü partikülleri karışabilmekte ve kaynak dikişi üzerinde estetik olmayan bir kabuk oluşabilmektedir. Söz konusu dezavantajlar FB-TIG yönteminde yoktur. Buna karşılık gerek A-TIG ve gerekse de FB-TIG yönteminde aktif örtü bedeli ve uygulama işçiliği maliyeti mevcuttur.

A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında kaynak sonucunu etkileyen birçok faktörler arasında en önemlileri kaynak akım şiddeti, kaynak hızı, koruyucu gaz debisi, uygulamada tercih edilen aktif örtünün cinsi, tane büyüklüğü, uygulama sonucunda ki kuru film kalınlığıdır.

1.5. TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinin Mukayesesi

TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinin karşılaştırılması özet olarak Çizelge 1' de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Kaynak Yöntemlerinin Mukayesesi

Özellikler	TIG Kaynak Tekniği	A-TIG Kaynak Tekniği	FB-TIG Kaynak Tekniği
Aktif Örtü Kullanımı	Kaynağın hiçbir aşamasında aktif örtü gerektirmez.	Kaynak dikişi üzerine aktif örtü pastası uygulanması gerekir.	Aktif örtü pastası, kaynak dikişinin sağında ve solunda belli bölgelere uygulanır.
Penetrasyon Derinliği	2,5-3,5 mm arasındapenetrasyon sağlar.	Aktif örtü kullanıldığında penetrasyon %200-300 oranında artarak 8-10mm'ye ulaşır.	Aktif örtü kullanıldığında penetrasyon %200-300 oranında artarak 8-10 mm'ye ulaşır.
Kalın Malzemeler	5 mm'den daha kalın malzemelerde kaynak ağzı açılması gerekir.	8-10 mm kalınlığa kadar kaynak ağzı açılması gerekli değildir.	8-10 mm kalınlığa kadar kaynak ağzı açılması gerekli değildir.
Arkın Isı Yoğunluğu	Arkın ısı yoğunluğu nispeten düşüktür.	Aktif örtü yalıtkan olduğundan ark çok dar bir alanda odaklanır, bu da yüksek ısı yoğunluğu sağlar.	Aktif örtü elektrik izolasyonu yapmadığındanısı yoğunluğu A-TIG'den daha düşüktür; bu da açısılçarpılmayı azaltır.
Kaynak Dikişi Şekli	Geniş, sıg kaynak dikişi oluşturur; dikişin kesit alanı büyüktür.	Tersine Marangoni etkisiyle daha dar ve derinbir kaynak dikişi elde edilir.	Tersine Marangoni etkisiyle daha dar ve derin bir kaynak dikişi elde edilir.
Paso Sayısı ve Isıl Girdi	3 mm'den daha kalın malzemelerde birden çok paso gerekir; bu da ısı girdisini artırır ve ITAB bölgesini genişletir.	8-10 mm kalınlıktaki iş parçalarında çoklu paso gerekmez; düşük ısı girdisiyle ITAB dar kalırve çarpılma azalır.	8-10 mm kalınlıktaki iş parçalarında çoklu paso gerekmez; düşük ısı girdisiyle ITAB dar kalır ve çarpılma azalır.
İnce Kesitli Malzemelerde Kullanım	İnce kesitli malzemelerin kaynağında rakipsizdir.	3 mm'den daha kalın malzemelerin kaynağı için uygundur.	3 mm'den daha kalın malzemelerin kaynağı için uygundur.
Maliyet ve İşçilik	Doğrudan uygulanır; aktif örtü kullanımına gerek yoktur.	Aktif örtü maliyeti ve ilave işçilik gerektirir.	Aktif örtü maliyeti ve ilave işçilik gerektirir.
Kaynak Dikişinin Dış Görünüşü	Dış görünüşü temiz veestetiktir.	Yüzeyde aktif örtü cürufu kalabilir; dikişin içeriğine aktif örtü taneleri karışabilir.	Dış görünüşü A-TIG'den daha iyidir; aktif örtü taneleri dikişin içerisine karışmaz.
Uygulama Kalitesi	Aktif örtü uygulanmadığından kaliteyi etkileme riski yoktur.	Aktif örtünün genişliği ve kalınlığı çok önemlidir; manuel uygulama uzmanlık gerektirir.	Aktif örtünün genişliği, kalınlığı ve dikişin sağına ve soluna uygulanması önemlidir; manuel uygulama uzmanlık gerektirir.

1.6. A-TIG ve FB-TIG Kaynaklarındaki Aktif Örtü Seçim Kriterleri

A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde kullanılan aktif örtünün seçim kriterleri, kaynak işleminin etkinliğini, nüfuziyet derinliğini ve kaynak dikişinin kalitesini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Aktif örtünün doğru seçilmesi, kaynak işleminin istenilen sonuçları vermesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Aşağıda, bu iki yöntem için aktif örtü seçim kriterleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır:

Malzeme Uyumu: Aktif örtünün, kaynak yapılacak ana malzeme ile uyumlu olması gerekir. Aktif örtü bileşenleri, malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre seçilmelidir. Örneğin, paslanmaz çelikler için kullanılan aktif örtüler, genellikle TiO_2 veya SiO_2 gibi bileşenler içerir. Bu bileşenler, kaynak sırasında Marangoni etkisini tersine çevirerek derin nüfuziyet sağlar.

Nüfuziyet Derinliği: Kaynak işleminin amacına uygun bir nüfuziyet derinliği elde etmek için aktif örtü seçimi yapılmalıdır. Derin nüfuziyet gerektiren uygulamalarda, yüzey gerilimini etkin bir şekilde değiştiren ve sıvı metalin kaynak banyosunun derinlerine doğru hareket etmesini sağlayan aktif örtüler tercih edilmelidir.

Kaynak Dikişi Kalitesi: Aktif örtü, kaynak dikişinin yüzey kalitesini ve iç yapısını doğrudan etkiler. Örtünün kalıntı bırakmaması, cüruf oluşumunu en aza indirmesi ve kaynak dikişi içinde taneler bırakmaması önemlidir. Kaliteli bir aktif örtü, temiz bir kaynak dikişi sağlar ve mekanik özelliklerin korunmasına yardımcı olur.

Isı Yoğunluğu ve Ark Kararlılığı: Aktif örtü, arkın ısı yoğunluğunu ve kararlılığını etkiler. A-TIG kaynaklarında kullanılan aktif örtüler, arkın dar bir bölgede odaklanmasını sağlayarak yüksek ısı yoğunluğu oluşturur. Bu, derin penetrasyon ve yüksek kaynak dikişi kalitesi sağlar. FB-TIG yönteminde ise aktif örtü, kaynak bölgesinin çevresinde ısı yoğunluğunu kontrol etmek için kullanılır ve örtü, kaynak banyosunun dengeli bir şekilde soğumasını sağlar.

Termal Özellikler: Aktif örtünün termal özellikleri, kaynak sırasında örtünün erime noktası, ısıl iletkenliği ve yalıtkanlık özelliklerini içerir. Yüksek ısıl iletkenliğe sahip bir aktif örtü, ısıyı kaynak bölgesine daha iyi ileterek derin bir nüfuziyet sağlar. Ayrıca, örtünün yalıtkanlık özellikleri, arkın odaklanmasını ve kaynak banyosunun kontrollü bir şekilde şekillenmesini sağlar.

Uygulama Kolaylığı: Aktif örtünün kaynak yüzeyine uygulanma kolaylığı da önemli bir kriterdir. Örtünün kalınlığı, uygulanma yöntemi ve yüzeye yapışma kabiliyeti, kaynak işlemi sırasında homojen bir yüzey gerilimi değişikliği sağlamak için dikkate alınmalıdır.

Ekonomik Faktörler: Düşük maliyetli örtüler, kaynak işleminin toplam maliyetini azaltabilir, ancak kaliteden ödün vermeden bu maliyet avantajını sağlayacak bileşenlerin seçilmesi önemlidir. Ayrıca, örtünün tekrar kullanılabilirliği veya birden fazla kaynak işlemi için uygunluğu da ekonomik faktörler arasında yer alır.

Çevresel ve Sağlık Etkileri: Aktif örtünün çevreye ve kullanıcı sağlığına olan etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Düşük emisyonlu, toksik olmayan ve çevreye zararsız bileşenler tercih edilmelidir.

Ellingham diyagramı (Şekil 1.8), metal oksitlerin kararlılığı ile ilgili bilgi sağlayan termodinamik bir araçtır ve özellikle oksitlenme ve indirgenme tepkimelerinin sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında aktif örtü seçiminde Ellingham diyagramı, uygun oksitlerin seçilmesine rehberlik eder. Bu diyagram, hangi metal oksitlerin belirli bir sıcaklıkta daha kararlı olduğunu ve dolayısıyla kaynak işlemi sırasında kullanılmaya uygun olacağını belirlemeye yardımcı olur. Ellingham diyagramı, farklı metallerin oksitlerinin oluşumu için gerekli serbest enerji değişimini (ΔG) gösteren bir diyagramdır ve bu enerji değişimi, sıcaklığa bağlı olarak değişir.

Ellingham diyagramı, bir metalin oksitlenme eğilimini ve oksitlenme tepkimesi için gerekli serbest enerji değişimini sıcaklık fonksiyonu olarak gösterir. Diyagram, sıcaklık eksenini (x eksenini) ile serbest enerji değişimi ekseninden (y eksenini) oluşur. Diyagramda, metal oksitleri ile ilgili reaksiyonların eğrileri yer alır. Eğrinin pozisyonu, bir metalin oksitlenme eğilimini ve bu sürecin ne kadar termodinamik olarak uygun olduğunu gösterir. Bir metalin oksitlenmesi, o metalin oksijenle reaksiyona girerek oksit oluşturması anlamına gelir ve bu reaksiyonun serbest enerji değişimi, metalin oksijenle ne kadar kolay reaksiyona girdiğini gösterir. Diyagramdaki eğriler aşağıya doğru eğimlidir; bu da daha yüksek sıcaklıklarda oksitlerin kararlılığının azaldığını gösterir. Diyagramda, düşük ΔG değeri, metalin oksitlenme eğiliminin yüksek olduğunu ve bu reaksiyonun daha kolay gerçekleştiğini gösterir.

A-TIG ve FB-TIG kaynakları ile ilgili deneysel çalışmalarda en çok kullanılan bileşiklerin oksitler ve tuzlar olduğu tespit edilmiştir. Bazı deneysel çalışmalarda oksit ve tuzlar tekli olarak veya belli oranlarda karıştırılarak (oksit+oksit, oksit+tuz, oksit+oksit+tuz vb.) ikili, üçlü ve dörtlü karışımlar halinde kullanılmıştır.

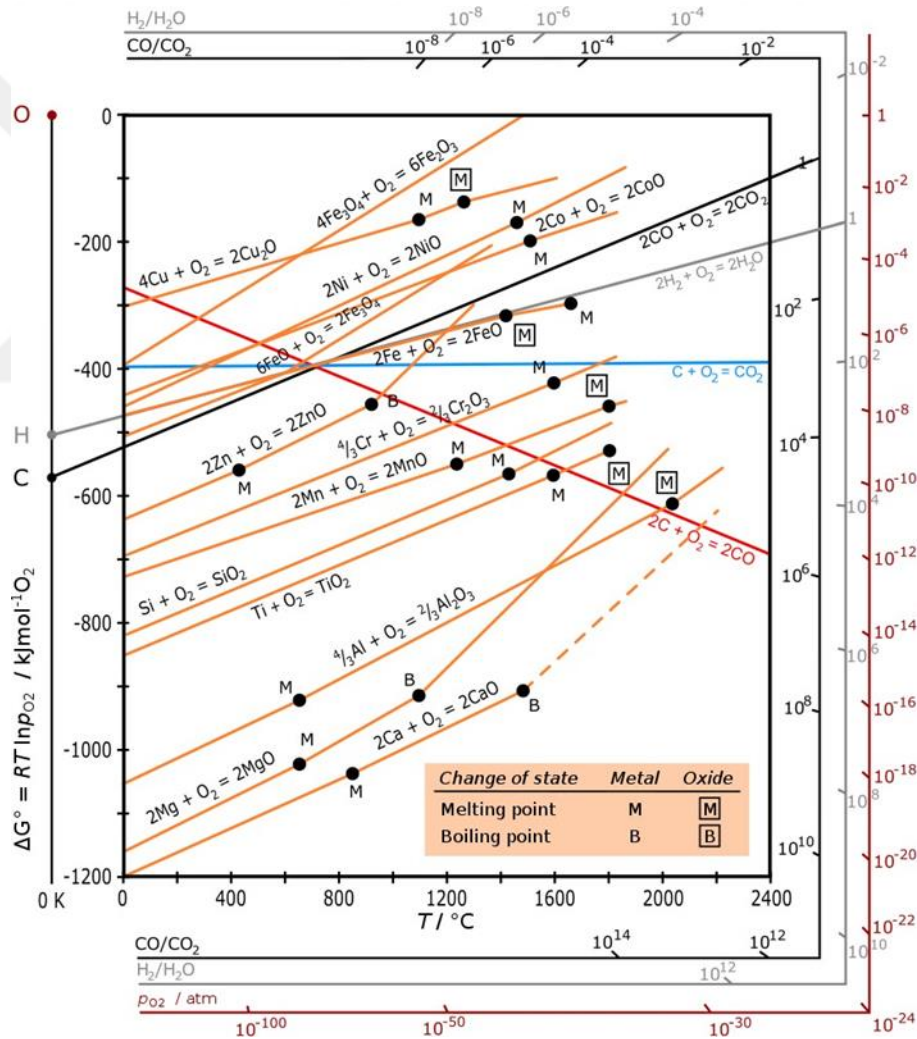
A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında aktif örtü (flux) seçimi, kaynak banyosunda istenilen kimyasal reaksiyonları teşvik etmek ve belirli metal oksitlerin oluşumunu engellemek için yapılır. Ellingham diyagramı, bu seçim sürecinde rehberlik sağlar:

Oksit Oluşumunun Kontrolü: Ellingham diyagramı, bir metalin belirli bir sıcaklıkta oksijenle ne kadar kolay reaksiyona girip oksit oluşturacağını gösterir. A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında, seçilen aktif örtünün, kaynak banyosundaki metal oksitlenme reaksiyonlarını kontrol etmesi istenir. Örneğin, TiO_2 gibi bir akı kullanılacaksa, bu bileşiğin kaynak sıcaklığında kararlı kalması ve istenmeyen oksitlenme reaksiyonlarını önlemesi gerekir.

Oksitleri Parçalama Yeteneği: Aktif örtü, kaynak banyosundaki oksitleri parçalama yeteneğine sahip olmalıdır. Ellingham diyagramında, bir aktif örtünün bileşenlerinin, kaynak banyosundaki mevcut metallerin oksitlerinden daha düşük bir ΔG değeri göstermesi tercih edilir. Bu, aktif örtünün, metal oksitleri daha kararlı bir bileşiğe dönüştürerek kaynak banyosunu saf metalden arındırmasına yardımcı olur.

Yüzey Gerilimi Üzerindeki Etkiler: Ellingham diyagramı, aynı zamanda kaynak banyosunun yüzey gerilimini kontrol etmek için de kullanılabilir. Aktif örtü bileşenlerinin, kaynak sıcaklığında yüzey gerilimini düşürerek Marangoni akışını yönlendirmesi amaçlanır. Diyagramdaki veriler, belirli bir aktif örtü bileşeninin, kaynak sırasında yüzey gerilimini nasıl etkileyebileceği konusunda fikir verir.

Bir A-TIG kaynağı için aktif örtü olarak TiO_2 kullanıldığında, Ellingham diyagramında bu oksidin sıcaklıkla nasıl bir serbest enerji değişimine sahip olduğunu incelemek gerekir. Eğer kaynak işlemi sırasında ulaşılan sıcaklık, TiO_2 'nin kararlılığını koruyabileceği bir sıcaklıksa, bu oksit kaynak banyosunun yüzeyinde kalıcı olur ve yüzey gerilimini etkileyerek Marangoni akışını yönetir. Ancak, sıcaklık çok yüksekse ve TiO_2 indirgenme eğilimindeyse, Ellingham diyagramı bunu gösterecektir ve bu durumda alternatif bir oksit düşünülmelidir.



Şekil 1.8. Oksitler için Ellingham Diyagramı
(Wikimedia Commons, Oksitler için Ellingham diyagramı)

Ellingham Diyagramı daha yüksek standart oluşum enerjisine sahip olan oksitlerin ve tuzların daha düşük sıcaklıkta ayrıştığını göstermektedir. Buna karşılık çok düşük standart oluşum enerjisine sahip olan oksit veya tuz bileşikleri (Örn: $Al_2O_3 = -1657,7 \text{ KJ/mol}$) çok daha kararlı olmaları nedeniyle genellikle daha yüksek sıcaklıkta ayrışmaktadır. Bu tür çok yüksek ayrışma sıcaklığına sahip olan oksit ve tuz bileşikleri aktif örtü olarak kullanıldığında sıcaklığın nispeten düşük olduğu ark kolonunun dışındaki bölgelerde ayrışmamakta ve hatta eriyememektedir. Böyle bir durumda toz halindeki aktif örü partiküllerin kaynak banyosunun katılaşması sırasında banyoya karışarak inklüzyon oluşturma riski vardır. Inklüzyonlar kaynak dikişinin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğinden kesinlikle istenmemektedir. Bunu aşmak için ayrışma sıcaklığı yüksek olan bir oksit veya tuz bileşiğini daha düşük ayrışma sıcaklığına sahip başka bir bileşik ile karıştırarak, karışımın erime sıcaklığını düşürmek ve akışkanlığı arttırmak ile mümkün olabilmektedir. Akışkanlık artırıcı olarak; Li_2O , Na_2O , B_2O_3 , BaO , MgO bileşikleri kullanılmaktadır.

Diğer taraftan erimiş haldeki aktif örtünün yoğunluğu ile kaynak yapılan metal veya alaşımın yoğunluğu arasındaki ilişkide çok önemlidir. Erimiş haldeki aktif örtünün yoğunluğu erimiş haldeki kaynak banyosunun yoğunluğundan daha ağır olursa erimiş aktif örtü kaynak banyosunun üzerinde yüzemeyeceğinden banyoya karışır. Bu durumda Tersine Marangoni etkisi oluşmaz ve kaynak dikişinde istenmeyen inklüzyonlar oluşur. Seçilecek aktif örtünün erimiş haldeki yoğunluğunun mutlaka erimiş haldeki kaynak banyosunun yoğunluğundan daha hafif olmasına dikkat edilmelidir.

Diğer kritik bir faktörde buharlaşma sıcaklığıdır. A-TIG veya FB-TIG kaynağında kullanılacak aktif örtünün buharlaşma sıcaklığının da ana metalin veya kaynak banyosunun ergime sıcaklığından daha düşük olmamasına dikkat edilmelidir. Zira böyle bir durumda kaynak banyosunun altındaki bir sıcaklıkta aktif örtü buharlaşacağından aktif örtüden beklenen “Tersine Marangoni Etkisi”nin gerçekleşmesi mümkün olmamaktadır.

Yukarıda sıralanan kısıtlayıcı başlıca kriterler ve Ellingham Diyagramı dikkate alınarak deneysel çalışmalarda aşağıdaki Çizelge 1.2’de gösterilen muhtelif bileşiklerin kullanılmasının mümkün olacağı sonucuna varılmıştır. Deneysel çalışmalarda Çizelge 1.2’de bileşiklerden 9 adedi seçilmiştir. Seçilen 9 adet bileşiğin tekli ve ikili kombinasyonları ile Çizelge 3.6’da görüleceği üzere 28 farklı aktif örtü geliştirilmiştir.

Çizelge 1.2. Deneysel Çalışmalarda Aktif Örtü Olarak Kullanılabilecek Muhtelif Bileşikler

Bileşik Adı	Doğal / Sentetik	Yoğunluk gr/m ³	Molekül Ağırlığı gr / mol	Erime Sıcaklığı °C	Kaynama Sıcaklığı °C	Standart Oluşum Entalpisi Kj / mol	Gibbs Serbest Enerjisi Kj / mol
Al ₂ O ₃	Doğal	3,987	101,9613	2072	2977	-1675,7	
CuO	Doğal	6,315	79,545	1326	2000	-156	
NiO	Doğal	6,67	74,6928	1955		-240	
Co ₂ O ₃	Sentetik	5,18	165,8646	895		-577	
ZnO	Sentetik	5,606	81,406	1974	2360	-350	-320
Cr ₂ O ₃	Sentetik	5,22	151,99	2435	4000	-1128	
Li ₂ O	Doğal	2,013	29,88	1438	2600	-595	-562,1
SiO ₂	Doğal	2,648	60,08	1713	2950	-911	
MgO	Doğal	3,6	40,304	2852	3600	-601,6	569,3
MnO ₂	Sentetik	5,026	86,9368	593		-520	-465
CaO	Doğal	3,34	56,0774	2613	2850	-635	-595
AlF ₃	Sentetik	3,01	83,977	1290		-1510,4	-1431
MoO	Sentetik	4,7	143,95	802	1,155	-745,1	-668
NaCl	Doğal	2,17	58,443	800,7	1,465	-411,12	
CaCl ₂	Sentetik	2,15	110,98	775	1935	-795,42	-748,81
CaF ₂	Sentetik	3,18	78,075	1418	2533	-1225,95	-1157,31
MnCl ₂	Sentetik	2,977	125,844	654	1225	-555,05	
MgF ₂	Sentetik	3,148	62,3018	1263	2260	-1224,2	-1070
Na ₃ AlF ₆	Sentetik	2,9	209,941	1832		-3,312	
Fe ₂ O ₃	Doğal	5,242	159,69	1475-1565	Ayrışıyor	824,2	
B ₂ O ₃	Doğal	2.460	69,6182	450	1860	-1254	-832
TiO ₂	Doğal	4,23	79,89	1843	2972	-945	-895
(2) 90/10 CuNi	Sentetik	8,94		1171			

Not 1: Bazı bileşiklerin kaynama sıcaklıkları ve Gibbs serbest enerjisi bulunamamıştır. Not 2: 90/10 CuNi deneysel çalışmalarda kullanılan ana malzeme.

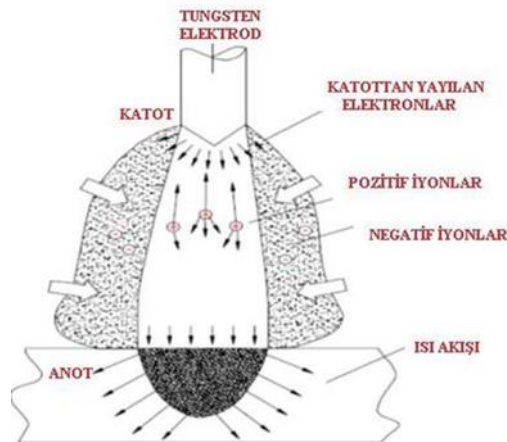
Aktif örtü olarak kullanılacak oksit ve tuzların elektron afinitesi (ilgisi) önemli bir faktördür. Elektron ilgisi iyonlaşma enerjileri yüksek olan elementlerde diğerlerine göre daha fazladır. Periyodik cetvelde soldan sağa doğru ve yukarıdan aşağıya doğru indikçe elementlerin elektrona ilgisi de artmaktadır. Diğer bir hususta ise ayrışan (dekompoze olan) oksitlerden açığa çıkan oksijenin kaynak banyosu içerisindeki çözünebilme potansiyelidir.

1.7. A-TIG ve FB-TIG Kaynağında Penetrasyon Derinliğinin Oluşmasına Neden olan Mekanizmalar

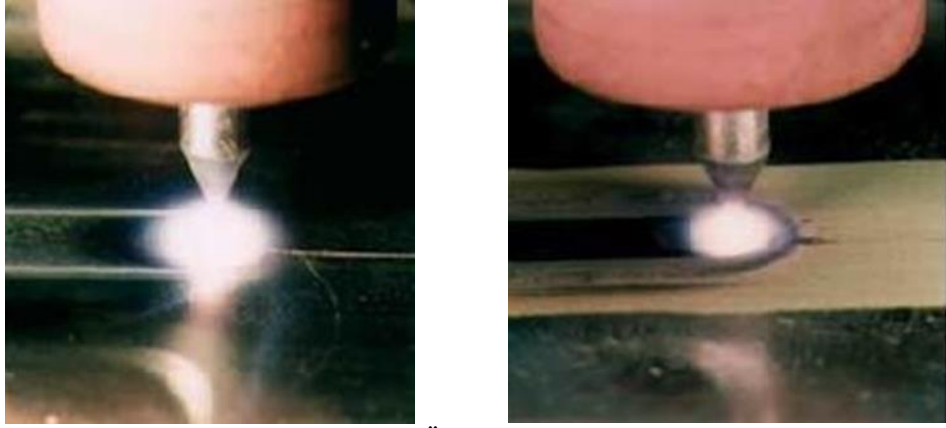
A-TIG ve FB-TIG kaynaklarının tartışılmaz üstünlüklerine rağmen endüstri de halihazırda yaygın olarak kullanılmaması birçok sebebe bağlanabilir. Ampirik olarak değişik kompozisyonlardaki ve termal kararlılıktaki oksit ve tuz bileşiklerinin (aktif örtülerin) penetrasyon derinliğini arttırdığı görülmesine rağmen bu sonucun hangi mekanizmalarla oluştuğu hususunda görüş birliği sağlanamamıştır. Tarihsel süreç içerisinde öne çıkan başlıca görüş ve önerilen teoriler aşağıda özetlenmiştir.

a- Simonik ve ark. Teorisi (1976); aktif örtü malzemelerinin içerdiği oksit ve florür moleküllerinin arkın oluşturduğu plazmanın dışındaki serbest elektronları bağlama özelliği vardır. Esasen oksit ve florürlerin ayrışması sonucunda oluşan iyonların hareket kabiliyeti serbest iyonlara nazaran daha düşüktür. Arkın dışındaki serbest elektronların bağlanması sonucunda ark kolonunun kaynak metali üzerindeki dairesel alanın çapı, normal TIG kaynağının oluşturduğu alanın çapından %20-30 oranında daha küçük olmaktadır. Ark kolonunun ortasındaki serbest elektronların nispeten daha hızlı hareket etmeleri nedeniyle ark kolonunun ortasındaki akım yoğunluğu artar. Bunun sonucunda, ark elektrodun izdüşümündeki daha küçük çaplı daireye daha iyi odaklanır ve daha derin penetrasyon sağlanır.

Lucas ve Howse (1997) ile Tseng ve ark. (2011) yukarıdaki teoriyi destekleyen çalışmalarında; ark plazmasında bulunan buharlaşmış aktif örtü molekülleri arkın dış çeperlerindeki elektronları yakalayıp arkın kısılmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Buharlaşan moleküller ve ayrılan atomlara elektronların bağlanması elektron absorpsiyonunu ve dolayısıyla negatif yüklü iyonların oluşmasını sağladığını belirtmişlerdir. Şekil 1.9'da arkın oluşturduğu plazmanın dış çeperlerindeki elektronların yakalanması sonucunda arkın kısılması (daraltılması) şematik olarak gösterilmiştir. Bu teoriyi destekleyen gerçek kaynak görselleri Şekil 1.10a ve 1.10b'de görüldüğü gibidir. TIG kaynağının ark plazması (Şekil 1.10a) kesit olarak aktif örtü kullanılmış olana göre (Şekil 1.10b) daha geniş olduğu görülmektedir.



Şekil 1.9. A-TIG ve FB-TIG Kaynaklarında Aktif Örtü kullanımıyla Ark Kısılmasını Gösterir Şematik Model (Lucas ve Howse, 1997)



Şekil 1.10. (a) Konvansiyonel ve (b) Aktif Örtülü TIG Kaynağının Ark Kolonu Resimleri (Lucas ve Howse, 1997)

Buharlaşma sonucunda arkın kısılması, plazma ile banyoya aktarılan ısı yoğunluğunun ve dolayısıyla arkın izdüşümünde banyo yüzeyine isabet eden bölgede arkın sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. A-TIG kaynak uygulaması sırasında FB-TIG'e nazaran ark kolunun dış çeperlerine çok daha fazla buharlaşmış molekül ve ayrılmış atom bulunur. Ark kısılması gerçekleştiğinde arkın dış çeperlerindeki elektron miktarında ciddi bir azalma gerçekleşir. Şüphesiz elektronlardaki azalmanın miktarı arkın dış çeperlerinde mevcut olan buharlaşmış moleküllerin ve ayrılan atomların, elektrona karşı ilgisine bağlıdır. Söz konusu partiküller elektronlarla birleşerek negatif yüklü iyonları oluşturur.

b- Savitskii ve Leskov Teorisi (1980); Aktif örtü malzemeleri kaynak banyosunun yüzey gerilimini düşürür. Bunun sonucunda arkın oluşturduğu itme kuvvetinin, banyo içerisinde daha derine kadar etkili olmasını sağlar. Başka bir deyişle kaynak banyosunun daha derinlere itilmesine imkân verir. Böylece daha derin penetrasyonun elde edilebildiğini ileri sürmüşlerdir.

c- Heiple ve Roper Teorisi (1982); Kaynak banyosunun içerisindeki metalin akış yönü, kaynak dikişi geometrisini etkileyen en önemli fonksiyonlardan birisidir. Ergimiş metalin akış yönünün merkezden dışa doğru olması fizik biliminde (Gibbs)/Marangoni etkisi ile açıklanmaktadır. Kaynak banyosundaki akışın yönü de kaynak banyosunun yüzey gerilimi katsayısının işaretine bağlıdır. Kaynak banyosundaki akışın yönü her zaman yüzey geriliminin düşük olduğu bölgeden yüksek olan bölgeye doğrudur. Sıcaklık söz konusu olduğunda kaynak banyosunun nispeten yüksek sıcaklıkta olan merkez bölgesindeki yüzey gerilimi, nispeten soğuk olan kenar bölgelere göre daha düşüktür. Dolayısıyla aktif örtü kullanılmamış olan TIG kaynağında yüzey geriliminin sıcaklıkla ilişkisindeki eğimi negatiftir. Bu nedenle akış merkezden kenarlara doğrudur.

Bu teoriye göre aktif örtü malzemeleri kaynak banyosunun yüzey geriliminin sıcaklıkla ilişkisindeki eğimini negatiften pozitifte çevirir. Bunun sonucunda kaynak banyosunun akış yönü merkezden dışarıya doğru değil aksine dışardan merkeze doğru olacak şekilde değişir. Tersine Marangoni etkisinin kaynak derinliğinin arttırması bu değişim ile izah edilmektedir.

d- Lowke, Tanaka ve Ushio Teorisi (2005); Aktif örtü malzemelerin daha yüksek elektrik izolasyonu sağlamaları neticesinde daha derin kaynak penetrasyonu sağlanabilmektedir.

Tungsten ark kaynağında uygulanan akım şiddetiyle, yüzeye sürülen aktif örtü katmanı sadece çok dar bir alanda parçalanmaktadır. Bu sayede arkın akım şiddeti aktif örtünün parçalandığı küçük bir alanda yoğunlaşmakta ve daha derin bir kaynak penetrasyonu gerçekleşmektedir.

Liu (2003), Snow (2002) Yaptıkları araştırmalar sonucunda kaynakbanyosundaki oksijen seviyesinin önemli olduğunu ve bu seviyenin (80-300 ppm) sınırlarında olması halinde ve Tersine Marangoni akışının gerçekleşebileceğini rapor etmişlerdir. Belirtilen limitlerin altında veya üstünde kalınması halinde ise $\partial\gamma/\partial T$ $\partial\gamma/\partial T$ nin negatif olması nedeniyle Tersine Marangoni akışının meydana gelmeyeceğini belirtmişlerdir. Kaynak banyosunda aktif örtü vasıtasıyla Tersine Marangoni akışı ve ark kısıntısı sağlayarak kaynak penetrasyon derinliğini maksimize edebilmek için şu hususlara dikkat edilmesi yararlı olabilir.

Ayrışmış haldeki aktif örtüden (oksit bileşiklerinin) oluşan kaynak banyosuna dahil olan oksijen miktarı da banyodaki akışın yönünü değiştiren çok önemli bir etkidir. Ark kolonunun iz düşümünde ısı yoğunluğu nedeniyle ayrıışmış bileşiklerden kaynak banyosuna transfer edilmiş olan oksijen miktarı kenarlara göre daha yüksektir. Başka bir anlatımda dy/dT ’ nin işareti pozitif olup, banyodaki Marangoni akışı kenardan merkeze doğru gerçekleşir.

Deneyssel çalışmalarımızda da $t=8$ mm. kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımının kaynağında kullanılan herhangi bir aktif örtü ile; kaynak yöntemine (A-TIG, FB-TIG) ve kaynak proses parametrelerine (kaynak akım şiddeti, kaynak hızı ve koruyucu gaz debisi) bağlı olarak farklı kaynak dikişi geometrisi (H, W, H/W) elde edildiği gözlemlenmiştir. Aktif örtü cinsi ve kaynak proses parametrelerine bağlı olarak öngörülen mekanizmaların biri veya birden fazlası kombine olarak etki ederek konvansiyonel kaynaktan daha derin penetrasyon sağlanabilmiştir. Bazı koşullarda da (uygun olmayan aktif örtü ve kaynak parametreleri nedeniyle) hiçbir mekanizma kayda değer etki yaratamadığından konvansiyonel TIG kaynağına yakın penetrasyon derinliği tespit edilmiştir.

1.8. 90/10 CuNi Alaşımının TIG Kaynağında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

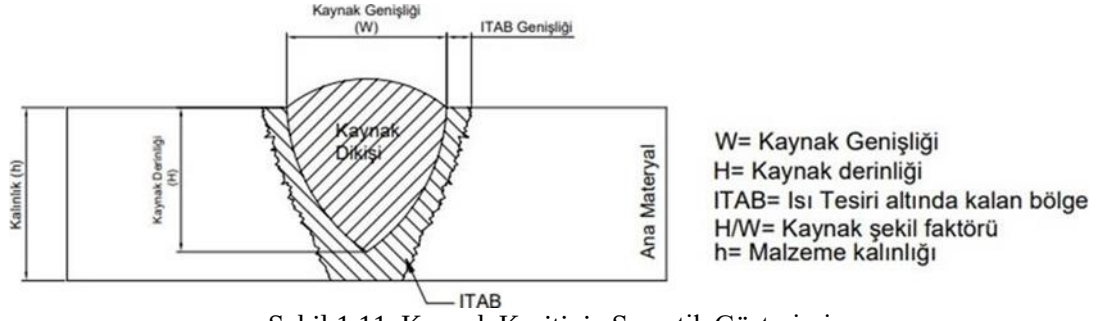
Nikel bronzu gerek haddeleme ve gerekse de döküm yöntemi ile elde edilmiş olsun TIG kaynak yöntemi ile mükemmel olarak birleştirilir. Isı girdisinin düşük olması ve metal ilavesi yoluyla kaynak kompozisyonunu kontrol edebilme avantajı nedeniyle çok yaygın kullanılan kaynak yöntemidir. 90/10 CuNi’nin TIG kaynağında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir; (German Copper Institute-DKI)

- Dolgu metali, kaynak yapılacak ana metale uygun seçilmelidir.
- Kaynağın arka yüzeyine, özellikle boruların kök kaynağını yaparken mutlaka argon gazı ile koruma yapılmalıdır.
- Koruyucu gaz olarak Argon gazı tercih edilmelidir.
- Koruyucu gazın kaynak banyosunun yüzeyini yeterince koruduğundan emin olmak için ark boyu mutlaka kısa tutulmalıdır.
- Kaynakta mutlaka doğru akım kullanılmalıdır.
- Nikel Bronzu (90/10 CuNi) kimyasal yapısında bulunan zararlı empüriteler (elementler) nedeniyle “sıcak yırtılma” ya duyarlıdır. Söz konusu zararlı elementler, Bizmut, kurşun, fosfor, selenyum, silisyum ve kükürttür (Copper Development ASSC.Inc., 2022). Sıcak yırtılma problemi yaşamamak için zararlı elementlerin kritik seviyelerinin altında olması gerekir.
- Nikel Bronzu alaşımlarının ısı iletkenlikleri düşüktür. Bu nedenle kaynak sırasında, kaynak banyosunun ısısı, ana malzemeye daha az transfer edildiğinden göreceli olarak daha rahat kaynak yapılabilir.
- 90/10 CuNi kaynağı sıcak yırtılma riski taşıdığı için kaynak esnasında ısı girdisini düşük tutmak zorunludur.
- Nikel Bronzlarında kaynak sonrasında, ana metal ile kaynak dikişi arasında renk uyumu isteniyorsa, kaynak metalinin alaşımının, ana malzeme alaşımına benzer kimyasal kompozisyonda olması gerekir.
- Nikel Bronzunun kaynağında ön ısıtmaya gerek olmayabilir. Kaynağın ısını azaltmak için çizgisel pasolar ve kısa pasolar ile kaynak yapılması tavsiye edilmektedir. Dikkat edilecek en önemli husus pasolar arasındaki sıcaklığın 100°C’ ı geçmemesi gerektiğidir.

1.9. Çalışmanın Amacı ve Orijinal Katkısı

Bu çalışmada, kaynak genişliği (W), kaynak derinliği (penetrasyon/nüfuziyet) (H) ve kaynak derinliğinin kaynak genişliğine oranı veya kaynak şekil faktörünü (H/W) optimize eden parametreleri belirlemek için 90/10 CuNi alaşım test numuneleri üzerinde TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleri uygulanmıştır (Şekil 1.11).

Aynı kaynak proses parametrelerinin uygulandığı A-TIG ve FB-TIG kaynağında güvenilir ve tekrarlanabilir kalitede ve TIG kaynağına göre daha derin penetrasyon ve daha iyi mekanik özelliklere sahip kaynak dikişi elde edilmesi bu çalışmanın başlıca amacıdır.



şekil 1.11. Kaynak Kesitinin şematik Gösterimi

Deneyisel çalışmaların birinci adımında Al_2O_3 , MgO , Cr_2O_3 tekli oksit bileşikleri ve 50% SiO_2 +50% Cr_2O_3 ikili oksit bileşikleri kullanılmıştır. Taşıyıcı sıvı olarak da aseton tercih edilmiştir. Deneyisel çalışmalarda aynı kaynak parametreleri kullanılarak konvansiyonel TIG, A-TIG ve FB-

TIG kaynak yöntemleri uygulanmıştır. Başlangıç deneylerinde Al_2O_3 ve Cr_2O_3 aktif örtülerinin diğerlerinden daha iyi penetrasyon sağladığını göstermiştir. Söz konusu aktif örtülerle yapılan doğrulama testlerinde de aynı sonuçlar alınmıştır. Doğrulama testlerinden sonra; 90/10 CuNi alaşımından imal olan $t=8$ mm kalınlığında plakayla uygulanan kaynak yöntemlerine göre elde edilen kaynak dikişlerinin genişliklerini ve penetrasyon derinlikleri mukayese edilmiştir. İlave olarak kaynak dikişlerinin dış görünüşleri genişlikleri ve mekanik özellikleri (ekme, akma mukavemetleri, mikro sertlik) ile metalürjik özellikleri (mikro ve makro yapılar ile DP ve X-Ray vs.) mukayese edilmiştir.

Daha önce 90/10 CuNi alaşımı üzerinde denenmemiş olan A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında kullanılabilecek aktif örtülerin tespit edilmiş olması da bu çalışmanın orijinal katkısıdır.

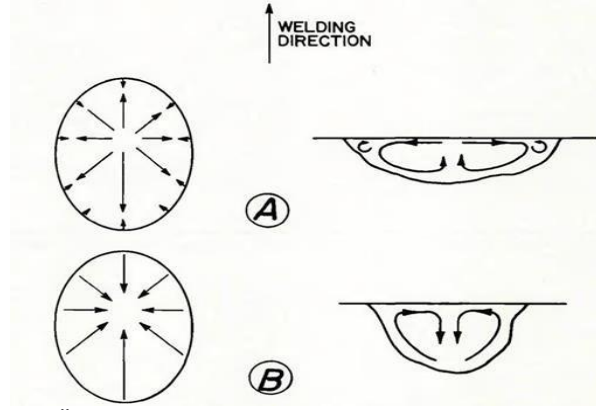
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

A-TIG ve FB-TIG yöntemleri son zamanlarda en öne çıkan konvansiyonel TIG kaynağı varyantlarından birisidir. Karbon Çeliği, Paslanmaz Çelik ve diğer demir dışı alaşımların kaynak penetrasyonunu ve kaynak dikişinin mekanik özelliklerini iyileştirmek adına A-TIG ve FB-TIG yöntemleri uygulayarak birçok çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda özellikle A-TIG ve FB-TIG kaynağında uygulanan kaynak parametrelerinin (aktif örtü ile ilgili parametrelerinin ve aktif örtünün cinsi, tekli, ikili, üçlü, çoklu karışım olması, tane büyüklüğü, uygulama kalınlığı, taşıyıcı sıvının aseton, alkol ve su olması vs.) penetrasyon derinliğine, kaynağın mekanik ve mikro yapısına olan etkisinin tespitine çalışılmıştır. Bazı araştırmacılar A-TIG ve FB-TIG kaynağında koruyucu gaz olarak saf argon yerine muhtelif karışım gazlarının kaynak morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. A-TIG veya FB-TIG uygulamaları ile A-TIG ve FB-TIG kaynağının birlikte uygulandığı deneysel çalışmalarla elde edilen belli başlı bulgular aşağıda özetlenmiştir.

2.1. TIG ve FB-TIG Kaynak Tekniği Uygulanarak Karbon Çeliği, Paslanmaz Çelik ve Diğer Alaşımlı Çelikler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

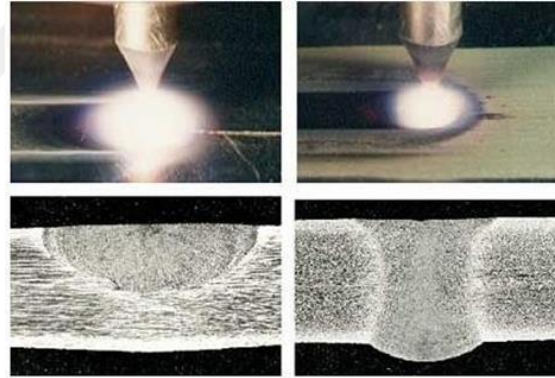
Paslanmaz çelik, karbon çeliği ve diğer alaşımlı çelikler, makine, gıda, havacılık, kimyasal proses ekipmanları (reaktörler, eşanjörler, muhtelif ekipmanlar vs.) gibi sektörlerde kolay temin edilebilmeleri, mükemmel mukavemetleri (yüksek ısı, korozyon, çekme ve akma mukavemetleri) ve kaynak edilebilmeleri nedeniyle çok yaygın kullanılmaktadır. A-TIG kaynağı ile saptanabilen yüksek penetrasyon nedeniyle çelikler üzerindeki deneysel çalışmaların %90-95' i A-TIG kaynak uygulamaları ile ilgilidir. Karbon çelik ve paslanmaz çelik gibi malzemelerin işlenmesinde kullanılan A-TIG kaynağı, yüksek penetrasyon kabiliyetiyle dikkat çekmektedir. Bu yöntem, çelikler üzerinde çeşitli deneysel çalışmaların odak noktası olmuştur. Literatürdeki çalışmalar, çeşitli bileşiklerin aktif örtü olarak kullanıldığı ve özellikle A-TIG ve FB-TIG kaynaklarının çeliklerin özelliklerine olan etkilerini incelediği deneysel çalışmaları içermektedir.

