T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ PASLANMAZ ÇELİK VE BAKIR PARÇALARIN KAYNAK BÖLGESİ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mak. Müh. Ender ÇİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Mümin ŞAHİN

2009
EDİRNE

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ PASLANMAZ ÇELİK VE BAKIR PARÇALARIN KAYNAK BÖLGESİ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mak. Müh. Ender ÇİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

2009
EDİRNE

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ PASLANMAZ ÇELİK VE BAKIR PARÇALARIN KAYNAK BÖLGESİ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mak. Müh. Ender ÇİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Bu tez **30** / **01** / **2009** tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Kabul Edilmiştir.

Doç. Dr. Mümin ŞAHİN	Yrd. Doç. Dr. Cem ÇETİNARSLAN	Yrd. Doç. Dr. Fikret IŞIK
Jüri Üyesi-Tez Danışmanı	Jüri Üyesi	Jüri Üyesi

ÖZET

Uygulamada malzeme maliyetlerini azaltmak, korozif ortamlarda çalışan parçaların ömürlerini uzatmak vb. sebeplerden dolayı farklı malzemelerin kullanıldığı parçalar tercih edilmektedir. Farklı malzemelerden oluşan parçaları imal etme yöntemlerinden biri de termal özelliklerinin farklı olmasından dolayı kaynak edilmesi güç olmasına rağmen bu malzemeleri sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirmektir. Sürtünme kaynak yöntemi, parçalara ısı uygulanmadığı için hem parçaların distorsiyona uğramasına engel olur hem de malzeme ve enerji tasarrufu sağlar.

Sunulan tezde, ostenitik paslanmaz çelik ve bakır malzemeler sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş ve optimum parametreler elde edilmiştir. Optimum parametrelerde birleştirilen deney parçalarının çekme dayanımları elde edilmiş, birleştirmeler ile orijinal malzemelerin çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Daha sonra, birleştirmelere mikroyapı ve Energy Dispersive X-Ray (EDX) analizleri ve sertlik incelemeleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Sürtünme Kaynağı, Paslanmaz Çelik, Bakır, EDX Analiz, Dayanım

ABSTRACT

To decrease the material costs in application, parts combining different materials are preferred according to such reasons like extending lifetimes of working materials in the corrosion environments. One of the methods of producing dissimilar material components is to join these materials with friction welding method although welding is difficult with different thermal features. Friction welding method both prevents material distortion and supplies material and energy saving for not applying heat to materials.

This thesis, austenitic-stainless steel and copper materials were joined by friction welding and the optimum parameters were obtained. Experimental parts joined in the optimum parameters were obtained by tensile strengths. In addition, tensile strengths of base materials were compared with those of the joints. Then, microstructure, energy dispersive X-ray (EDX) analysis and hardness examinations were done in the joints and obtained results were commented.

KEYWORDS: Friction Welding, Stainless Steel, Copper, EDX Analysis, Strength

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında araştırılmış olan paslanmaz çelik ve bakır malzemelerin sürtünme kaynağıyla birleştirilmesi, farklı termal özelliklere sahip iki parçanın kaynağı zor olmasına rağmen başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kaynağı, dışarıdan herhangi bir enerji kullanmadan parçaların sürtünme vasıtasıyla oluşan mekanik enerjinin ısıya dönüşmesiyle kaynak edilir. Sürtünme kaynak metodu, şu an endüstriyel sistemde yaygın kullanılan bir teknolojidir.

Bu çalışmada, yöntemin AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik ve bakır parçalara uygulanabilirliği araştırılmış; birleştirilmiş numunelere daha sonra çekme, mikroyapı ile Energy Dispersive X-Ray (EDX) analizleri ve mikrosertlik testleri uygulanmıştır.

Çalışma, yedi bölümden ibaret olup, ilk bölümde üretim kavramı ve kaynaklı birleştirmeler hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde kaynak yöntemleride sınıflandırılarak kaynak tekniği hakkında açıklama yapılmıştır. Üçüncü bölümde sürtünme kaynak yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde geçmişte araştırmacılar tarafından yapılan benzer çalışmalar genel anlamda incelenmiştir. Beşinci bölümde tezin önemi ve tez çalışma planı verilmiştir. Altıncı bölümde deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Son bölüm olan yedinci bölümde, yapılan deney sonuçları irdelenmiş ve tartışılmıştır.