Heiple ve ark. (1982), paslanmaz çelik üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarında, saf alüminyum, Al_2O_3 ve FeS tozu kullanmışlardır. Yüksek hızlı fotoğraflar, saf alüminyumun kaynak banyosunu dışarıya doğru yönlendirdiğini, FeS'in ise merkeze doğru hareket ettiğini göstermiştir. Farklı elementlerin füzyon bölgesinin yapısını etkilediği belirlenmiş ve özellikle sülfür ilavesinin kaynak penetrasyonunu artırdığı, alüminyum ilavesinin ise derinlik/genişlik oranını düşürdüğü tespit edilmiştir. Koruyucu gaz içeriğinin, kaynak genişliği yerine kaynak derinlik/genişlik oranını etkilediği rapor edilmiştir (Şekil 2.1).



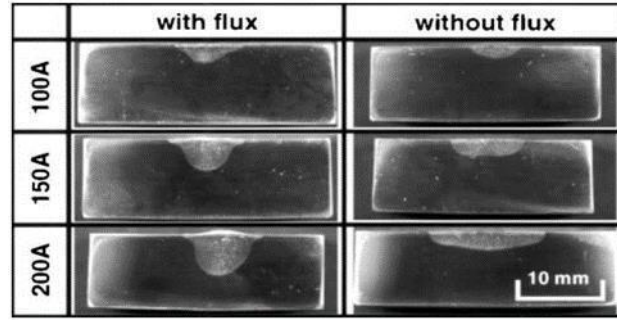
Şekil 2.1. Kaynak Havuzu Üzerinde ve Altında Gerçekleşen Sıvı Akışı. A: Pozitif Yüzey Gerilimi Sıcaklık Katsayısı; B: Negatif Yüzey Gerilimi Sıcaklığı Katsayı. Heiple ve ark. (1982)

Howse ve ark. (2000), AISI 316L paslanmaz çelik levhalar üzerinde farklı kaynak yöntemleri ve aktif örtü kullanımının etkisini incelemiştir. A-TIG kaynağında, ark kolonunun kısılmasının kaynak derinliğini artırdığı ve aktif örtünün kaynak voltajını artırdığı sonucuna varmışlardır. A-TIG uygulamaları sonucunda kaynak dikişinin kesit alanında %30 ila %80 arasında artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu artışın, voltaj artışına ve aktif örtünün banyonun soğuma hızını düşürüp prosesin etkisini arttırmasına bağlı olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. A-TIG ve Geleneksel TIG Arklarının Karakteristik Görünümleri ve 6 mm Kalınlığındaki Paslanmaz Çelikteki Karşılaştırmalı Nüfuziyet Derinlikleri (Solda: Geleneksel TIG Kaynağı, Sağda: A- TIG Kaynağı) Howse ve ark. (2000)

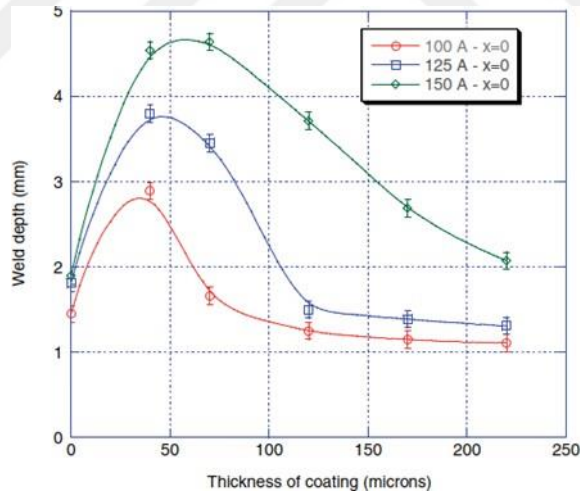
Tanaka ve ark. (2000), AISI 304 kalite paslanmaz çelik üzerinde saf TiO_2 bileşimini aseton ile karıştırarak aktif bir örtü olarak kullandıkları A-TIG kaynak yöntemini uygulamışlardır. Çalışmada W-2La $2O_3$ elektrot, saf helyum koruyucu gazı, belirli bir debi, ilerleme hızı ve ark yüksekliği kullanılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, geleneksel TIG kaynağıyla karşılaştırıldığında, A-TIG'in kaynak derinlik/genişlik (DWA) oranının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Aktif örtü kalınlığının azalmasıyla birlikte penetrasyon derinliğinde keskin bir düşüş olduğu belirlenmiştir. Aktif örtü kullanıldığında plazma halindeki metalin kaynak banyosunun merkezinde konumlandığı tespit edilmiş ve Lorenz Kuvveti ile Marangoni akışı arasındaki etkileşimlerin kaynak penetrasyonunu artırdığı görülmüştür (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Aktif Örtü Kullanıldığında ve Kullanılmadığı Durumda Kaynak Kesit Alanı Tanaka ve ark. (2000)

Liu ve Ark. (2002), A-TIG kaynağının 10 mm kalınlığındaki AISI 304 kaliteli paslanmaz çelik üzerinde uygulanmasını ele almaktadır. Araştırmacılar, TiO_2 , Cu_2O , NiO , Cr_2O_3 ve SiO_2 bileşiklerini tekli aktif örtü olarak kullanarak kaynak derinliğini arttırmışlardır. Aktif örtünün ayrışması durumunda, kaynak banyosuna dahil olan oksijenin banyonun yüzey gerilimini ve Marangoni akışının yönünü değiştirdiği belirtilmiştir. Ayrıca, kaynak penetrasyon derinliğinin oksijen miktarına bağlı olduğu ve belli bir aralıkta kaynak penetrasyonunu ciddi olarak arttırdığı ifade edilmiştir. Snow (2002), AL-6XN östenik paslanmaz çelik plakalar üzerinde A-TIG kaynağı gerçekleştirilmiştir. Aktif örtünün kompozisyonunda TiO/TiO_2 , Cr_2O_3 ve SiO_2 bileşiklerinin bulunduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, aktif örtü tozunun süspansiyon haline getirilerek kullanılmasının kaynak dikişinin mikroyapısını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Kaynak penetrasyon derinliğinin artması ve kaynak genişliğinin azalması için aktif örtü kalınlığına dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Haung ve ark. (2005), paslanmaz çelik TIG kaynağında MnO_2 - ZnO karışımını aktif örtü olarak kullanarak kaynak performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmaları, aktif örtünün kullanımının kaynak penetrasyonunu arttırdığını ve daha derin kaynak penetrasyonu ile daha dar kesitli kaynak dikişleri elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, aktif örtünün ısı girdisini arttırarak kaynak dikişinin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve çatlama riskini azalttığı gözlemlenmiştir. Vasudevan ve ark. (2005), 304 LN ve 316 LN kaliteli paslanmaz çelik malzemelerin TIG kaynağı için geliştirilen özel örtü malzemelerinin kullanımı incelenmiştir. Araştırmacılar, özel örtü malzemelerinin kullanımıyla tek pasodaki kaynak nüfuziyetinin geleneksel TIG kaynağına kıyasla %300 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Penetrasyondaki artışın, arkın genişliğinin daraltılması ve Marangoni akışının tersine dönmesiyle ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, aktif örtü malzemeleri kullanılarak yapılan A-TIG kaynağının mikroyapı ve mekanik özellikler açısından geleneksel yöntemle yapılan kaynaklardan herhangi bir olumsuzluk taşımadığı sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde, AISI 304 LN veya 316LN kaliteli paslanmaz çeliklerde dolgu teli kullanılmadan yapılan autojen kaynakların tek pasoda 12 mm kalınlığındaki saclarda tam nüfuziyet sağlayabildiği belirtilmiştir. Kullandıkları örtünün bileşiminde %30- 50 TiO_2 , %25-40 SiO_2 , %10-20 CrO_3 , %10-15 NiO ve %5-15 CuO bulunduğunu belirtmişlerdir. Li ve ark. (2007), paslanmaz çelik TIG kaynağına SiO_2 ve TiO_2 metal oksitleri gibi ilave örtü malzemelerinin etkisini incelemişlerdir. Yüksek hızlı

kamera sistemleri ve osiloskop gibi teknikler kullanarak, kaynak esnasında oluşan ark şekillerini ve voltaj değişimlerini eş zamanlı olarak gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, SiO_2 'nin ark voltajını arttırdığını, ancak TiO_2 'nin ark voltajı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, geleneksel TIG kaynağı ile SiO_2 örtülü TIG (A-TIG) kaynağı arasında yapılan karşılaştırmada, SiO_2 esaslı örtü malzemesinin arkın biçimi üzerinde belirgin bir etki yarattığı rapor edilmiştir. Shyu ve ark. (2007), AISI 304 kalite paslanmaz çelik üzerinde çeşitli bileşikler aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynağının performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, Cr_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 aktif örtülerinin kaynak derinliğini arttırdığını ancak kaynak genişliğini daralttığını, bu etkilerin CaO ile gözlemlenmediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, A-TIG kaynağının mekanik özelliklerde (mukavemet, süreklilik ve sertlik) geleneksel TIG kaynağına göre avantajlar sağladığını ve paslanmaz çelik kaynak dikişindeki delta ferrit miktarını artırarak sıcak yırtılma duyarlılığını azalttığını göstermişlerdir. Ruckert ve ark. (2007), AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac üzerinde SiO_2 bileşimini aktif örtü olarak kullanarak FB-TIG ve A-TIG kaynak yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Yapılan deneylerde, aktif örtü kalınlığının kaynak penetrasyonunu akım şiddetine bağlı olarak etkilediği ve SiO_2 bileşiğinin kaynak penetrasyonunda önemli bir artış sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, aktif örtünün kalınlığının kaynak penetrasyonunu etkileme derecesinin, Şekil 2.4' te görüldüğü gibi, uygulanan kaynak yöntemine bağlı olarak farklılık gösterdiği vurgulanmıştır.



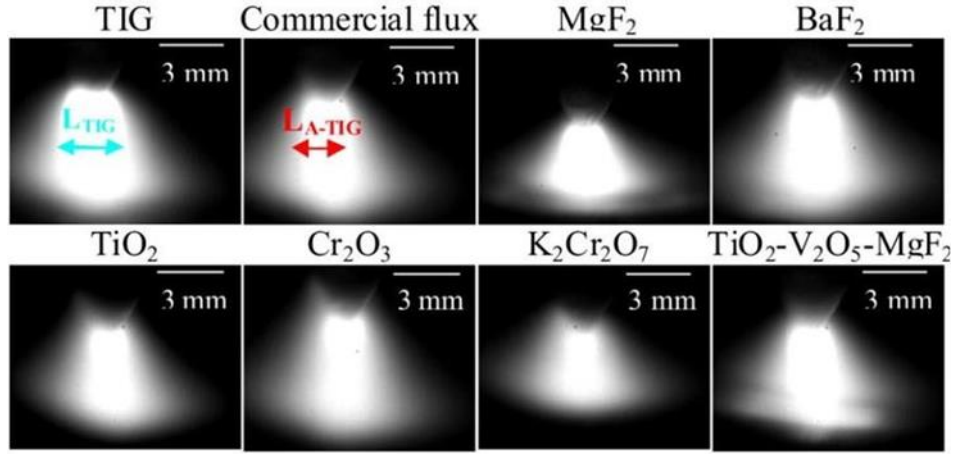
Şekil 2.4. Aktif Örtünün Kalınlığının Kaynak Penetrasyonuna Etkisi Ruckert ve ark. (2007)

Sándor ve ark. (2008) çalışmasında, farklı kalınlıklardaki AISI 304 kalite paslanmaz çelik üzerinde SiO_2 esaslı aktif örtü kullanılarak A-TIG kaynağı yapıldı. A-TIG kaynağının, geleneksel TIG kaynağına göre daha derin penetrasyon sağladığı ve penetrasyon derinliğinin kalınlıktan etkilenmediği bulundu. %30 He ilave edilmiş koruyucu gazın penetrasyon derinliğini artırdığı ancak kalınlık arttıkça etkinliğinin azaldığı gözlemlendi. Abd-Allah ve ark. (2008) çalışmasında, S235 kalite karbon çeliği üzerine tekli ve çoklu bileşiklerden aktif örtü kullanarak A-TIG kaynağı gerçekleştirildi. Cr_2O_3 'ün (D/W) oranını en fazla arttıran bileşik olduğu belirlendi. Aktif örtünün kalınlığının önemli olduğu ve bileşiklerin cinsine bağlı olarak 25 ila 40 mikron kalınlığının optimum

olduğu vurgulandı. Ayrıca, CaF_2 oranının %5'ten az olması gerektiği ve yüksek oranda kullanılmasının penetrasyonu azaltılabileceği sonucuna varıldı. Sambherao'nun (2008) çalışmasında, AISI 316 L paslanmaz çelik üzerinde TiO_2 , Al_2O_3 bileşiklerini tekli ve karışım halinde aktif örtü olarak kullandı. TiO_2 'nin penetrasyonu önemli ölçüde artırdığı görüldü ve bu etkinin ark bölgesinde TiO_2 'nin oksijen vermesiyle oluşan Tersine Marangoni etkisiyle ilişkilendirildi.

Ayrıca, TiO_2 ve Fe_2O_3 karışımının daha istikrarlı bir penetrasyon sağladığı belirlendi. Bu sonuçlar, karışımların daha uygun olduğunu öne sürdü. Kuo ve ark. (2011) çalışması, JISG 3131 kalite karbon çeliği ile SUS 316L kalite paslanmaz çeliğin kaynağında A-TIG kaynak yöntemini kullandı. SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 ve Cr_2O_3 gibi aktif örtüleri denediler. SiO_2 'nin kullanılmasıyla açılma çarpılmaların azaldığı ve kaynak dikişinin çekme mukavemetinin arttığı gözlemlendi. Ayrıca, SiO_2 kullanıldığında kaynak penetrasyonundaki en yüksek artışın elde edildiği belirlendi. Bu sonuçlar, yüksek enerji yoğunluğunun etkisiyle açıklandı. A-TIG uygulamasıyla oluşan kaynak dikişinin yüzeyinde cüruf kalıntıları tespit edildi. Ahmed ve ark. (2012), AISI 316L çelik plakalar üzerinde SiO_2 ve TiO_2 bileşiklerini kullanarak A-TIG yöntemini uygulamışlardır. Her iki aktif örtünün de penetrasyon derinliğini artırdığı ve kaynak dikişi genişliğini daralttığı gözlemlenmiştir. SiO_2 'nin TiO_2 'den daha etkili olduğu belirlenmiştir. Berthier ve ark. (2012), AISI 304L paslanmaz çeliğinde farklı bileşiklerin A-TIG kaynağı üzerindeki etkisini incelemiştir. Oksit, florür ve klorür bileşiklerinin kullanımının arkın kısıtlanmasına neden olduğu ve bunun kaynak banyosu üzerindeki etkilerini simüle ettikleri gözlemlenmiştir. Berthier ve ark. (2012) ilk çalışmasında, AISI 304L kalitesindeki paslanmaz çelik üzerinde yürütülen araştırmada, ticari formülasyonlu ($\text{TiO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{V}_2\text{O}_5 + \text{MgF}_2$ ve MgCl_2) karışımları ile tekli olarak TiO_2 , Cr_2O_3 , K_2Cr_2 ve MgF_2 bileşiklerinin kullanımıyla A-TIG kaynak tekniğinin etkisi incelenmiştir. Geliştirilen iki boyutlu simetrik model, kaynak banyosundaki akışın davranışını simüle etmiş ve aktif örtü olarak kullanılan bileşiklerin, kaynak banyosunun makrografisini etkileyerek yüzey gerilim gradyanlarını tersine çevirdiği tespit edilmiştir. Özellikle, MgF_2 'ye %25 oranında Cr_2O_3 ilave edilmesinin, diğer bileşiklere kıyasla daha güçlü bir malzeme akışına neden olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, MgF_2 içine eklenen küçük miktardaki oksit bileşiğinin bile tersine Marangoni akışı oluşturabildiği gözlemlenmiştir. (Şekil 2.5)

Nümerik sonuçlar, aktif örtünün kaynak dikişi geometrisi ile Marangoni etkisi ile kombine olan Lorenz kuvvetlerinin üzerindeki etkisini doğrulamıştır. Ancak, A-TIG kaynağında Lorenz kuvvetinin etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Berthier ve ark. (2012) ikinci çalışmasında, yine AISI 304L paslanmaz çelik üzerinde farklı bileşiklerin A-TIG kaynak tekniğindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, tekli ve formülasyonlu bileşiklerin kullanımıyla farklı aktif örtüler elde edilmiştir. Oksit, florür ve klorür bileşiklerinin aktif örtü olarak kullanılması durumunda, bu bileşiklerin kaynak ısısı ile ayrışma ve iyonize olması sonucunda iş parçası ile tungsten uç arasında oluşan arkın kısıldığı gözlemlenmiştir. Arkın kısılmasının, kaynak banyosu üzerindeki ısı yoğunluğunu artırdığı veya arkın içerisindeki sıcaklığı artırdığı rapor edilmiştir. Ayrıca, aktif örtüdeki metalik elementin iyonizasyon potansiyeli ile ark sıcaklığı arasında ilişki olduğu belirtilmiştir. A-TIG kaynağında ark kısılması ve ark sıcaklığındaki artış net olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2.5. Farklı Aktif Örtüler için TIG ve A-TIG Kaynağı Sırasında Gözlemlenen Ark Şekilleri Berthier ve ark. (2012)

Tseng ve ark. (2012) çalışmasında ise, AISI 316 L paslanmaz çelik üzerinde yapılan deneysel çalışmada, A-TIG kaynak tekniğinde SiO_2 ve TiO_2 bileşiklerinin tekli olarak kullanılması incelenmiştir. Sonuçlar, geleneksel TIG kaynağına kıyasla, A-TIG tekniğinin SiO_2 ve TiO_2 bileşiklerinin kullanımıyla kaynak derinliğini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, SiO_2 'nin enerji yoğunluğunu TiO_2 'ye kıyasla daha fazla arttırdığı belirtilmiştir. Tathgir (2013), AISI 1020, AISI 304, 316, 4340 ve Duplex 2205 çelikler üzerinde farklı bileşiklerin aktif örtü olarak etkinliğini incelemiştir. Aktif örtülerin kaynak nüfuziyetini arttırdığı gözlemlenmiştir. SiO_2 , TiO_2 , MoS_2 , CrO_3 , MoO_3 gibi bileşiklerin kaynak nüfuziyetini en fazla arttıranlar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, koruyucu gaz içerisinde az miktarda He'nin kullanımının nüfuziyeti arttırdığı görülmüştür. Ebrahimi ve ark. (2013), 316L çeliğinde kaynak derinliğini etkileyen parametrelerin optimizasyonunu Taguchi metodunu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. SiO_2 ve TiO_2 'nin kaynak derinliğini arttırdığı ve penetrasyonun artışında etkili olduğu tespit edilmiştir. A-TIG yöntemiyle elde edilen kaynakların geleneksel TIG kaynağından daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Patel ve ark. (2014) çalışması, paslanmaz çeliklerdeki kaynak tekniklerini iyileştirmek amacıyla yapılmış önemli bir araştırmadır. AISI 321 kaliteli paslanmaz çelik üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, SiO_2 ve TiO_2 gibi aktif örtü bileşiklerini kullanarak A-TIG kaynağı uygulanmıştır. Bu çalışma, kaynak penetrasyon derinliğini arttırmak için akım şiddeti ve aktif örtü cinsinin optimize edilmesini içermiştir. Yapılan deneylerde, akım şiddeti ve aktif örtü cinsinin penetrasyon derinliğini arttırmada belirleyici faktörler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, aktif örtü kullanımının sadece penetrasyon derinliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda kaynak deformasyonunu azalttığı ve kaynak dikişinin mekanik özelliklerini iyileştirdiği rapor edilmiştir. Magudeeswaran ve ark. (2014) çalışması ise UNS S32205 Duplex çeliğin TIG kaynağının nüfuziyetini arttırmak için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, iş parçası ile elektrot arasındaki mesafe, ilerleme hızı, akım şiddeti ve akım gerilimi gibi parametreler optimize edilmiştir. Taguchi yöntemiyle belirlenen optimal kaynak parametreleri uygulandığında, istenilen ferrit miktarı elde edilmiş ve makro yapıda katılama çatlakları oluşmamıştır. Vikesh ve ark.

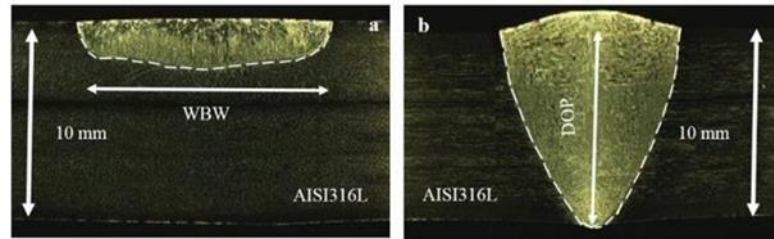
(2014) çalışması, orta karbonlu çeliklerin A-TIG kaynağında parametre optimizasyonunu ele almıştır. Kaynak akım şiddeti ve kaynak hızının nüfuziyet üzerindeki etkilerini Taguchi yöntemiyle inceleyen bu çalışma, akım şiddetinin nüfuziyeti belirleyici şekilde arttırdığını ve kaynak hızının da ikincil etkili olduğunu ortaya koymuştur. Choudhary ve ark. (2014), A-TIG kaynağındaki MnO_2 , ZnO , Fe_2O_3 ve $MgCl_2$ bileşiklerinin kullanımını incelemişlerdir. 6 mm'lik bir deneme materyali kullanan araştırmacılar, MnO_2 ve Fe_2O_3 'ün penetrasyon derinliğini arttırdığını ve kaynak genişliğini daralttığını, dolayısıyla kaynak derinlik/genişlik oranını belirgin şekilde arttırdığını bulmuşlardır. MnO_2 ve Fe_2O_3 'ün en yüksek çekme mukavemetini ve uzama yüzdesini sağladığı gözlemlenmiştir. A-TIG kaynağının mekanik özelliklerini ve morfolojisini geleneksel kaynağa göre iyileştirdiği de rapor edilmiştir. Bhawandeer ve Ark. (2015) orta karbonlu çelik üzerinde A-TIG kaynak tekniğini Cr_2O_3 , $MgCO_3$, %50 Cr_2O_3 +%50 Mg_2CO_3 , MgO , CaO ve Al_2O_3 bileşiklerini tekli veya ikili olarak kullanmışlardır. Bulguları, Cr_2O_3 'ün kaynak derinliğini artırdığını, Mg_2CO_3 'ün ise diğerlerine göre daha az penetrasyon sağladığını göstermiştir. Ayrıca, A-TIG kaynak dikişlerinin sertliğinin geleneksel kaynağa göre düşük olduğunu, ancak kaynak kalitesinin arttığını rapor etmişlerdir. Özellikle %50 Cr_2CO_3 + %50 $MgCO_3$ karışımı ile yapılan kaynakların D/W oranının diğerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Gnanasckaran ve ark. (2015), AISI 304 paslanmaz çelik üzerinde A-TIG kaynak uygulaması yapmışlardır. SiO_2 , CaF_2 ve MnO_2 bileşiklerini tekli veya ikili olarak kullanarak farklı kombinasyonlar denemişlerdir. Araştırmacılar, kaynak penetrasyonunu ve kaynak şekil faktörünü artırmak için %25 TiO_2 +75% SiO_2 karışımının etkili olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte, kaynak bölgesindeki korozyon direncinin bileşiklere bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Lagude ve ark. (2015), AISI 304L paslanmaz çelik üzerinde SiO_2 bileşimini aktif örtü olarak kullanan A-TIG kaynak tekniğini değerlendirmişlerdir. Parametre optimizasyonu için Taguchi metodunu kullanarak, kaynak parametrelerinin etkinliğini incelemişlerdir. Bulguları, ark yüksekliği, kaynak akımı, kaynak hızı ve koruyucu gaz debisinin kaynak hızı üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ortaya koymuştur. Venkatesan ve ark. (2014), AISI 409 paslanmaz çelik üzerinde A-TIG kaynak uygulaması yapmışlardır. Çalışmalarında, çeşitli aktif örtü kombinasyonlarının kullanımının kaynak derinliği ve penetrasyon üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bulguları, SiO_2 içeren karışımların penetrasyonu artırmada etkin olduğunu ve A-TIG kaynağının tekrarlanabilir şekilde kaliteyi artırabileceğini göstermiştir. Singh ve ark. (2015), 8 mm kalınlığındaki orta karbonlu çelik üzerinde çeşitli bileşiklerin aktif örtü olarak kullanıldığı A-TIG kaynak tekniğini incelemişlerdir. Aktif örtü kullanımının kaynak kalitesini artırdığını, ancak kaynak sertliğini azalttığını bulmuşlardır. Naik ve ark. (2016), 6 mm kalınlığındaki 2205 Duplex paslanmaz çelik üzerinde SiO_2 bileşimini aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynak tekniğini uygulamışlardır. Taguchi yöntemi ve L9 ortogonal matrik sistemini kullanarak kaynak parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel TIG kaynağına kıyasla %91,6 penetrasyon derinliği/genişlik oranında %63 oranında iyileşme elde etmişlerdir. Optimum kaynak parametrelerini belirlerken, 150 sn./200 mm kaynak hızı, 250 amp akım şiddeti ve 5 lt./dk koruyucu

gaz debisi kullanmışlardır. Bu parametrelerle elde edilen kaynak dikişi sertliği 98 Rockwell ve çekme mukavemeti 723 N/mm² olarak belirlenmiştir. Dhindsa ve ark. (2016), 8 mm kalınlığındaki SA516 grade 70 karbon çeliği üzerinde SiO₂ ve TiO₂ bileşiklerini aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynak yöntemini uygulamışlardır. Taguchi metodu ve L9 ortogonal matrisi ile proses parametrelerini optimize etmişlerdir. En uygun kaynak parametrelerinin 180 A akım şiddeti, 11 Litre/dk koruyucu gaz akış debisi ve SiO₂ aktif örtü olduğunu bulmuşlardır. TiO₂ ile %228, SiO₂ ile ise %91,6 oranında penetrasyon derinliği/genişlik oranı artışı elde etmişlerdir. Aynı araştırmacılar (2015), 6 mm kalınlığındaki P91 çeliği üzerinde farklı tek bileşenli aktif örtüler kullanarak A-TIG kaynak yöntemini incelemişlerdir. Fe₂O₃, ZnO, MnO₂ ve CrO₃ kullanıldığında tam nüfuziyet sağlanabildiğini, diğer örtülerin penetrasyon derinliğini farklı şekillerde etkilediğini rapor etmişlerdir. Cai ve ark. (2016), 5 mm kalınlığındaki BS700 MC Süper çelik üzerinde B₂O₃ ve Cr₂O₃ bileşiklerini aktif örtü olarak kullanarak A-TIG tekniğini uygulamışlardır. Boron oksidin kaynak penetrasyonunu artırdığını, bu durumun ısı girdisini azaltarak iğnemsiz ferrit oluşumunu teşvik ettiğini belirtmişlerdir. İğnemsiz ferritin çeliğin düşük sıcaklık dayanımını artırdığını tespit etmişlerdir. Vora ve ark. (2016), 6 mm kalınlığındaki RAFM (Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel) kaliteli alaşımlı çelik üzerinde altı farklı bileşiği kullanarak A-TIG kaynak yöntemini incelemişlerdir. Co₃O₄ ile en derin penetrasyonu elde edebildiklerini ve metanolün taşıyıcı sıvı olarak diğerlerinden daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Perumal ve ark. (2016), AISI 316L paslanmaz çelik levha üzerinde farklı bileşiklerin A-TIG kaynağındaki etkilerini araştırmışlardır. %75 SiO₂+%25 TiO₂ karışımının kullanıldığı durumda penetrasyon artışının %187 olduğunu ve derinlik/genişlik oranının %208 kat arttığını tespit etmişlerdir. Tekli bileşiklerin kullanıldığı durumlarda da ciddi artışlar gözlemlenmiştir. TiO₂'nin penetrasyonu arttırmadığını, ancak MnO₂'nin derinlik/genişlik oranını arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca, kaynak dikişindeki mikro sertliklerin A-TIG ve TIG kaynaklarında benzer olduğunu, en yüksek sertliğin ana metalde ve en düşük sertliğin HAZ bölgesinde olduğunu rapor etmişlerdir. Tseng ve ark. (2017), AISI 316L kaliteli paslanmaz çelik üzerinde F-GTAW (A-TIG) ve F-PAW (Flux Aided Plasma Arc Welding) yöntemlerini kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Aktif örtü olarak NPUST tarafından geliştirilen bir karışımı kullanmışlardır. Bu karışımın hem geleneksel TIG kaynağının hem de geleneksel plazma ark kaynağının penetrasyon derinliğini artırdığını rapor etmişlerdir. Aktif örtü bileşiklerinin tek solvent yerine ikili karışım kullanılmasının yüzey kapama kabiliyetini artırdığını belirtmişlerdir. Seçilen formülasyonun A-TIG kaynağındaki penetrasyon derinliğini arttırdığı gibi F-PAW/Plazma ark kaynağında daha düzgün kaynak kesiti oluşturduğunu gözlemlenmiştir. Roy ve ark. (2017), AISI 316 paslanmaz çelik üzerinde farklı oranlarda karıştırılmış SiO₂ ve TiO₂ bileşiklerini aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynak tekniğini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalarda, tüm karışımların kaynak penetrasyon derinliğini artırdığını ve SiO₂'nin etkinliğinin TiO₂'ye oranla daha fazla olduğunu gözlemlenmiştir. En fazla penetrasyon derinliğini %80 SiO₂+%20 TiO₂ karışımıyla elde ettiklerini ve bu karışımın 5 mm kalınlığındaki 316 kaliteli paslanmaz çelik sac malzemede tam

penetrasyon sağladığını rapor etmişlerdir. Mudaliyar ve ark. (2018), AISI 304 paslanmaz çelik üzerinde A-TIG kaynak tekniğini, SiO_2 bileşimini aktif örtü olarak kullanarak incelemişlerdir. Taguchi deney dizaynı ve L18 ortogonal matriksi kullanarak kaynak parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Optimum koşulların, 65 mm/dak hızında kaynak, 3 Hz frekansta ark ve 180 Ampere akım şiddetinde olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları kaynağın penetrasyon derinliğini 6,78 mm, kaynak dikişi genişliğini 7,55 mm ve açılma çarpılmasını ise $1^\circ 30' 56''$ olarak tespit etmişlerdir. Ark frekansı ve akım şiddetinin artmasıyla birlikte penetrasyonun da arttığını gözlemlemişlerdir. Kulkarni ve ark. (2018), P91 kalite alaşımlı çelik üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, TiO_2 , Cr_2O_3 , CuO ve MoO_3 bileşiklerini aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynak tekniğinin etkisini incelemişlerdir. Bulguları, tüm aktif örtülerin geleneksel TIG kaynağına göre kaynak penetrasyonunu artırdığını ve TiO_2 'nin penetrasyonu 2,5 kat artırarak D/W oranını 0,95'e yükselttiğini göstermektedir. Ayrıca, banyodaki oksijen seviyesinin kaynak penetrasyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve en az 30-80 ppm oksijen içermesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, düşük oksijen seviyelerinin derin penetrasyon elde etmeyi engellediğini vurgulamışlardır. Mikro yapı analizi, kaynak dikişinde temperlenmemiş martensit, delta ferrit ve oksit inklüzyonlarını göstermiştir. Hddhibi ve ark. (2018), AISI 316L paslanmaz çelik üzerinde yaptıkları çalışmada, TiO_2 , SiO_2 , MnO_2 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , ZrO_2 ve CaO gibi sekiz farklı bileşiği aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynağının performansını değerlendirmişlerdir. Bulguları, TiO_2 , SiO_2 ve MnO_2 'nin derin penetrasyonu artırdığını göstermektedir. SiO_2 'nin kullanılmasının dikiş dışında çekme dayanımı ve sertlik açısından geleneksel TIG kaynağından daha iyi sonuçlar verdiği belirtilirken, diğer bileşiklerin ani şoklara karşı dayanımının düşük olduğu rapor edilmiştir. Shariya ve ark. (2018), 15CDV6 çelik plakalar üzerinde yaptıkları çalışmada, TiO_2 , SiO_2 , Cr_2O_3 , ZnO ve NiO bileşiklerini tekli olarak kullanarak FB-TIG kaynağının performansını incelemişlerdir. Bulguları, TiO_2 'nin maksimum kaynak derinliğini artırdığını, ancak Cr_2O_3 'nin daha sık penetrasyon sağladığını göstermektedir. FB-TIG kaynağında full penetrasyon ve maksimum (D/W) elde etmek için aktif örtü uygulanmış bölgeler arasındaki mesafenin 3 mm olması gerektiğini belirtmişlerdir. Jadhav ve ark.

(2018), AISI 316L paslanmaz çelik üzerinde SiO_2 , ZnO ve %50 SiO_2+ZnO bileşiklerini aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynağını değerlendirmişlerdir. Optimizasyon için Taguchi L9 ortogonal matrisini kullanan ekip, maksimum penetrasyon için akım şiddeti, gaz debisi ve aktif örtünün optimum kombinasyonunu belirlemiştir. Ayrıca, ANNOVA analiziyle akım şiddeti, aktif örtü ve gazdebisinin etkinlik sıralamasını belirlemişlerdir. Sonuçlar, farklı aktif örtü kombinasyonlarının kaynakparametrelerini ve sonuçlarını belirlemedeki önemini vurgulamaktadır. Albijan ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, DSS 2205 kalitesindeki paslanmaz çelik üzerinde A-TIG kaynağı yöntemi kullanılarak çeşitli oksit bileşiklerinin aktif örtü olarak kullanımı incelenmiştir. Çalışma, başlangıçta 6 mm. kalınlığındaki malzemelerde on iki farklı bileşiğin etkisi üzerinde odaklanmıştır. Ardından, üç farklı ikili bileşimin (Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , $\text{ZnO}+\text{Mn}_2\text{O}_3$ ve %92 V_2O_5 +%8 Mn_2O_3) kaynaklarda kullanılmasıyla devam edilmiştir. Bu bileşenlerin A-TIG

kaynaklarında full penetrasyon sağlandığı gözlemlenmiştir. Özellikle, (%89 Fe_2O_3 +%11 Cr_2O_3 ve %59 ZnO +%41 Mn_2O_3) karışımlarının kullanımıyla penetrasyonun arttığı, kaynak dikişinin sertliğinin ana metale yakın olduğu tespit edilmiştir. Saha ve ark. (2020) tarafından yürütülen çalışmada, AISI 306L paslanmaz çelik üzerinde A- TIG kaynağı incelenmiştir. Bu çalışmada, TiO_2 , SiO_2 ve Cr_2O_3 bileşikleri tek başına aktif örtü olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, farklı bileşiklerin kaynak penetrasyonu ve derinliği üzerinde farklı etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle Cr_2O_3 'ün kaynak penetrasyonu üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, A-TIG kaynağında kırılğan bir cüruf tabakası olduğu gözlemlenmiş ve Cr_2O_3 'ün cüruf oluşumunu enaza indirgediği belirtilmiştir. Moghaddam ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, AISI316L paslanmaz çelik üzerinde SiO_2 bileşiği kullanılarak A-TIG kaynağının optimizasyonunu ele almıştır. Taguchi metodolojisi kullanılarak yapılan çalışmada, kaynak parametrelerinin (kaynak akımı gibi) kaynak derinliği ve genişliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sekil 2.6'da görüldüğü üzere bu çalışma, kaynak akımının penetrasyon derinliği üzerindeki en büyük etkiye sahip olduğunu ve kaynak genişliğini de önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Moghaddam ve ark. (2020) tarafından yürütüldüğü çalışma, aktif örtülü TIG kaynağı prosesinin optimizasyonu ve modellemesi üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada da yine AISI 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Deney sonuçları, kaynak akımının penetrasyonu ve genişliği üzerindeki belirleyici etkisini doğrulamıştır. Ayrıca, Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçların deneysel olarak doğrulandığı belirtilmiştir.

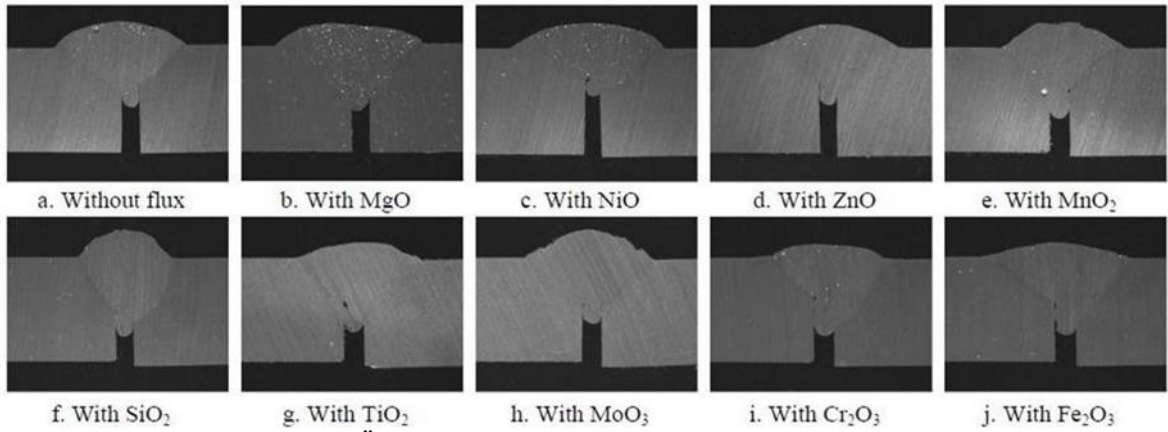


Şekil 2.6. Aynı Kaynak Koşulu Altında (a) TIG ve (b) A-TIG Kaynaklarının Kesitlerinin Karşılaştırılması (10X) Moghaddam ve ark. (2020)

Dobránszky ve ark. (2007) ise 2205 tip Duplex çeliği üzerinde SiO_2 bileşiğini aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynak tekniğini incelemiştir. Bu çalışma, A-TIG kaynağının geleneksel TIG kaynağına göre daha düşük ısı girdisi ile sonuçlandığını, bu da ısıdan etkilenen bölgelerin daralmasına neden olduğunu belirtmektedir. Ayrıca, A-TIG kaynağının parçalar arasında boşluk bırakarak kaynak yapabilme özelliği ve daha düşük ısı girdisinin mikro yapıyı iyileştirdiği görülmüştür. Ancak, mikro yapıdaki ince dendritik yapının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği ve bu durumun SiO_2 örtüsüne TiO_2 ilavesiyle giderilebileceği belirtilmiştir. Karışım gaz kullanılarak yapılan A-TIG kaynaklarının geleneksel TIG kaynağına göre daha düşük delta ferrit oranına sahip olduğu tespit edilmiştir.

2.2. TIG ve FB-TIG Kaynak Tekniği Uygulanarak Alüminyum, Magnezyum, Nikel ve Diğer Demir Dışı Alaşımlar Üzerinde Yapılan Çalışmalar

A-TIG ve FB-TIG kaynak tekniklerinin uygulanmasıyla alüminyum, magnezyum, nikel gibi demir dışı alaşımların kaynağı oldukça zorlu bir süreçtir ve büyük bir dikkat gerektirir. Bu zorlukları aşmak için önceki çalışmalarda çeşitli deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Liu ve ark. (2006), 5 mm kalınlığındaki AZ31B magnezyum alaşımı üzerinde $CdCl_2$ bileşimini aktif örtü olarak kullanarak A-TIG kaynak yöntemini uygulamışlardır. $CdCl_2$ 'nin kullanılmasının, geleneksel TIG kaynağına göre kaynak derinliği (D) ve kaynak şekil faktörü (D/W) üzerinde olumlu etkileri olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kaynak ilerleme hızının azalmasının ve ark yüksekliğinin artmasının akım gerilimini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Zhao ve ark. (2011), 5083 alüminyum alaşımı üzerinde FB-TIG kaynak yöntemi kullanmışlardır. SiO_2 , TiO_2 , CaF_2 , MgO ve $NaCl$ bileşiklerini tek başına aktif örtü olarak uygulamışlardır. Beş farklı aktif örtünün penetrasyon derinliğini arttırdığını, özellikle SiO_2 'nin kaynak derinliğini önemli ölçüde arttırdığını bulmuşlardır. Aktif örtü uygulanan bölgeler arasındaki mesafenin 4,0 mm olarak seçilmesinin H/W oranını 0,59'a kadar artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, FB-TIG tekniğindeki ark kasılması ve kaynak banyosundaki tersine Marangoni etkisinin nüfuziyeti arttıran önemli mekanizmalar olduğunu rapor etmişlerdir. Li ve ark. (2012), 6 mm kalınlığındaki AZ31 kalitesindeki magnezyum alaşımı üzerinde TiO_2 ve CaF_2 aktif örtü bileşiklerini tek başına ve çeşitli oranlarda karıştırarak uygulamışlardır. %70 TiO_2 +%30 CaF_2 karışımının H/W'yi %118 ve çekme dayanımını (UTS) %89 arttırabildiği gözlemlenmiştir. Lin ve diğerleri (2012), Inconel 718 alaşımı üzerinde tek başına SiO_2 , TiO_2 , NiO , MoO_3 , Cr_2O_3 , MnO_2 , ZnO ve MoS_2 bileşiklerini A-TIG kaynak yöntemiyle test etmişlerdir, bu bileşiklerin farklı kaynak penetrasyon derinlikleri ile kaynak genişliğine oranı (H/W) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. En etkili altı aktif örtü belirlendikten sonra, bunları %50 oranında karıştırarak dört farklı ikili hibrit karışım elde etmişlerdir. İkili karışımlar arasında, %50 SiO_2 +%50 MoO_3 karışımının en iyi kaynak performansını sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, aynı kaynak parametreleriyle FB-TIG yönteminin 6,35 mm kalınlığında tam penetrasyon sağlayabildiği gözlemlenmiştir. Hsuan-Liang Lin ve ark. (2012), Şekil 2.7'de görüleceği üzere 6,35 mm kalınlığındaki Inconel 718 alaşımı üzerinde çeşitli bileşikleri (SiO_2 , TiO_2 , NiO , MoO_3 , Cr_2O_3 , MnO_2 , ZnO , MoS_2) A-TIG kaynak yöntemiyle incelemişlerdir. Deneylerinin amacı, farklı aktif örtülerin kaynak penetrasyon derinliği ile kaynak genişliğine oranı üzerindeki etkilerini araştırmaktır. En etkin altı aktif örtü seçilmiş ve bunlarla %50 oranında karışım yapılarak dört farklı ikili hibrit karışım elde edilmiştir. Araştırmacılar, en iyi kaynak performansını %50 SiO_2 +%50 MoO_3 karışımıyla elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Ayrıca, aynı kaynak parametreleri altında FB-TIG yöntemi kullanıldığında 6,35 mm kalınlığında tam nüfuziyet sağlanabildiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.7. Tek Bileşenli Aktif Örtüler ile Gerçekleştirilen A-TIG Kaynağı Kesitleri Hsuan-Liang Lin ve ark. (2012)

Kumar S.A. ve ark. (2015), Incoloy 800 H alaşımı üzerinde üç farklı aktif örtü (SiO_2 , ZnO , %50 ZnO +%50 SiO_2) kullanmışlardır. Aynı proses parametreleri altında, SiO_2 'nin kaynak derinliğini belirgin olarak arttırdığını ancak ZnO 'nun olumsuz etkilediğini raporlamışlardır. SiO_2 'nin kullanımının tane sınırlarında hassasiyete neden olduğunu, %50 ZnO +%50 SiO_2 karışımının ise istenmeyen dendritik yapı oluşturduğunu belirtmişlerdir. Ramkumar ve ark. (2015), 5 mm kalınlığındaki Inconel 718 alaşımlı sac üzerine SiO_2 ve TiO_2 aktif örtüler kullanarak A-TIG yöntemiyle çalışmışlardır. 140 Ampere kadar olan akım şiddetlerinde tam nüfuziyet elde ettiklerini belirtmişlerdir. Her iki aktif örtünün kullanıldığı kaynak dikişlerindeki ortalama sertlik değerlerinin ana metalin sertliğinden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Babu A.V.S. ve ark. (2016), 7 mm kalınlığındaki AA2219 T87 alüminyum üzerine SiO_2 bileşiğini aktif bir örtü olarak kullandıkları FB-TIG kaynak yöntemini incelemişlerdir. Deneylerinin sonuçları, FB-TIG kaynak uygulamasının penetrasyonu artırdığını ve SiO_2 bileşiğinin uygun bir aktif örtü olduğunu göstermektedir. Ayrıca, alternatif akımın tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Araştırmacılar, SiO_2 partiküllerinin 0,6-2,5 mikron çapında olması ve aktif örtü uygulanan bölgeler arasındaki mesafenin 4 mm olması gerektiğini önermişlerdir. FB-TIG kaynağını konvansiyonel TIG kaynağı ile karşılaştırdıklarında, akma gerilimi ve stres korozyonu ile çatlama direncinin FB-TIG kaynağında daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Jaykrishnan ve ark. (2017), ticari Saf Alüminyum üzerinde TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , SiO_2 bileşiğinin aktif örtü kullanılarak FB-TIG kaynak yöntemini incelemişlerdir. Bu çalışmada, aktif örtü tane büyüklüğünün ve aktif örtü uygulanmış bölgelerin birbirine olan uzaklıklarının H/W üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mikro yapı analizleriyle kaynak banyosu ve bitişik bölgelerdeki tane yapısındaki değişimler de incelenmiştir. Aktif örtünün tane büyüklüğü azaldıkça kaynak derinliğinde artış olduğu ve aktif örtü uygulanmış bölgeler arasındaki mesafenin azaldıkça H/W oranının yükseldiği bulunmuştur. Ayrıca, aktif örtü uygulanmış bölgeler arasındaki mesafenin 4-5 mm olduğunda H' ın geleneksel kaynak yöntemine kıyasla en az 5 kat arttığı ve ince taneli aktif örtü kullanıldığında kaynak derinliğinin %303 oranında arttığı tespit edilmiştir. Yükler, A.İ. ve ark. (2019), demir dışı metallerin A-TIG kaynak özelliklerini araştırmışlardır. Öncelikle, örtü

malzemesinin kaynak nüfuziyetini ve kullanılan örtü malzemelerinin kimyasal özellikleri ile uygulama kalınlığının etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, A-TIG kaynağının geleneksel TIG kaynağına göre daha derin kaynak nüfuziyeti sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca, kullanılan örtü malzemesinin kimyasal analizinin kaynak derinliği ile kaynak genişliği arasındaki ilişki üzerinde doğrudan etkisi olduğu belirlenmiştir. A-TIG kaynak dikişinin yüzeyinin daha pürüzlü olduğu ve optimal aktif örtü malzemesi kalınlığının yaklaşık 12 mg/cm² olduğu önerilmiştir. Aktif örtü tozlarının asetonun en uygun süspansiyonu olduğu belirtilmiştir. Neelima P. ve ark. (2021) çalışmalarında, Inconel 600 alaşımı üzerinde 6 mm kalınlığında yapılan deneysel çalışmaları, FB-TIG kaynağını kullanmışlardır. Bu çalışmada, SiO₂ bileşiği aktif örtü olarak tercih edilmiş ve aktif örtülü bölgeler arasında 2,5 mm boşluk bırakılmıştır. Geleneksel TIG kaynağında maksimum 1,6 mm penetrasyon derinliği elde edilirken, aynı parametrelerin FB-TIG kaynağında kullanılmasıyla derinliğin üç kat arttığı (5,3 mm) rapor edilmiştir. Ancak, her iki yöntemle yapılan kaynak dikişlerinin benzer olduğu gözlemlenmiştir. Diğer araştırmacılar da farklı aktif örtülerin kullanımının kaynak performansını arttırdığını ve mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir. Bu çalışmalar, ileri kaynak tekniklerinin ve aktif örtülerin dikkatle seçilmesi ve optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Araştırmacılar, farklı aktif örtü bileşiklerinin ve uygulama yöntemlerinin malzeme ve proses özelliklerine uygun şekilde seçilmesiyle daha derin penetrasyon, daha iyi mekanik özellikler ve daha verimli kaynak sonuçları elde edilebileceğini belirtmektedirler.

2.3. A-TIG ve FB-TIG Kaynak Tekniği Uygulanarak Bakır ve Bakır Alaşımları Üzerindeki Yapılan Çalışmalar

Yüksek termal ve elektrik iletkenliği ve eşsiz korozyon direnci nedeniyle ısı eşanjörlerinde, yarı iletkenlerde, güç üreten ekipmanlarda vb. yaygın olarak kullanılan en önemli malzeme Bakır ve Bakır alaşımlarıdır. Ancak yüksek termal ve elektrik iletkenliğinin neden olduğu hızlı ısı transferi, kaynak bölgesindeki kaynak sıcaklığını yetersiz kılar bu yüzden bakır ve bakır alaşımlarının TIG kaynağı kalifiye ustalık gerektirir. Genellikle kaynak bölgesini 500-600 °C'a kadar ısıtmak gerekebilir. Bakır ve alaşımlar ile ilgili A-TIG ve FB-TIG kaynak tekniği uygulamalarıyla ilgili sınırlı sayıda deneysel çalışmalar rapor edilmiştir. Salates D. S. ve ark. (2007) çalışmasında, %95-98 oranında saf bakır içeren bobinlerin kaynağında A-TIG yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, araştırmacılar tarafından geliştirilen ve patenti alınan hibrit aktif örtü kullanılmıştır. Bu örtü, SiO₂, TiO₂, Cr₂O₃ ve bir halojen bileşiği içermektedir. Yapılan deneyler sonucunda, 220 Amper, 9-11 volt ve 7,5-9,0 cm/dk. hızda herhangi bir ilave tel kullanmaksızın (otojen) tam nüfuziyet sağlanabildiği belirlenmiştir. Harikrishna R. ve ark. (2020) deneysel çalışmasında, oksijensiz bakır şeritler kullanılarak farklı bileşiklerin aktif örtü olarak etkisi incelenmiştir. MoO₃, MgO, SiO₂ ve CaF₂ bileşiklerinin A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde en yüksek derinlik/genişlik oranını sağladığı belirlenmiştir. FZ-TIG (Flux Zoned-TIG) kaynak uygulamasında, merkezi kaplama için MoO₃ veya MgO, dış bölgeler için TiO₂, Fe₂O₃ ve Al₂O₃ bileşiklerinin kullanıldığı rapor edilmiştir. Bu

uygulamada, MoO_3 ve MgO aktif örtülerinin kullanımıyla TIG kaynağına kıyasla kaynak penetrasyonunun %353 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Busic M. ve ark. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deneysel olarak %99,9 saflıkta Elektrolitik Bakır Levha (Cu-ETP) kullanılarak %0,02 - 0,04 oksijen içeriğine sahip kompozisyon elde edilmiştir. Bu çalışmada, koruyucu gaz olarak %50-50 oranında argon-helyum karışımı tercih edilmiş ve belirli bir debide uygulanmıştır. Ayrıca, A-TIG kaynak yönteminde CaO , SiO_2 ve Na_2CO_3 bileşikleri tekli aktif örtü olarak seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, TIG kaynak yöntemi uygulandığında full penetrasyon için belirli bir ısı girdisi gerektiği, ancak SiO_2 kullanımıyla bu gereksinimin %30 daha az olduğu belirlenmiştir. SiO_2 aktif örtü kullanımının, kaynak dikişi geometrisini ve penetrasyon derinliğini olumlu yönde etkilediği, eğme testlerinden başarıyla geçtiği ve kaynak dikişinin çekme geriliminin istenen seviyede olduğu gözlemlenmiştir. CaO bileşiğinin uygun kaynak parametreleri seçilmesi durumunda aktif örtü olarak kullanılabileceği ancak Na_2CO_3 'ün aktif örtü olarak uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Önceki araştırmaların gözden geçirilmesiyle aşağıdaki bulgular tespit edilmiştir:

- Metal ve/veya alaşım türlerine bağlı olarak penetrasyonu artıran aktif örtü çeşitleri konusunda bir uzlaşma bulunmamaktadır. Kullanılan aktif örtülerin önemli bir kısmı metal oksitlerden oluşmaktadır. Klorür, florür ve benzeri tuzlar genellikle tek başlarına aktif örtü olarak tercih edilmemektedir. Ancak metal oksitlerin etkisini artırmak için klorürler ve florürler aktif örtü ilave edilmektedir.
- A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında aktif örtünün kaynak penetrasyonunu artıran en önemli faktörün, kaynak banyosunda oluşan ters Marangoni etkisi olduğu konusunda bir uzlaşma vardır. Ters Marangoni etkisiyle birlikte, Lorenz kuvveti, ark kuvveti, ark kasılması ve ark akım yoğunluğunun belirli bir bölgede konsantrasyonu gibi etkilerin de önemli olduğu belirtilmektedir. A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında sadece aktif örtü üzerinde değil, aktif örtütürü, tane boyutu ve uygulama kalınlığının penetrasyon artışı için oldukça önemli faktörler olduğu vurgulanmıştır.
- Saf bakır, alüminyum ve diğer bazı demir dışı metallerin ve/veya alaşımların A-TIG ve FB-TIG kaynaklarıyla ilgili literatür bulunmaktadır. Ancak, bu tez kapsamında yer alan 90/10 CuNi alaşımı ile ilgili A-TIG ve FB-TIG kaynaklarına dair çok fazla araştırmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı üzerinde yapılan deneyler, A-TIG ve FB-TIG verilerini geleneksel TIG kaynağı verileriyle karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

3. MALZEME VE METOT

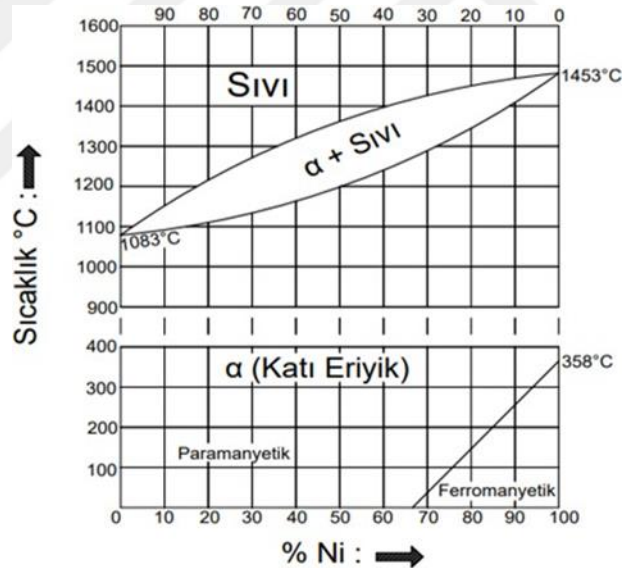
Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan ana ve yardımcı malzemelere ait bilgiler ve uygulanan test yöntemleriyle ilgili detaylar açıklanmıştır.

3.1. Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan ana, malzeme dolgu malzemesi ve aktif örtülerle ilgili teknik spesifikasyonlara alt bölümlerde detaylı olarak izah edilmiştir.

3.1.1. Kaynak Edilecek Malzeme Cinsi

Nikel, bakır içerisinde tamamen çözülebildiği için Bakır-Nikel alaşımları tek fazlıdır. Alfa fazındaki kristaller yüzey merkezli (FCC) formdadır. Alaşımın geniş bir katılma sıcaklık aralığı olduğundan taneler dendiriktir. Dendritik tanelerin kimyasal kompozisyonunda merkezden kenarlara doğru Nikel konsantrasyonu azalarak değişkenlik arz eder. Bakır-Nikel alaşımının ikili faz diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Cu- Ni İkili Faz Diyagramı (Copper- Nickel Alloys/ German Copper Institute (DKI))

Deney numunelerinin hazırlanmasında ithal orijinli 90/10 CuNi alaşımından üretilmiş 8 mm kalınlığında sac levha kullanılmıştır. Sac plakalar uluslararası standartlara göre (ASTM/UNS 70600 kalite) Hindistan’da imal edilmiştir. Kullanılan malzemenin kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de mekanik özellikleri de Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

90/10 CuNi alaşımında bakır (Cu) ve Nikel (Ni), Demir (Fe) ve Mangan (Mn) önemli alaşım elementleridir. Buna karşılık Kükürt (S), Fosfor (P), Kurşun (Pb) ve Çinko (Zn) varlığı istenmeyen elementlerdir.

Çizelge 3.1. 90/10 CuNi Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu (Copper- Nickel Welding and Fabrication (2013))

Malzeme	Ni	Fe	Mn	Zn	Pb	S	P	Kalan
90/10 CuNi	9,0-11,0	1,0-1,8	1,0-max	0,5-max	0,02-max	0,02-max	0,02-max	Bakır (>86,5)

Çizelge 3.2. 90/10 CuNi Alaşımının Mekanik Özellikleri (Copper- Nickel Welding and Fabrication (2013))

Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	zama(%)	Sertlik (Brinell)	Yoğunluk	Elastisite Modülü	Kesme Modülü	Poisson Oranı
345 - 485 MPa	105 - 210 MPa	%30 - %40	70 - 110 HB	8.89 g/cm ³	138 GPa	51 GPa	0.34

3.1.2. Aktif Örtü Malzeme Cinsleri

Araştırmacıların 90/10 CuNi alaşımı dışındaki farklı alaşımlar üzerinde uyguladıkları A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında kullandıkları aktif örtü bileşikleri ve literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak, deneysel çalışmalar için 9 farklı kimyasal bileşik (TiO₂, MnO₂, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, CuO ve Cr₂O₃) seçilmiştir. Çizelge 1.2’de gösterildiği üzere, bu bileşikler tekli veya ikili karışımlar halinde hazırlanmış, toplamda 28 farklı aktif örtü elde edilmiştir ve bu örtüler, Çizelge 3.4’te belirtildiği şekilde özel kodlarla kodlandırılmıştır. Bileşikler, orijinal ambalajlarında bir kimya firmasından temin edilmiştir.

90/10 CuNi alaşımı için en uygun aktif örtü veya örtülerin belirlenmesi amacıyla eliminasyon yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, seçilen 9 farklı bileşik karbon çeliği üzerinde test edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha iyi H ve H/W oranı sağlayan bileşikler seçilmiştir. Başarılı sonuçlar elde edilen bu bileşikler, sırasıyla 5,0 mm kalınlığında paslanmaz çelik ve 90/10 CuNi alaşımı üzerinde de denenmiştir. Sonuç olarak, 8 mm kalınlığında CuNi alaşımı üzerinde yapılacak A-TIG ve FB-TIG uygulamaları için deneysel çalışmalarda Al₂O₃, MgO, Cr₂O₃ ve %50 SiO₂ + %50 Cr₂O₃ bileşiklerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda aktif örtü olarak kullanılmak üzere temin edilmiş çeşitli bileşikler ve süspansiyon sıvıları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan çeşitli bileşikler ve süspansiyon sıvıları

Test numunelerinin markalanmasında, grafik veya çizelgelerde aktif örtü bileşiklerinin tam formülleri yerine kısa kodlar kullanılmıştır. Bu kodlamada, "Betimlenmiş Oksit Malzeme" BOM olarak adlandırılmıştır. Örneğin, TiO_2 için BOM1, Cr_2O_3 için ise BOM9 kısaltmaları kullanılmıştır.

3.1.3. Kaynakta Kullanılan Dolgu Teli Malzemesi

90/10 CuNi alaşımının kaynağında sıcak yırtılma riski bulunduğundan, dolgu telinde Ni oranı ana malzemeye kıyasla biraz daha yüksek tutulmuştur. Ayrıca, P, S, Zn, Pb gibi zararlı elementlerin kimyasal kompozisyonda bulunmamasına özen gösterilmiştir. BS C16 standardına göre üretilen ve deneysel çalışmalarda kullanılan örtüsüz TIG kaynağı dolgu telinin kimyasal analizi Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. 90/10 CuNi Kaynak Telinin Kimyasal Kompozisyonu

Dolgu Teli Tipi	BS	Ana Alaşım Elemanlarının Ağırlık Oranları (%)						
		Cu	Ni	Mn	Fe	Si Max.	Ti	Al max.
90/10 CuNi Çıplak Kaynak Teli	C 16	88-85	10.0-12.0	0.5-1.0	1.5-1.8	0.1	0.20-0.50	0.03

3.2. Metot

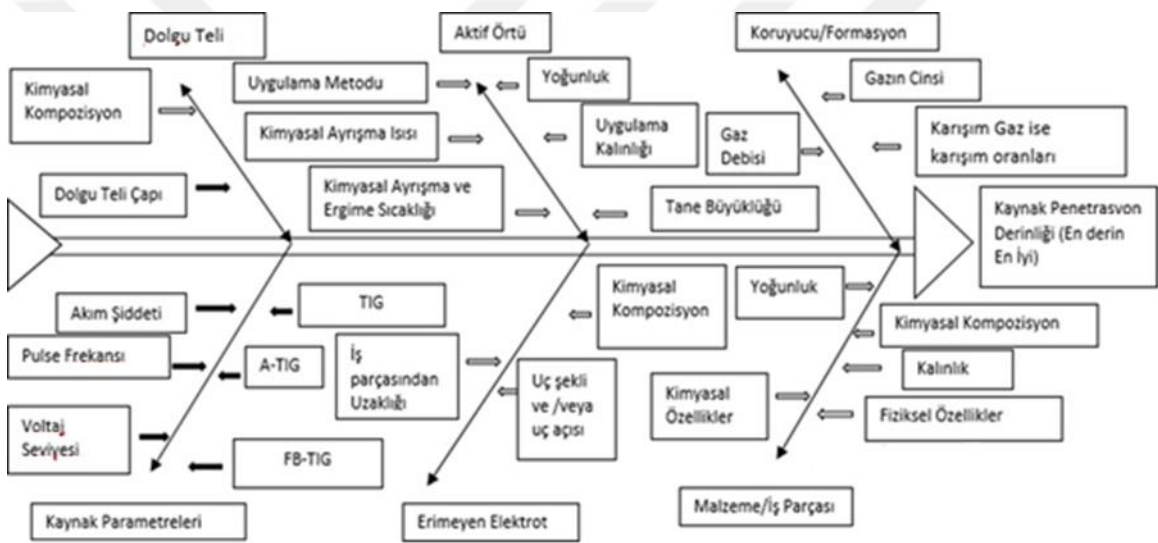
Bu çalışmada, 90/10 CuNi alaşımı için en uygun aktif örtü bileşiğinin belirlenmesi amacıyla, konvansiyonel TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleri altında uygulanan kaynak parametrelerinin oluşturduğu kaynak dikiş verileri (yükseklik [H], genişlik [W], H/W oranı) karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, 8 mm kalınlığındaki S235JR kalite karbon çelik, 5 mm kalınlığındaki AISI 304 kalite paslanmaz çelik, 5 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı ve 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çizelge 1.2'te belirtilen

22 bileşikten 9 adeti tercih edilmiş olup, bu oksitler tekli veya ikili karışımlar halinde aktif örtü olarak kullanılmıştır.

Test parçaları, haddeleme yönü dikkate alınarak ana plakadan 8x60x100 mm boyutlarında kesilmiştir. Kaynak deneylerinde kullanılacak numunelerin kesimi, su jeti (Water jet /Germany) tezgahı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, kesim sırasında malzemenin analizinde ve tane yapısında oluşabilecek ısıl değişimlerin önlenmesi amacıyla tercih edilmiştir.

3.2.1. Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak işleminde uygulanacak parametrelerin ve bu parametrelere etki eden değişkenler aşağıdaki Şekil 3.3'teki Balık Kılçığı diyagramında işlenmiştir. Deneydeki sabit ve değişken parametrelerin testinde bu diyagramdan yararlanılmıştır.



Şekil 3.3. A-TIG ve FB-TIG Kaynağında Kaynak Prosesinin Sonucunu Etkileyen Faktörler Balık Kılçığı Diyagramı

A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde, kaynak sonucunu etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler, dolgu teli, aktif örtü, koruyucu gaz ve malzeme/iş parçası gibi ana başlıklar altında incelenebilir.

Dolgu Teli kategorisinde, dolgu telinin kimyasal kompozisyonu, kullanılan doğru tel çapı, akım şiddeti, pulse frekansı ve voltaj seviyesi gibi unsurlar ön plana çıkar. Dolgu telinin kimyasal kompozisyonu, kaynak dikişinin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Doğru tel çapı, kaynak bölgesine iletilen malzeme miktarını ve dolayısıyla dikişin şeklini ve penetrasyon derinliğini belirler. Akım şiddeti, kaynak sırasında kullanılan ısı girdisini belirlerken, pulse frekansı ısı dağılımını ve kaynak dikişinin homojenliğini etkiler. Voltaj seviyesi ise arkın uzunluğunu kontrol ederek kaynak dikişinin şekli ve penetrasyon derinliği üzerinde etkili olur.

Aktif Örtü ile ilgili olarak, uygulama metodu, örtünün kalınlığı, kimyasal kompozisyonu ve erime sıcaklığı önemli faktörlerdir. Aktif örtünün nasıl uygulandığı, kaynak sırasında oluşan ısı ve kimyasal reaksiyonları etkileyerek penetrasyon derinliğini belirler. Örtünün kalınlığı, yüzey geriliminde değişikliklere neden olarak, kaynak banyosundaki metalin akışını etkiler. Ayrıca, aktif örtünün kimyasal kompozisyonu, kaynak banyosunda oluşan reaksiyonları ve dolayısıyla kaynak dikişinin özelliklerini şekillendirir. Erime sıcaklığı ise örtünün metal üzerinde ne kadar süre aktif kalacağını belirler.

Koruyucu Gaz kategorisinde, gazın cinsi, gazın karışım oranları, gaz debisi ve bu faktörlerin kaynak dikişindeki tane büyüklüğü üzerindeki etkileri ele alınır. Kullanılan gaz türü, kaynak atmosferini koruyarak dikişin mikroyapısını belirler. Eğer bir gaz karışımı kullanılıyorsa, karışım oranları gazın etkisini şekillendirir. Gaz debisi, kaynak bölgesinde gazın dağılımını ve koruma sağlayıp sağlamadığını etkiler. Bu faktörler, kaynak dikişinde meydana gelen tane büyüklüğünü ve homojenliğini de etkileyebilir.

Malzeme/İş Parçası kategorisi altında, malzemenin kimyasal kompozisyonu, fiziksel özellikleri ve kalınlığı ele alınır. İş parçasının kimyasal kompozisyonu, kaynak sırasında meydana gelen reaksiyonları ve dikişin dayanımını belirler. Malzemenin fiziksel özellikleri, kaynak işlemi sırasında ne kadar ısıya ihtiyaç duyulacağını etkilerken, malzemenin kalınlığı ise ısı dağılımı ve dolayısıyla kaynak penetrasyonunu ve dikiş kalitesini belirler.

Balık Kılçığı diyagramında "En derin penetrasyon-En iyi" hedefine ulaşmak amacıyla yürütülen çalışmada, sonucu en çok etkileyen faktörler olarak aktif örtü cinsi, akım şiddeti, koruyucu gaz debisi ve kaynak ilerleme hızı belirlenmiş ve bu faktörler değişken olarak ele alınmıştır. Diğer tüm kaynak parametrelerinin sabit kaldığı varsayımı altında, bu dört değişkenin etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Tanımlanan sabit ve değişken parametreler, Çizelge 3.4'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu parametreler, yalnızca 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı için değil, aynı zamanda TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerine de tutarlı bir şekilde uygulanmıştır. Deneylerin güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini sağlamak adına, her bir deney üçer defa aynı koşullar altında tekrarlanmıştır. Bu yaklaşımla, değişken parametrelerin kaynak penetrasyonu ve genel kaynak kalitesi üzerindeki etkileri daha net bir şekilde gözlemlenmiş ve değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.4. TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynağında Sabit ve Değişken Faktörler

Parametreler	Durumu	Açıklama / Değer
Test Malzemesi	Sabit	Ni -Bronzu 90/10 CuNi / ASTM UNS 70600
Sac Kalınlığı	Sabit	8 mm
Birleştirme Şekli	Sabit	Alın-Alına birleştirme
Elektrot Teli	Sabit	2 mm %2 Thoriated Tungsten
Örtü Gazı	Sabit	Ticari Saf Argon
Kaynak Pozisyonu	Sabit	Aşağıya doğru ve torç düşey eksen ile 30° açılı
Ark Mesafesi	Sabit	3 mm
Kaynak Yöntemi	Değişken	Geleneksel TIG, A-TIG ve FB-TIG
Akım Cinsi	Sabit	Sabit Direk Akım
Koruyucu Gaz Debisi	Değişken	14, 16, 18 Lt/dk
Akım Şiddeti	Değişken	250, 265, 280 Amp
Kaynak Hızı	Değişken	150, 180, 210 mm/dk
Aktif Örtü	Değişken	BOM4 (Al ₂ O ₃) BOM7 (MgO) BOM9 (Cr ₂ O ₃) BOM23 (SiO ₂ +Cr ₂ O ₃)
Dolgu Teli Çapı	Sabit	Ø2,4 mm
Dolgu Teli Malz.	Sabit	BS C16 90/10 CuNi çıplak elektrot
Kök Boşluğu	Sabit	2 mm
Elektrot yükseliği	Sabit	5 mm
Dolgu Telinin Yatay ile açısı	Sabit	20 °
Kaynak Torçunun Dikey ile açısı	Sabit	30°

3.2.2. Deney Öncesi Hazırlık Prosedürü

A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde kullanılacak aktif örtü solüsyonlarının hazırlanması ve test numunelerinin kaynak öncesi hazırlık süreçleri, aşağıda adım adım tarif edilen şekillerle detaylandırılmıştır.



Şekil 3.4. Ticari Olarak Satın Alınan Muhtelif Metal Oksit Bileşikleri

Şekil 3.5(a), ticari olarak temin edilen bileşiklerin manuel olarak inceltilme sürecini göstermektedir. Bu işlemde, ortalama 40 mikron tane büyüklüğüne ulaşılması hedeflenmiştir. Şekil 3.5(b) ise inceltirilmiş aktif örtünün tane boyutlarının sınıflandırılmasında kullanılan eleği göstermektedir.



Şekil 3.5. Bileşiklerin (a) Havanla İnceltilmesi ve (b) Elekle Boyutlanması

Elekten geçirilmiş bileşiklerin %5 hassasiyete sahip dijital terazi ile tartılması, Şekil 3.6 a ve b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Hassas Terazide Tartım Yapılması

Ölçekli beher kabına konulan uçucu sıvı ve aktif örtü bileşiği, Şekil 3.7a'da gösterildiği gibi, başlangıçta elle karıştırılmıştır. Kaynak bölgesine uygulanacak aktif örtü süspansiyonunda bulunan uçucu sıvı (metanol, etanol vb.) buharlaştıktan sonra, taneciklerin dökülmesini önlemek ve yüzeye sıkıca yapışmasını sağlamak amacıyla, Şekil 3.7b'de gösterildiği üzere, beherdeki karışıma %2-3 oranında Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) eklenmiştir.

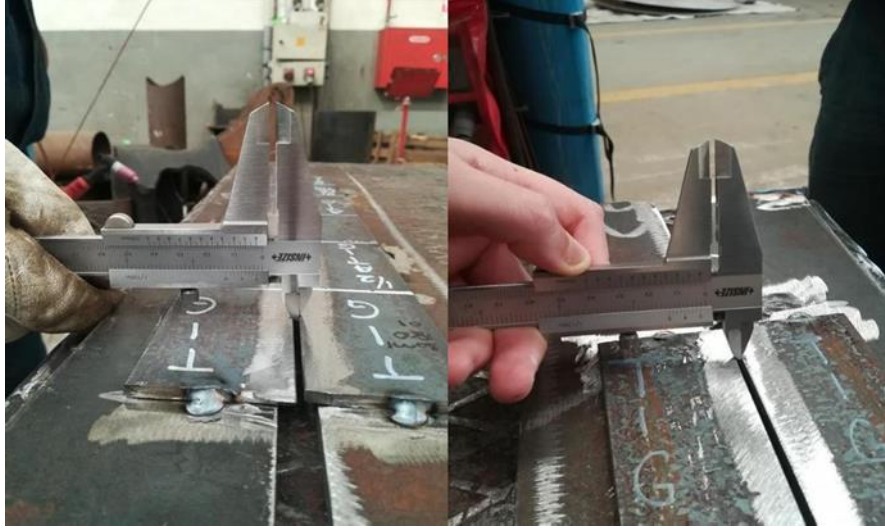


Şekil 3.7. Süspansiyonun (a) elle karıştırılması ve (b) Sodyum Silikat İlavesi

Aktif örtü süspansiyonunun homojen bir karışım oluşturabilmesi amacıyla, Şekil 3.8'de sunulan manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Süspansiyon, manyetik karıştırıcı ile en az 10 dakika boyunca karıştırılmış ve ardından kullanıma hazır hale getirilmiştir. Bu işlem, her bir aktif örtü için belirtilen prosedürler doğrultusunda aynı sırayla tekrarlanmıştır.



Şekil 3.8. Süspansiyon Homojenizasyonu için Kullanılan Manyetik Karıştırıcı Hazırlanan aktif örtü süspansiyonu, Şekil 3.9'da gösterildiği üzere kaynak bölgesine uygulanmıştır.



Şekil 3.9. Aktif Örtü Uygulaması

Kaynak işlemine başlamadan önce, kaynaklanacak parçalar özenle hazırlanmıştır. Bu hazırlık aşamasında, parçalar istenilen boyutlarda kesilmiş ve kaynak yapılacak yüzeylerde oksit, çapak ve cüruf gibi istenmeyen kalıntıların bulunmaması sağlanmıştır. Bu amaçla, yüzey temizliği için paslanmaz çelik fırça ve zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Bu temizleme işlemi, kaynak kalitesini artırmak ve malzeme bütünlüğünü korumak adına büyük önem taşımaktadır. Şekil 3.10'da, kaynak işlemine hazır hale getirilmiş ve üzerine aktif örtü uygulanmış olan bir A-TIG kaynak test parçası gösterilmektedir. Parçalar arasındaki mesafenin hassas bir şekilde ayarlanması, kaynak işleminde kritik bir adım olup, bu ölçüm Şekil 3.9'da detaylı olarak gösterilmektedir. Kaynak sırasında doğru mesafenin sağlanması, düzgün ve homojen bir kaynak dikişi elde etmek için gereklidir. Şekil 3.10'da, kaynak uygulamasının başladığı bir test numunesi yer almaktadır. Bu numune, uygulanan tekniklerin etkinliğini değerlendirmek ve kaynak dikişinin kalitesini incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Kaynak işlemi sırasında, uygulama koşulları dikkatle izlenmiş ve test numunesinin özellikleri titizlikle değerlendirilmiştir.



Şekil 3.10. Kaynağı Yapılmakta Olan Test Parçası

Deney prosedürüne uygun olarak hazırlanmış deney numuneleri, kaynak işlemi sırasında olası hareketlerin engellenmesi amacıyla kaynak tablasına sabitlenmiştir. Kaynak öncesinde, numunelerin yüzeyleri uygun şekilde temizlenmiş ve işlem için hazır hale getirilmiştir. Temizlik işlemlerinin ardından, aktif örtü sıvısı bir fırça yardımıyla dikkatlice kaynak dikişinin üzerine veya kaynak bölgesinin yan taraflarına uygulanmıştır. Aktif örtünün yüzeyde eşit bir şekilde yayılmasını ve optimal etkisini gösterebilmesi için kuruması beklenmiştir. Aktif örtü tamamen kuruduktan sonra, deneyde kullanılacak TIG kaynak makinesi, önceden belirlenmiş kaynak parametrelerine göre ayarlanarak kaynak işlemine başlanmıştır. Kaynak işlemi sırasında, test numunesinin arka yüzeyine sürekli olarak koruyucu bir formasyon gazı verilmiş, bu sayede kaynak sırasında meydana gelebilecek oksidasyonun önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Bu adımlar, kaynak işleminin güvenliği ve kalitesini artırmak, elde edilen sonuçların doğruluğunu sağlamak için titizlikle uygulanmıştır.

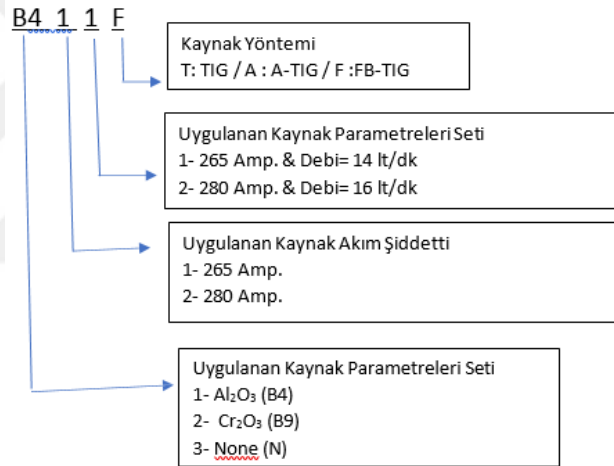
Testlerden elde edilen kaynak dikişine ait W, H ve H/W değerlerine ek olarak, ilgili tahribatlı ve tahribatsız deneyler gerçekleştirilmiş ve mekanik özellikler de detaylı bir şekilde kaydedilmiştir. Bu sayede, aktif örtü kullanımının penetrasyon artışı üzerindeki etkisinin, mekanik özelliklerde de benzer bir artış sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Testlerden Sonra Yapılan Kesitlerden Alınan Ölçülerin Kayıt Tablosu

Kaynak Proses Girdileri						Kaynak Proses Çıktıları							
Deney No	Amper Değeri	Aktif Örtü Cinsi	Gaz Debisi (lt/dk)	Kaynak Hızı (mm)	Kök Boşluğu (mm)	(W) Genişlik (mm)	(H) Yükseklik (mm)	H/W (Şekil Oranı)	Q (Isı Girdisi) K.Cal.	Çekme /Gerilim (Kg/mm²)	Kaynak Sertliği (HRC)	ITAB Bölgesi Genişliği (mm)	
1													
2													
.													
.													
21													

3.2.3. Deneylerde Kullanılan Kodlama Sistemi

Kaynak uygulamaları yapılan plakaların karışmaması için aşağıdaki kodlama sistemi uygulanmıştır.



Deneyisel çalışmalarda kullanılan test plakalarının üzerinde, tablo ve grafiklerde aktif örtü bileşiklerinin açık formüllerinin yazılması yerine, Çizelge 3.6'da belirtildiği gibi, BOM numarasının kısaltması olan "BOMX" kullanılmıştır. Örneğin, SiO₂ %50+Cr₂O₃ %50 yerine "BOM23" veya "B 23" kısa kodu tercih edilmiştir. Uygulanan kodlama sistemi, deney numunelerinin karışmasını etkili bir şekilde engellemiş ve test materyallerinin deneyler sonrasında güvenli bir şekilde arşivlenmesine olanak sağlamıştır.

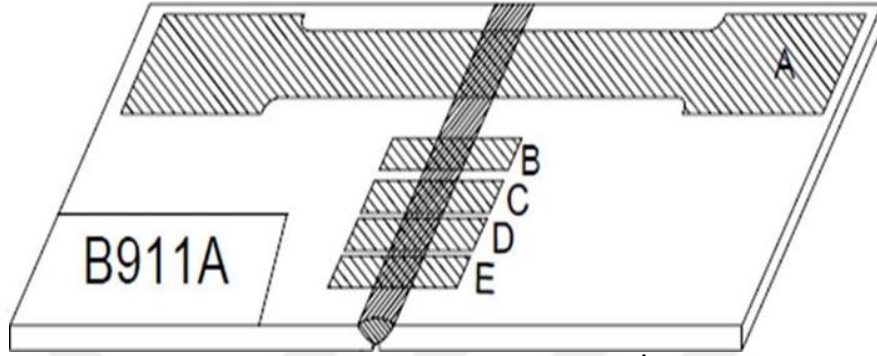
Çizelge 3.6. Deneysel Çalışmalarda Kullanılması Planlanmış olan Aktif Örtü Bileşikleri

Aktif Örtü Kodu	Aktif Örtü Formülü	Karışım Oranları
BOM-1	TiO ₂	100%
BOM-2	MnO ₂	100%
BOM-3	SiO ₂	100%
BOM-4	Al ₂ O ₃	100%
BOM-5	Fe ₂ O ₃	100%
BOM-6	CaO	100%
BOM-7	MgO	100%
BOM-8	CuO	100%
BOM-9	Cr ₂ O ₃	100%
BOM-10	TiO ₂ +MnO ₂	50%
BOM-11	TiO ₂ +SiO ₂	50%
BOM-12	TiO ₂ +Al ₂ O ₃	50%
BOM-13	TiO ₂ +Fe ₂ O ₃	50%
BOM-14	TiO ₂ +CaO	50%
BOM-15	TiO ₂ +MgO	50%
BOM-16	TiO ₂ +CuO	50%
BOM-17	TiO ₂ +Cr ₂ O ₃	50%
BOM-18	SiO ₂ +Al ₂ O ₃	50%
BOM-19	SiO ₂ +Fe ₂ O ₃	50%
BOM-20	SiO ₂ +CaO	50%
BOM-21	SiO ₂ +MgO	50%
BOM-22	SiO ₂ +CuO	50%
BOM-23	SiO ₂ +Cr ₂ O ₃	50%
BOM-24	MnO ₂ +SiO ₂	50%
BOM-25	MnO ₂ +Al ₂ O ₃	50%
BOM-26	MnO ₂ +Fe ₂ O ₃	50%
BOM-27	MnO ₂ +CaO	50%
BOM-28	MnO ₂ +CuO	50%

3.2.4. Tahribatlı ve Tahribatsız Testler için Numune Alınması

Kaynak işlemleri tamamlanan test parçaları üzerinde önce tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmış, ardından tahribatlı testler gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız muayene kapsamında radyografik inceleme ve penetrant testi (dye penetration) yapılmıştır. Bu muayene yöntemleri,

kaynaklı bölgedeki olası yüzey ve iç hataların tespit edilmesi amacıyla uygulanmıştır. Tahribatsız muayene sonucunda herhangi bir kusur bulunmayan numuneler, daha sonra tahribatlı testler için hazırlanmıştır. Tahribatlı testler, kaynaklı birleşimlerin mekanik özelliklerini ve malzeme bütünlüğünü değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla, her bir test parçasından Şekil 3.11'de gösterildiği üzere üçer adet numune kesilmiştir.



A: Çekme ve Akma Testleri için Numune (3 Adet), B: Mikroyapı İncelemesi Numunesi (3 Adet) C: Makroyapı İncelemesi Numunesi (3 Adet), D: Mikro Sertlik İncelemesi Numunesi (3 Adet)

Şekil 3.11. Tahribatlı ve Tahribatsız Testler için Numune Alınması

Şekil 3.11'de gösterildiği gibi, çekme, sertlik, makro ve mikro yapı gibi testlerin gerçekleştirilmesi amacıyla numunelerin kesimi yapılmıştır. Kaynak nüfuziyeti derinliğini ölçmek için enine kesilmiş kaynak dikişlerinin yüzeyleri, önce 1/0, 2/0 ve 4/0 numaralı zımpara kağıtlarıyla parlatılmıştır. Bu hazırlık sürecinin ardından, numuneler metalografi laboratuvarında kaynak nüfuziyeti derinliğinin belirlenmesi amacıyla incelenmiştir. Yüzey hazırlığı ve metalografik analizler, kaynak dikişinin iç yapısının detaylı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamış ve nüfuziyet derinliğinin hassas bir şekilde ölçülmesine olanak tanımıştır.

3.3. Kaynak Dikişine Uygulanan Tahribatsız Testler

Kaynak dikişinin sağlamlığını kontrol etmek için muhtelif tahribatsız testler (NDT) uygulanmıştır.

3.3.1. Kaynak Dikişinin Radyografik (GAMA-Ray) Yöntemle İncelenmesi

Kaynak işlemi uygulanmış test numunelerinin kaynak dikişlerinin kalitesini değerlendirmek amacıyla, kesilme işleminden önce radyografik inceleme yöntemi kullanılarak görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Bu radyografik testlerde, SENTINEL markasına ait 880 Delta tipi radyografik cihaz (Şekil 3.12) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, TS EN ISO 17636-1 standardına uygun şekilde yürütülmüştür. Bu standart, kaynak dikişlerinin radyografik muayenesinde izlenecek prosedürleri belirlemekte olup, kaynak dikişlerinde oluşabilecek hataların tespiti ve değerlendirilmesi için güvenilir bir yöntem sunmaktadır. Radyografik testler, kaynak dikişinin iç yapısını görsel olarak incelemeyi mümkün kılarak, olası hataların kesilmeden önce tespit edilmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 3.12. Radyografik Test Cihazı

3.3.2. Dye-penetration (DP) Testi

Dye-penetration (DP) testi, malzemelerdeki yüzey kusurlarını tespit etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu testin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için öncelikle test edilecek yüzeyin kir, pas, yağ ve benzeri yabancı maddelerden arındırılması gerekmektedir. Yüzeyin bu tür kirleticilerden tamamen temizlenmesi, test sonuçlarının doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Yüzeyin temizlenmesinin ardından, özel olarak formüle edilmiş bir penetre edici boya yüzeye uygulanır. Bu boya, yüzeydeki ince çatlaklar, gözenekler ve diğer kusurların içine nüfuz ederek bu kusurları belirgin hale getirmek için tasarlanmıştır. Penetre edici boyanın yüzeye uygulanmasından sonra belirli bir süre beklenir, bu süre zarfında boya yüzeydeki kusurların içine tam anlamıyla girebilmesi için yeterli zaman bulur. Belirlenen bekleme süresi sonunda, yüzeyde kalan fazla boya dikkatlice temizlenir. Bu aşamada yüzeyde sadece kusurların içine nüfuz eden boya kalır. Ardından, geliştirici (developer) olarak adlandırılan bir ikinci katman boya yüzeye uygulanır. Geliştirici boya, penetre edici boyanın kusurların içinden dışarı taşmasını ve bu kusurların yüzeyde belirgin hale gelmesini sağlar. Geliştirici boyanın uygulanmasının ardından, belirli bir süre beklenir. Bu süre zarfında, yüzeydeki kusurların bulunduğu bölgelerden penetre edici boyanın dışarı taşarak geliştirici boyanın üzerinde iz bırakıp bırakmadığı incelenir. Bu gözlem sonucunda, yüzeydeki çatlaklar, gözenekler, boşluklar gibi kusurlar belirlenir ve bunların yeri tespit edilir. DP testi, EN 3452-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilir. Bu standart, testin her aşamasında izlenmesi gereken prosedürleri ve kalite gerekliliklerini tanımlar. Şekil 3.13'te de görüldüğü üzere, geliştirici boya uygulandıktan sonra penetre edici boyanın dışarıya taşması, yüzeydeki kusurların varlığını ortaya çıkarır ve bu sayede malzemenin yapısal bütünlüğü hakkında önemli bilgiler elde edilir.



Şekil 3.13. Dye-penetration Uygulanmış Kaynak Bölgesinin Görseli

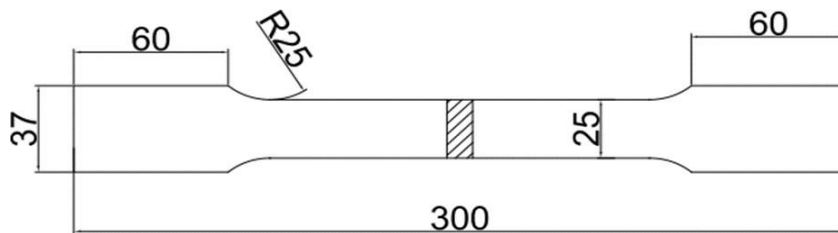
3.4. Kaynak Dikişine Uygulanan Tahribatlı Testler

Kaynak dikişinin sağlamlığını kontrol etmek için muhtelif tahribatlı testler uygulanmıştır.