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1. ÜRETİM KAVRAMI VE KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELER 1

1.1. Giriş 1

BÖLÜM 2. KAYNAK TEKNİĞİ 14

2.1. Kaynak Tekniğinin Gelişimi 5
2.2. Kaynak Metalurjisi 6
2.2.1. Kaynak Kabiliyeti 6
2.2.2. Karbon Eşdeğeri ($C_{eş}$) 9
2.2.3. Ergiyen Bölge 10
2.2.4. ITAB (Isının Tesiri Altındaki Bölge) 11
2.3. Kaynak Yöntemleri 12
2.3.1. Gaz Kaynağı 12
2.3.2. Elektrik Ark Kaynağı 12
2.3.3. Gazaltı Ark Kaynağı 13
2.3.3.1. Tungsten Inert Gaz (TIG) Kaynağı 14
2.3.3.2. Plazma Kaynağı 14
2.3.3.3. MIG\MAG Kaynağı (Eriyen Elektrodla Gazaltı Kaynağı) 15
2.3.4. Tozaltı Kaynağı 16
2.3.5. Direnç Kaynağı 16
2.3.6. Özel Kaynak Yöntemleri 16
2.3.6.1. Elektrocuruf Kaynağı 16
2.3.6.2. Sürtünme Kaynağı 17
2.3.6.3. Soğuk Basınç Kaynağı 17
2.3.6.4. Difüzyon Kaynağı 18
2.3.6.5. Ark Saplama Kaynağı 18

BÖLÜM 3. SÜRTÜNME KAYNAĞI YÖNTEMİ 20

3.1. Yöntemin Tanımlanması 20
3.1.1. Klasik (Sürekli Tahrikli) Sürtünme Kaynağı 22
3.1.2. Volanlı (Atalet) Sürtünme Kaynağı 23
3.1.3. Kombine Sürtünme Kaynağı 24
3.2. Sürtünme Kaynak Parametreleri 26
3.3. Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti 27
3.4. Kaynak Öncesi Hazırlık ve Bağlantı Dizaynı 28
3.4.1. Kaynak Yüzeyinin Hazırlanması 28
3.4.2. Kaynak Yapılacak Parçaların Bağlanması 29
3.5. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları 30
3.6. Sürtünme Kaynağının Üstünlükleri ve Sakıncalı Yönleri 34

BÖLÜM 4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR **35**

4.1. Sürtünme Kaynağı Araştırmaları 35
4.1.1. Kaynak Parametreleri Üzerine Yapılan Araştırmalar 35
4.1.2. Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmiş Parçalarda Elde Edilen Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Araştırmalar 36
4.1.3. Birleştirilmiş Parçaların Sertlik Dağılımı ve Mikro Yapısı Üzerine Yapılan Araştırmalar 37
4.1.4. Birleştirilmiş Parçaların Isı Dağılımı Üzerine Yapılan Araştırmalar 39

BÖLÜM 5. TEZİN ÖNEMİ VE TEZ ÇALIŞMA PLANI **40**

5.1. Tezin Önemi, Kapsamı ve Gerekçesi 40
5.2. Uygulanacak Araştırma Teknik ve Yöntemleri 41
5.3. Tez Çalışma Planı 42

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **43**

6.1. Deneysel Prosedür 43
6.1.1. Test Edilecek Deney Parçalarının ve Numunelerin Geometrisi 45
6.1.2. Kaynak Parametrelerinin İstatistiksel Yaklaşımla Belirlenmesi 46
6.2. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma 48
6.2.1. Çekme Deneyleri 48
6.3. Kaynaklanan Parçaların Mikroyapısı 49
6.4. Kaynak Ara Yüzeyinin EDX Analizi 52
6.5. Kaynaklanan Parçaların Sertlik Değişimleri 58