3.4.1. Çekme Testi

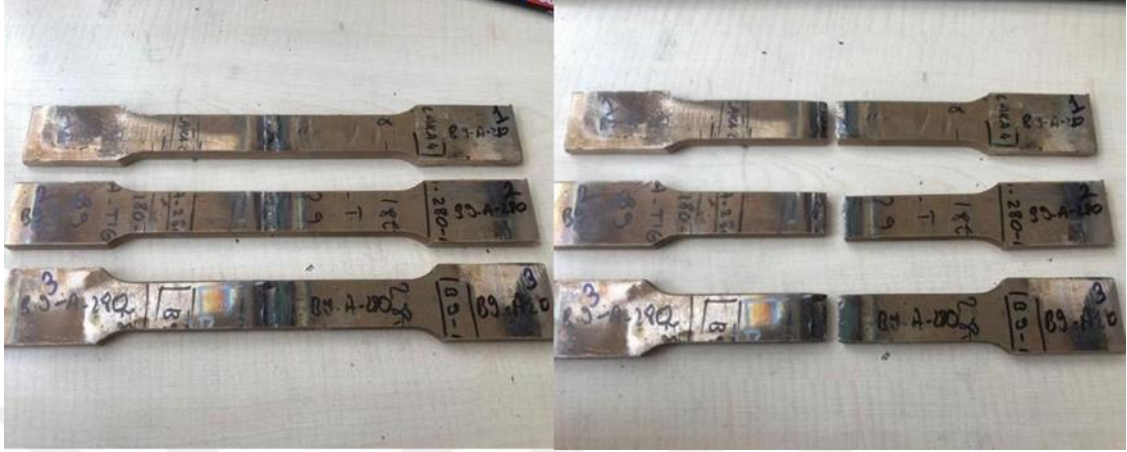
Kaynak işlemi sonrasında elde edilen numuneler, kaynak dikişine dik doğrultuda su jeti yöntemiyle kesilerek çekme testi numuneleri ve kaynak nüfuziyet derinliği ölçüm numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanması sürecinde, kesme işlemi sırasında malzemenin alevle temas etmesi, ısı etkilerinden dolayı malzemenin mikroyapısını değiştirerek test sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebileceği düşünülmüştür. Bu olumsuzlukları önlemek ve numunelerin orijinal özelliklerini korumak amacıyla, su jeti ile kesim tercih edilmiştir. Bu çalışmada, su jeti kesimi, WATERJET Germany S4020 model tezgâh kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Metalik malzemelerin mekanik özelliklerini, özellikle mukavemet parametrelerini (örneğin, akma dayanımı, çekme dayanımı, uzama yüzdesi gibi) belirlemek ve elde edilen sonuçları uluslararası standartlarla karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilen testlere tek eksenli çekme testi adı verilmektedir. Bu test, malzemenin belirli bir eksen boyunca çekilerek uygulanan kuvvet altında nasıl davrandığını ve kırılma noktasına kadar olan performansını değerlendirmek için kullanılır. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen bu tek eksenli çekme testleri, DIN EN ISO 6892-1 ve ASTM E8 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Çekme testi numuneleri, ASTM E8 standardına göre özel olarak şekillendirilmiş ve hazırlanmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Standartlara göre hazırlanmış çekme çubuğu

Kaynak sonrası hazırlanmış olan çekme çubukları, test öncesinde (Şekil 3.15a) ve çekme testinin ardından (Şekil 3.15b) görsel olarak incelenmiş ve kaydedilmiştir. Bu görseller, test öncesi ve sonrası numunelerin yapısal bütünlüğünü ve deformasyonlarını göstermek amacıyla sunulmuştur.



Şekil 3.15. (a) Çekme Testi Öncesi ve (b) Sonrası Test Çubukları

Maksimum çekme mukavemetine ulaşabilmek için, test numuneleri üzerindeki çentikler ve keskin köşeler tesviye edilerek giderilmiştir. Bu işlemler, numunelerin homojen bir şekilde yük altında kalmasını ve test sonuçlarının güvenilirliğini artırmak amacıyla yapılmıştır. Hata olasılığını minimuma indirmek ve elde edilen verilerin doğruluğunu artırmak için, her test seviyesinde en az üç adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Çekme mukavemeti testleri, kalibrasyonu düzenli olarak yapılan ve yüksek doğrulukla çalışan INSTRON marka, 100 kN kapasiteli "Bilgisayar Kontrollü Üiversal Çekme Test Makinesi" kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.16). Tüm testler, TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş, sonuçlar bu standartlara göre değerlendirilmiştir.



Şekil 3.16. Testlerde kullanılan Çekme Testi Makinesi

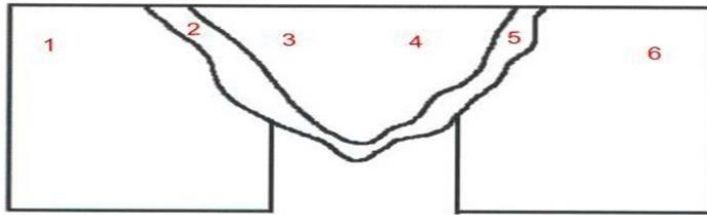
3.4.2. Kaynak Dikişı Bölgesinin Mikro Sertliklerinin Ölçülmesi

Metalik malzemelerin sertliğini ölçmek, hem aynı tür hem de farklı tür metallerin kaynak dikişlerinin yanı sıra, bu dikişlerin sağında ve solunda yer alan ısı etkisi altında kalan bölgelerin (Isıl Tesir Altında Kalan Bölge - ITAB/HAZ) karakterizasyonu için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, sertlik ölçümleri, kare tabanlı ve 136° tepe açısına sahip piramit formunda bir elmas uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanacak yük, malzemelerin türüne ve kalınlığına bağlı olarak dikkatle seçilmiştir. Sertlik ölçümleri, malzemelerin kırılmalık derecelerini ve belirli kullanım amaçlarına uygunluğunu belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu ölçümler, özellikle kaynak dikişi, ITAB bölgesi ve ana malzemenin mikro sertliklerinin belirlenmesi açısından önem taşır. Bu nedenle, enine kesilmiş kaynak dikişlerinin yüzeyleri, 1/0, 2/0 ve 4/0 numaralı zımpara kağıtları ile dikkatlice parlatılmıştır.

Mikro sertlik ölçümlerinde, TUKON marka, 1102 tip sertlik makinesi kullanılmıştır. Bu testler, TS EN ISO 9015-1, TS EN ISO 6507 ve ASTM E384 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Kaynak ölçümlerinin nasıl yapıldığını gösteren detaylar, aşağıdaki Şekil 3.18’de sunulmuştur.



Şekil 3.17. Mikro Sertlik Ölçme Cihazı



Şekil 3.18. Mikro Sertlik Ölçümlerinin Yapıldığı Bölgenin Şematik Gösterimi

3.4.3. Kaynak Dikişinin Mikro Yapısının İncelenmesi

Kaynak dikişinin mikroyapısını incelemek amacıyla hazırlanan numunelerin enine kesitleri, yüzey hazırlığı sürecinin bir parçası olarak öncelikle 1/0, 2/0 ve 4/0 numaralı zımparalarla aşamalı olarak zımparalanmıştır. Bu aşamalı zımparalama işlemi, numune yüzeyinin pürüzsüz hale getirilmesi ve mikroyapı incelemesi için gerekli olan düzgün yüzeyin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra, numuneler su ile dikkatlice yıkanarak, zımparalama sırasında oluşabilecek partiküllerin yüzeyden uzaklaştırılması sağlanmıştır. Zımparalama ve kurutma işlemleri

tamamlanan numuneler, mikroyapıların daha net bir şekilde gözlemlenebilmesi için parlatılmıştır. Parlatma işlemi, keçe üzerinde elmas partikülleri içeren bir solüsyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, numune yüzeyinin aynasal bir parlaklığa ulaşmasını sağlamak ve mikroskopik inceleme sırasında mikroyapıların detaylı bir şekilde gözlemlenebilmesine olanak tanımak amacıyla yapılmıştır. Parlatılmış numuneler, mikroyapı incelemesi öncesinde, mikro yapıların daha belirgin hale getirilmesi için dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlama işlemi, numunelerin dağlama havuzunda 40-60 saniye süreyle bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi sırasında, numuneler nital (10 ml nitrik asit + 100 ml etanol) adı verilen bir dağlayıcı solüsyona daldırılmıştır. Bu süre sonunda, numuneler su ve alkol ile dikkatlice yıkanarak dağlayıcı maddelerin yüzeyden uzaklaştırılması sağlanmış ve numuneler mikroyapı incelemesine hazır hale getirilmiştir.

Mikroyapı incelemesi, KOZO marka ve XJM404 model mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.19). İnceleme sırasında, numunelerdeki mikroyapıların gözlemlenmesi için TS EN ISO 17639 standardı uygulanmıştır. Bu standart, kaynak dikişlerinde mikroyapıların belirlenmesi ve değerlendirilmesi için gerekli olan prosedürleri ve kriterleri tanımlar.



Şekil 3.19. Metalografi Mikroskobu

3.4.4. Kaynak Dikişlerinin Makro Yapısı (Kaynak Derinliği) İncelenmesi

Kaynak kalitesi, büyük ölçüde kaynak dikişi geometrisi ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, kaynak dikişi geometrisinde en kritik parametrelerden biri, kaynak dikişinin derinliğinin genişliğine oranıdır. Kaynak dikişi geometrisi, kaynaklı bağlantının mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir faktör olarak öne çıkar. Kaynak derinliği ve genişliği gibi geometrik ölçümler, kaynak dikişinin dayanımını, esnekliğini ve genel performansını etkileyen temel unsurlardır. Bu nedenle, kaynak dikişi geometrisinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi ve optimize edilmesi, yüksek kaliteli ve güvenilir kaynak bağlantılarının elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Kaynak dikişinin penetrasyon derinliğini ve genişliğini ölçmek amacıyla, enine kesilmiş kaynak dikişi numunelerinin yüzeyleri sırasıyla 1/0, 2/0 ve 4/0 numaralı zımparalar kullanılarak zımparalanmış ve ardından yüzeyler parlatılmıştır. Bu işlemlerin ardından, kaynak boyutları mikroskop altında ölçülerek elde edilen veriler tablolara kaydedilmiştir. Bu çalışmada makro yapı incelemeleri için KOZO marka XJM404 model mikroskop kullanılmıştır.





4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Daha önce bahsedilen sebep-sonuç diyagramından anlaşılacağı üzere, hedeflenen derin kaynak penetrasyonunun ve sağlam, kaliteli bir kaynak dikişinin elde edilebilmesi için, kaynak sürecinde birçok parametrenin dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, özellikle farklı akım seviyelerinin ve çeşitli aktif örtü bileşiklerinin kaynak üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk aşamada, farklı akım şiddetlerinin kaynak morfolojisi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Kaynak işlemi, birçok karmaşık değişkenin bir arada ele alınmasını gerektiren hassas bir işlemdir. Akım şiddeti, bu değişkenlerin en önemlilerinden biridir ve kaynak morfolojisi üzerindeki etkisi, penetrasyon derinliği ve dikiş kalitesi açısından kritik bir rol oynar. Çalışmamızda, farklı akım seviyelerinin kaynak banyosu içindeki metal akışını nasıl etkilediği, bu etkinin kaynak dikişinin geometrik özelliklerine nasıl yansıdığı ve sonuç olarak elde edilen kaynak dikişinin mekanik özellikleri üzerinde nasıl bir etki bıraktığı sistematik olarak araştırılmıştır.

Bununla birlikte, aktif örtü bileşiklerinin kaynak sürecine olan katkıları da çalışmanın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Aktif örtüler, yüzey gerilimini modifiye ederek kaynak penetrasyonunu artırabilmekte ve bu da dikişin derinlik-genişlik oranını optimize etmeye olanak tanımaktadır. Çalışmada, farklı bileşiklerin aktif örtü olarak kullanıldığında kaynak banyosu ve dikiş morfolojisi üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, bu bileşiklerin kaynak kalitesine olan etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.1. 8 mm Kalınlığındaki Parçaların Kaynağında Kaynak Akım Şiddetinin Etkileri

A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde, aktif örtünün türü, tane büyüklüğü ve uygulama kalınlığı gibi parametreler, akım şiddetinin seçimi kadar kritik öneme sahiptir (Abd-Allah ve ark., 2008). Deneysel çalışmalar, belirli bir akım şiddetinde, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleriyle penetrasyon derinliğini artırabilen bir aktif örtünün, farklı akım şiddetlerinde aynı olumlu etkiyi göstermediğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, akım şiddetinin, kaynak işleminin etkinliği üzerinde ne denli belirleyici bir faktör olduğunu vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, deneyler çeşitli malzemeler üzerinde ve farklı akım şiddetleri kullanılarak A-TIG ve FB-TIG kaynak teknikleri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, akım şiddetinin kaynak dikişi geometrisi üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemeyi amaçlamıştır. Her bir deney seti, kullanılan akım şiddetinin, kaynak dikişi geometrisinin şekillenmesinde nasıl bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, aktif örtülerin etkililiğinin, yalnızca fiziksel özellikleriyle değil, aynı zamanda uygulanan akım şiddetiyle de yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

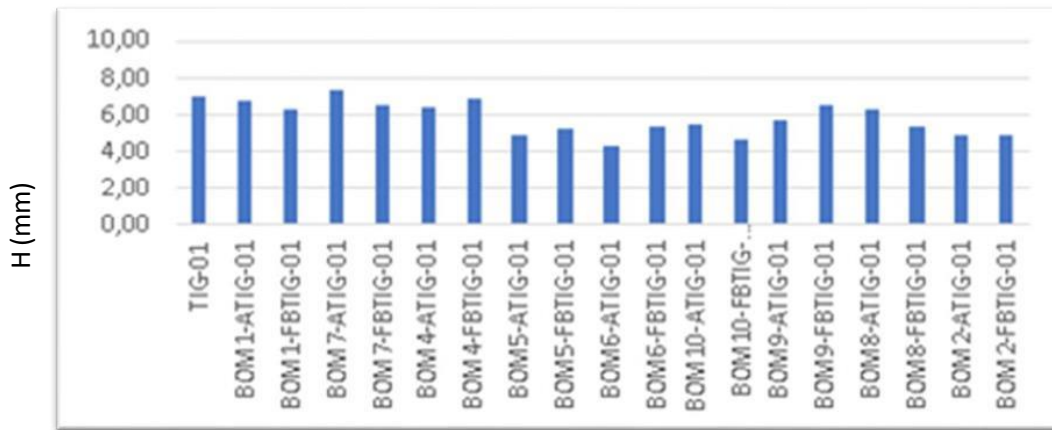
A-TIG ve FB-TIG kaynak tekniklerinin optimizasyonu için akım şiddetinin dikkatli bir şekilde ayarlanması gerektiğini ve farklı malzemeler için ideal parametrelerin titizlikle belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Her malzeme için optimum akım şiddetinin ve aktif örtü kombinasyonunun belirlenmesi, kaynak işleminin etkinliğini ve kaynak dikişinin kalitesini artırmak için hayati öneme sahiptir.

4.1.1. S235 JR Kalite Karbon Çeliğine Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri

90/10 CuNi malzemesinin yalnızca ithal edilerek temin edilebilmesi ve yüksek maliyetli bir ana malzeme olması nedeniyle, bu alaşım üzerinde deneysel çalışmalara başlamadan önce, 8 mm kalınlığındaki karbon çeliği (S235 JR) üzerinde farklı akım ve aktif örtü kombinasyonları ile TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı için optimum sonuçları vereceği öngörülen kaynak proses parametrelerini belirlemektir. Karbon çelik üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, BOM1 (TiO₂), BOM2 (MnO₂), BOM4 (Al₂O₃), BOM5 (Fe₂O₃), BOM6 (CaO), BOM7 (MnO), BOM8 (CuO), BOM9 (Cr₂O₃), BOM10 (TiO₂+MnO₂) aktif örtü bileşikleri kullanılmış ve kaynak akım şiddeti olarak 180 Amper seçilmiştir. Tüm deneylerde, kaynak hızı 160 mm/dk ve koruyucu gaz debisi (Argon) 16 lt/dk olarak sabit tutulmuştur.

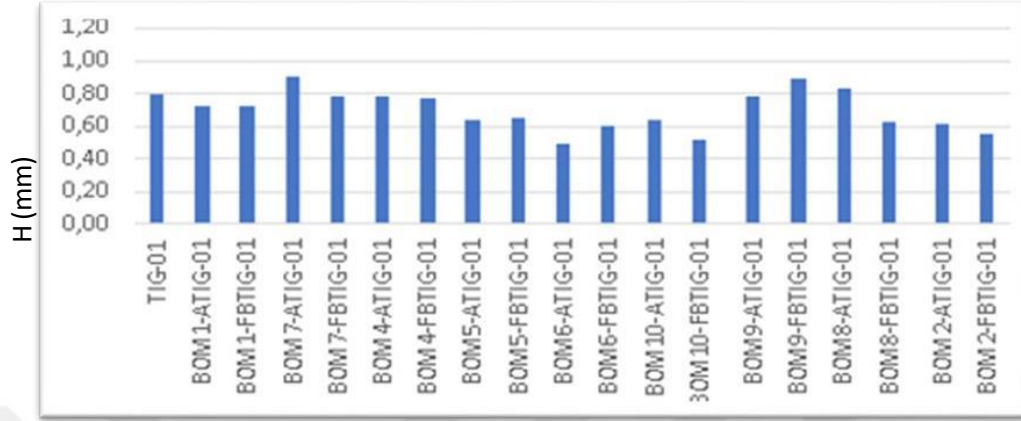
8 mm S235 JR karbon çeliği üzerinde farklı aktif örtülerin uygulanmasıyla gerçekleştirilen deneylerde, kaynak penetrasyon derinliği (H) kalite parametresi olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, geleneksel TIG kaynağı ile karşılaştırıldığında, FB-TIG yöntemi için en iyi performansın BOM4 aktif örtüsü ile elde edildiğini göstermektedir. A-TIG kaynağında ise, en yüksek penetrasyon derinlikleri BOM7 ve BOM9 aktif örtüleri kullanıldığında elde edilmiştir. Bu deneylerin sonuçlarına ilişkin penetrasyon derinlikleri, Şekil 4.1'de detaylandırılmıştır.



Şekil 4.1. 8 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri

Aynı deneylerde H/W değerleri bir kalite parametresi olarak dikkate alındığında ve bu sonuçlar geleneksel TIG kaynağıyla karşılaştırıldığında, A-TIG kaynağında BOM4 ve BOM8 aktif örtülerinin, FB-TIG kaynağında ise BOM9 aktif örtüsünün diğer aktif örtülere kıyasla daha üstün

performans gösterdiği tespit edilmiştir. Denemelerde kullanılan tüm aktif örtülerin H/W değerleri Şekil 4.2’de sunulmuştur. S235 JR kalite karbon çeliğinin kaynağında özellikle öne çıkan BOM4, BOM7, BOM8 ve BOM9 aktif örtüleri, sonraki çalışmalarda da tercih edilmiştir.

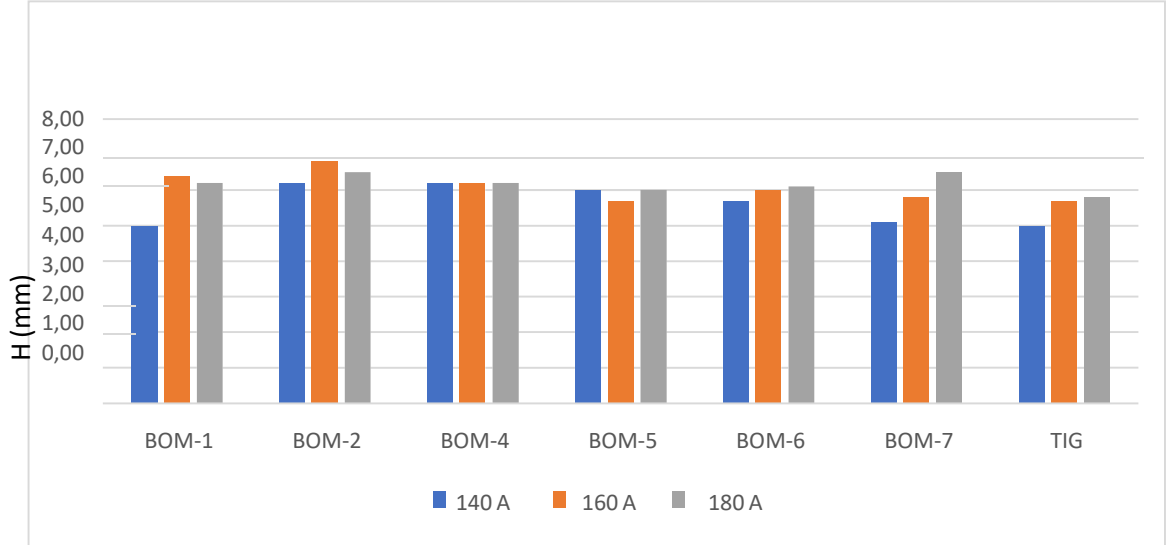


Şekil 4.2. 8 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları

4.1.2. 5 mm S235 JR Kalite Karbon Çeliğine Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri

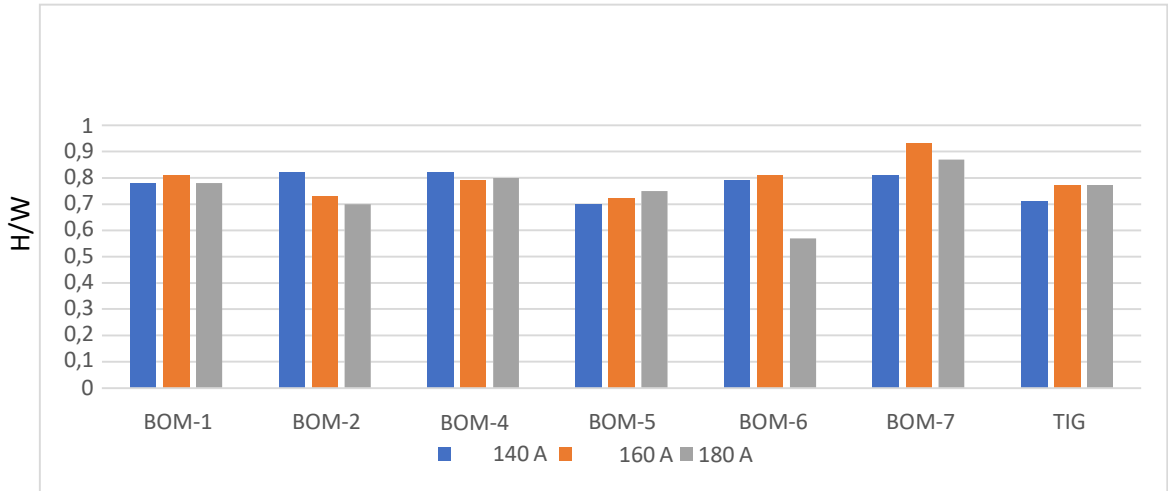
TIG kaynağında akım şiddeti, sürecin en kritik parametrelerinden biridir. Akım şiddetinin etkilerini kullanılan aktif örtü türleri ile birlikte değerlendirmek amacıyla, S235 JR kalite karbon çelik malzeme üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda BOM1, BOM2, BOM3, BOM4, BOM5, BOM6 ve BOM7 aktif örtü bileşikleri kullanılmıştır. Deneylerde, 140, 160 ve 180 Amper olmak üzere üç farklı akım şiddeti seçilmiştir. Kaynak hızı 160 mm/dk, koruyucu argon gazı debisi ise 16 lt/dk olarak sabitlenmiştir. Farklı akım şiddetleri ve aktif örtüler kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar, Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'te sunulmuştur.

5 mm S235 JR kalite karbon çeliği üzerinde farklı aktif örtülerin uygulandığı deneylerde, kaynak penetrasyon derinliği (H) ile ilgili olarak yapılan değerlendirmelerde, geleneksel TIG kaynağına kıyasla tüm aktif örtülerin daha derin bir penetrasyon sağladığı tespit edilmiştir. Bu deneylere ilişkin penetrasyon derinlikleri, Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. 5 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve A-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri

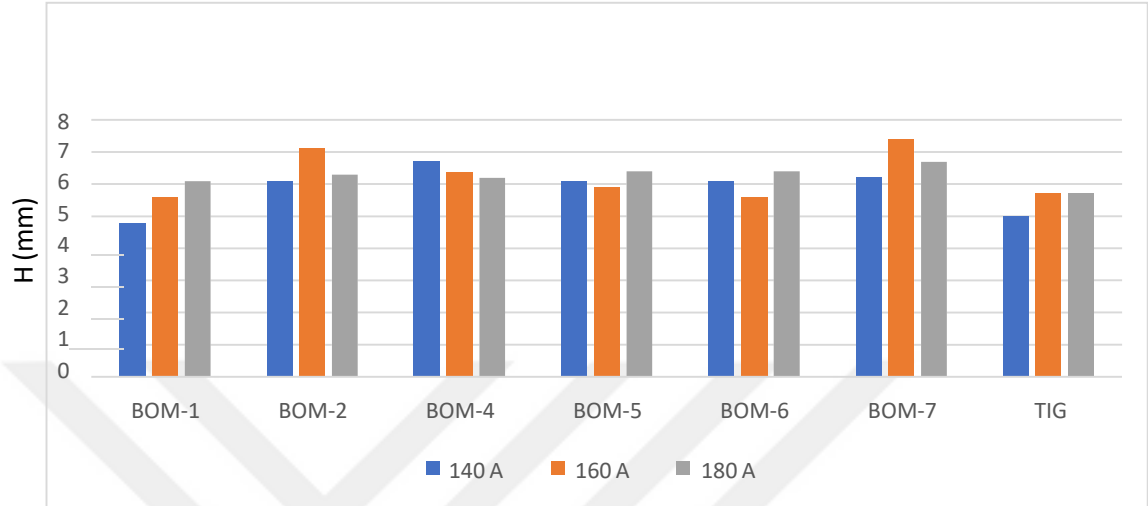
5 mm S235 JR kalite karbon çelik malzemeye farklı aktif örtülerin uygulandığı deneylerde, H/W oranı açısından kaynak dikiş geometrisi incelendiğinde, tüm aktif örtülerin kullanıldığı A-TIG kaynaklarının, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek oranlar sağladığı belirlenmiştir. 140 A akım kullanılarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağında, BOM2, BOM4 ve BOM5 aktif örtüleri en iyi sonuçları verirken, 160 A ve 180 A akım seviyelerinde yapılan A-TIG kaynaklarında ise BOM7 aktif örtüsünün diğer bileşiklere kıyasla üstün performans sergilediği Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. 5 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve A-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları

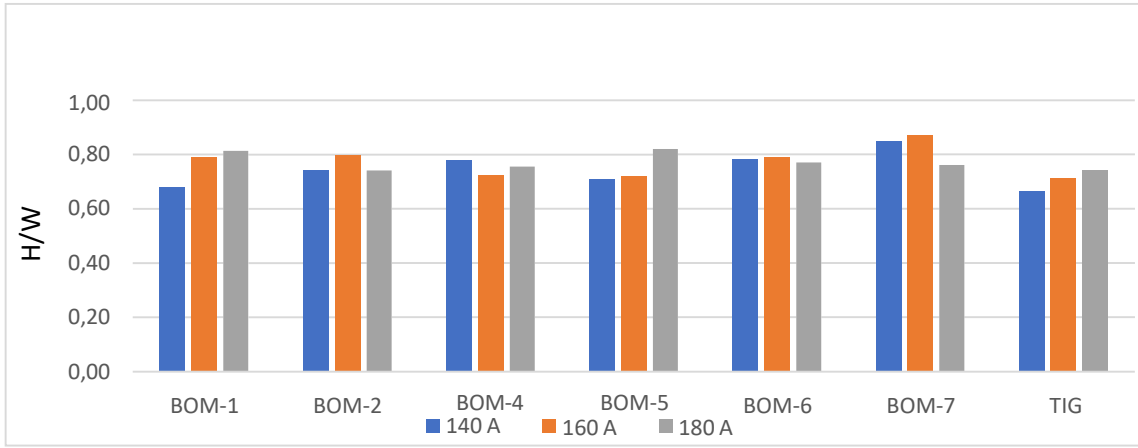
5 mm S235 JR kalite karbon çeliğinin farklı aktif örtüler kullanılarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynak işlemlerinde elde edilen kaynak penetrasyon derinlikleri (H), geleneksel TIG kaynağı ile karşılaştırıldığında, 140 A akım şiddetinde BOM4'ün en iyi performansı sergilediği, BOM1 haricindeki tüm aktif örtülerin ise geleneksel TIG kaynağından daha derin penetrasyon sağladığı

tespit edilmiştir. 160 A akım şiddetinde ise sırasıyla BOM7 ve BOM2'nin daha iyi sonuçlar verdiği, 180 A akım şiddetinde ise BOM5, BOM6 ve BOM7'nin üstün penetrasyon sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, 180 A akım şiddetinde kullanılan tüm aktif örtülerin, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha derin penetrasyon elde ettiği belirlenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. 5 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri

Yapılan deneylerde, H/W oranı kalite parametresi olarak dikkate alındığında, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, uygulanan tüm kaynak akım şiddeti seviyelerinde FB-TIG yönteminde kullanılan aktif örtülerin, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek H/W oranları sağladığı tespit edilmiştir. 140 A akım seviyesinde, BOM7, BOM6 ve BOM5 aktif örtülerinin diğerlerine göre daha üstün sonuçlar verdiği; 160 A akım seviyesinde ise BOM7, BOM1, BOM6 ve BOM2 aktif örtülerinin daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. 180 A akım seviyesinde gerçekleştirilen deneylerde ise BOM1 ve BOM5 aktif örtülerinin diğerlerine nazaran daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. H ve H/W oranları göz önünde bulundurulduğunda, aktif örtülerin TIG kaynağına kıyasla daha derin bir penetrasyon sağladığı ve artan akım şiddetinin penetrasyon derinliğini olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

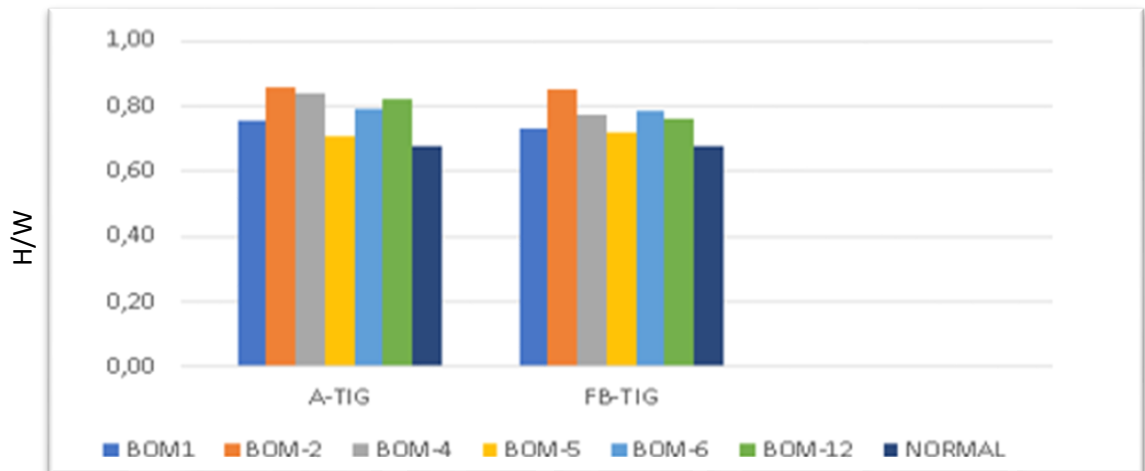


Şekil 4.6. 5 mm S235 JR Karbon Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları

4.1.3. 5 mm AISI 304 Kalite Paslanmaz Çeliğine Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri

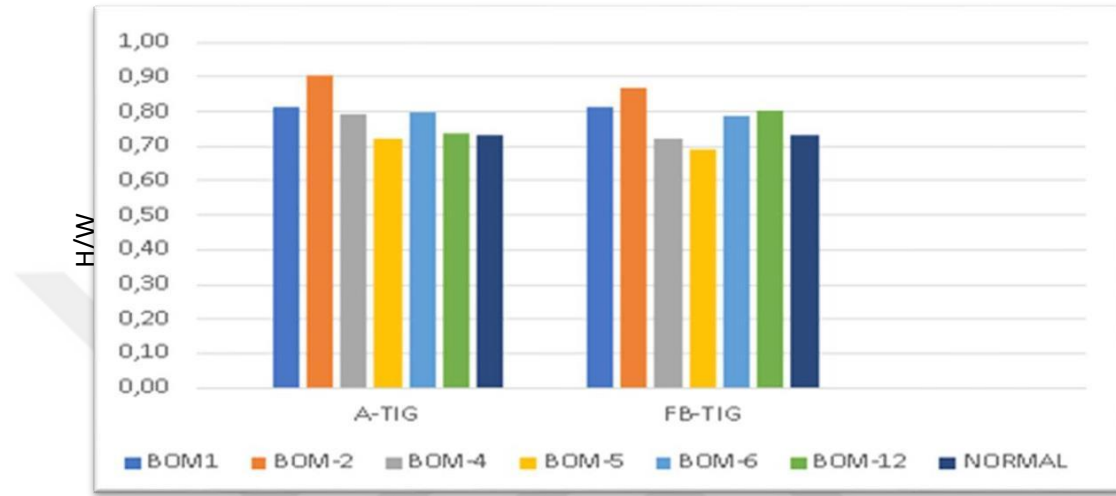
S235 JR karbon çeliğinde elde edilen sonuçları desteklemek amacıyla, AISI 304 paslanmaz çelik malzeme üzerinde TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmalarda, BOM1 (TiO_2), BOM2 (MnO_2), BOM4 (Al_2O_3), BOM5 (Fe_2O_3), BOM6 (CaO) ve BOM12 ($\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) aktif örtü bileşikleri kullanılmıştır. Deneylerde, 140, 160 ve 180 amperlik akım şiddetleri tercih edilmiş, kaynak hızı 160 mm/dakika ve koruyucu gaz debisi 16 litre/dakika olarak sabitlenmiştir.

5 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik üzerine uygulanan A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleri, 140 Amper akım şiddetinde farklı aktif örtülerle gerçekleştirildiğinde, bu yöntemlerle elde edilen H/W oranlarının geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. A-TIG kaynağı için BOM2, BOM4, BOM6 ve BOM12 aktif örtüleri ile elde edilen sonuçlar, diğer aktif örtülere göre üstün performans göstermiştir. Benzer şekilde, FB-TIG kaynağında da BOM2, BOM4, BOM6 ve BOM12 aktif örtüleri en iyi sonuçları vermiştir. Bu bulgular Şekil 4.7'de detaylı olarak sunulmuştur.



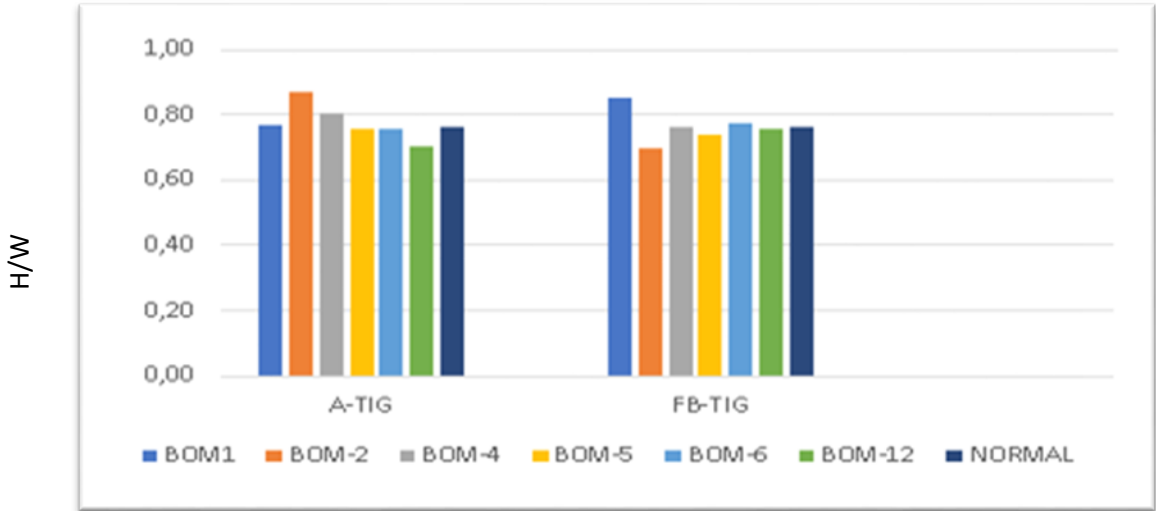
Şekil 4.7. 5 mm AISI 304 Paslanmaz Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları (140 A)

5 mm AISI 304 paslanmaz çelik üzerinde yapılan deneylerde, aktif örtüler sabit tutularak yalnızca akım şiddeti 160 Ampere yükseltildiğinde, A-TIG kaynağında en yüksek H/W oranlarının sırasıyla BOM2, BOM1, BOM4 ve BOM6 aktif örtüleri ile elde edildiği, FB-TIG kaynağında ise en iyi sonuçların sırasıyla BOM2, BOM1 ve BOM6 aktif örtüleri ile elde edildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçların, geleneksel TIG kaynağına kıyasla üstün performans gösterdiği Şekil 4.8’de sunulmuştur.



Şekil 4.8. 5 mm AISI 304 Paslanmaz Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG,A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları (160 A)

5 mm AISI 304 paslanmaz çelik üzerinde gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde, proses parametreleri sabit tutulup akım şiddeti 180 Ampere yükseltilerek yapılan deneyler, H/W oranı açısından değerlendirildiğinde, A-TIG kaynağında kullanılan BOM1 ve BOM4 aktif örtülerinin, TIG kaynağına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. FB-TIG kaynağında ise BOM1 aktif örtüsü ile elde edilen sonuçların, TIG kaynağına göre üstün olduğu Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Diğer aktif örtüler, TIG kaynağına kıyasla kayda değer bir iyileşme sağlamamıştır. Üç farklı akım seviyesi incelendiğinde, 160 Amperlik akım şiddetinin H/W oranı üzerinde diğer iki akım seviyesinden daha olumlu bir etki yarattığı belirlenmiştir.

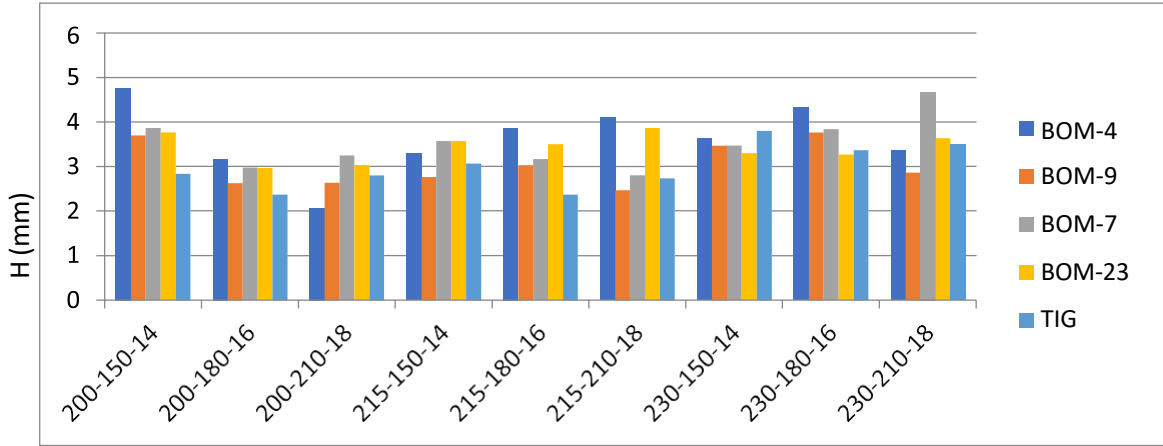


Şekil 4.9. 5 mm AISI 304 Paslanmaz Çelik Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları (180 A)

4.1.4. 5 mm 90/10 CuNi alaşımına Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri

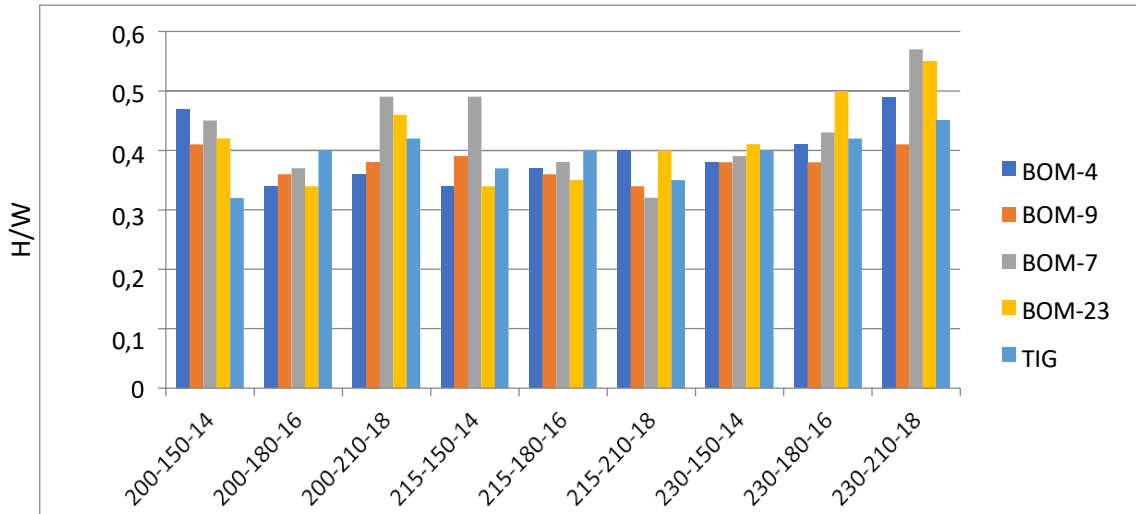
Bu bölümde, S235 JR ve AISI 304 kalite çelikler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, kaynak dikişi geometrisi (H, H/W, W) üzerinde olumlu etkileri gözlemlenen aktif örtülere ekolarak, BOM 23 (%50 SiO₂ + %50 Cr₂O₃) bileşiğinin denenmesi tercih edilmiştir. 90/10 CuNi alaşımının ısı iletim katsayısı, karbon çelikleri ve paslanmaz çeliklerden daha yüksek olduğu için, bu alaşımın kaynak işlemlerinde kullanılan akım şiddeti, diğer malzemelere kıyasla daha yüksek seviyelerde tutulmuştur. Deneylerde, BOM4 (Al₂O₃), BOM7 (MgO), BOM9 (Cr₂O₃) ve BOM23 (SiO₂ + Cr₂O₃) aktif örtü bileşiklerini kullanılmıştır. Uygulanan akım şiddetleri sırasıyla 200, 215 ve 230 Amper olarak belirlenmiş; kaynak hızları ise 150, 180 ve 210 mm/dakika olarak seçilmiştir. Ayrıca, koruyucu gaz debileri 14, 16 ve 18 litre/dakika olarak ayarlanmıştır.