BÖLÜM 7. İRDELEME VE SONUÇ **60**

7.1. Çekme Deneylerinin Yorumu 60
7.2. Mikroyapı ve Sertlik Yorumu 61

KAYNAKLAR **62**

TEŞEKKÜR **65**

ÖZGEÇMİŞ **66**

ŞEKİL LİSTESİ

ŞEKİL NO	***ŞEKİL ADI***	***Sayfa No***
Şekil 2.1.	Kaynak Kabiliyetinin Temel Faktörler ve Özelliklerle İlişkisi	**7**
Şekil 2.2.	Alın Birleştirmede Segregasyon Bölgesi	**11**
Şekil 2.3.	Asetilen-oksijen Alevi	**12**
Şekil 2.4.	Elektrik Ark Kaynağının Prensip Şeması	**13**
Şekil 2.5.	TIG Kaynağının Prensibi	**14**
Şekil 2.6.	Plazma Kaynağının Prensibi	**15**
Şekil 2.7.	MIG\MAG Kaynağının Şematik Görünümü	**15**
Şekil 2.8.	Tek Telli Tozaltı Kaynağının Prensibi	**16**
Şekil 2.9.	Elektrocuruf Kaynağının Prensip Şeması	**17**
Şekil 2.10.	Soğuk Basınç Kaynağının Prensip Şeması	**18**
Şekil 2.11.	Difüzyon Kaynağının Prensip Şeması	**18**
Şekil 2.12.	Ark Saplama Kaynağında İşlem Sırası	**19**
Şekil 3.1.	Kaynak Edilen Parçalar	**21**
Şekil 3.2.	Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı	**23**
Şekil 3.3.	Klasik Sürtünme Kaynak Parametreleri	**23**
Şekil 3.4.	Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı	**24**
Şekil 3.5.	Volan Tahrikli Sürtünme Kaynak Parametreleri	**24**
Şekil 3.6.	Sürtünme Kaynak Makinesı	**25**
Şekil 3.7.	Sürtünme Kaynağı Bağlantı Tasarımları	**30**
Şekil 3.8.	Sürtünme Kaynaklı Parçalar	**32**
Şekil 3.9.	Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilmiş Parçalar	**32**
Şekil 3.10.	Sürtünme Kaynaklı Parçalar	**33**
Şekil 6.1.	Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Mekanizması Şematik Gösterimi	**44**
Şekil 6.2.	Sürtünme Süresi Elektriksel Kontrol Devresi	**45**
Şekil 6.3.	Deneylerde Kullanılan Parçaların Boyutları	**47**
Şekil 6.4.	Çekme Mukavemetinin Sürtünme Basıncıyla Değişimi	**49**
Şekil 6.5.	Çekme Mukavemetinin Sürtünme Zamanıyla Değişimi	**50**
Şekil 6.6.	Kaynaklı Haldeki Birleştirmenin Makro Fotoğrafı	**51**
Şekil 6.7.	Birleştirmenin Enine Kesilmiş Makro Fotoğrafı	**51**
Şekil 6.8.	Paslanmaz Çeliğin Mikro Yapısı	**52**
Şekil 6.9.	Bakırın Mikro Yapısı	**52**
Şekil 6.10.	Birleştirmede Ara Yüzeyin Görünümü	**53**
Şekil 6.11.	Birleştirmede SEM Mikroyapısı Ve İşqaretlenen Bakır	**54**
Şekil 6.12.	Birleştirmede Bakırın Spectrum Analizi	**54**
Şekil 6.13.	Birleştirmede SEM Mikroyapısı Ve İşaretlenen Çelik	**55**
Şekil 6.14.	Birleştirmede Çeliğin Spectrum Analizi	**56**
Şekil 6.15.	Birleştirmede SEM Mikroyapısı Ve İşaretlenen Arayüzey	**56**
Şekil 6.16.	Birleştirmede İntermetalik Fazın Spectrum Analizi	**57**
Şekil 6.17.	Arayüzeyde İntermetalik Faz Bileşiklerinin Kalınlıkları	**58**
Şekil 6.18.	Sertlik Testi Şematik Gösterimi	**59**
Şekil 6.19.	Birleştirmenin Yatay Mesafesinde Sertlik Değişimi	**59**
Şekil 6.20.	Birleştirmenin Dikey Mesafesinde Sertlik Değişimi	**60**