5 mm kalınlığında 90/10 CuNi alaşımına farklı aktif örtüler uygulanarak gerçekleştirilen deneylerde, kaynak penetrasyon derinliği kalite parametresi olarak değerlendirilmiştir. Geleneksel TIG kaynağı ile elde edilen penetrasyon derinlikleri, A-TIG kaynağı ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.10'da gösterildiği üzere, 200-150-14 deney setinde, tüm A-TIG kaynak dikişleri, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha iyi penetrasyon derinliği sergilemiştir. Ancak, 200-180-16 deney setinde, hiçbir aktif örtü, geleneksel TIG kaynağının penetrasyon derinliğini aşamamıştır. Buna karşın, 200-210-18 deney setinde, BOM7 ve BOM23 aktif örtüleri daha derin penetrasyon sağlamıştır. En yüksek penetrasyon derinliği, 200-150-14 deney setinde BOM4 aktif örtüsü ile, 230-210-18 deney setinde ise BOM7 aktif örtüsü ile elde edilmiştir. Bu bulgular, farklı aktif örtülerin kaynak performansı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



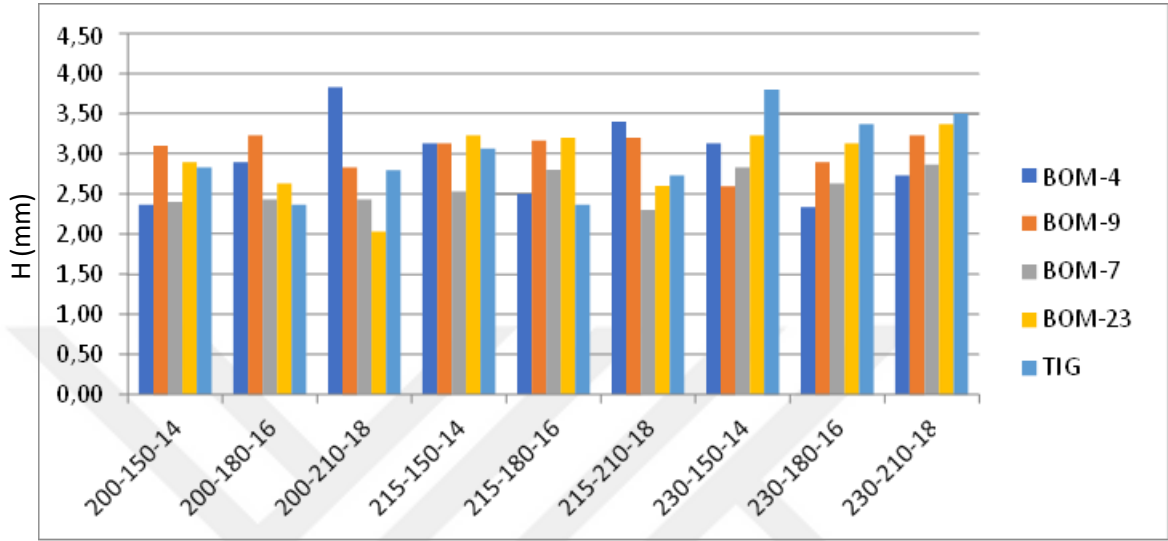
Şekil 4.10. 5 mm 90/10 CuNi Alaşımı Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve A-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri

Aynı deneylerde H/W değeri bir kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, A-TIG kaynağında 200-150-14 deney setinde kullanılan tüm aktif örtüler, geleneksel TIG kaynağına kıyasla üstün performans sergilemiştir. Ancak, 200-180-16, 215-180-16 ve 230-150-14 deney setlerinde hiçbir aktif örtü, geleneksel TIG kaynağından daha iyi sonuç vermemiştir. Şekil 4.11'de gösterildiği üzere, 200-210-18 deney setinde BOM7, 215-150-14 deney setinde BOM4 ve BOM23, 230-210-18 deney setinde ise BOM4, BOM7 ve BOM23 en iyi H/W değerlerini sağlamıştır. Tüm deney setleri arasında en yüksek H/W oranı, 230-210-18 deney setinde elde edilmiştir; bu set, en yüksek akım şiddetiyle gerçekleştirilmiştir.



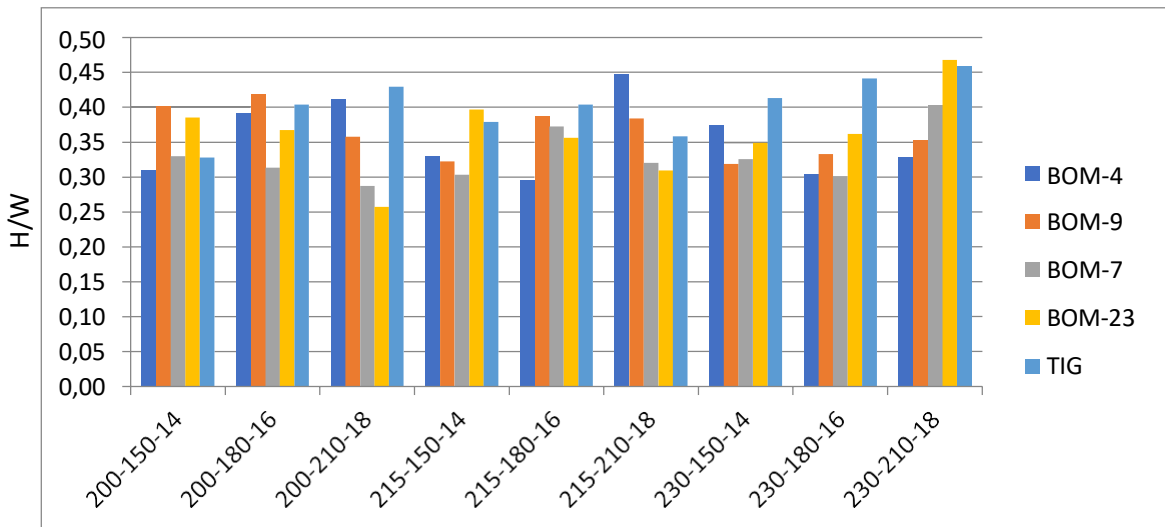
Şekil 4.11. 5 mm 90/10 CuNi Alaşımı Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve A-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları

Aynı deney parametreleri ve aktif örtüler kullanılarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynaklarında elde edilen penetrasyon derinlikleri, geleneksel TIG kaynak yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Kaynak parametrelerine göre, 200-210-18 deney setinde BOM4; 215-180-16 deney setinde BOM7, BOM9, BOM23; 215-210-18 deney setinde ise BOM4 ve BOM9 kullanılarak daha derin penetrasyon elde edilmiştir. Bu bulgular, Şekil 4.12'de ayrıntılı olarak sunulmaktadır.



Şekil 4.12. 5 mm 90/10 CuNi Alaşımı Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve FB-TIG Kaynak Dikişi Penetrasyon Derinlikleri

Aynı deneylerde H/W değerini kalite parametresi olarak dikkate aldığımızda, FB-TIG kaynaklarının H/W oranlarının geleneksel TIG kaynağı ile karşılaştırıldığında üstünlük sağladığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.13'te görüldüğü üzere, 200-150-14 deney setinde BOM9 ve BOM23; 200-180-16 deney setinde BOM9; 215-150-14 deney setinde BOM23; ve 215-210-18 deney setinde BOM4 ve BOM9, daha yüksek H/W oranları elde etmiştir. Bu bulgular, FB-TIG kaynaklarının, H/W oranı açısından geleneksel TIG kaynağına göre üstün performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.13. 5 mm 90/10 CuNi Alaşımı Üzerinde Farklı Aktif Örtülerle Gerçekleştirilen TIG ve FB

-TIG Kaynak Dikişı Penetrasyon Penetrasyon Derinliği/Genişliği Oranları

Yapılan çalışmada, 5.0 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımının A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleri ile kaynağı sırasında, H ve H/W mukayeselerinde farklı aktif örtülerin diğerlerine kıyasla üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Deneylerin büyük çoğunluğunda, TIG kaynağı ile karşılaştırıldığında, A-TIG ve FB-TIG yöntemleri daha iyi sonuçlar vermiştir. Aynı aktif örtülerin kullanıldığı deneylerde, daha yüksek akım şiddetlerinin, düşük akım şiddetlerine göre daha üstün performans sağladığı gözlemlenmiştir.

4.1.5. 8 mm 90/10 CuNi Alaşımına Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinde Akım Şiddetinin Etkileri

Tez ile ilgili ana deneysel çalışmalara başlamadan önce 8,0 mm ve 5,0 mm kalınlığında S235 JR kalite karbon çeliği, 5 mm AISI 304 kalite paslanmaz çelik 5,0 mm kalınlığında 90/10 CuNi alaşımı üzerinde A-TIG ve FB-TIG kaynak uygulamaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda farklı akım şiddetlerinin kaynak derinliği (H) ve kaynak şekil faktörü (H/W) üzerindeki etkileri incelenmiş olup sonuçlar yorumlanmıştır. Her aktif örtü farklı kaynak tekniklerindeki (A-TIG; FB-TIG) farklı akım şiddetlerinde farklı etkiler sergilemiştir. 5 farklı malzeme ve kalınlık üzerinde yapılan öncü çalışmalardan sonra aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Gerek A-TIG ve gerekse de FB-TIG kaynağında kaynak akım şiddetinin artışı, genellikle aktif örtülerin penetrasyon derinliğini artırıcı yönde etkin olmaktadır.
- Öncü deneysel çalışmalarda kullanılan birçok farklı aktif örtü içerisinde BOM4(Al_2O_3), BOM7(MgO), BOM9(Cr_2O_3) ve BOM23($Si_2 + Cr_2O_3$) aktif örtüleri ile en iyi sonuçlar elde edilebilmiştir. Kaynak dikiş geometrilerine bütünsel olarak (H, W, H/W) yaklaşılarak bu sonuçlara varılmıştır.

Yukarıda belirtilen hususlar doğrultusunda, 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımında A-TIG ve FB-TIG uygulamaları sırasında en iyi sonuçlar, BOM4 (Al_2O_3), BOM7 (MgO), BOM9 (Cr_2O_3) ve BOM23 ($Si_2 + Cr_2O_3$) aktif örtüleri kullanılarak elde edilmiştir. Malzemenin daha kalın olması nedeniyle, 5 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımına uygulanan akım şiddetinden daha yüksek akım şiddetleri (250, 265 ve 280 amper) tercih edilmiştir. Deneylerdeki kaynak prosesi girdi ve çıktı parametreleri, Çizelge 4.1'de belirtilen formata uygun olarak kaydedilmiştir.

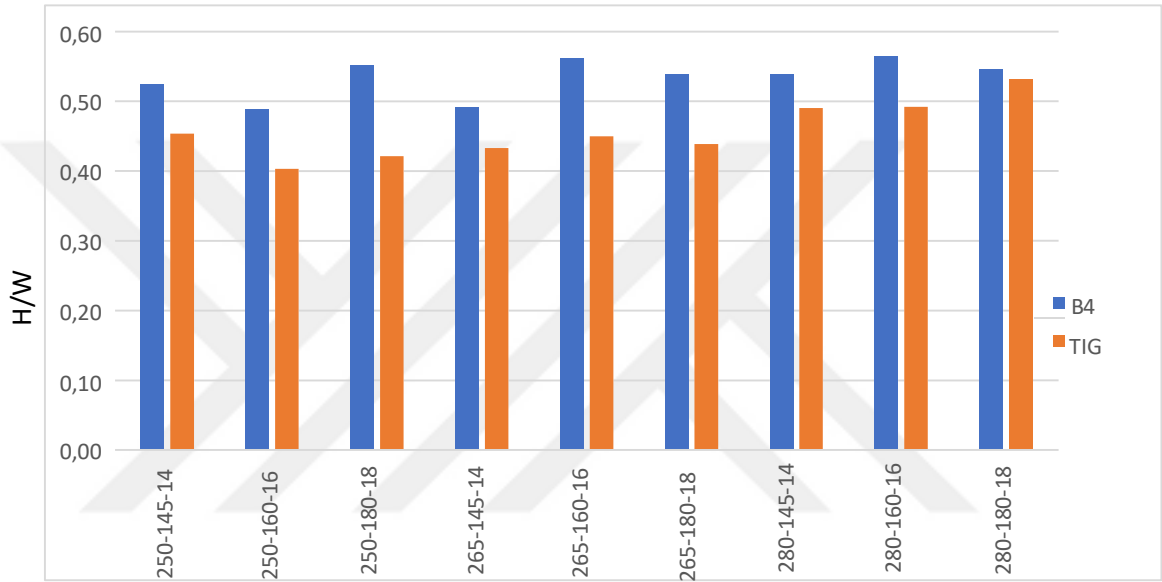
Kaynak işlemlerinde, ilerleme hızları 145, 160 ve 180 mm/dk olarak belirlenmiş, koruyucu gaz debileri ise 14, 16 ve 18 lt/dk olarak ayarlanmıştır. Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, hem TIG hem de A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleri için her bir akım şiddetine yönelik üç farklı kaynak proses parametre seti tanımlanmış ve uygulanmıştır. Kaynaklanan her parçadan, kaynak genişliği (W), kaynak penetrasyon derinliği (H) ve kaynak şekil faktörü (H/W) ölçümlerini gerçekleştirmek amacıyla üçer adet test numunesi alınmıştır. Bu ölçümlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak, elde

edilen ortalama değerler grafiklerde sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Deneysel Çalışmalarda Kayıtların Yapıldığı Kayıt Formu

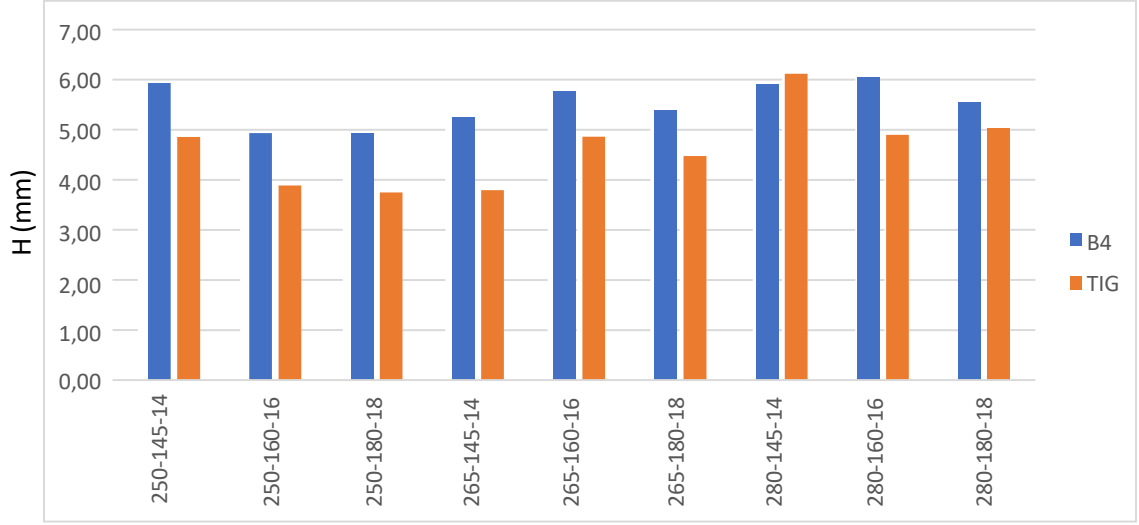
Kaynak Prosesi Girdi Parametreleri		Kaynak Çıktı Parametreleri					
BOM4, BOM7, BOM9 ve BOM23 (Aktif Örtüler)		A-TIG veya FB-TIG			TIG		
AMP-v-GAS		W	H	H/W	W	H	H/W
250-145-14	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
250-160-16	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
250-180-18	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
265-145-14	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
265-160-16	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
265-180-18	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
280-145-14	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
280-160-16	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
280-180-18	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							

8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımında BOM4 aktif örtüsü uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı işlemlerinde, H/W oranı bir kalite parametresi olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, her bir akım şiddeti için BOM4 aktif örtüsü kullanıldığında, geleneksel TIG kaynağına kıyasla H/W oranının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, BOM4 aktif örtüsünün kaynak işlemi sırasında derinlik/genişlik oranını artırmada etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde, BOM4 aktif örtüsünün kullanımı ile elde edilen H/W oranlarının, geleneksel TIG kaynağına göre her akım şiddetinde belirgin bir iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Bu deneylere ait H/W oranlarının grafiksel gösterimi ise şekil 4.14'te sunulmuştur.



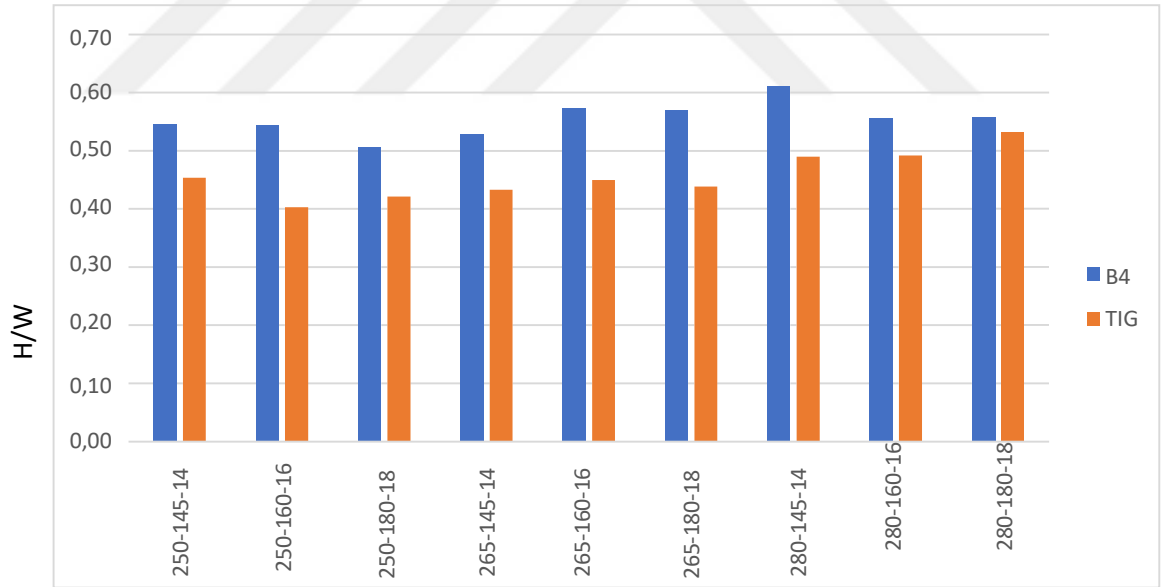
şekil 4.14. BOM4 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları

Penetrasyon derinliğinin kalite parametresi olarak değerlendirildiği aynı deneyler incelendiğinde, A-TIG kaynağında 280-145-14 deney seti dışında, BOM4 deney seti, TIG kaynağına kıyasla daha derin bir penetrasyon sağlamıştır. En derin penetrasyon ise 6,10 mm olarak 280-160-16 deney seti ile elde edilmiştir (şekil 4.15)



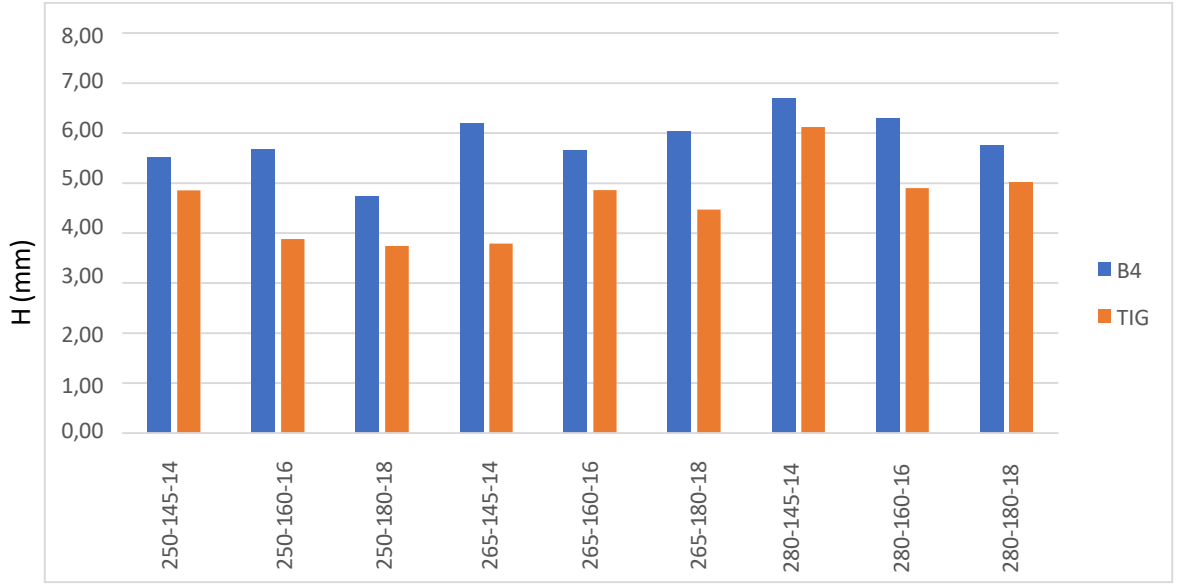
Şekil 4.15. BOM4 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri

BOM4 aktif örtüsünün kullanıldığı FB-TIG kaynaklarında, H/W oranı bir kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, her bir akım şiddeti için BOM4 kullanılan FB-TIG kaynaklarında, standart TIG kaynağına kıyasla daha yüksek H/W oranları elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, Şekil 4.16’da sunulmuştur.



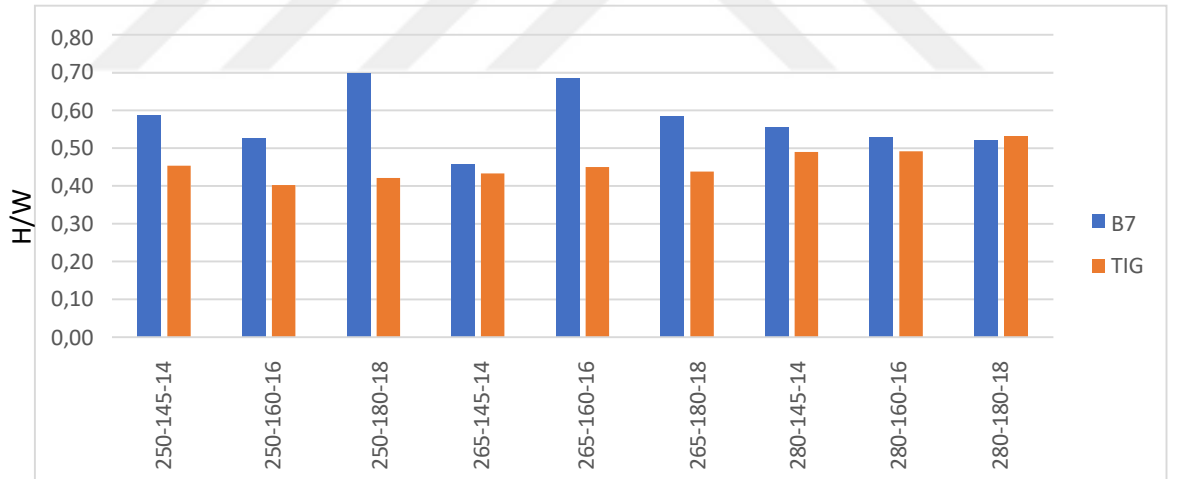
Şekil 4.16. BOM4 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları

Aynı deneylerde penetrasyon derinliği kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, BOM4 kullanılan FB-TIG kaynağının her akım şiddetinde, TIG kaynağına kıyasla belirgin bir penetrasyon derinliği artışı sağladığı tespit edilmiştir. Deney sonuçları, Şekil 4.17’de sunulmuştur. Özellikle 280-145-14 deney setinde elde edilen penetrasyon derinliği (H=6,89 mm), diğer tüm alternatiflerden daha yüksek bulunmuştur.



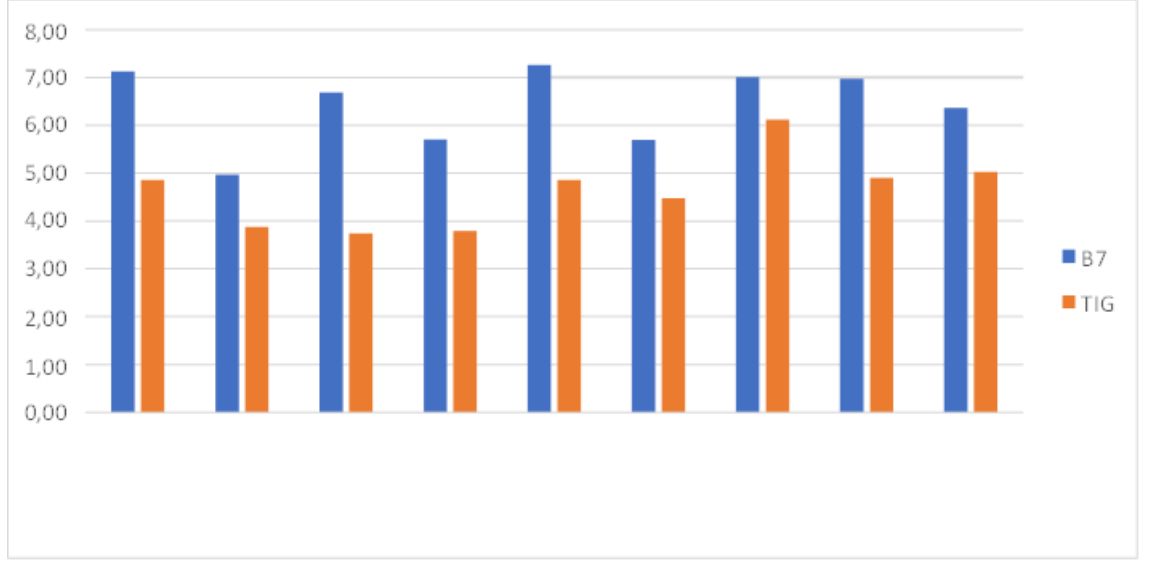
Şekil 4.17. BOM4 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri

BOM7 aktif örtüsünün uygulandığı A-TIG kaynak işlemlerinde H/W oranı bir kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, 280-180-18 deney seti hariç tüm deney setlerinde BOM7 kullanılan A-TIG kaynağının H/W oranının geleneksel TIG kaynağından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, Şekil 4.18'de sunulmaktadır.



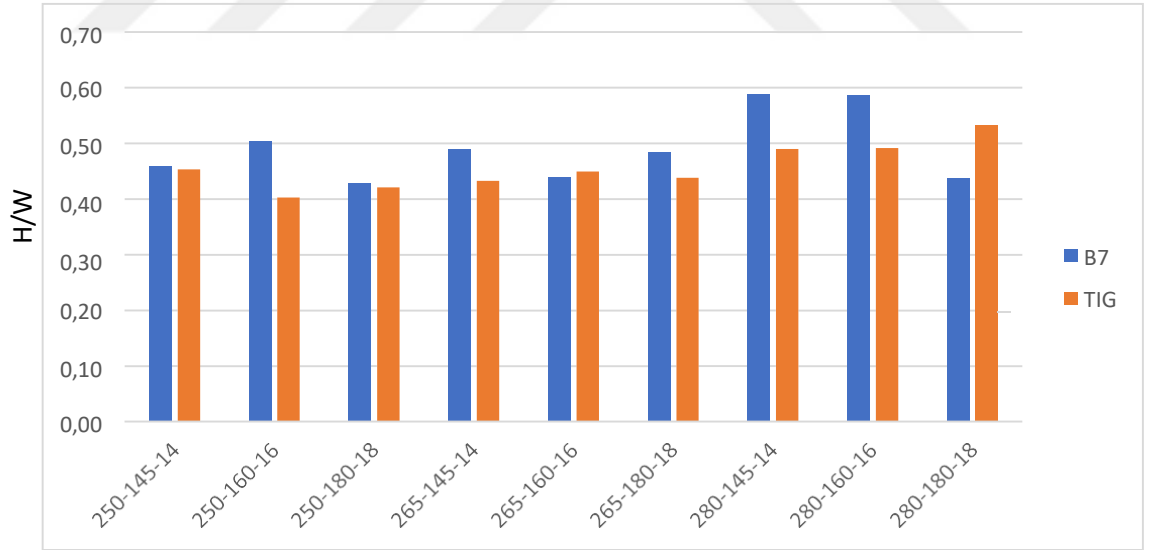
Şekil 4.18. BOM7 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları

Aynı deneylerde penetrasyon derinliğini bir kalite parametresi olarak ele aldığımızda, Şekil 4.19'da gösterildiği üzere, BOM7 kullanılan A-TIG kaynağının her akım şiddeti seviyesinde geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek penetrasyon derinliği sağladığı görülmektedir. Özellikle 250-145-4, 265-160-16, 280-145-14 ve 280-160-16 deney setleri ile elde edilen en yüksek penetrasyon derinlikleri sırasıyla 7,26 mm ve 7,13 mm olarak ölçülmüş olup, bu sonuçlar diğer deney setleri arasındaki en yüksek değerlerdir.



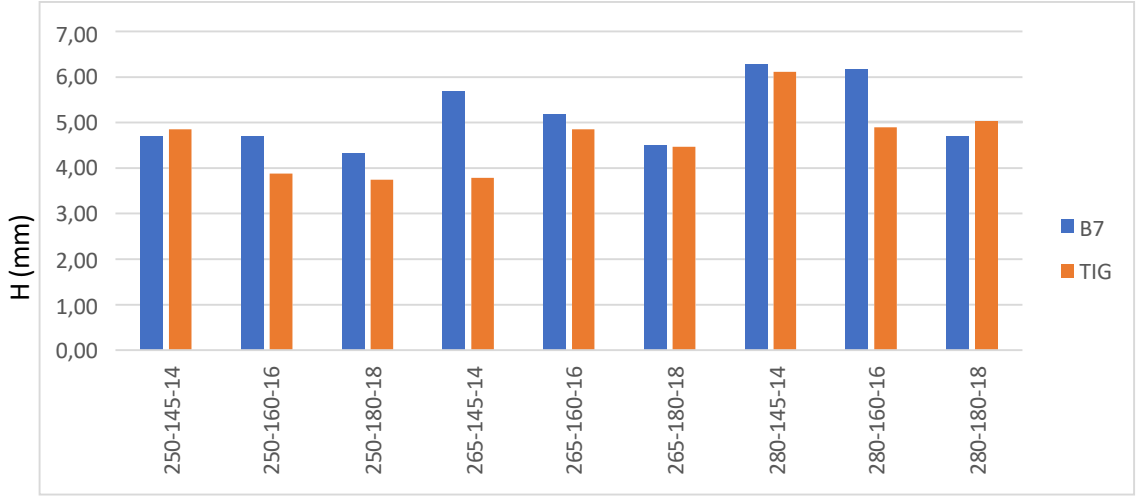
Şekil 4.19. BOM7 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri

BOM7 aktif örtüsü kullanılarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağında, H/W oranı kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, yalnızca 280-180-18 deney setindeki FB-TIG kaynağının H/W oranının geleneksel TIG kaynağından daha düşük olduğu Şekil 4.20'de görülmektedir. Bununla birlikte, 280-145-14 ve 280-160-16 deney setlerinde elde edilen H/W oranları, diğer deney setlerine ve geleneksel TIG kaynağına kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olarak tespit edilmiştir.



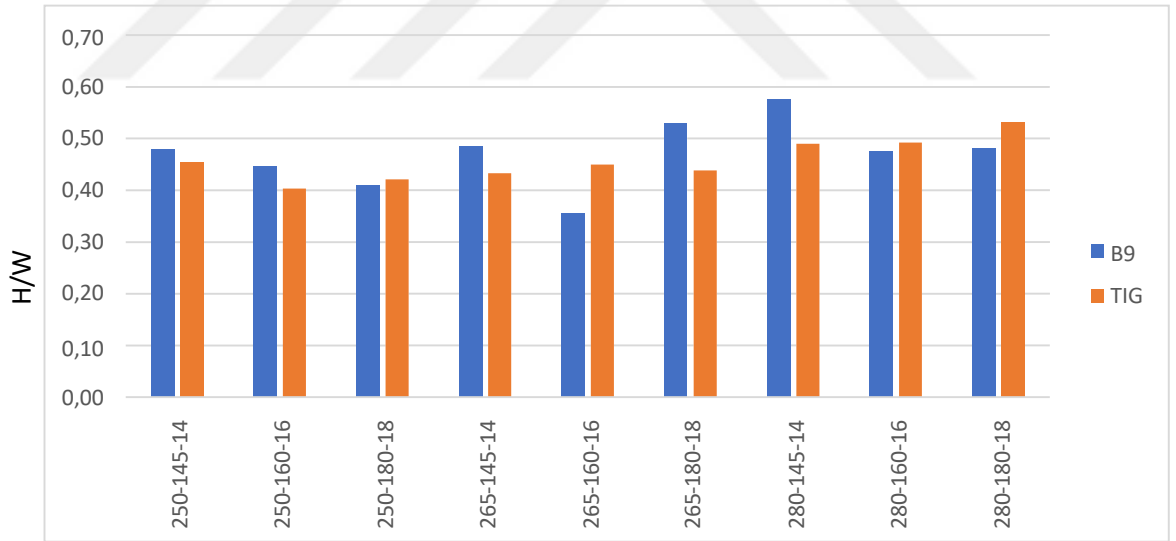
Şekil 4.20. BOM7 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları

Aynı deneylerde, penetrasyon derinliği bir kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, BOM7 aktif örtüsünün kullanıldığı FB-TIG kaynağının penetrasyon derinliğinin, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu bulgular Şekil 4.21'de sunulmuştur. Özellikle 280-160-16 deney setinde, en derin penetrasyonun (H=6,23 mm) gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.



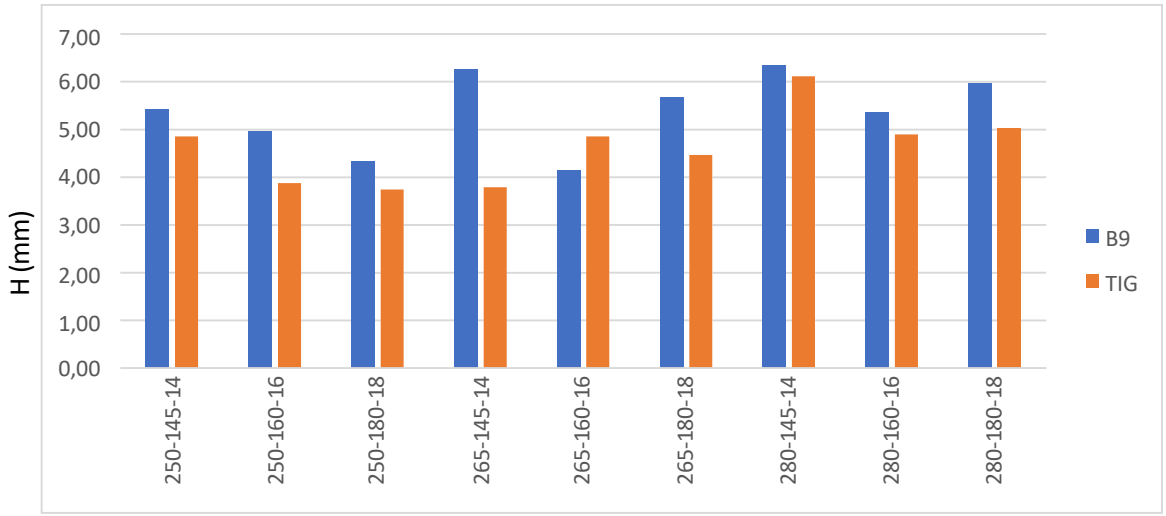
Şekil 4.21. BOM7 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri

8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı üzerinde BOM9 aktif örtüsü kullanılarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı sürecinde, H/W oranı kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, özellikle 265-180-18 ve 280-145-14 deney setleriyle, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek H/W oranlarının elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, Şekil 4.22'de sunulan deneysel verilerle desteklenmektedir.



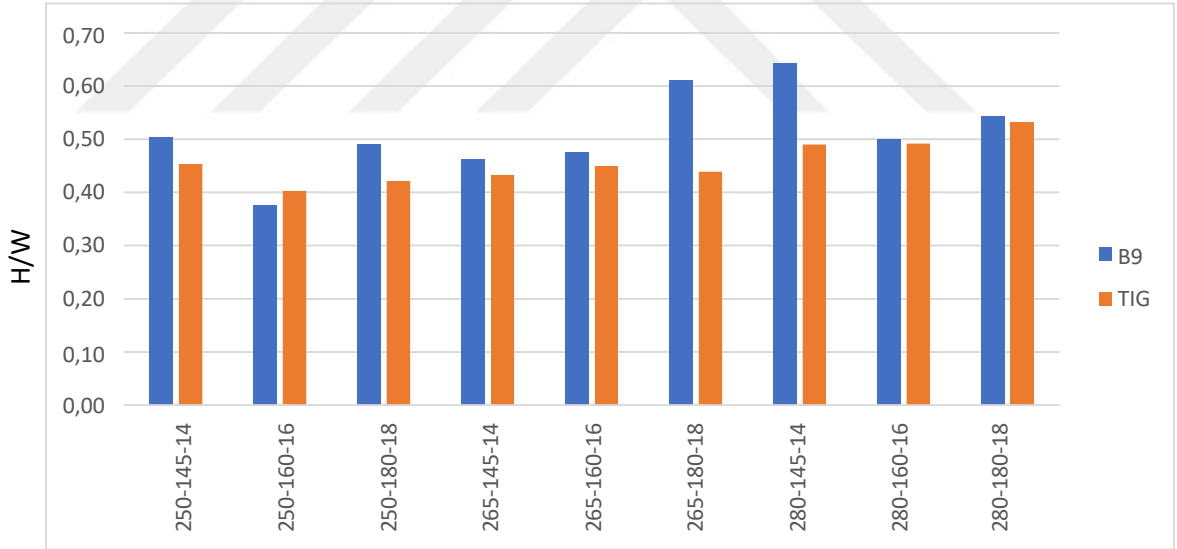
Şekil 4.22. BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları

Penetrasyon derinliğini kalite parametresi olarak değerlendirdiğimizde, 265-145-14 deney seti dışındaki tüm deneylerde, BOM9 kullanılan A-TIG kaynağının H değerinin, geleneksel TIG kaynağından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, Şekil 4.23'te sunulmuştur. En yüksek H oranları, 265-160-16, 280-145-14 ve 280-180-18 deney setlerinde elde edilmiş olup, bu setler en yüksek performansı sergilemiştir.



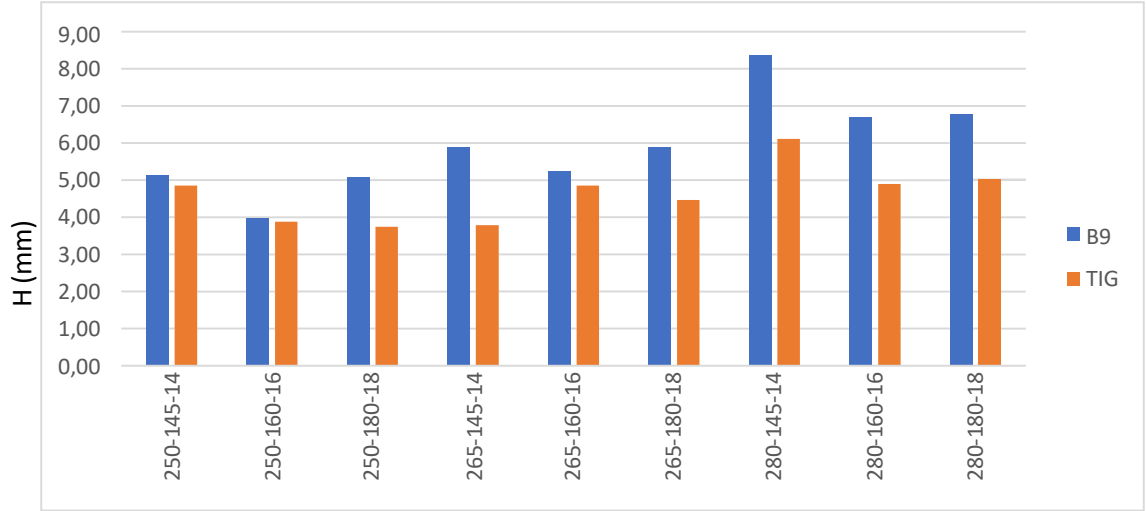
Şekil 4.23. BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri

BOM9 aktif örtüsünün kullanıldığı FB-TIG kaynağında, H/W oranının kalite parametresi olarak değerlendirildiği çalışmada, farklı akım şiddetlerinde elde edilen FB-TIG kaynaklarının H/W oranlarının, geleneksel TIG kaynaklarına kıyasla aynı veya daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, Şekil 4.24'te sunulan deneysel verilerle desteklenmektedir. Özellikle, 265-180-18 ve 280-145-14 deney setlerinde daha yüksek H/W oranlarına ulaşılabildiği belirlenmiştir.



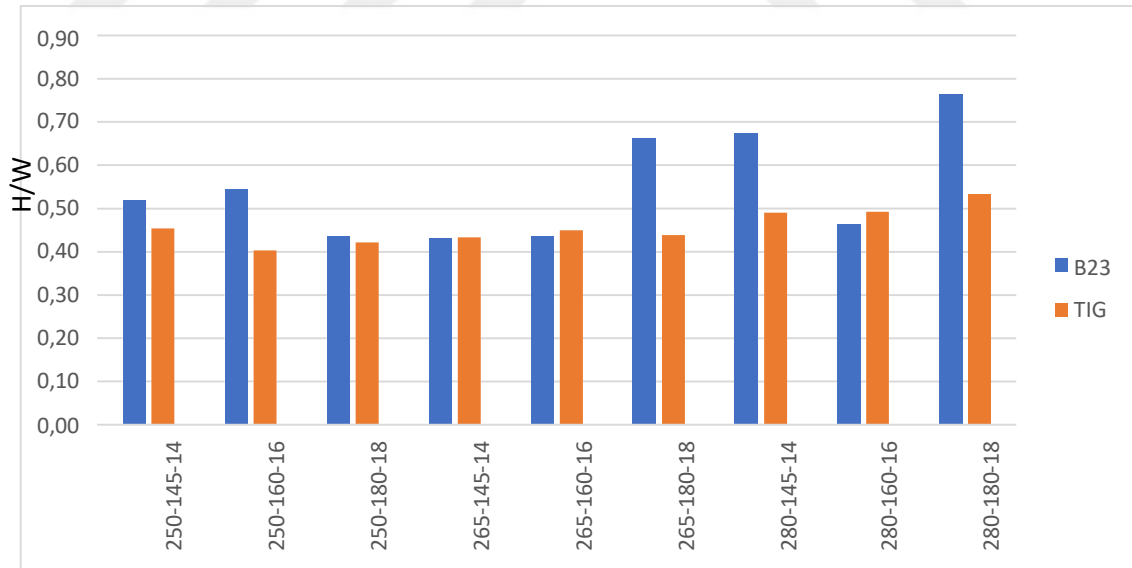
Şekil 4.24. BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları

Aynı deneylerde penetrasyon derinliği kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, BOM9 aktif örtüsü kullanılan FB-TIG kaynağının, her akım şiddetinde geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha derin penetrasyon sağladığı Şekil 4.25'te gözlemlenmektedir. Özellikle 280-145-14, 280-160-16 ve 280-180-18 parametre kombinasyonları öne çıkmakta olup, sırasıyla 8,36 mm, 6,70 mm ve 6,77 mm penetrasyon derinlikleri elde edilmiştir. 280-145-14 parametresi ile tam nüfuziyet sağlanmış olup, yüksek penetrasyonun 280 A akım şiddetinde gerçekleşmesi, akım şiddetinin penetrasyon derinliği üzerindeki olumlu etkisini de ortaya koymaktadır.



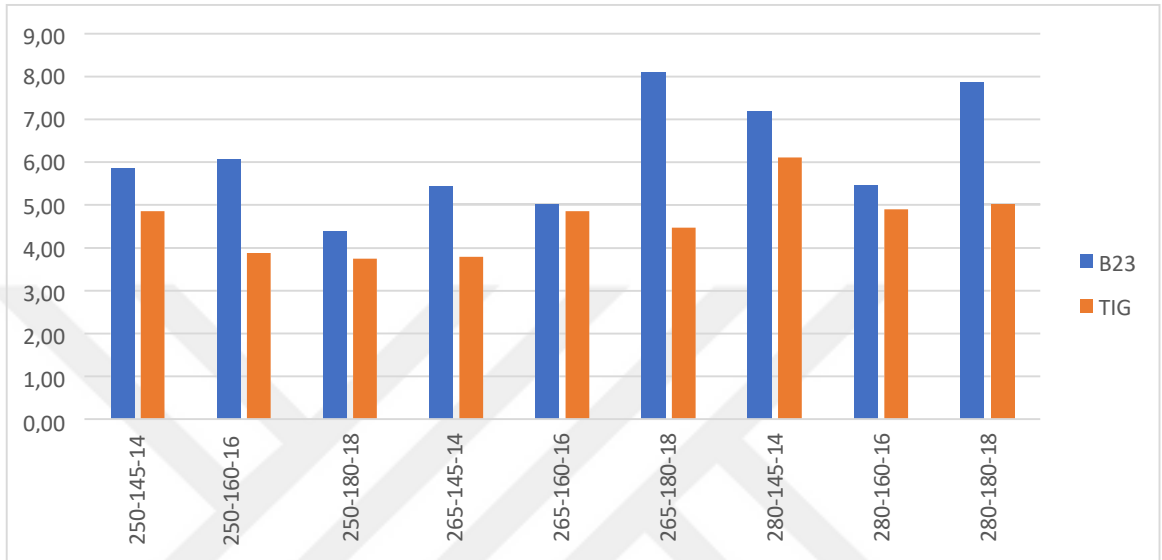
Şekil 4.25. BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri

8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı üzerinde BOM23 aktif örtüsü kullanılarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı çalışmalarında, H/W oranı kalite parametresi olarak değerlendirilmiştir. Şekil faktörü, her bir akım şiddetinde geleneksel TIG kaynağı ile karşılaştırıldığında aynı seviyede veya daha yüksek bulunmuştur. Deneylerden elde edilen veriler Şekil 4.26'da sunulmuştur. Özellikle 280-180-18, 265-180-18 ve 280-145-14 deney setleri, diğer alternatiflere kıyasla üstün sonuçlar vermiştir.



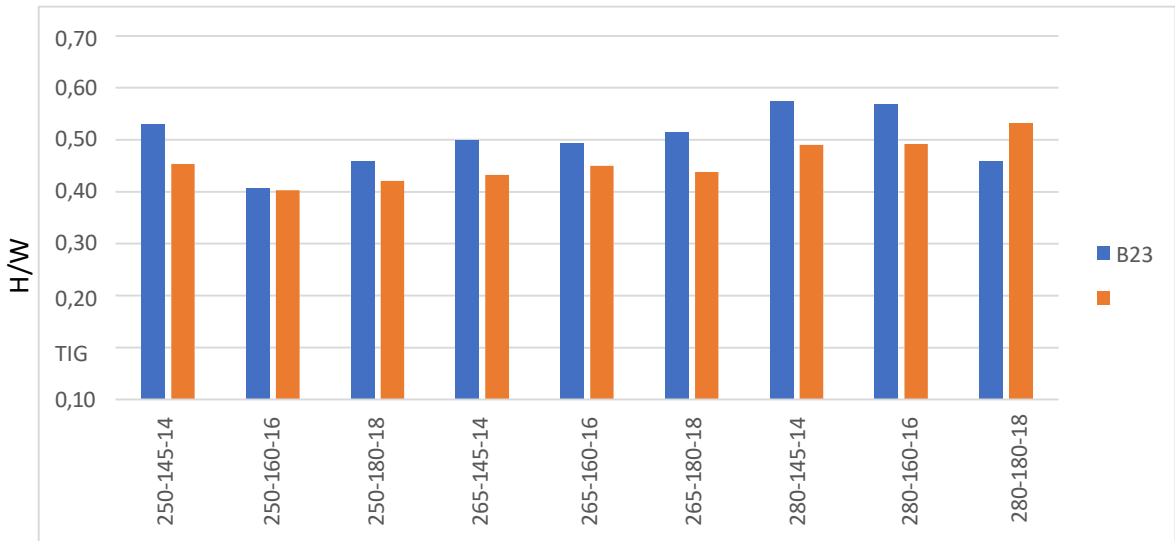
Şekil 4.26. BOM23 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları

Penetrasyon derinliğinin kalite parametresi olarak değerlendirildiği aynı deneylerde, BOM23 aktif örtüsünün kullanıldığı A-TIG kaynaklarında elde edilen penetrasyon derinlikleri, her akım seviyesinde geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek olmuştur. En derin penetrasyon derinlikleri sırasıyla 265-180-18, 280-180-18 ve 265-145-14 akım seviyelerinde, sırasıyla H=8,10 mm (tam penetrasyon), H=7,87 mm ve H=7,20 mm olarak kaydedilmiştir. Deneysel bulgular Şekil 4.27'de sunulmuştur.



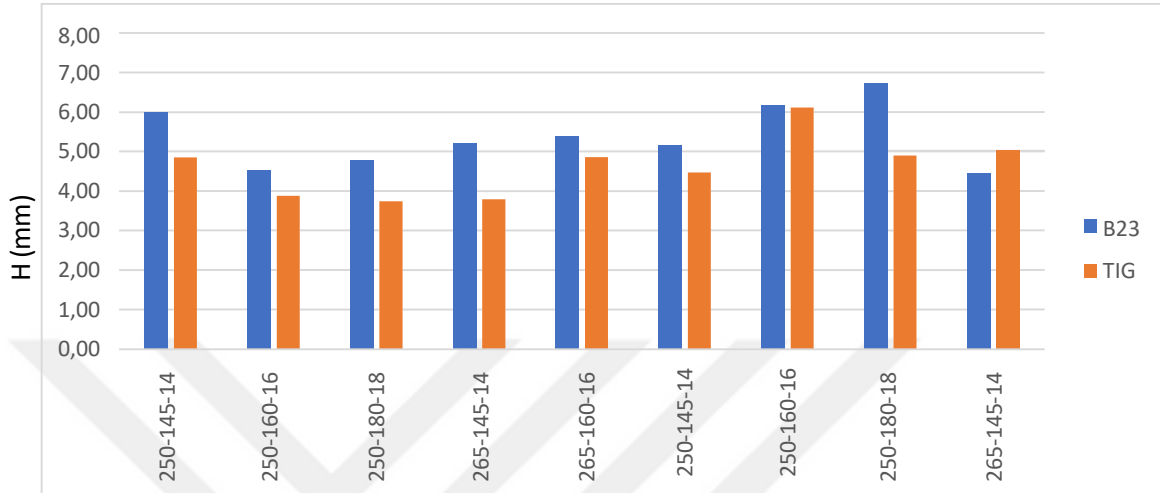
Şekil 4.27. BOM23 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri

BOM23 aktif örtüsü kullanılarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağında, H/W oranı bir kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, FB-TIG/BOM23 yöntemi ile elde edilen kaynak dikişlerinin H/W oranının, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak, yalnızca 280-180-18 deney setinde H/W oranının TIG kaynağı lehine olduğu Şekil 28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. BOM23 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları

Aynı deneylerde penetrasyon derinliği kalite parametresi olarak ele alındığında, 280-180-18 ve 250-145-14 deney setleri ile gerçekleştirilen FB-TIG/BOM23 kaynak uygulamalarının, TIG kaynağına kıyasla belirgin bir penetrasyon artışı sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen penetrasyon derinlikleri sırasıyla 6,74 mm ve 5,98 mm olup, deneysel veriler Şekil 4.29'da sunulmuştur.



Şekil 4.29. BOM23 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri

4.1.6. 8 mm 90/10 CuNi Alaşımına Uygulanan TIG, A-TIG ve FB-TIG Kaynak Yöntemlerinin Doğrulama Testlerinde Akım Şiddetinin Etkileri

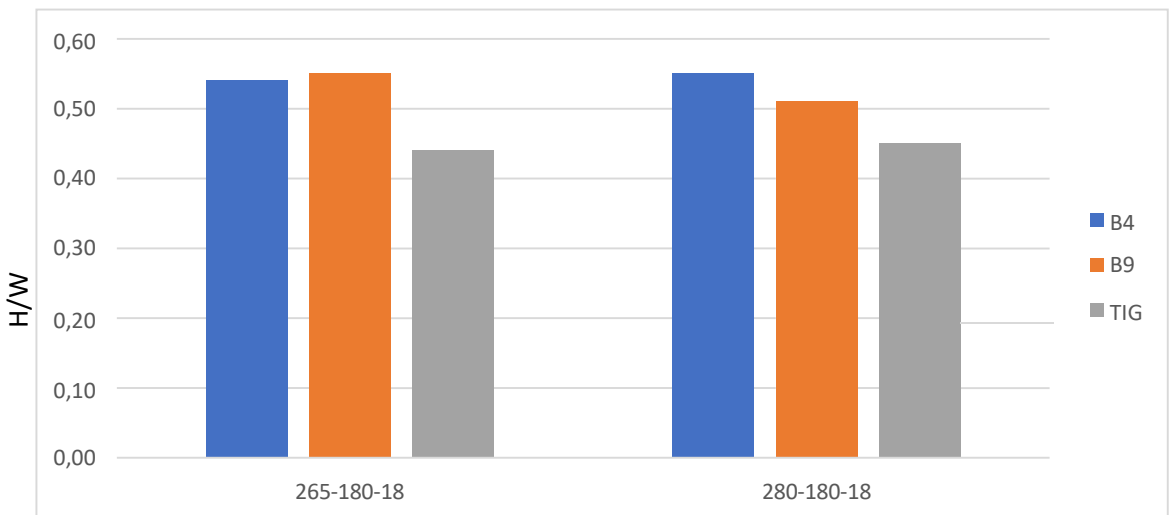
Tez çalışmalarında kullanılan dört farklı aktif örtü arasında, BOM4 (Al_2O_3) ve BOM9 (Cr_2O_3) diğer örtülerden üstün performans göstermiştir. Bu iki aktif örtü, kaynak kalitesi üzerinde olumlu etkiler yaratmış ve bu nedenle daha fazla inceleme yapılmak üzere seçilmiştir. Deneysel çalışmalar, bu örtülerin performansını doğrulamak amacıyla tekrarlanmış ve sonuçlar titizlikle analiz edilmiştir. Deneylerde kullanılan parametreler sabit tutulmuş olup, kaynak akım şiddetleri 265 ve 280 Amper olarak belirlenmiştir. Kaynak ilerleme hızı 180 mm/dk olarak seçilmiş, koruyucu gaz debisi ise 18 mm/dk olarak ayarlanmıştır.

BOM4 (Al_2O_3) aktif örtüsü, özellikle yüzey temizliği ve oksit oluşumunun kontrolü konusunda üstün performans sergilemiştir. Al_2O_3 , yüksek erime noktası ve kimyasal kararlılığı sayesinde, kaynak havuzunun sabit kalmasına ve kaliteli bir kaynak dikişi elde edilmesine katkı sağlamıştır. Bu durum, kaynak dikişinin homojenliğini artırarak, mikroyapısal incelemelerde olumlu sonuçlar vermiştir. Diğer yandan, BOM9 (Cr_2O_3) aktif örtüsü, özellikle paslanmaz çelik kaynaklarında tercih edilmiştir. Cr_2O_3 , kaynak sırasında yüzey oksitlerinin oluşumunu minimize ederken, aynı zamanda yüzey gerilimini de kontrol ederek kaynak penetrasyonunu artırmıştır. Bu örtü, daha derin ve düzgün kaynak dikişleri elde edilmesine olanak sağlamış, dolayısıyla mekanik özelliklerin iyileştirilmesine önemli bir katkı yapmıştır. Test parametreleri, Çizelge 4.2'de detaylı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 4.2. Deneysel Çalışmalarda Kayıtların Yapıldığı Kayıt Formu

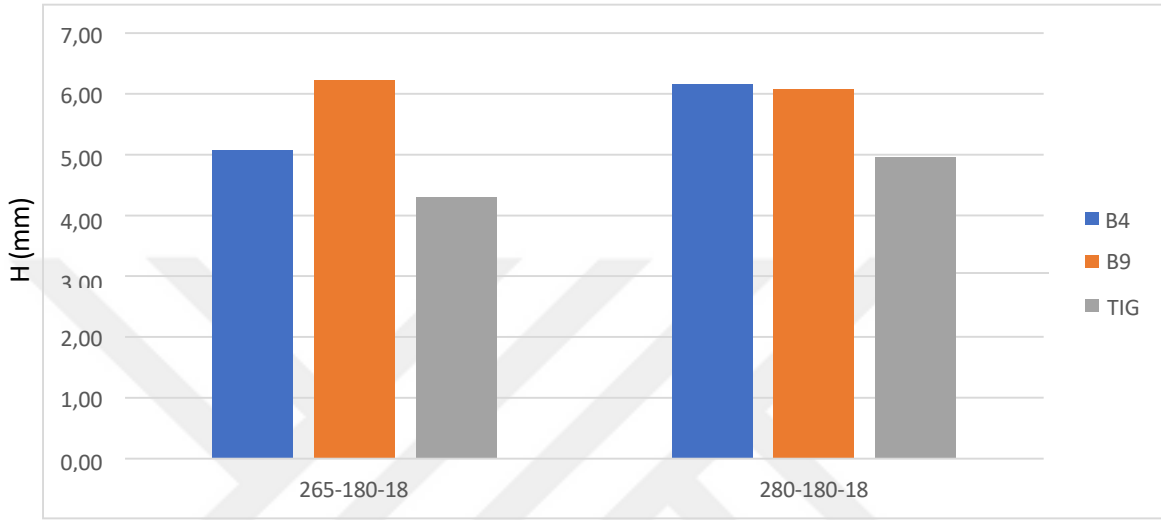
BOM4/ BOM9							
		A-TIG/ FB-TIG			TIG		
AMP-v- GAS		W	H	H/W	W	H	H/W
265-180-18	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							
280-180-18	DENEY-1						
	DENEY-2						
	DENEY-3						
ORTALAMA							

8,0 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı ile gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde, A-TIG kaynak yöntemi kullanılarak BOM4 ve BOM9 aktif örtüleriyle elde edilen kaynak sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada, H/W oranı, kaynak dikişinin kalite parametresi olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler, A-TIG yöntemi ile yapılan kaynaklarda, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek H/W oranlarına ulaşıldığını göstermektedir. Özellikle BOM9 aktif örtüsü, en yüksek H/W oranını sağlarken, BOM4 aktif örtüsü ise buna yakın bir performans sergilemiştir. Bu bulgular, kaynak dikişinin morfolojisi üzerindeki aktif örtülerin etkisini vurgulamakta olup, ilgili sonuçlar Şekil 4.30’da grafiksel olarak sunulmuştur.



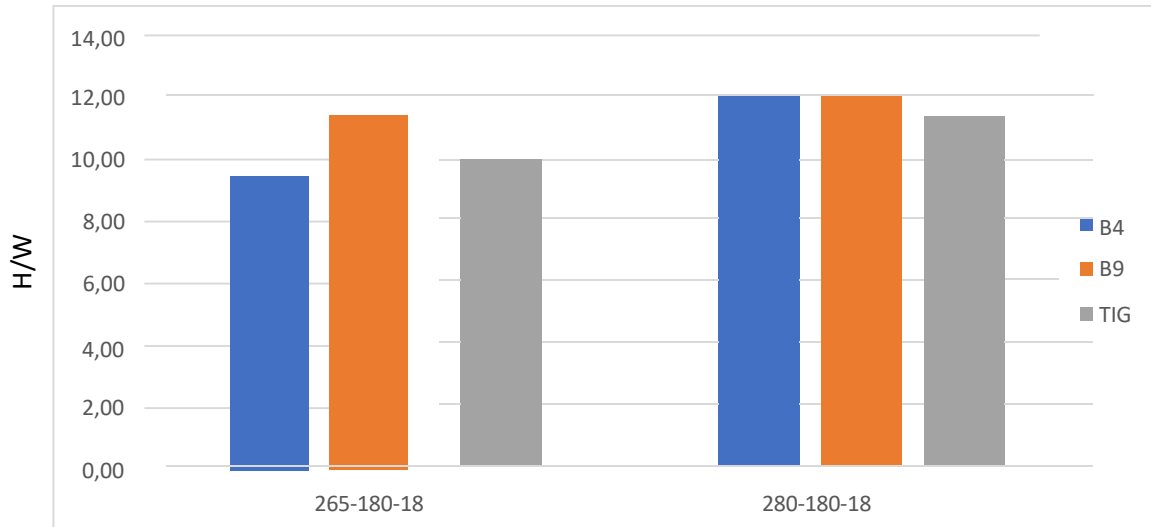
Şekil 4.30. BOM4/BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları

Yapılan deneylerde penetrasyon derinliğini bir kalite parametresi olarak değerlendirdiğimizde, BOM4 ve BOM9 aktif örtülerinin kullanıldığı A-TIG kaynağının, 265 ve 280 A akım şiddetlerinde, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha derin penetrasyon sağladığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, her iki akım seviyesinde de BOM4 ve BOM9 aktif örtülerinin kaynak işlemi üzerindeki etkisinin belirgin olduğunu ve bu örtülerin kullanımıyla daha derin bir penetrasyon elde edilebileceğini ortaya koymaktadır (Şekil 4.31)



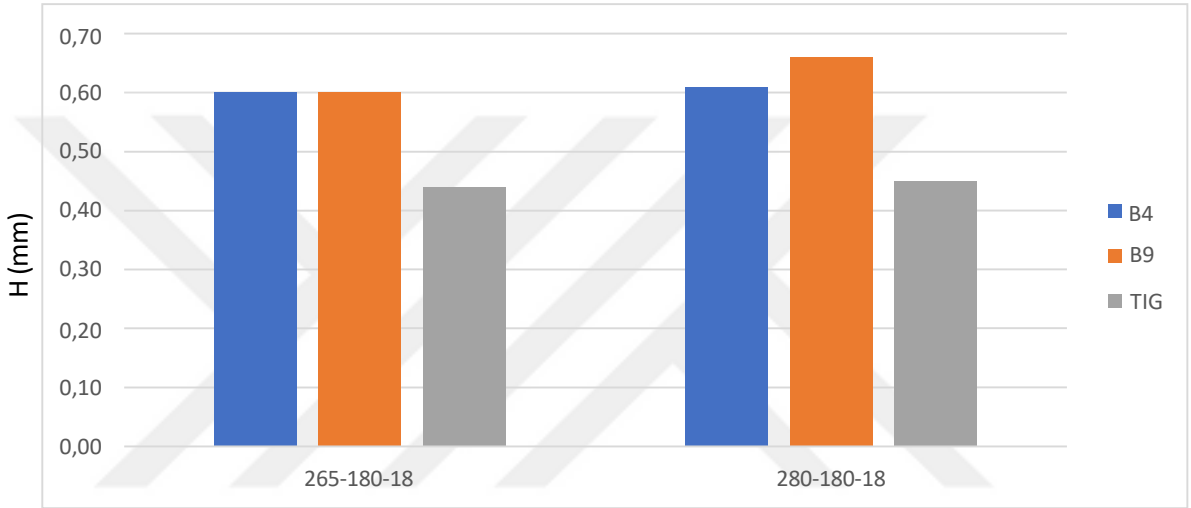
Şekil 4.31. BOM4/BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri

8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı üzerinde BOM4 ve BOM9 aktif örtüleri kullanılarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynak uygulamasında, H/W oranı bir kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, her iki akım seviyesinde de BOM4 ve BOM9 aktif örtülerinin, geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek H/W oranları sağladığı belirlenmiştir (Şekil 4.32). BOM4 aktif örtüsünün H/W oranı her iki akım seviyesinde de sabit kalırken, BOM9'un 280 A akım şiddetinde en yüksek H/W oranını sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.32. BOM4/BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları

BOM4 ve BOM9 aktif örtüleri kullanılarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı deneylerinde, penetrasyon derinliği kalite parametresi olarak değerlendirilip, iki farklı akım şiddetinde (265 A ve 280 A) gerçekleştirilmiş olup, her iki durumda da hem BOM4 hem de BOM9 aktif örtülerinin geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha derin bir penetrasyon sağladığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, her iki aktif örtünün kaynak banyosu üzerindeki etkisinin önemli olduğunu ve penetrasyon derinliğini artırarak kaynak kalitesini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Şekil 4.33, bu deneylerden elde edilen sonuçları grafiksel olarak sunmaktadır, bu da FB-TIG yönteminin geleneksel TIG kaynağına göre üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.33. BOM4/BOM9 uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri

4.2. Farklı Aktif Örtülerinin Etkileri

Farklı tipteki aktif örtülerin cinslerine bağlı olarak kaynak morfolojisi üzerindeki etkileri, çeşitli deneysel çalışmalar aracılığıyla kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmalar, aktif örtülerin bileşimi, uygulanma şekli ve kaynak işlemi sırasında oluşturdıkları termal ve kimyasal ortamın, kaynak banyosunun şekillenmesi ve kaynak dikişinin nihai özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamıştır.

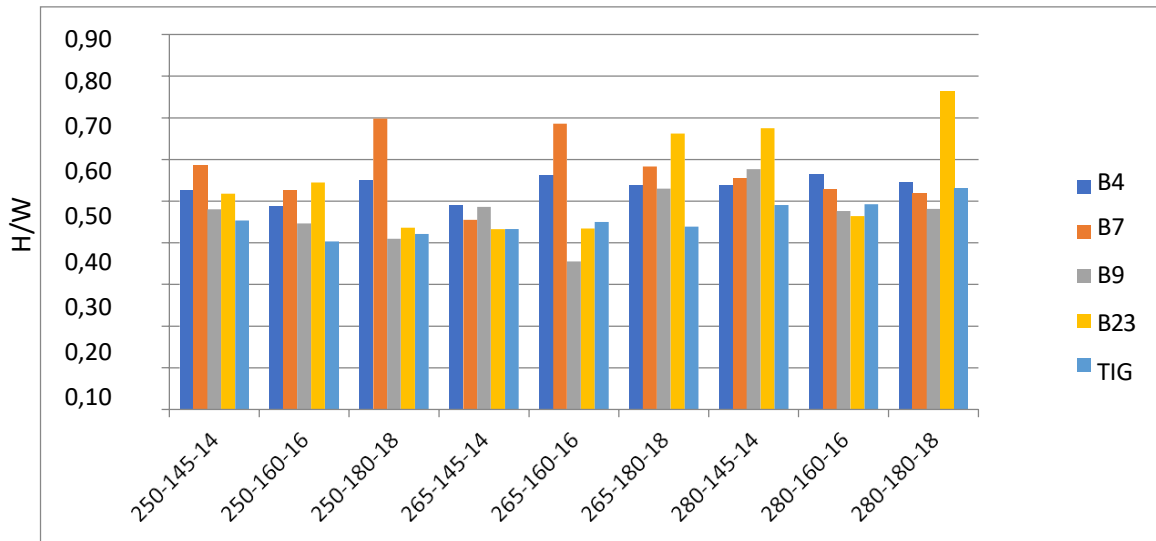
Aktif örtülerin farklı malzemelerde nasıl etki gösterdiğini anlamak için yapılan deneysel araştırmalar, kaynak dikişinin geometrisi, penetrasyon derinliği, genişlik/oran ilişkisi gibi kritik morfolojik özelliklerin detaylı analizini içermiştir. Bu analizler, aktif örtülerin kimyasal bileşimlerinin, kaynak sırasında nasıl bir reaksiyon verdiklerini ve bu reaksiyonların kaynak banyosunun yüzey gerilimi, Marangoni akışı ve metalin mikroyapısı üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik olmuştur.

4.2.1. Aktif örtü tipine bağlı olarak kaynak penetrasyon derinliği (H) ile kaynak dikişi genişliğinin (W) oranının (H/W) değişimi

Deneysel çalışmalara başlamadan önce, deneylerde kullanılacak uygun aktif örtü türlerini ve kaynak parametrelerini belirlemek amacıyla, farklı malzemeler üzerinde çeşitli aktif örtü bileşikleri kullanılarak A-TIG ve FB-TIG kaynak teknikleri uygulanmıştır. Bu öncü deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen kaynak dikişlerinin makroyapı ölçümleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı için en uygun aktif örtülerin BOM4 (Al_2O_3), BOM7 (MgO), BOM9 (Cr_2O_3) ve BOM23 ($SiO_2+Cr_2O_3$) olduğu belirlenmiştir.

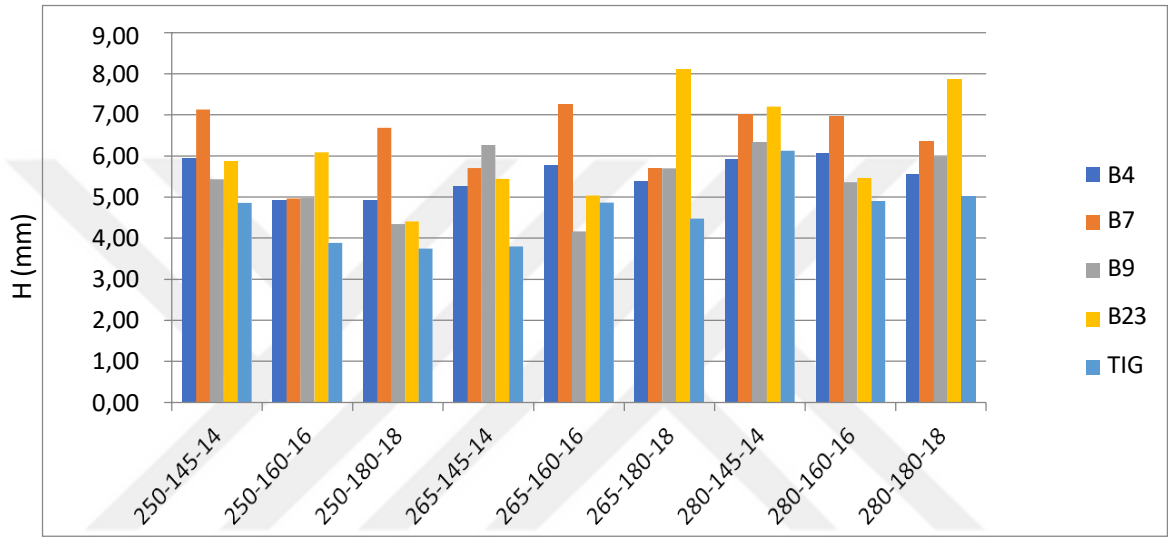
Kaynak işlemlerinde kullanılacak akım şiddetleri 250, 265 ve 280 A olarak seçilmiş, kaynak ilerleme hızları ise 145, 160 ve 180 mm/dk olarak belirlenmiştir. Koruyucu argon gazı debisi için 14, 16 ve 18 lt/dk değerleri tercih edilmiştir. Her bir deney setinde, dört farklı bileşikle gerçekleştirilen kaynak işlemlerinden elde edilen makroyapı ölçüm değerleri tek bir tabloda toplanarak analiz edilmiştir. Bu sistematik yaklaşım, her bir kaynak tekniği için ve her bir deney seti kapsamında, kullanılan aktif örtülerin birbirlerine olan üstünlüklerinin mukayese edilmesini mümkün kılmıştır. Böylece, en uygun aktif örtü ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi için kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır.

8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımına uygulanan A-TIG kaynak denemelerinde, dört farklı aktif örtünün etkinliği incelenmiştir. Deneyler, seçilen dört aktif örtünün her bir akım seviyesinde geleneksel TIG kaynağı ile karşılaştırıldığında, eşit veya daha yüksek H/W oranları elde ettiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, A-TIG yönteminin aktif örtülerle kombinasyonunun, geleneksel yöntemlere kıyasla kaynak dikişi geometrisinde iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Deneysel veriler, Şekil 4.34'te sunulmuş olup, bu grafikte farklı aktif örtülerin H/W oranlarına etkisi görsel olarak da izlenebilir. Denemelerde kullanılan aktif örtüler arasında BOM7, BOM23 ve BOM4, özellikle öne çıkmış ve diğer aktif örtülere göre daha yüksek performans göstermiştir. Bu örtüler, kaynak dikişinin yüksekliği ile genişliği arasındaki ideal oranı sağlama konusunda en başarılı sonuçları vermiştir.



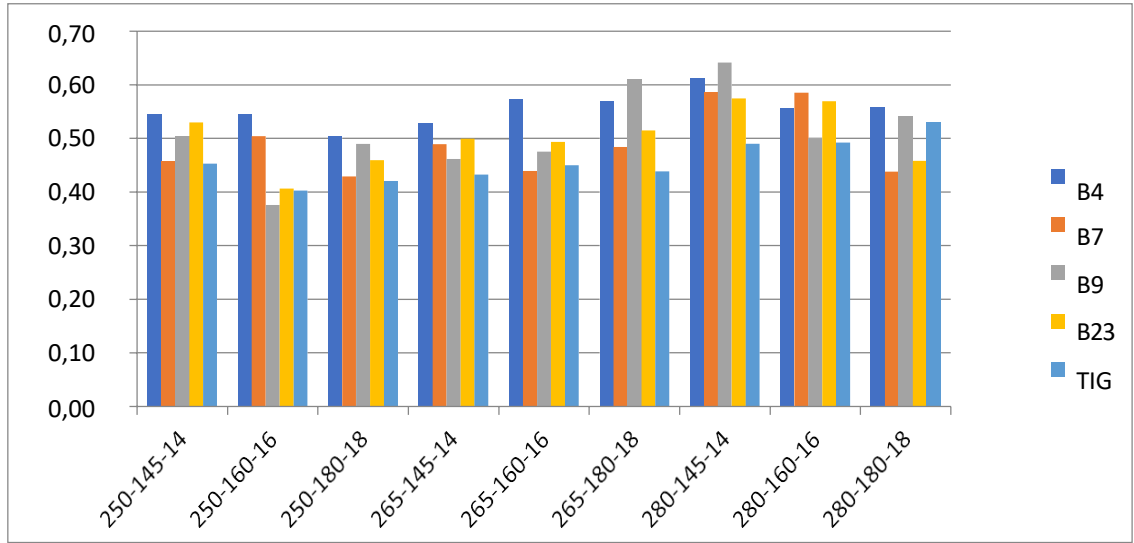
Şekil 4.34. Farklı Aktif Örtüler uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H/W oranları

Yapılan deneysel çalışmalarda, penetrasyon derinliği (H) bir kalite parametresi olarak ele alındığında, tüm aktif örtülerin, her bir akım seviyesinde geleneksel TIG kaynağına kıyasla daha yüksek penetrasyon derinliği sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, aktif örtülerin kaynak işlemi sırasında malzeme üzerinde etkili bir nüfuziyet artışı sağladığını göstermektedir. Şekil 4.35'te bu deneylere ait H değerleri detaylı bir şekilde sunulmuştur. Özellikle, 250 ve 265 A akım seviyelerinde BOM4, BOM7 ve BOM9 aktif örtüleri dikkat çekici sonuçlar vermiştir. Bu örtüler, belirtilen akım aralıklarında daha üstün penetrasyon derinlikleri elde edilmesine olanak tanımıştır. 265 ve 280 A seviyelerinde ise BOM23 aktif örtüsü, tam nüfuziyet sağlayarak diğer örtülerden ayrılmıştır.



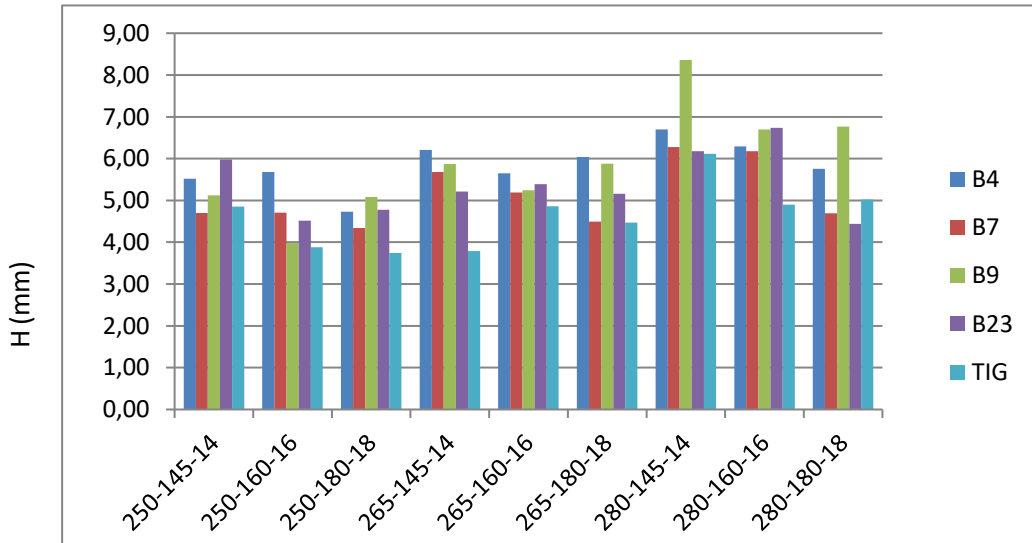
Şekil 4.35. Farklı Aktif Örtüler uygulanarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağı H değerleri

8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı üzerinde gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı deneylerinde, dört farklı aktif örtü kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, FB-TIG kaynağında kullanılan dört aktif örtünün her biriyle, her bir akım seviyesinde geleneksel TIG kaynağı ile elde edilen H/W oranına eşit veya bu oranın üzerinde bir performans sağlandığını ortaya koymuştur (Şekil 4.36). Bu sonuçlar, FB-TIG kaynağında aktif örtü kullanımının, kaynak dikişi geometrisinin optimizasyonunda önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle H/W oranı açısından en iyi performans gösteren aktif örtü, BOM7 olmuştur; bunu sırasıyla BOM23 ve BOM4 izlemiştir. Bu bulgular, BOM7'nin H/W oranını artırma kapasitesinin, özellikle yüksek kaliteli kaynak dikişi gerektiren uygulamalarda tercih edilmesi gereken bir aktif örtü olduğunu düşündürmektedir. Aktif örtülerin bu sıralı performansı, FB-TIG kaynağında doğru aktif örtü seçiminin kritik önem taşıdığını ve kaynak dikişinin yapısal bütünlüğü ile ilgili etkileri olabileceğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.36. Farklı Aktif Örtüler uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H/W oranları

Yapılan deneyler neticesinde, penetrasyon derinliği bir kalite parametresi olarak değerlendirildiğinde, FB-TIG kaynak yöntemi, kullanılan tüm aktif örtüler ile birlikte, her bir akım seviyesinde geleneksel TIG kaynağına kıyasla üstün performans sergilemiştir. Özellikle 265 A akım seviyesinde, BOM4 ve BOM7 aktif örtüler belirgin bir üstünlük göstermiştir. Benzer şekilde, 280 A akım seviyesinde, BOM9 ve BOM23 aktif örtüler öne çıkmış ve BOM9, tam nüfuziyet (%112) sağlayarak dikkate değer bir başarı elde etmiştir. Bu deneylerde elde edilen penetrasyon derinlikleri, Şekil 4.37'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.37. Farklı Aktif Örtüler uygulanarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynağı H değerleri

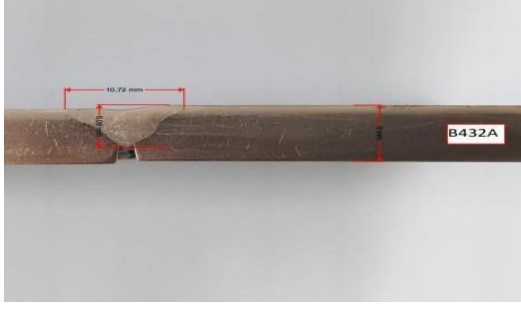
Deneyisel bulgular, FB-TIG kaynağının, farklı akım seviyelerinde çeşitli aktif örtülerin etkisini ortaya koymakta ve bu yöntemin penetrasyon derinliği ve şekil faktörü açısından geleneksel TIG kaynağından daha verimli olduğunu kanıtlamaktadır. Aktif örtülerin optimizasyonu ve doğru akım seviyesinin seçimi, FB-TIG kaynak sürecinde penetrasyon derinliğinin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle BOM9'un 280 amperde sağladığı tam nüfuziyet, bu yöntemin doğru koşullarda nasıl üstün sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Bu bulgular, FB-TIG kaynağının endüstriyel uygulamalarda penetrasyon derinliğini maksimize etmek için nasıl kullanılabileceğine dair önemli ipuçları sunmaktadır.

4.3. Aktif Örtü Bileşiklerinin Kaynak Dikişin Makroyapısı Üzerindeki Etkileri

Kaynak dikişinin makroyapısını, kaynak işleminin kalitesini ve güvenilirliğini değerlendirmek açısından büyük bir öneme sahiptir. Makroyapı, kaynak dikişinin iç yapısını, eriyik metalin dağılımını ve farklı malzemelerin birleşim bölgelerini makroskobik ölçekte gösterir. Bu analiz, kaynak sırasında oluşabilecek kusurların, örneğin çatlaklar, gözenekler, erime hataları ve metalik bağlanma sorunlarının tespit edilmesine olanak tanır. Kaynak dikişindeki bu tür kusurların varlığı, bağlantının mekanik dayanımını ve uzun vadeli performansını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, makroyapı analizi, kullanılan kaynak parametrelerinin ve dolgu metallerinin uygunluğunu değerlendirmeye yardımcı olur. Bu analiz, bu parametrelerin dikişin şekli, penetrasyon derinliği ve homojenliği üzerindeki etkilerini görsel olarak ortaya koyar. Bu bilgi, kaynak sürecinin optimize edilmesini ve daha tutarlı, yüksek kaliteli kaynak dikişlerinin elde edilmesini sağlar.

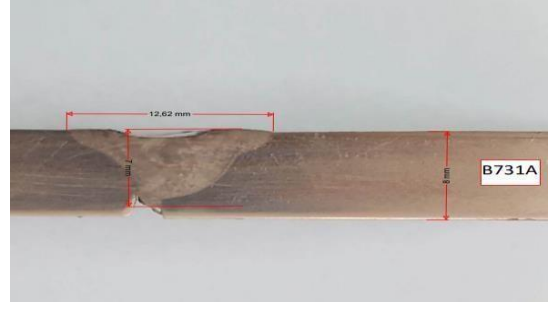
Her aktif örtünün en iyi performansı gösterdiği makroyapılar Şekil 4.38a, Şekil 4.38b, Şekil 4.39a ve Şekil 4.39b'de mukayeseli olarak gösterilmektedir.

BOM4 AKTİF ÖRTÜSÜ

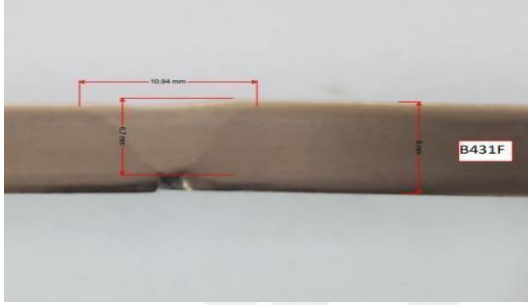


(a) A-TIG, H= 6,05 mm

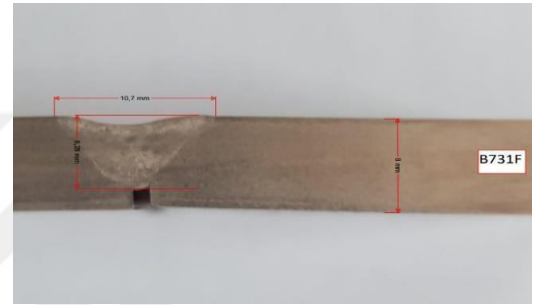
BOM7 AKTİF ÖRTÜSÜ



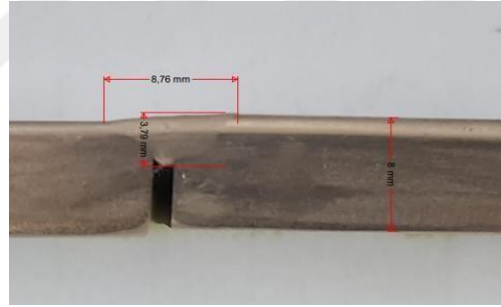
(a) A-TIG, H= 7,26 mm



(b) FB-TIG, H= 6,70 mm



(b) FB-TIG, H= 6,28 mm

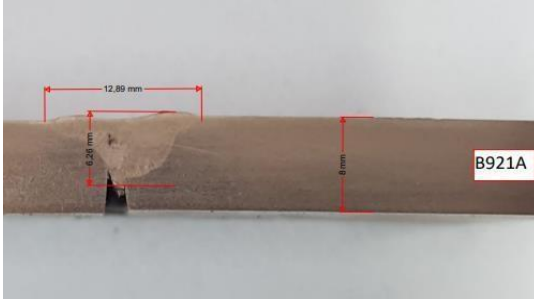


(c) TIG, H= 3,79 mm

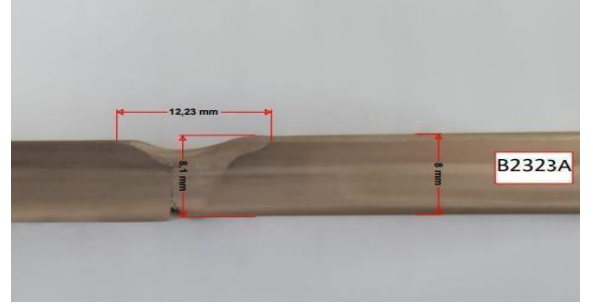
Şekil 4.38. Farklı Aktif Örtü ile elde edilen Makro yapılar

A-TIG (BOM4-BOM7), (b) FB-TIG (BOM4-BOM7), (c) TIG (Örtüsüz) ile Elde Edilen Makroyapılar ve H değerleri

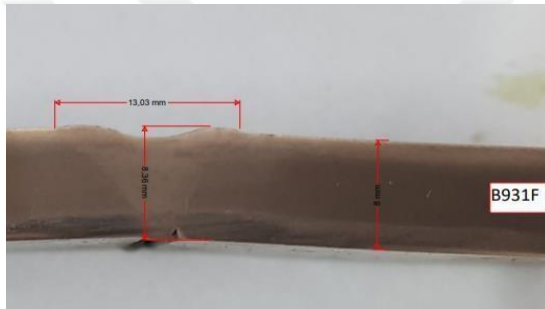
BOM9 AKTİF ÖRTÜSÜ



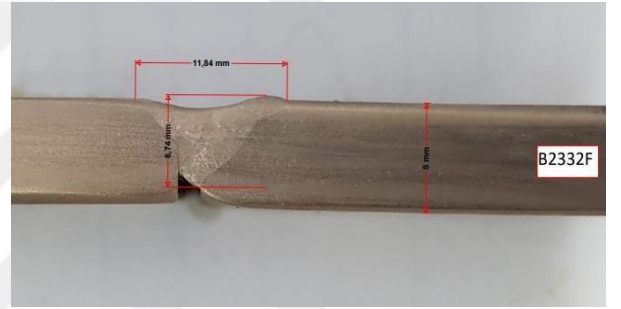
(a) A-TIG, H= 6,26 mm



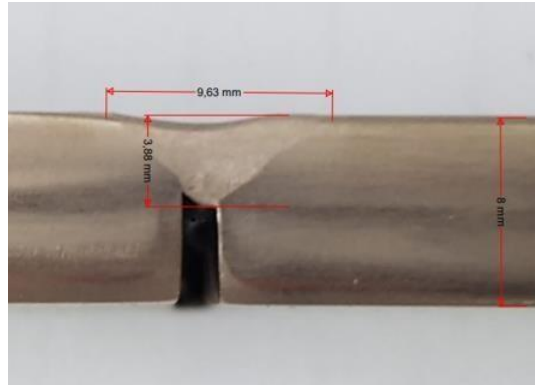
(a) A-TIG, H= 8,10 mm



(b) FB-TIG, H= 8,36 mm



(b) FB-TIG, H= 6,74 mm



(c) TIG, H= 3,88 mm

Şekil 4.39. Aktif Örtü ile elde edilen Makro yapılar

(a) A-TIG (BOM9-BOM23), (b) FB-TIG (BOM9-BOM23), (c) TIG (Örtüsüz) ile Elde Edilen En Makroyapılar ve H değerleri

Sonuç olarak, 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı üzerinde gerçekleştirilen TIG, FB-TIG ve A-TIG kaynak yöntemlerine yönelik farklı aktif örtüler ve değişken kaynak parametreleri ile elde edilen kaynak dikişlerinin kesitleri ile makro yapıların boyutsal olarak karşılaştırılması neticesinde, her bir aktif örtü için en uygun kaynak parametreleri ve elde edilen H penetrasyon

derinliği aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

BOM4 aktif örtüsü kullanılarak gerçekleştirilen FB-TIG kaynak yöntemi ile 280-145-14 parametre setinde elde edilen en iyi kaynak derinliği 6,70 mm olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç, aynı koşullar altında gerçekleştirilen geleneksel TIG kaynağı ile kıyaslandığında, FB-TIG kaynağında penetrasyon derinliğinin %177 oranında arttığını göstermektedir.

BOM7 aktif örtüsü ile gerçekleştirilen A-TIG kaynak yönteminde 265-160-16 parametre seti kullanıldığında, elde edilen en iyi kaynak derinliği 7,26 mm olmuştur. Bu durum, geleneksel TIG kaynağı ile karşılaştırıldığında, A-TIG kaynağında %150 oranında artan bir penetrasyon derinliği elde edildiğini ortaya koymaktadır.

BOM9 aktif örtüsü ile gerçekleştirilen FB-TIG kaynak yönteminde 280-145-14 parametre seti kullanıldığında, tam bir penetrasyon derinliği olan 8,36 mm elde edilmiştir. Bu sonuç, aynı koşullardaki geleneksel TIG kaynağına kıyasla, FB-TIG kaynağında penetrasyon derinliğinin %215 oranında arttığını göstermektedir.

BOM23 aktif örtüsü kullanılarak gerçekleştirilen A-TIG kaynak yönteminde 265-180-18 parametre seti kullanıldığında, tam penetrasyon derinliği olan 8,10 mm elde edilmiştir. Bu sonuç, aynı koşullardaki geleneksel TIG kaynağı ile karşılaştırıldığında, A-TIG kaynağında penetrasyon derinliğinin %181 oranında arttığını göstermektedir.

Bu bulgular, her bir aktif örtü ve kaynak yöntemi kombinasyonunun, spesifik parametreler altında optimize edildiğinde, geleneksel TIG kaynağına kıyasla belirgin lde daha yüksek penetrasyon derinlikleri sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu da, kaynak verimliliğini artırmak ve kaynak kalitesini iyileştirmek açısından bu yöntemlerin önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

4.4. Aktif rt Bileşiklerinin Kaynak Dikişinin Mikroyapısı zerindeki Etkileri

Kaynak dikişinin mikroyapısı, malzemenin performansı, dayanıklılığı ve güvenliği açısından büyük bir öneme sahiptir. Mikroyapı, malzemenin içyapısını, yani tane boyutunu, faz dağılımını, keltileri ve diğer mikroskobik özellikleri tanımlar. Bu yapılar, malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkiler ve dolayısıyla kaynak dikişinin mikroyapısını bilmek, malzemenin nihai özelliklerini anlamak ve kontrol etmek açısından kritik hale gelir. Mikroyapı malzemenin mekanik özelliklerini belirler. Örneğin, ince taneli bir mikroyapı, genellikle daha yüksek mukavemet, sertlik ve tokluk sağlar. Bu tür bir yapı, malzemenin çatlamaya karşı dirençli olmasını ve yük altında daha iyi performans göstermesini sağlar. Kaynak dikişinde mikroyapının nasıl oluştuğunu bilmek, bu özellikleri kontrol etme ve optimize etme imknı verir, böylece malzemenin kullanım ömrü ve güvenilirliği artırılabilir.

TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleri ile 90/10 CuNi alaşımı üzerinde gerçekleştirilen kaynak dikişlerinin mikroyapıları, haddeleme yöntemi ile üretilmiş ve tavlanmış olan alaşımın

mikroyapısı ile detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Orijinal alaşımın mikroyapısı, Şekil 4.40'ta sunulmaktadır. Bu mikroyapı incelendiğinde, mikroyapıdaki koyu renkli bölgelerde Demir (Fe) ve Nikel (Ni) konsantrasyonunun diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu yoğunluk farkları, özellikle bu elementlerin bakır matrisinde farklı çözünme eğilimlerinden kaynaklanmaktadır. Haddelenmiş alaşımda, dendritik tanelerin yanı sıra kolon (columnar) olarak adlandırılan uzunlamasına tane yapıları da gözlemlenmiştir. Dendritik yapılar, solidifikasyon sürecindeki soğuma hızının bir sonucu olarak ortaya çıkarken, kolon yapılar ise genellikle kontrollü bir yönlü katılaşma süreci ile ilişkilidir. Bu kolon yapıları, alaşımın üretim sürecindeki termal gradyanların ve soğuma koşullarının etkisiyle oluşmaktadır.

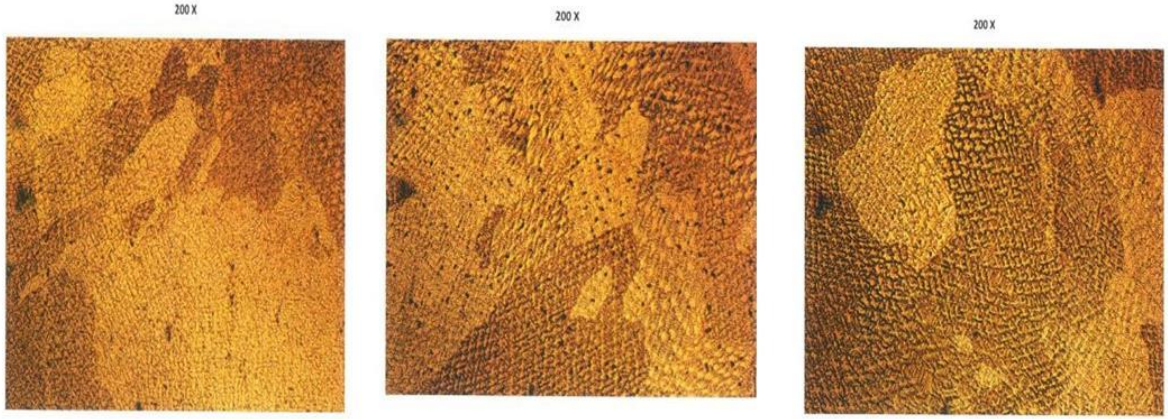


Şekil 4.40. 90/10 CuNi Haddelenmiş Sac Plakanın Orijinal Mikroyapısı (Copper- Nickel Welding and Fabrication)(2013)

4.4.1. Farklı Aktif Örtü ve Akım Şiddeti ile Elde Edilen Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları

90/10 CuNi alaşımında, BOM4 aktif örtünün ve 265 A akım şiddetinin uygulandığı A-TIG kaynağıyla elde edilen mikroyapı, Şekil 4.41(a)'da, FB-TIG kaynağıyla elde edilen mikroyapı Şekil 4.41(b)'de, geleneksel TIG kaynağıyla elde edilen mikroyapı ise Şekil 4.41(c)'de gösterilmiştir. Bu mikroyapıların karşılaştırılması sonucunda, TIG kaynağıyla elde edilen kaynak dikişinin en temiz ve düzgün mikroyapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunu sırasıyla FB-TIG ve A-TIG yöntemleriyle elde edilen mikroyapılar takip etmektedir.

Tane boyutları açısından yapılan incelemeler, en geniş enine tane boyutunun FB-TIG kaynağında elde edildiğini, bu yöntemi sırasıyla TIG ve A-TIG yöntemlerinin izlediğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, her bir kaynak yönteminin mikroyapı üzerinde farklı etkiler yarattığını göstermekte olup, kaynak yöntemi seçiminin, malzemenin nihai mekanik özellikleri üzerinde önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, TIG kaynağının daha homojen bir yapı sağladığı, FB-TIG kaynağının ise tane boyutu üzerinde belirgin bir etki yarattığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.41. BOM4 Aktif Örtü ve 265 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları x 200: (a) A-TIG, (b) FB-TIG ve (c) TIG

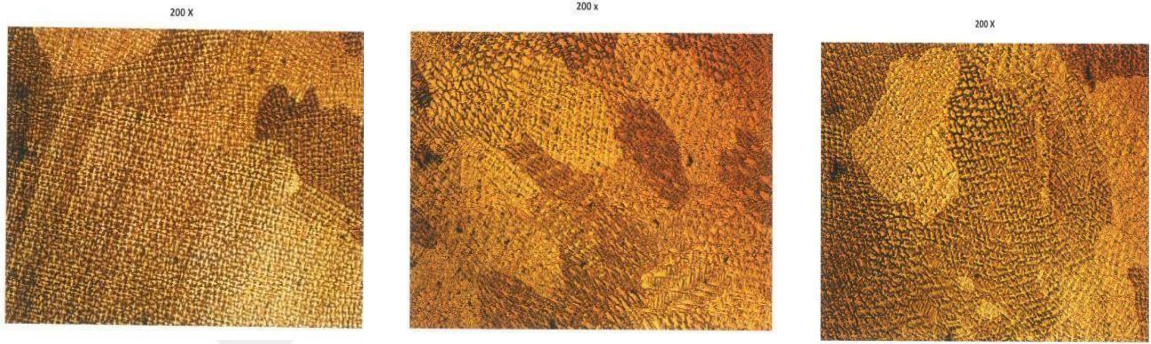
BOM4 aktif örtüsünün 280 A akım şiddetinde uygulandığı A-TIG kaynağı ile elde edilen mikroyapı (Şekil 4.42a), FB-TIG kaynağı (Şekil 4.42b) ve geleneksel TIG kaynağı ile elde edilen mikroyapı (Şekil 4.42c) karşılaştırıldığında, FB-TIG kaynağında daha ince bir tane büyüklüğünün meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tane büyüklüğünün, A-TIG ve geleneksel TIG kaynaklarına doğru sırasıyla artış gösterdiği, ilgili şekillerde net bir biçimde görülmektedir. Ayrıca, mikroyapı açısından incelendiğinde, geleneksel TIG kaynağının, diğer yöntemlerle elde edilen mikroyapılara kıyasla daha temiz bir yapı sergilediği anlaşılmaktadır. Bu durum, TIG kaynağının mikro yapısal bütünlüğünün, aktif örtü kullanımı ile yapılan kaynak yöntemlerine göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.42. BOM4 Aktif Örtü ve 280 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları x 200: (a) A-TIG, (b) FB-TIG ve (c) TIG

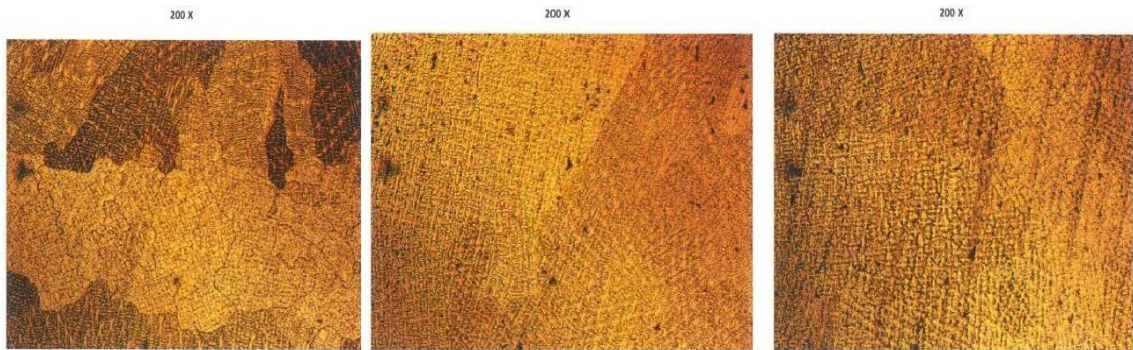
BOM9 aktif örtüsü ve 265 A akım şiddetinde gerçekleştirilen A-TIG kaynağının mikroyapısı, Şekil 4.43(a)'da sunulmuştur. Aynı şekilde, FB-TIG kaynağına ait mikroyapı Şekil 4.43(b)'de ve geleneksel TIG kaynağının mikroyapısı ise Şekil 4.43(c)'de gösterilmiştir. A-TIG ve geleneksel TIG kaynağı ile elde edilen kaynak dikişlerinin mikroyapısal incelemelerinde, tane yapılarının büyük ölçüde benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu benzerlik, her iki kaynak yöntemi ile üretilen dikişlerin, tane yapısının yönelimi ve morfolojisi açısından ortak özellikler taşıdığını

göstermektedir. A-TIG kaynağında kullanılan aktif örtü, kaynak bölgesinde belirli bir etki yaratmış olsa da, bu etkinin mikroyapı üzerinde belirgin bir farklılık oluşturmadığı anlaşılmaktadır. Buna karşılık, FB-TIG kaynağı ile elde edilen mikroyapı, diğer iki yönteme kıyasla belirgin bir farklılık sergilemektedir. FB-TIG kaynağında, kaynak dikişinin farklı yönlerde ve kolon (columnar) tane yapısında katılaştığı gözlemlenmiştir. Kolon yapısındaki bu katılaşma, özellikle ısı akışının yönelimi ve katılaşma hızının farklılığından kaynaklanabilir. FB-TIG yönteminin karakteristik olarak daha odaklanmış bir enerji girişi ve farklı bir termal profil sunması, bu mikroyapısal farklılığı açıklamaktadır.



Şekil 4.43. BOM9 Aktif Örtü ve 265 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları x 200: (a) A-TIG, (b) FB-TIG ve (c) TIG

BOM9 aktif örtüsü ve 280 A akım şiddeti kullanılarak gerçekleştirilen A-TIG kaynağına ait mikroyapı, Şekil 4.44(a)'da, FB-TIG kaynağının mikroyapısı ise Şekil 4.44(b)'de gösterilmiştir. Ayrıca, geleneksel TIG kaynağının mikroyapısı da Şekil 4.44(c)'de sunulmaktadır. Bu karşılaştırmalı analizde, A-TIG ve geleneksel TIG kaynak dikişlerinin kolon tipi tane yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, FB-TIG kaynağının mikroyapısının daha homojen ve ince taneli bir yapıya sahip olduğu ve aynı zamanda diğer yöntemlere kıyasla daha temiz bir mikroyapı sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 4.44. BOM9 Aktif Örtü ve 280 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Mikroyapıları x 200: (a) A-TIG, (b) FB-TIG ve (c) TIG

TIG ve FB-TIG kaynak dikişlerinde mikroyapısal analizler sonucunda herhangi bir empürite (kirlilik) gözlemlenmemiştir. Ancak, A-TIG yöntemi ile elde edilen kaynak dikişlerinde, mikroyapı içerisinde bir miktar empürite tespit edilmiştir. Bu metal olmayan segregasyonların, kullanılan aktif örtünün yüzeye uygulanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aktif örtü, kaynak işlemi sırasında yüzey geriliminde değişiklikler yaratmakta ve bu durum, empüritelerin mikroyapıda birikmesine yol açmaktadır.

Yapılan deneyler sonucunda, incelenen kaynak dikişlerinin yapılarında hiçbir çatlak, gözenek veya sıcak yırtılma izine rastlanmamıştır. Bu bulgu, her üç kaynak yöntemiyle elde edilen dikişlerin genel olarak sağlam ve dayanıklı olduğunu göstermektedir. Özellikle, A-TIG yöntemiyle ortaya çıkan empüritelerin, kaynak dikişinin genel bütünlüğü üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı, ancak mikroyapıda belirli bir derecede heterojenlik oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, aktif örtünün kaynak dikişine katkıları kadar, potansiyel dezavantajlarını da ortaya koymaktadır. Ancak, makro yapıda herhangi bir yapısal zayıflığın tespit edilmemesi, bu empüritelerin dikişin mekanik performansını olumsuz yönde etkilemediğini göstermektedir. Dolayısıyla, A-TIG kaynağında mikroyapıdaki empüriteler, dikkatle yönetilmesi gereken bir unsur olarak değerlendirilmeli, ancak genel kaynak kalitesine etkisi sınırlı olduğu için işlem güvenliği açısından endişe yaratmamaktadır.

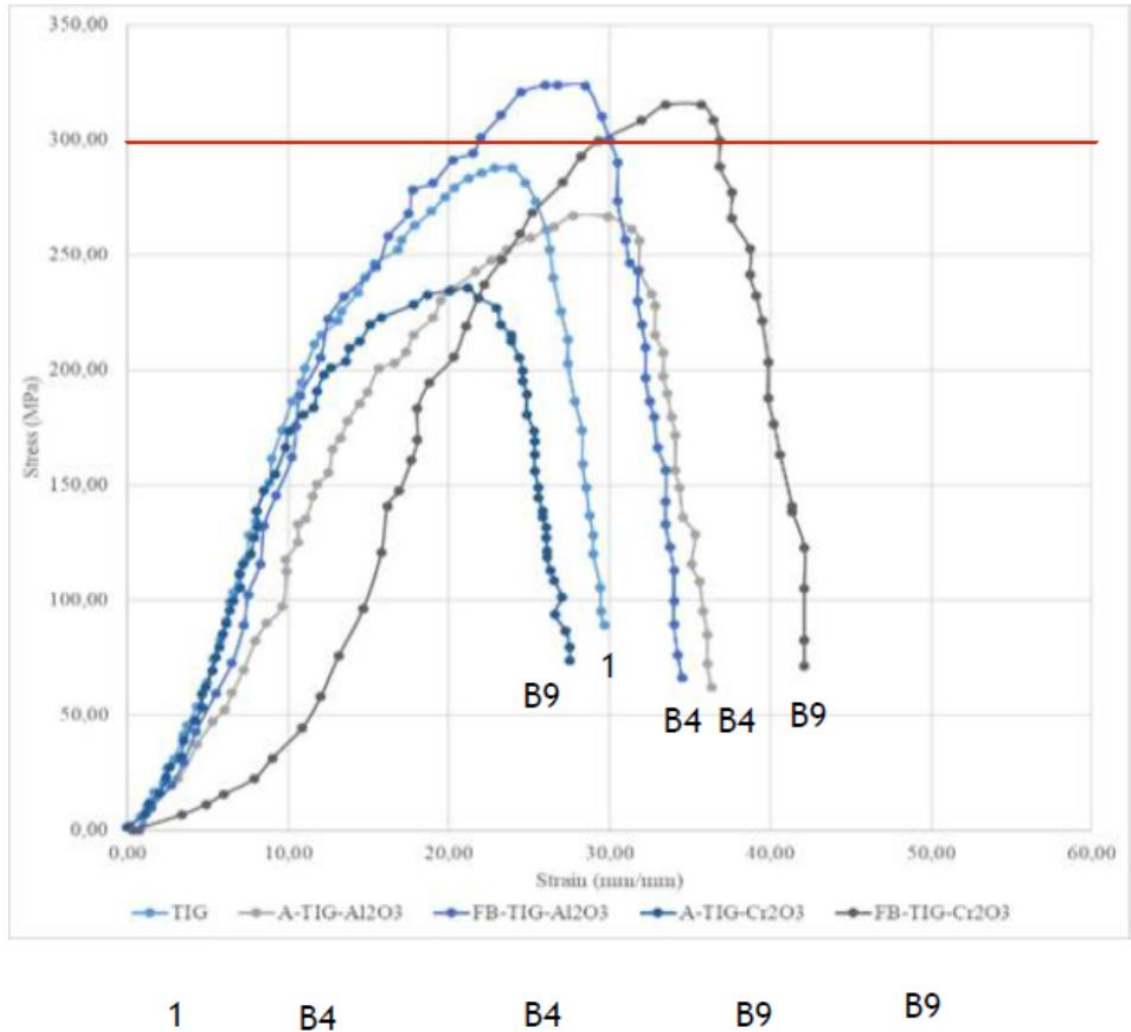
4.5. Aktif Örtü Bileşiklerinin Kaynak Dikişinin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Kaynak dikişinin mekanik özellikleri, bir kaynağın performansını, güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Bu özellikler, bir yapı veya bileşenin maruz kalacağı çeşitli yükleri taşıma kapasitesini, deformasyon davranışını ve farklı çalışma koşullarına karşı direncini doğrudan etkiler. Kaynak dikişinin çekme dayanımı, akma dayanımı ve kesme dayanımı gibi özellikleri, birleştirilen malzemeler arasında güvenli bir şekilde yük transferini sağlar. Eğer bu mekanik özellikler yetersizse, kaynak dikişi yapısal zayıflık noktaları oluşturabilir ve bu da yapının bütünlüğünü tehlikeye atabilir. Kaynak dikişinin tokluk ve süneklik gibi mekanik özellikleri, çatlak oluşumunu ve bu çatlakların yayılmasını önlemek açısından kritik öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, kaynak dikişinin korozyon ve yorgunluk dayanımı, dikişin mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Zayıf bir kaynak dikişi, korozyon etkilerine daha duyarlı olabilir ve zamanla yapısal bütünlüğün bozulmasına neden olabilir.

Bu çalışmada, 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı üzerinde gerçekleştirilen A-TIG ve FB-TIG kaynaklarının çeşitli mekanik özellikleri, geleneksel TIG kaynağıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kaynak işlemleri, 265 ve 280 A akım şiddetlerinde gerçekleştirilmiş ve farklı aktif örtü bileşikleri kullanılmıştır. Araştırmada, her bir kaynak yönteminin çekme dayanımı, mikro sertlik ve sağlamlık gibi mekanik özellikleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle A-TIG ve FB-TIG yöntemlerinin geleneksel TIG kaynağına kıyasla hangi mekanik avantajlar sunduğunu ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir.

4.5.1. Çekme ve Akma Mukavemeti / 265 Amp

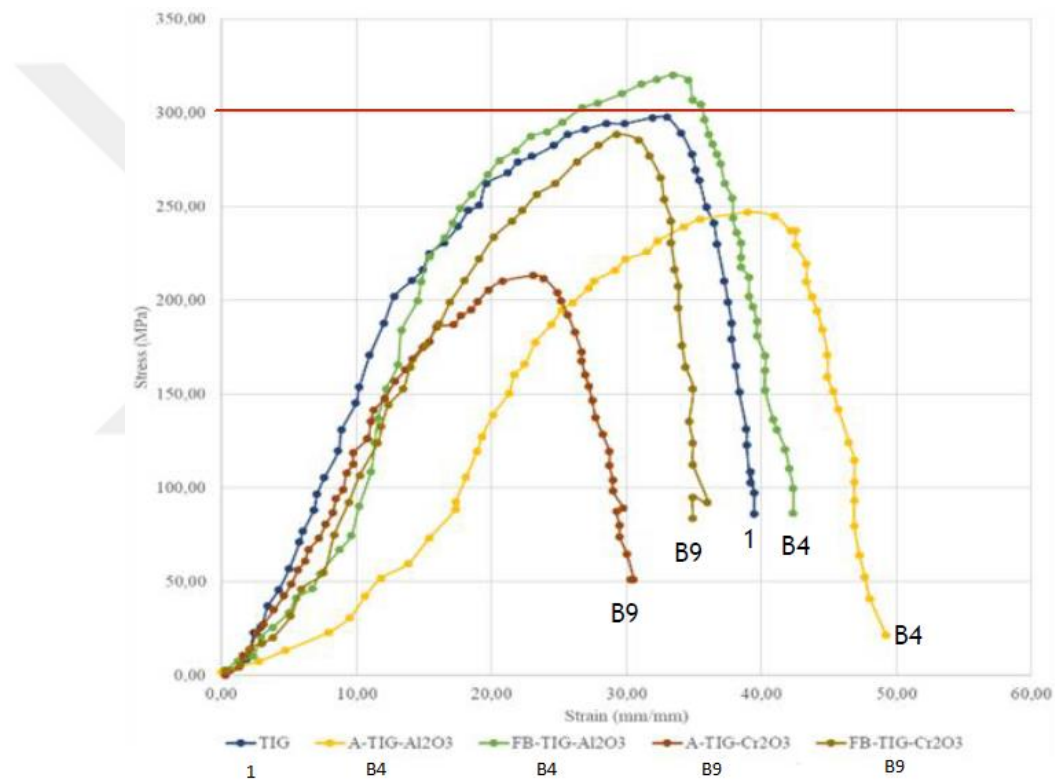
Her kaynak yöntemi ve kaynak proses seti için üçer adet çekme çubuğu numunesi hazırlanmış ve deneyler, TÜV SILA firmasının akredite laboratuvarında bulunan kalibrasyonlu INSTRON 5989 çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımının 265 A akım şiddetinde yapılan TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak işlemlerinden elde edilen çekme test numuneleri üzerinde yapılan deneylerin sonuçları, Şekil 4.45'te sunulmuştur. Elde edilen bulgular, FB-TIG kaynağının, özellikle Al_2O_3 ve Cr_2O_3 içerikli aktif örtülerle (BOM4 ve BOM9), mekanik özellikler açısından hem A-TIG hem de geleneksel TIG kaynağından daha üstün olduğunu göstermiştir. Çekme dayanımı ve akma mukavemeti bakımından en iyi sonuçlar sırasıyla FB-TIG, TIG ve A-TIG yöntemleri ile elde edilmiştir. 90/10 Cu-Ni alaşımının kopma dayanımı olan 300Mpa referans olarak alındığında, 265Amperde yapılan FB TIG kaynak yönteminin BOM4 ve BOM9 kullanıldığı koşullarda kopma mukavemetinin %10 civarında daha yüksek değer elde edilebildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.45. BOM4, BOM9 Aktif Örtüler ve 265 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Çekme-Uzama Değişimi

4.5.2. Çekme ve Akma Mukavemeti / 280 Amp

280 A akım şiddetinde gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleriyle elde edilen kaynak dikişlerine ait çekme test numunelerinin sonuçları, Şekil 4.46'da sunulmaktadır. FB-TIG yöntemiyle gerçekleştirilen kaynak dikişlerinde, özellikle BOM4 aktif örtüsünün kullanıldığı durumda, 280 A akım şiddetinde diğer tüm alternatifler arasında en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği belirlenmiştir. Mekanik özellikler açısından sıralandığında, FB-TIG/BOM4 yöntemini sırasıyla geleneksel TIG, FB-TIG/BOM9, A-TIG/BOM4 ve A-TIG/BOM9 yöntemleri takip etmektedir. 90/10 Cu-Ni alaşımının kopma dayanımı olan 300Mpa referans olarak alındığında, 280Amperde yapılan FB TIG kaynak yönteminin BOM4 kullanıldığı koşullarda kopma mukavemetinin % 8 civarında daha yüksek değer elde edilebildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.46. BOM4, BOM9 Aktif Örtüler ve 280 A Akım Şiddetinde Gerçekleştirilmiş Kaynak Dikişlerinin Çekme-Uzama Değişimi

Her iki farklı akım şiddeti (265 ve 280 A) ile gerçekleştirilen kaynak işlemleri sonucunda elde edilen çekme ve akma mukavemetlerinin oldukça yakın değerler gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, uygulanan akım şiddetinin, kaynaklı yapıların mekanik özellikleri üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ve bu özelliklerin iyileştirilmesinde, kullanılan kaynak tekniği ile aktif örtü cinsinin daha belirleyici faktörler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, kaynak sürecinde aktif örtü ve teknik seçiminin, kaynak dikişinin nihai mekanik özellikleri üzerinde kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır.

Özellikle, kullanılan aktif örtünün cinsi ve uygulanan kaynak tekniği, kaynak dikişinin homojenliği, dayanıklılığı ve mekanik mukavemeti üzerinde belirleyici olmaktadır.

FB-TIG yönteminin, özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilmesi gerektiğini vurgulayan bu bulgular, FB-TIG kaynağında kullanılan aktif örtülerin, kaynak dikişinin homojenliği ve mekanik dayanımı üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymaktadır. FB-TIG yöntemi, geleneksel TIG ve A-TIG kaynaklarına kıyasla daha üstün performans sergileyerek, yüksek mukavemetli ve dayanıklı kaynak dikişleri elde edilmesinde önemli bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Bu yöntemin, özellikle endüstriyel uygulamalarda, yüksek mukavemet gerektiren bileşenlerin birleştirilmesinde sağladığı avantajlar, FB-TIG kaynağını, geleneksel yöntemlerin ötesinde bir seçenek haline getirmektedir. FB-TIG kaynağı, Bakır ve Nikel bazlı alaşımlar gibi zorlu malzemelerin kaynağında daha az deformasyon ve daha yüksek mekanik dayanım sunarak, endüstriyel üretimde kaliteyi artıran bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Ayrıca, FB-TIG yöntemiyle elde edilen kaynak dikişlerinin mekanik mukavemet ve homojenlik açısından üstün özellikler sergilemesi, bu yöntemin gelişmiş mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde benimsenebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, kaynaklı yapıların tasarım ve üretiminde, FB-TIG yönteminin sunduğu bu avantajlar göz önünde bulundurulmalı ve uygulama alanlarına uygun olarak tercih edilmelidir. Bu bağlamda, endüstride yaygın olarak kullanılan nikel bazlı alaşımlar gibi malzemelerin kaynağında, FB-TIG yöntemi, kalite ve güvenilirlik açısından daha üstün bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

4.5.3. Kaynak Dikişindeki ve Ana Malzemedeki Mikrosertlik Dağılımı

Kaynak dikişindeki ve ana malzemedeki mikrosertlik dağılımı, kaynaklı yapıların performansı ve güvenilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Mikrosertlik dağılımı, malzemenin kaynak bölgesinde maruz kaldığı termal döngüler ve mekanik işlemler sonucunda oluşan mikroyapısal değişikliklerin bir göstergesidir ve bu değişiklikler, kaynak dikişi, ısı tesir altında kalan bölge (ITAB) ve ana malzemenin mekanik özelliklerini anlamak açısından büyük önem taşır.

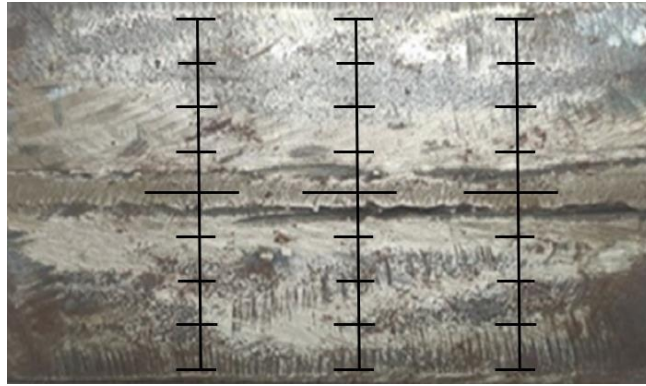
Mikrosertlik dağılımı, malzemenin farklı bölgelerinde oluşan sertlik farklarını ortaya koyar. Kaynak işlemi sırasında, kaynak dikişi, ITAB ve ana malzeme farklı sıcaklıklara maruz kaldığı için bu bölgelerde sertlik değişiklikleri meydana gelir. Mikrosertlik dağılımı, bu değişikliklerin yapısal bütünlük üzerindeki etkilerini anlamak için kullanılır. Düşük sertlik, malzemenin lokal olarak zayıflamasına ve çatlakların oluşma riskinin artmasına yol açabilirken, yüksek sertlik, malzemenin kırılgan hale gelmesine ve çatlama olasılığının artmasına neden olabilir. Bu bağlamda, mikrosertlik dağılımı, kaynaklı birleşimlerin mekanik performansını doğrudan etkiler. Mikrosertlik ölçümleri ayrıca, kaynak bölgesinde meydana gelen mikroyapısal değişiklikleri belirlemede önemli bir araçtır.

Farklı mikroyapılar, farklı sertlik değerlerine sahiptir, bu nedenle mikrosertlik dağılımı, kaynak işlemi sırasında malzemede hangi mikroyapıların oluştuğunu ve bu yapıların sertlik üzerindeki etkisini anlamaya yardımcı olur.

Mikrosertlik dağılımı, aynı zamanda kaynaklı yapıların yorulma dayanımını da etkiler. Kaynak dikişinde ve ITAB'de sertlik farkları, yorulma yüklerine maruz kaldığında gerilme yığılmalarına neden olabilir. Bu durum, mikro çatlakların oluşumunu hızlandırarak malzemenin servis ömrünü kısaltabilir. Homojen bir mikrosertlik dağılımı ise bu tür gerilme yığılmalarını minimize eder ve malzemenin uzun ömürlü olmasını sağlar.

Mikrosertlik dağılımı ayrıca, kaynak işleminin kalitesini kontrol etmek ve süreci optimize etmek için de kullanılır. Mikrosertlik profilleri, kaynak işleminin parametrelerinin (örneğin, kaynak hızı, ısı girdisi, soğuma hızı) doğru ayarlanıp ayarlanmadığını gösterebilir. İdeal bir mikrosertlik dağılımı, kaynak sürecinin doğru bir şekilde yürütüldüğünü ve kaynaklı birleşimin mekanik özelliklerinin optimum seviyede olduğunu gösterir. Bu nedenlerle, kaynak dikişindeki ve ana malzemedeki mikrosertlik dağılımı, kaynaklı yapıların güvenliği, dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından dikkatle incelenmeli ve kontrol edilmelidir.

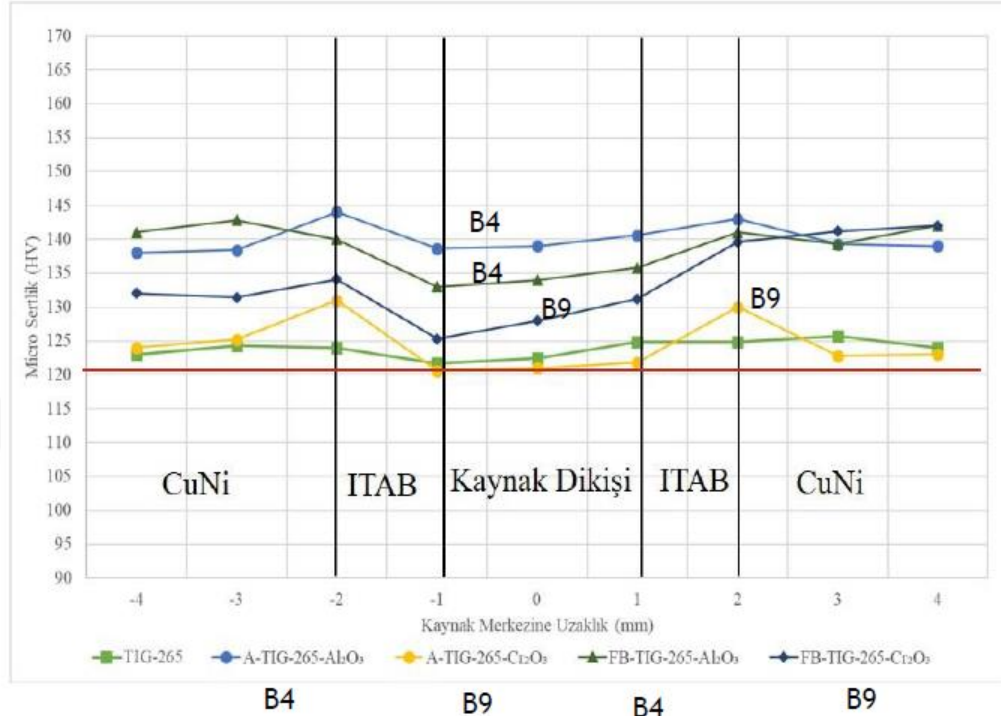
8 mm kalınlığında 90/10 CuNi alaşımına BOM4- Al_2O_3 ve BOM9- Cr_2O_3 aktif örtü kullanılarak TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynakta teknikleri uygulanmıştır. Sertlik Ölçümleri, Şekil 4.47'de gösterildiği gibi kaynak yüzeyindeki test çizgileri boyunca yapılmıştır. Kaynak boyunca uzunlamasına yönde sertlik ölçümleri, kaynağın merkez hattının her iki tarafında düzenli olarak 2 mm aralıklarla sistematik olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir bölgede üç farklı noktaya sertlik testi uygulanmış ve Vickers sertlik değerleri kaydedilmiştir.



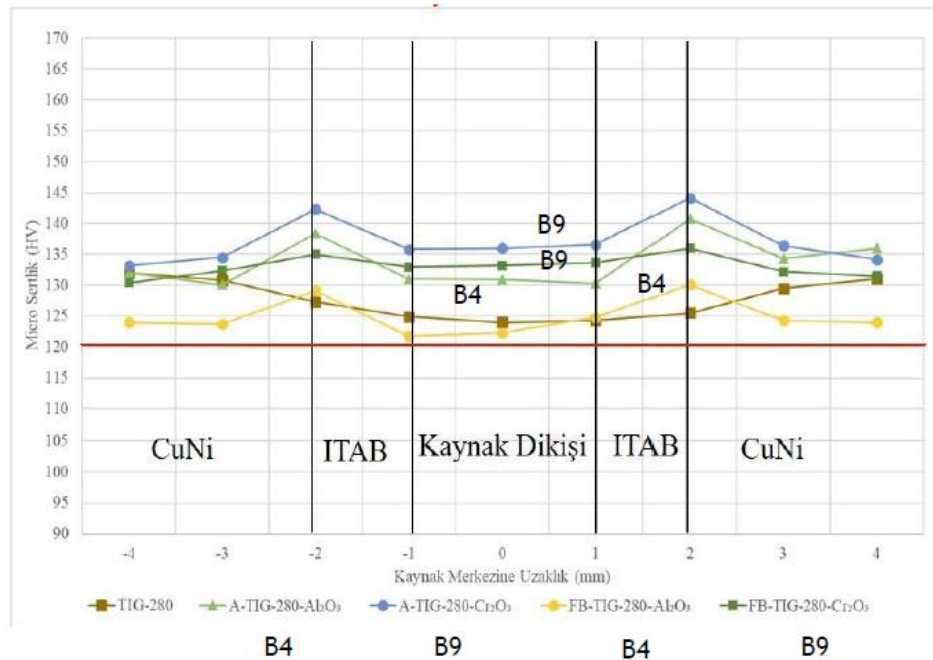
Şekil 4.47. Kaynak yönü boyunca sertlik ölçümü noktaları

CuNi alaşım kaynaklarının 265 ve 280 A akım seviyelerine karşılık gelen Vickers sertlik değişim profilleri, Şekil 4.48 ve 4.49'de gösterilmiştir. Bu şekiller, BOM4 ve BOM9 aktif örtü kullanılarak yapılan kaynak tekniklerinde sertlikteki değişiklikleri göstermektedir. 90/10 Cu-Ni alaşımının sertlik değeri olan 120 HV referans olarak alındığında, 265Amperde yapılan FB TIG ve A TIG kaynak yönteminin BOM4 kullanıldığı koşullarda kaynak dikişi ve ITAB bölgesindeki ve

sertlik ortalama %15 civarında daha yüksek değer elde edilebildiği gözlemlenmiştir. 280Amperde yapılan FB TIG ve A TIG kaynak yönteminin BOM9 kullanıldığı koşullarda kaynak dikişi ve ITAB bölgesindeki ve sertlik ortalama %15 civarında daha yüksek değer elde edilebildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.48. CuNi alaşımının 265 A için TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynaklarının sertlik profilleri



Şekil 4.49. CuNi alaşımının 280 A için TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynaklarının sertlik profilleri

A-TIG ve FB-TIG kaynak tekniklerinde Al_2O_3 ve Cr_2O_3 aktif örtülerinin kullanımının, aktif örtü katkısı olmadan gerçekleştirilen kaynak işlemleriyle karşılaştırıldığında, kaynakların maksimum sertliğinde bir artış sağladığını ortaya koymuştur. Özellikle 265 A akım seviyesinde kaynak yapıldığında, hem A-TIG hem de FB-TIG yöntemlerinde Al_2O_3 aktif örtüsünün uygulanması, kaynak dikişinde belirgin sertlik dağılımını sağlamıştır. Bu durum, Al_2O_3 'ün kaynak sırasında oluşan ısı döngüleri üzerinde etkili olduğunu ve bu etkileşimin kaynak dikişi boyunca daha homojen bir sertlik dağılımı elde edilmesini sağladığını göstermektedir. Buna karşılık, 280 A akım seviyesinde gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde, A-TIG ve FB-TIG tekniklerinde Cr_2O_3 aktif örtüsünün kullanımı, kaynak dikişinde yüksek sertlik dağılımını elde etmek için en uygun seçenek olarak öne çıkmıştır. Cr_2O_3 aktif örtüsü, yüksek akım seviyelerinde, özellikle kaynak dikişi ve ITAB boyunca daha yüksek bir sertlik dağılımı sağlayarak, malzemenin mekanik dayanımını artırmıştır.

Araştırmanın sonunda, kaynak dikişi boyunca sertlik değişim eğrisinin genel olarak benzer bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, ana metal, ITAB ve erime bölgesi (fusion zone) arasında sertlik değerlerinde belirli ölçüde farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, her bir bölgedeki mikroyapısal dönüşümlerin ve termal etkilerin bir sonucu olarak değerlendirilmiştir. Aktif örtülerin kullanımı, özellikle ITAB'de daha homojen bir yapı ve sertlik profili sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir, bu da kaynak işleminin genel performansı ve güvenilirliği açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.

Bu sonuçlar, A-TIG ve FB-TIG kaynak süreçlerinde doğru aktif örtü seçimlerinin, özellikle belirli akım seviyelerinde, kaynak dikişi ve çevresindeki bölgenin mekanik özelliklerini iyileştirmede kritik bir rol oynayabileceğini vurgulamaktadır.

4.5.4. Kullanılan Aktif Örtülerin Kaynaklı Parçaların Yapısal Bütünlüğü Üzerine Etkisi

Kaynak dikişlerinin hem dış görünüşünün hem de içyapısındaki süreksizliklerin etkin bir şekilde kontrol edilmesi amacıyla, çeşitli tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda, görsel muayene, girici boya (dye-penetration) testi ve radyografik testler tercih edilmiştir.

Görsel ve Girici Boya / Boya-penetrasyon Testleri

Görsel muayene, kaynak dikişinin yüzey kalitesini değerlendirmek ve yüzeydeki olası kusurları tespit etmek amacıyla yapılan ilk adımdır. Bu yöntem, yüzeydeki çatlaklar, gözeneklilikler, yanma izleri veya diğer yüzeysel kusurların belirlenmesine olanak tanır ve kaynak dikişinin genel kalitesi hakkında ilk izlenimleri sunar.

Boya-penetrasyon testi, özellikle yüzeydeki mikroskobik çatlakların ve diğer yüzey süreksizliklerinin tespiti için kullanılır. Bu test, boya penetrantının yüzey çatlaklarına nüfuz etmesi ve ardından geliştirici bir madde yardımıyla bu kusurların belirgin hale getirilmesi prensibine dayanır. Bu sayede, çıplak gözle görülmesi zor olan ince çatlaklar ve yüzeysel hatalar tespit edilebilir. BOM4 ve BOM9 aktif örtülerinin farklı akım şiddetlerinde kullanıldığı A-TIG, FB-TIG ve

geleneksel TIG kaynak yöntemleriyle elde edilen test numuneleri üzerinde, tahribatlı testler uygulanmadan önce Boya-penetrasyon testi gerçekleştirilmiştir. Bu testten önce, tüm numunelerin kaynak dikişleri dikkatlice gözle incelenmiş ve herhangi bir görsel kusur olup olmadığı kontrol edilmiştir. Yapılan görsel inceleme ve Boya-penetrasyon testi sonucunda, numunelerde gözenek, çatlak, undercut gibi herhangi bir kusura rastlanmamıştır. Şekil 4.50'de, Boya-penetrasyon testi uygulanmış bir test numunesi görülmektedir. Elde edilen bulgular, geleneksel TIG kaynağında kaynak dikişi yüzeyinin dış bükey formda olduğunu, buna karşın A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemlerinde kaynak dikişlerinin iç bükey, yani çukur şeklinde oluştuğunu göstermektedir.

Bu durum, kullanılan aktif örtülerin ve akım şiddetinin kaynak dikişinin geometrisi üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Aktif örtüler, özellikle A-TIG ve FB-TIG yöntemlerinde, Marangoni akışını değiştirerek kaynak banyosunun şeklini etkilemiş ve bu sayede kaynak dikişi formunun iç bükey olmasına yol açmıştır. Geleneksel TIG kaynağında ise bu etki gözlenmemiştir, bu da kaynak dikişinin daha tipik dış bükey bir form almasına neden olmuştur. Bu bulgular, farklı kaynak yöntemlerinin ve kullanılan aktif örtülerin, kaynak kalitesini ve kaynak dikişi geometrisini nasıl etkileyebileceğini göstermektedir. Bu kapsamda yapılan görsel ve Boya-penetrasyon testleri, kaynak dikişlerinin yüzey kalitesinin ve yapısal bütünlüğünün sağlandığını doğrulamış, bu sayede tahribatlı testler öncesinde numunelerin uygunluğunu kanıtlamıştır.



Şekil 4.50. Boya-penetrasyon Uygulanan Kaynak Dikişi Görseli

Radyografi (GAMA-Ray) Testleri

Radyografik test, kaynak dikişinin iç yapısındaki süreksizliklerin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. X-ışınları veya gama ışınları kullanılarak yapılan bu test, kaynak dikişinin iç yapısındaki gözenekler, çatlaklar, cüruf kalıntıları veya birleşme hataları gibi kusurların tespit edilmesine olanak sağlar.

265 ve 280 A akım şiddetlerinde gerçekleştirilen TIG, A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleriyle elde edilen kaynak dikişlerinin geometrisi ve mekanik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla hazırlanan test numuneleri, tahribatlı testlere tabi tutulmadan önce Gama-Ray yöntemi

(İridyum-IR 192 izotopu kullanılarak) ile incelenmiştir. Bu inceleme, numunelerin içyapısında süreksizliklerin olup olmadığını tespit etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.51'de Gama-Ray yöntemi kullanılarak çekilmiş bir film örneği gösterilmektedir. Her üç kaynak tekniğiyle kaynaklanmış tüm test numuneleri üzerinde uygulanan Gama-Ray (Radyografik Test, RT) sonuçlarına göre, kaynak dikişlerinde herhangi bir gözenek, çatlak veya benzeri kaynak kusuru tespit edilmemiştir. Bu bulgu, kullanılan kaynak yöntemlerinin her birinin numunelerde kalite standartlarını sağladığını ve içyapı bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, yapılan Gama-Ray testleri, kaynak dikişlerinin içyapısal kalitesinin tatmin edici olduğunu ve daha ileri tahribatlı testlerin güvenle uygulanabileceğini doğrulamıştır.



Şekil 4.51. Kaynak Dikişinin Radyografik Film Görseli



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Konvansiyonel TIG kaynak yönteminde karşılaşılan düşük penetrasyon ve buna bağlı olarak düşük iş gücü verimliliği sorununu aşmak amacıyla geliştirilen A-TIG ve FB-TIG kaynak tekniklerinin, 90/10 CuNi alaşımında da beklentileri karşılayabildiği, deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. TIG kaynağında elde edilen penetrasyon derinliğine kıyasla, A-TIG ve FB-TIG teknikleri ile daha derin bir penetrasyon sağlanmış ve bu da tek bir tek paso ve kaynak ağzı açılmaksızın tam penetrasyon elde edilmesine olanak vermiştir. Bu sonuç, çalışmanın başarısını teyit eden önemli bir bulgudur.

A-TIG ve FB-TIG kaynak yöntemleriyle, aynı uzunluktaki kaynak dikişinin, TIG yöntemine kıyasla harcanan zamanın yarısından daha kısa bir sürede tamamlanabilmesi, maliyet ve zaman açısından önemli bir rekabet avantajı sağlamaktadır. Başka bir ifadeyle, kaynak ağzı açılması ve en az iki paso gerektiren konvansiyonel TIG kaynağına kıyasla, A-TIG veya FB-TIG teknikleri ile kaynak ağzı açılmaksızın, tek paso ile ve çok daha kısa bir sürede kaynak işleminin tamamlanabilmesi, verimlilikte muazzam bir artış ve maliyetlerde belirgin bir tasarruf sağlamaktadır. Deneysel çalışmalarda, araştırma metodolojisi olarak "Tümden Gelim" yöntemi uygulanmıştır. Çalışmanın başlangıç aşamalarında, çok sayıda aktif örtü, farklı malzeme türleri ve kalınlıkları üzerinde A-TIG ve FB-TIG teknikleri ile denenmiştir. Nihai aşamada ise, hedef malzeme olan 8 mm kalınlığındaki 90/10 CuNi alaşımı için en uygun aktif örtülerin Al_2O_3 , MgO , Cr_2O_3 ve

$SiO_2+Cr_2O_3$ bileşimleri olduğu tespit edilmiştir.

90/10 CuNi alaşımı üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, A-TIG ve FB-TIG kaynak tekniklerinde kullanılan her aktif örtünün, farklı kaynak parametreleri altında, diğer aktif örtülerden ve TIG kaynağından daha üstün performans gösterdiği belirlenmiştir. Tek paso ile tam penetrasyon sağlanan BOM9 ve BOM23 dışında, BOM4 ve BOM7 gibi aktif örtülerle de TIG kaynağına göre tatmin edici penetrasyon derinlik artışları sağlanmıştır. Bu deneysel çalışmalarda kullanılan aktif örtülerin sağladığı en iyi penetrasyon derinlikleri aşağıdaki gibidir:

BOM4/A-TIG/280-160-16: Penetrasyon Derinliği (H) = 6,05 mm BOM4/FB-TIG/280-145-16: Penetrasyon Derinliği (H) = 6,70 mm BOM7/A-TIG/265-160-16: Penetrasyon Derinliği (H) = 7,26 mm BOM7/FB-TIG/280-145-16: Penetrasyon Derinliği (H) = 6,18 mm BOM9/A-TIG/265-145-14: Penetrasyon Derinliği (H) = 6,26 mm BOM9/FB-TIG/280-145-14: Penetrasyon Derinliği (H) = 8,36 mm (*) BOM23/A-TIG/265-180-18: Penetrasyon Derinliği (H) = 8,10 mm (**) BOM23/FB-TIG/280-160-16: Penetrasyon Derinliği (H) = 6,74 mm (*) Tek pasoda %105 penetrasyon/tam penetrasyon sağlanmıştır.

(**) Tek pasoda %101 penetrasyon/tam penetrasyon sağlanmıştır.

A-TIG ve FB-TIG uygulamaları ile elde edilen kaynak dikişi geometrisinde de belirgin iyileşmeler tespit edilmiştir. Bu iyileşmeler, daha dar bir dikiş genişliği (W), daha derin bir dikiş

derinliği (H) ve daha yüksek H/W oranı ile kendini göstermiştir. TIG kaynağı ile elde edilen H değerleriyle karşılaştırıldığında, Al_2O_3 (BOM4) ile A-TIG kaynağında %160, FB-TIG kaynağında %177 oranında; MgO (BOM7) ile A-TIG kaynağında %150, FB-TIG kaynağında %130 oranında; Cr_2O_3 (BOM9) ile A-TIG kaynağında %161, FB-TIG kaynağında %215 oranında ve $SiO_2+Cr_2O_3$ (BOM23) ile A-TIG kaynağında %181, FB-TIG kaynağında ise %151 oranında penetrasyon derinliğinde artış sağlandığı belirlenmiştir.

BOM4 (Al_2O_3) ve BOM9 (Cr_2O_3) aktif örtüleriyle yapılan doğrulama deneylerinde de penetrasyon artışının sağlanabildiği görülmüştür. A-TIG ve FB-TIG kaynaklarında uygulanan akım şiddeti arttıkça, aktif örtülerin penetrasyon derinliğini artırmada daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, TIG kaynağında kirlilik gözlenmezken, A-TIG kaynak dikişlerinde FB-TIG kaynağına göre daha fazla kirlilik (impürite) olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, hem FB-TIG hem de A-TIG kaynaklarında uygulanan aktif örtülerin, izolasyon şiltesi görevi yaparak kaynak banyosunun soğutma hızını düşürdüğü ve ITAB bölgesindeki mikroyapıların TIG kaynağına göre daha ince yapıda ve daha yüksek sertlikte olduğu tespit edilmiştir.

Çekme ve akma mukavemetleri karşılaştırıldığında, en iyi değerlerin sırasıyla FB-TIG, TIG ve A-TIG yöntemlerinde elde edildiği görülmüştür. Homojen tane yapısının ve mikroyapının temizliğinin, mekanik değerleri artırdığı belirlenmiştir. Mikroyapı, sertlik ve mekanik mukavemet arasındaki birebir ilişki açıkça gözlemlenmiştir.

Aktif örtü türleri, tane boyutu, uygulama şekli ve benzeri faktörlerden bağımsız olarak, akım şiddeti arttıkça her üç kaynak yönteminde (TIG, A-TIG ve FB-TIG) de penetrasyon derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Penetrasyon artışında, kullanılan aktif örtülerle sağlanan tersine Marangoni etkisi ve ark daralmasının en belirgin etmenler olduğu sonucuna varılmıştır.

Görsel olarak, TIG kaynak dikişi parlak, düz veya dış bükey bir formda iken, özellikle A-TIG ve kısmen FB-TIG kaynak dikişlerinin mat ve iç bükey (çukur) formda olduğu tespit edilmiştir. Tüm kaynak uygulamalarında, ITAB bölgesindeki mikrosertliğin, kaynak dikişi ve ana metalden %25-35 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Aktif örtü olarak kullanılan oksitlerin ark ısı ile dekompoze olması sonucunda meydana gelen iyonların molekül haline dönüşmesi ekzotermik bir reaksiyondur ve önemli miktarda ısı açığa çıkmaktadır. Bu ısının tamamının veya bir kısmının banyoya transfer olması ile banyonun ısı girdisinin arttığı ve bu durumun daha derin penetrasyonu desteklediği öngörülmektedir.

5.2. Öneriler

90/10 CuNi alaşımının kaynak işlemlerinde en uygun aktif örtünün seçimi, kaynak performansını ve sonuçların kalitesini doğrudan etkileyebilir. Bu doğrultuda, tekli, ikili, üçlü ve daha fazla oksit ve tuz bileşiklerinin belirli oranlarda karıştırılarak denenmesi, en uygun aktif örtü kombinasyonunun belirlenmesi açısından faydalı olabilir.

Aktif örtü seçiminde, kaynak edilecek metal ya da alaşıma uygun bileşenlerin belirlenmesi sürecinde, periyodik cetvel ve Ellingham diyagramlarının kullanılması önemli bir rehberlik sağlayabilir. Tersine Marangoni etkisinin başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için aktif örtüde kullanılan malzemelerin termodinamik özellikleri büyük önem taşır. Standart oluşum entalpisi, ayrışma sıcaklığı ve oksit malzemesinin ergime/buharlaştırma sıcaklıkları, Marangoni etkisinin yönünü ve şiddetini belirlemede etkili olabilir. Bu nedenle, bu özelliklerin dikkate alınması, kaynaştırmanın verimliliği ve dikiş kalitesinin iyileştirilmesine yardımcı olabilir.

90/10 CuNi nikel bronz alaşımının A-TIG ve FB-TIG kaynak tekniklerinde, koruyucu gaz olarak saf argon yerine helyum (He), karbondioksit (CO₂) veya oksijen (O₂) ilave edilmiş karışım gazların kullanılması, aktif örtülerin performansını artırabilir. Bu gaz karışımları, kaynak havuzunun davranışını ve dolayısıyla kaynak dikiş kalitesini etkileyerek daha derin ve kaliteli bir penetrasyon elde edilmesine katkıda bulunabilir.

Aktif örtülerin uygulanma yöntemleri de kaynak işlemlerinin etkinliğini artırmak için yeniden değerlendirilebilir. Süspansiyon haline getirilmiş aktif örtünün kaynak bölgesine fırça ile uygulanması yerine, aktif örtü tozlarının özlü kaynak tellerinde olduğu gibi dolgu telinin içerisine yerleştirilmesi veya bu tozların örtülü elektrotlarda olduğu gibi dolgu telinin dış yüzeyine kaplanması önerilebilir. Ayrıca, tek tarafı yapışkanlı, diğer tarafına da zımpara kağıdında olduğu gibi aktif örtünün sabitlendiği 10-15 mm genişliğindeki rulo halindeki kâğıt bantların kullanılması, uygulama kolaylığı sağlayabilir ve işçilik verimliliğini artırabilir.

İlerleyen dönemlerde, ana malzeme cinsine bağlı olarak en iyi sonucu veren birer veya ikişer adet aktif örtünün tespit edilmesi uygulama açısından faydalı olabilecektir.

Son olarak, aynı malzeme üzerinde daha yüksek ergime sıcaklığı, daha yüksek standart oluşum entalpisi ve daha yüksek ısı yalıtım katsayısına sahip aktif örtülerin kullanılması, penetrasyon derinliğini artırma konusunda pozitif bir etkiye sahip olabilir. Bu bağlamda, bu tür aktif örtülerin daha düşük değerlere sahip olan aktif örtülerle karşılaştırılması ve penetrasyon üzerindeki etkilerinin araştırılması, önemli bir çalışma alanı olabilir. Bu tür çalışmalar, kaynak işlemlerinin optimize edilmesine ve kaynak kalitesinin artırılmasına yönelik değerli bilgiler sağlayabilir.



KAYNAKLAR

- Santahkuman, A., (2018) Advances in Gas Tungsten arc Welding. General Manager – Miller Welding and Machine Welding Research Institute, Bharat Heavy Electricals Ltd., Tiruchirapalli.
- Yükler, A.İ., Kurtulmuş, M., Doğan, E., (2019) Activated Flux TIG Welding of Non Ferrous Metals. International Journal of Engineering Science and Application, Vol 3., No.1, 2019.
- Santhana Babu, A.V., Narayanan, P.R., S.V.S. Murty, N., (2016) Development of Flux Bounded Tungsten Inert Gas Welding Process to join Alüminum Alloys. American Journal of Mechanical and Industrial Engineering Volume 1, Issue 3, November, 2016 pages 58-63.
- Jadhav, A., Prof. Wasankar, K.S., (2018) Optimisation of process parameters of A-TIG welding for penetration and hardness of SS 304 stainless steel weld. International Research of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 05 Issue: 10 | Oct 2018, e-ISSN: 2395- 0056, p-ISSN: 2395-0072 www.irjet.net
- Abd-Allah, Khalifa, M., Hafiz, W., Sadek, K., Raheem, A.A., N. (2008) Effect of Flux on the Quality of A-TIG Welds. (2008) Proceedings of the Ninth Cairo University International Conference on Mechanical Design and Production (MDP-9) Cairo Egyp Jan.8-10.2008.
- Holbihi, A., Touileb, K., Djoudjou, R., Ouis, A., Bouazizi, M.L., Chakhari, J., (2018) Effect of Single Oxide Fluxes on Morphology and Mechanical Properties of A-TIG on 316L Austenitic Stainless Steel Welds. Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol 8, No 3, 2018, 3064-3072.
- Mason, A., (2022) Advanced A-TIG Welding – Overview and Technological Solutions. In Welding, September 21, 2022.
- Ador Welding e-weldone, February (2016) Volume 08.
- Ahmadi, E., Ebrahimi, A., Hoseinzadeh, A., (2020) Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 2219 Aluminum Alloy A-TIG Welds. Physics of Metals and Metallography. 121. 483-488.
- Patel A.B., 1. Prof. Patel, S., 2. (2014) The Effect of Activating Fluxes in TIG Welding by Using Anova for SS321 Journal of Engineering, Research and Applications, ISSN: 2248-9622, Vol 2 Issue 5 (Version 5), May 2014, pp 41-48.
- Singh, A.K., Day, V., Rai, R.N., (2017) Techniques to Improve Weld Penetration in TIG Welding (A Review). Materials Today Proceedings 4 (2017), 1252-1259.
- Singh, A., Singh, V., Singh, A.P., Patel, D., Gupta, S.K., (2023) Experiment Analysis of A-TIG Welding and Comparison Between TIG, Double-TIG, and A-TIG of Hastelloy C-276. Science Direct 18 May 2023.
- Bertheir, A., Palliard, P., Valensi M.C.F., (2012) TIG and A-TIG Welding Experimental Investigations and Comparison to Simulation-Part 1. Identification of Marangoni Effect. Science and Technology of Welding & Joining November 2012, 17(8) 609-615.

- Bertheir, A., Palliard, P., Valensi, M.C.F., (2012) TIG and A-TIG Welding Experimental Investigations and Comparison With Simulation-Part 2: Arc Constriction and Arc Temperature Science and Technology of Welding & Joining, November 2012, 17(8) 616-521.
- Sambherao, A., (2013) Use of Activated Flux for Increasing Penetration in Austenitic Stainless Steel White Performing GTAW. December 2013, International Journal of Advanced Research 9001 (12).
- Kalkarni, A., Dwivedi, D.K., Vasudevan, M., (2018) Effect of Oxide Fluxes on Activated TIG Welding of P91 Steel Proceeding of ISER 135 th. International Conference, St.Petersburg, Russian Federation 9-10 July-2018.
- Babu, A., Giridharan, P., Narayanan, P., Svs, Narayana. (2016) Prediction of Bead Geometry for Flux Bounded TIG Welding of AA 2219-T87 Aluminum Alloy. Journal of Advanced Manufacturing Systems. 15. 69-84.
- BOMAK company product and Process Brochure, available at www.bomak.com.tr Copper Development Association Inc. (Copyright © 2022) Powered by Cascade CMS. 03/07/2018.
- Heiple C.L., and Roper, J.R., (1982) Mechanism for Minor Element Effect on GTA Fusion Zone Geometry. Supplement to the Welding Journal, April 1982.
- Pammi, C., Agilan, M., Neethu N. (2019) Flux Bounded Tungsten Inert Gas Welding (FBTIG). Flux Bonded Tungsten Inert Gas Process (PP:45-90) Edition 1, Chapter.
- Limmaneevichitir, C., Kou, S., (2000) Visualization of Marangoni Convection in Simulated Weld Pools Containing a Surface-Active Agent. Welding Journal 2000; 324s-330s.
- Kuo, C.H., Tseng, K.H., and Chou, C.P., (2011) Effect of activated TIG Flux on Performance of Dissimilar Welds Between Mild Steel and Stainless Steel. Key Engineering Materials Vol.479 (2011) pp. 74-80.
- Yang, C., Lin, S., Liu, F., Wu, L., Zhang, Q., (2003) Research on the Mechanism of A-TIG Welding. J Mater Sci Technol, 2003, Vol19 Issue (Supl.) 225-227.
- Copper- Nickel Alloys: Properties, Processing, Applications- German Copper Institute (DKI) Copper- Nickel Welding and Fabrication (2013) Copper Development Association Publication 139, Revised February 2013
- Howse, D.S., Lucas W., (2000) An investigation into Active Fluxes For TIG (A-TIG) Welding. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/an-investigation-into-arc-constriction-by-active-fluxes-for-tig-welding-2000>.
- Dey, Harish & Albert, Shaju & Bhaduri, A. & U., Kamachi. (2013) Activated flux TIG welding of titanium. Welding in the World. 57.

- Dinaharan, Isaac & R, Ramesh & Dey, Harish & Bhaduri, Arun. (2022) Effect of activating flux on penetration and microstructure of tungsten inert gas-welded pure titanium grade-2 plate. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 121. 1-19.
- Pandya, D., Badgujar, A., Ghetiya, N., (2020) A Novel Perception Toward Welding of Stainless Steel by Activated TIG Welding: a Review. Pages 877-903 | Received 13 Jun 2020, Accepted 02 Nov 2020.
- Patel, D., Jani, S., (2020) ATIG Welding: a Small Step Towards Sustainable Manufacturing. Advances in Materials and Processing Technologies 7(6).
- Patel, D., Jani, S., (2020) Techniques to Weld Similar and Dissimilar Materials by A-TIG Welding-an Overview. Materials and Manufacturing Processes.
- Ahmedi, E., Ebrahimi, A.R., (2013) The Effect of Activating Fluxes on 316L Stainless Steel Weld Joint Characteristic in TIG Welding Using the Taguchi Method. Journal of Advanced Materials and Processing Vol.1, No.1, 2013, 55-62.
- E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv.
- Singh, E.B., Singh, E.A., (2015) Performance of Activated TIG Process in Mild Steel Welds. Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMEL) p-ISSN 2320-334X, Volume 12 Issue 2, Ver. IV (Mar-Apr.2015), pp 01-05.
- Choughary, G., Duhan, R., (2015) Effect of Activated Flux on Properties of SS304 Using TIG Welding International Journal of Engineering, Vol 28, No.2 (February 2015) 290-295.
- Vankatesan, G., George, J., Sowmyasri M., Muthupanoli, V., (2014) Effect of Ternary Fluxes on Depth Penetration in A-TIG Welding of AISI 409 Ferritic Stainless Steel. Procedia Material Science 5 (2014) 2402-2410.
- Magudeeswaran, G., Kumar, A., Nair, R., Sundar, L., Harikannan, N., (2014) Optimization of Process Parameters of the Activated TIG Welding for Aspect Ratio of UNS 32205 Duplex Stainless Steel Weld.
- Magudeeswaran, G., Nair, S.R., Sundar, L., Harikannan, N., (2014) Defence Technology. Volume 10, Issue 3, September 2014, Pages 251-260.
- Singh, G., Shukla, K., (2019) Structure-Property Interaction in Flux Assisted Tungsten Inert Gas Welding of Austenitic Stainless Steel. International Journal of Engineering, Volume 32, Issue 1, Kaurnay 2019, Pages 99-105.
- Dhindsa, G.S., Kaushik, V., Gagen (2016) Effect of Activated TIG Welding Process on depth of Penetration in Carbon Steel (SA516 GR-70). International Journal of Engineering Science Invention Research & Development; Vol. 11 Issue XI, May 2016.
- Ganesh S. Mudaliyar, Priyank B. Patel, J.D. Patel, Ayesha M. Doi (2018) Optimization of A-TIG Welding Parameters for Improving Weld Geometry of AISI 304L Stainless Steel By Taguchi Approach (2018) IJARIE – ISSN (0) – 2395-4396 Volume 4, Issue 2, 2018.

- Xiaogang, G., Junhui, D., Xu, H., (2017). Effect of RE₂O₃ (RE = La, Ce) fluxes on A- TIG welding of Ti6Al4V. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- Ruckert, G., Perry, N., Sire, S., Marya, S., (2013) Enhanced Weld Penetration with Activating Fluxes Case Studies: Plain Carbon & Stainless Steels, Titanium and Aluminium.
- Rückert, G., Pery, N., Marya, S.S.S., (2014) Enhanced Weld Penetrations in GTA Welding with Activating Fluxes-Case Titanium and Aluminum. May 2014, Materials Science Forum, 783-786:2804-2809.
- Pandolfi, G.S., Filipe, G., Rodrigues, P., Modenesi, P.J., (2016) Evaluation of Arc Mechanical Constriction in A-TIG Welding of Austenitic Stainless Steel. Joldagen &Inspeção, 2016; 21(4):428-443.
- Huang, H.Y., Shyu, S.E., Chou, C.P., (2005) Evaluation of TIG Flux Welding on Characteristics of Stainless Steel. Science and Technology of Welding and Joining 2005, Vol 10, No:5-566.
- Huang, H.Y., Shyu, S.W., Tseng, K.H., Chou, C.P., (2013) Evaluation of TIG flux Bounded TungstenInert Gas Welding on the characteristics of stainless steel. Science and Tecnology of Weldingan Joining volume 10, Issue 5, pages 566-573, December, 2013.
- Rana, H., Badheka, V., Patel, P., Patel, V., Li, W., Andersson, J., (2020) Augmentation of Weld Penetration by Flux Assisted TIG Welding and its Distinct Variantsfor Oxygen Free Copper.
- Heiple, C.R. (1982) Mechanism for Minor Element Effect on GTA Fusion Zone Geometry. Welding Journal, 61. 97–102.
- Howse, D., Lucas, W., Russell JD., (1997) "Investigation of the A-TIG Mechanism and the Productivity Benefits in TIG Welding A", TWI Members report 604, 1997.
- Lin, H.L., Wu, TM., (2012) Effects of Activating Flux on Weld Bead Geometry ofInconel 718 Alloy TIG Welding Materials and Manufacturing Process, 27,1457-1461, 2012ISSN 1042 - 6914.
- Albaijan, I., Hedhibi, A.C., Touileb, K., Djoudjou, R., Ouis, A., Alrobei, H., (2020) Effect of Binary Oxide Flux on Weld Shape, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of 2205 Duplex Stainless Steel Welds. Volume 2020.
- Sivakumar, J., Babu, K., Moharanj, N.B, M.P., Hariharan, E., Kumar, M.R., (2022) A New Perception of Activated Flux Tunsten Inert Gas (A-TIG) Welding Techniques for Various Materials. International Journal of Recent Technologies (IJRTE) ISSN 2277-3878, Volume 10, Issue 5, Jan.2022.
- Vora, J.J., Badheka, V.J., (2016) Experimental Investigation on Effects of Carrier Solventand Oxide Fluxes in Activated TIG Welding of Reduced Activated TIG Welding of ReducedActivation Ferritic/Martensitic (RAFM) Steel Int. Journal of Advances in Mechanical & Auto Mobile Engg. (IJAMAE) Vol.3 Issue 1 (2016) ISSN 2349-1485, EISSN 2349-1493.
- Dobránszky, J., (2007) The Experiences of Activated Tungsten Inert Gas (ATIG) Welding Appliedon 1.4301 Type Stainless Plate <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.537-538.63>

- Davis, J.R., (2001) Copper and Copper Alloys ASM International, Ith. Jan.2001
- Yushchonko, K.A., Kovelenco, D.V., Kovelenco, I.V., (2006) Peculiarities of A-TIG Welding of Stainless Steel.
- Perumal, K., Vivek, N., Venkataaramanan, M.S., Gurubalaji, R., (2016) Experimental Investigation on TIG Welded of Austenitic Stainless Steel L304 International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 7, Issue 2, February 2014.
- Tseng, K.H., Wang, N.S., (2017) Research on bead width and Penetration Depth of Multicomponent FLux-Aided Arc Welding of Grade 316L Stainless Steel Powder Technology 311(2017) 514-521.
- Tseng, K.H., Weng, W.C., (2011) Study of Silica – Titania Mixed Flux Assisted TIG Welding Process Advanced Materials Research ISSN.1662-8985, Vols.291-294 PP:949-953.
- Tseng, K.H., Chen, K.L., (2012) Comparisons Between TiO₂- and SiO₂-Flux Assisted TIG Welding Processes. Journal of, Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 12, 6359–6367, 2012.
- Liu, L., Zhang, Z., Song, G., Shen, Y., (2006) Effect of Cadmium Chloride Fluxin Active Flux TIG Welding of Magnesium Alloys. Materials Transactions, Vol 47, No:2 (2006) pp.446 to 449.
- Lin, H. L., Wang, W. K., (2016) Effect of Activating Flux on the A356 and 6061 Aluminum Alloy GMA Welds. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 835, pp. 161–166). Trans Tech Publications, Ltd.
- Lowke, J. J. Et Al. (2005) Mechanisms Giving Increased Weld Depth due to a Flux. J. Phys. D: Appl. Phys. 38: 3438-3445.
- Shanping, L., Hiroyuki, S., Kiyoshi, N., (2003) Mechanism and Optimization of Oxide Fluxes for Deep Penetration in Gas Tungsten Arc Welding. Metallurgical and Materials Transactions A. 34. 1901-1907.
- Gnanasekaran, M., Kumaravel, A., Jarome, S., (2015) Effect of Double Component Fluxes on weld Bead Geometry and Corrosion Behavior of Atig Weldments of Austenitic Stainless Steel. Journal of Applied Science Research. ISSN: 1819-544X, EISSN: 1816-157N 2015 December, 11(23) pages 177-183.
- Chacravarthy, M.P., Ramanaiah, N., Sundara, B.S.K., Rao, S., (2013) Process Parameters Optimization for PULSED TIG Welding of 70/30 CuNi Alloy Welds Using Taguchi Technique. International Journal of Mechanical and Mechatronic Engineering, Vol.7, No:4, 2013.
- Tanaka, M., Sihimizu, T., Terasaki, H., Ushio, M., Koshi-Ishi, F., Yang, C.L., (2000) Effects of Activating Flux on Arc Phenomena in Gas Tungsten Arc Welding Science at Technology of Welding and Joining 2000 Vol.5 No.6.
- Vasudevan, M., Bhaduri, A.K., Raj, B., (2005) Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels. International Welding Congress, February 16-19, 2005, Mumbai.

- Mainier, F., Coelho, A., Barros, E., (2019) Corrosivity Evaluation of Copper-Nickel Alloy(90/10) in Pumps Used in Offshore Platforms for Seawater Pumping. Engineering, Technology & Applied Science Research. 9. 4636-4639.
- Mogdaham, M.A., Kolahan, F., (2020) Modelling and Optimization of Flux Assisted Tungsten Inert Gas Welding Process Using Taguchi Metod and Statistical Analysis. AUT Journal of Mechanical Engineering 4(3) (2020) 415-424.
- Bušić, M., Šolić, S., Tropša, V., Klobčar, D., (2024) Influence of Flux Agent Composition on the Ionization Potential in A-TIG Welding of the Electrolytic Tough Pitch Copper (Cu- ETP) Sheets. Journal of Materials Research and Technology. Volume 29, March–April 2024, Pages 1253-1261.
- Gajjar, M.D., Satija, AArchit, U.M.P.A.P. , Patel, P., (2017) Effect of Different Fluxes on DOP and Weld Bead Width in TIG Welding Literatur Review IOSR Journal (of Mechanical and Civil Engineering (IOSR JMCE) PSISSN 2320-334X, Volume 14 Ver VI (Jul-Aug 2017) PP 01-06.
- Kurtulmuş, M., Yüklér, A.İ., Doğan, E., (2019) Activated flux TIG Welding on non-ferrous metals. Indian Chemical Tecnology. Vol 26 March 2019, pp 164-169.
- Kurtulmuş, M., Bilici, M.K., Çatalgöl, Z., Çalış, İ., (2017) Activated Flux TIG Welding of Austenitic Stainless Steels. Journal of Scientific and Engineering Research, 2017,4(7):169-177, ISSN: 2394-630
- Modenesi, P., Apolinário, E., Pereira, I., (2000) TIG Welding with Single-Component Fluxes. Journal of Materials Processing Technology. 99.
- Jeyaprakash, N., Heile, A., Arunprasath, M., (2015) The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A Review The International Journal of Engineering and Science (IJES) Volume 4, Issue 2, pp 11-20 (2015).
- Korra, N.N., Vasudevan, M., Balasubramanian, K.R., (2015) Optimization of A-TIG Welding of Duplex Stainless Steel Alloy 2205 Based on Response Surface Methology and Experimental Validation. International Mechanical Engineers Volume 230, Issue 4.
- Meelima, P., Agilan, M., Saravanan, K., Chakravarthy, Murty, S.V.S.N., Sivakumar, D., BhanuPant (2021) Optimisation of Flux and Weld Parameters During Flux Bounded Tungsten InertGas Welding (FBTIG) of Nickel Based Superalloy Inconel 600. Transactions of the Indian National Academy of Engineering (2021) 6:123-131.
- Millard, P.D., Rahul D. Shalke (2021) A Review on Effect of Flux Powder SiO₂ for the Welding of 304-Austenitic Stainless Steel. International Research Journal of Engineering andTechnology (IRJET) Volume 08, Issure 05, May 2021.
- Bušić M., Ph.D. Jurica M., Prof. Ph.D. Garašić I., Prof. Ph.D. Kožuh Z. (2019) A-TIG Welding as a Solution For Nickel and Manganese Savings in Duplex Stainless Steel Welded Joints. International (Scientific Jour, Technology, Materials ‘ ‘ Year XIII, Issie 1, PP.19-22(2019).

- Powell, C., Michels, H., (2000) Copper-Nickel Alloys for Seawater Corrosion Resistance and Anti-Fouling - A State of the Art Review. Paper 00627; Corrosion/2000; NACE International.
- Lugade, P.S., Deshmukh, M.J., (2015) Optimization Process Parameters of Activated Tungsten Inert Gas (A-TIG) Welding for Stainless Steel 304L Using Taguchi Method. International Journal of Engineering Research and General Science Volume 3, Issue 3, May-June 2015 ISSN 2091-2730.
- Sambharao, A.B., (2013) Use of Activated Flux For Increasing Penetration in Austenitic Stainless Steel While Performing GTAW. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering ISSN 2250-2459, Volume 3, Issue 12, Dec. 2013.
- Li, O.M., Wang, X.H., Wu, Z.Z., J.N., (2007) Effect of Activating Flux on arc Shape and arc Voltage in Tungsten Inert Gas Welding.
- Woods, R.A., Milner, D.R., (1971) Motion in the Weld Pool in Arc Welding Motion that Occurs in Weld Pools is Primarily Caused by the Action of the Lorentz Force which Decreases in Intensity away From the Constriction at the Arc Root. AWS 52 th. Annual Meeting, San Francisco, April 23-29, 1971.
- Kumar, R., Bharathi, S., (2015) A Review Study on A-TIG Welding of 316(L) Austenitic Stainless Steel.
- Ramkumar, K. D. & - Vinayak, V & Prasad, M. & Rajan, N. & Shanmugam, N. (2018) Effect of activated flux on penetration depth, microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V TIG Welds. Journal of Materials Processing Technology. 261. 233-241.
- Ruckert, G; Huneau, B; Marya, S. (2007) Optimizing the design of silica coating for productivity gains during the TIG Welding of 304 L stainless steel. Materials and Design, 28:2387-2393.
- Afolalu, S. A., Soetan, S B, Ongbali, S. O., Abioye, A. A., Oni, A.S. (2019) Impact of activated-flux tungsten inert gas (a-tig) welding on weld joint of a metal – Review. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 640 (2019).
- Prasad, S. K.; Mathiaszagan, A.; Krishnadas, P. (2021) Effect of Manual Flux Bounded TIG Welding on Austenitic Stainless Steel AISI 304 and its Comparison with Automated Flux Bounded TIG Welding. Indian Welding Journal, 2021, Vol 54, Issue 0046-9092.
- Jayakrishnan, S., Pammi, C., Rijas, M. a (2016) Effect of Flux Gap and Particle size on the Depth of Penetration in FB-TIG Welding of Aluminum. June 2016, Transactions of the Indian Institute of Metals 70(5).
- Shyu, S.W., Huang, H.Y., Tseng, K.H., Chou, C.P. (2008) Study of the Performance of Stainless Steel A-TIG Welds. January 2008, Journal of Materials Engineering and Performance 17(2): 193-201.
- Roy, S, Samaddar, S., Uddin, N., Hoque, A. (2017) Effect of Activating Flux on Penetration in ATIG Welding of 316 Stainless Steel. October 2017, Indian Welding Journal 50(4) 72.

- Toyoyuki, S. & Shanping, L. & Kiyoshi, N. (2008) Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing - Mater Sci Eng A-Struct Mater.* 495. 296-303.
- Balos, S, Janjatovic, M.D.P., Zabunov, N.K.I., Pilic, B., Klobcar, D. (2020) Influence of Metallic Oxide Nanoparticles on the Mechanical Properties of an A-TIG Welded 304L Austenitic Stainless Steel. *Materials* 2020,13(20).
- Lu, S, Fujii, H., Saguyama, H., Tanaka, M., Nogi, K. (2002) Weld Penetration and Marangoni Convection with Oxide Fluxes in GTA Welding. *Material Transactions*, Vol 43, No/1 (2002) pp 2926-2931.
- Shariya, P.D, Satheesh, M., DHAS, E.R., Suneesh, E. (2018) A Study of PF-TIG and FB-TIG Welding Process on Bead Morphology Using Nanoparticles on 15CDV6 Steel *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* Volume9, Issue 6, June 2018 pp.450-458.
- Siddharaj, P, Shah, K. (2016) Experimental Study on Activated Tungsten Inert Gas Welding- A Review paper. Vol-2 Issue-3 2016 - *IJARIII*-ISSN(O)-2395-4396
- Kumar, S.A., & Sathya (2014) Experimental Investigation of the A-TIG Welding Process of Incoly 800 H *Materials and Manufacturing Process* Volume 30, 2015-Issue 9.
- Sire, S. , Surendar, M. (2002) On the Development of a New Flux Bounded TIG Process(FBTIG) to Enhance Weld Penetrations in Aluminium 5086. *International Journal of Forming Processes.* 5. 39-51. 10.3166/ijfp.5.39-51.
- Snow, H. M. (Marie), (2002) Investigation of the effect of microstructure and properties of gas tungsten arc welds made on a superaustenitic stainless steel. <https://preserve.leigh.edu/etd/753>.
- Biswas, S, Paul, T. (2023) Activated Flux TIG Welding of Similar Materials Stainless Steel 308. © 2023 JETIR December 2023, Volume 10, Issue 12 www.jetir.org (ISSN-2349-5162) Saha, S. and Das, S. (2019) Application of Activated Tungsten Inert Gas (A-TIG) Welding Towards Improved Weld Bead Morphology in Stainless Steel Specimens <https://www.researchgate.net/publication/339089197> Chapter: December 2019
- Simonik, AG (1976), The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of electronegative elements. *Weldg product.; g.b.; da.* 1976; vol. 23; no 3; pp. 68-71; bibl. 10 ref.; trad. du russe: *svaroch. proizvod., s.s.s.r.,* 1976, no 3, 49-51
- Surinder, K. T. (2015) Experimental Investigation on Flux Activated TIG Welding of Different Steels. Master of Engineering Master Thesis (Regd. No: 851282001) Mechanical Engineering Department Thapar University, Patiala (July 2015).

- Maurya, S.K., Jain, A., Singh, A. K. (2017) Effect of Oxide-Based Fluxes on Hardness and Microstructure of Mild Steel in Gtaw Welding Using Taguchi Method International Journal of Mechanical and Production Engineering, Volume 5, Issue 11, Nov.2017, ISSN:2320-2092.
- Sándor, T., Dobranszky, J. (2007) The Experiences of Activated Tungsten Inert Gas (ATIG) Welding Applied on 1.4301 Type Stainless Steel Plates.
- Le, T. N., (2019) Cu-Ni Welding-Part 2: Cu-Ni General Requirement. General Technical Knowladge August 17,2019.
- The Nickel Institute, Copper-nickel Welding and Fabrication available at <https://nickelinstitute.org/THERMEC> 2013, Dec.2013. United States. pp.202, hal-00941234.
- Donega, T. J., Vilarinho, T. F. C. L. O. (2013) Thermal Efficiency Measurement During A-TIG and TIG Welding 22 th. International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Nov. 3-7, 2013, R. Preto S.P. Brasil.
- Paskell, T. D., (1998) Gas Tungsten Arc Welding Flux United State Patent 5804792 Sep.8, 1998.
- Eşme, U., (2006) Effect of Pool Geometry of the Quality of TIG Welded Joints Phd. Thesis Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences Dept. Of Mech. Engineering Adana 2006
- Rao, V . Deivanathan, Dr. R. (2014) Experimental Investigation for Welding Aspects of Stainless Steel 310 for the Process of TIG Welding. Procedia Engineering 97(2014) 902-908
- Kumar, V ., Lucas, B ., Howse, D ., Melton, G ., Raghunathan, S ., Vilarinho, L. (2009) Isth: International Conference on the Joining of Materials (JOM 15) and 6 th Conference on education in Welding (ICEW 6), Helsingor, Denmark, 3-6 May 2009.
- Alhussein, V. A., (2023) Effect of Nano Aluminum Oxide Percentage of A-TIG on Mechanical Properties of Welded Joint of 7075 Aluminum Alloy. International Journal of Materials Technology and Innovation Article 8, Volume 3, Issue 2, June 2023, Page:74-79.
- Deekshant, V., & Kumar, K. (2021) Effects of activating flux on aluminum 6061 using TIG welding (GTAW). AIP Conference Proceedings. 2341. 040029.
- Randhawa, V. J., Suri, N.M. (2014) Effect of A-TIG Welding Process Parameters on Penetration in Mild Steel Plates. October 2014, International Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Wikimedia Commons, Oksitler için Ellingham diyagramı
- Schleich, W., Powell, C., CuNi 90/10 (2007) How to Avoid Typical Failures of Seawater Tubing Systems and Marine Biofouling on Structures, Editor(s): D. Féron, In European Federation of Corrosion (EFC) Series, Corrosion Behaviour and Protection of Copper and Aluminium Alloys in Seawater, Woodhead Publishing, Pages 73-94, Welding Copper and Copper Alloys American Welding Society 550 N.W. Le Jeune Road. Miami, FL 33126.

- Xie, X., & Jun, S. & Liang, C. & Yang, L. & Yayun, P. (2015) Effects of nano-particles strengthening activating flux on the microstructures and mechanical properties of TIG welded AZ31 magnesium alloy joints. *Materials & Design*. 81. 31-38.
- Wang, X., Huang, J. K., Fan, Y. H. D., Guo, Y. (2017) *Applied Thermal Engineering* Volume 113, 25 February 2017, Pages 27-35.
- Huang, Y., Fan, D., Shao, F. (2012) Alternative Current Flux Zoned Tungsten Inert Gas Welding Process for Aluminum Alloys. *Institute of Materials Minerals & Mining*, Volume 17, Issue 2.
- Cai, Y., Luo, Z., Huang, Z., Zeng, Y. (2015) Influence of Oxides on Microstructures and Mechanical Properties of High Strength Steel Joint (2016).
- Li, Y., Xie, X., Shen, J., Pu, Y. (2015) Effects of Nano-Particles Strengthening Activating Flux on the Microstructures and Mechanical Properties of TIG Welded AZ31 Magnesium Alloy Joint. *Materials & Design* Volume 84, 15 September 2015 Pages 31-38.
- Huang, Y., Wang, B., Guo, J., Fan, D., Yu, S. (2023) Investigation of Mechanism of Powder Pool Coupled Activating TIG Welding Metals 2023, 13(5), 830.
- Zhao, Y., Yong, G., Yan, K., Liu, W. (2011) Effect on Formation of 5083 Aluminum Alloy of Activating Flux in FBTIG Welding. *Advanced Materials Research* ISSN: 1662-8985, Vols: 311-313 PP: 2385-2388.
- Lijun, Z., & Guo, Q. & Lan, M. & Yuelai, D. & Qun, W. & Ruolan, W. & Wentao, H. (2020) Study on Joint Structure and Fatigue Properties of Magnesium Alloy Active TIG Welding and TIG Welding. *Journal of Physics: Conference Series*. 1578. 012197.
- Zhang, Z., Liu, L., Sun, H. et al. AC (2008) TIG welding with single-component oxide activating flux for AZ31B magnesium alloys. *J Mater Sci* 43, 1382–1388 (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Rıfıkı BAYRAM, ilk, orta ve lise eğitimini Adana’da tamamladıktan sonra İ.T.Ü’den 1968 yılında Metalurji Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. Öncelikle Ereğli Demir Çelik Fabrikalarında ve daha sonra sırasıyla Uzel Makine San. A.Ş’de ve Temsa A.Ş. İş Makinaları bölümünde çeşitli kademelerde yönetici olarak görev yaptı. 1989 yılından bu yana kurucu ortağı olduğu BOMAK Mak. Ltd. Şti. ve Astaş Isıl İşlem Ltd. şirketlerinde aktif iş hayatına devam etmektedir.

Bomak Makine Ltd. Şti.