TABLO LİSTESİ

TABLO NO	***TABLO ADI***	***Sayfa No***
Tablo 1.1.	İmal Usullerinin Sınıflandırılması	**3**
Tablo 2.1.	Kaynak Kabiliyetini Etkileyen Faktörler	**8**
Tablo 2.2.	Karbon Eşdeğeri-Tavlama İlişkisi	**10**
Tablo 1.2.	Gazaltı Kaynak Yöntemlerinin Sınıflandırılması	**13**
Tablo 6.1.	Ostenitik-Paslanmaz Çeliğin Standart Kimyasal Bileşimi	**46**
Tablo 6.2.	Bakırın Standart Kimyasal Bileşimi	**46**
Tablo 6.3.	Faktörlere Göre Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	**48**
Tablo 6.4.	Sürtünme Kaynağı Deneylerinde Kullanılan Parametreler	**48**
Tablo 6.5.	SEM Mikroyapısı ve Bakırda İşaretlenen Bölgeye Göre EDS Analiz Sonucu	**55**
Tablo 6.6	SEM Mikroyapısı ve Çelikte İşaretlenen Bölgeye Göre EDS Analiz Sonucu	**56**
Tablo 6.7.	SEM Mikroyapısı ve Ara Yüzeyde İşaretlenen Bölgeye Göre EDS Analiz Sonucu	**57**

BÖLÜM 1. ÜRETİM KAVRAMI

1.1. Giriş

Metaller insanlar tarafından binlerce yıldan beri kullanılmakla birlikte, ilk yararlı metalin nasıl üretildiği kesin olarak bilinmemektedir. Metallerin erken çağlardan itibaren kullanılmış olduğu bakır alaşımından (bronz) yapılmış aletlerin ortaya çıkarılması ile kanıtlanmıştır. Fakat metalin bir başka metale birleştirilmesi yöntemi bundan çok sonraları bulunabilmiştir. Milattan önce 1400 yıllarında Suriyelilerin bulduğu söylenen demirci kaynağındaki gelişmeler bir yana bırakılırsa, küçük metal parçacıkların birleştirilerek daha büyük ve daha karmaşık parçaları üretmedeki yetersizlik, mühendislikteki gelişmeyi 19. yüzyılın başlarına kadar ertelemiştir. Cıvatalama, perçinleme, lehimleme ve son olarak da kaynak gibi birleştirme tekniklerinin ticari boyutlarda ortaya çıkışı ancak makineye bağlı endüstriyel devrimin gerçekleşmesiyle mümkün olmuştur.

Bugün çok sayıda kullanılabilir birleştirme tekniği vardır ve günümüzdeki sorun birleştirmenin nasıl yapılacağı değil, en iyi birleştirme yönteminin nasıl seçileceğidir. Bronz çağı insanı birleştirme yöntemi olarak sadece kama kullanma veya deri şeritle bağlama arasında seçim yapmak zorunda iken, günümüzde bir tasarım mühendisi, aynı derecede uygun dört veya beş değişik birleştirme tekniğinin olduğu durumlarla kolaylıkla karşılaşabilir. Her yöntemin kendine has özellikleri vardır ve en uygun seçim için birçok hususun değerlendirilmesi gerekir. Mukavemet, üretim kolaylığı, maliyet, ömür, korozyon dayanımı ve görünüş gibi faktörlerin göreceli önemi, büyük ölçüde göz önüne alınan uygulamaya bağlıdır.

Bir köprü tasarımcısı, köprü platformunda hareket eden vasıtaların oluşturduğu değişken yükleri taşıyacak levhaları birbirine birleştirecek yöntemler arar. Buna karşılık, köprüden geçen otomobillerin imalatçısı ise üretim hattında kullanılabilmeye uygun güvenilirlik, tekrarlanabilirlik ile birlikte yüksek üretim hızına sahip birleştirme tekniklerini araştırır. Genellikle büyük iş gücü gerektiren bu yöntemler mümkün olduğunca yarı kalifiye operatörler tarafından uygulanmaya müsait olmalıdır. Bu ise, üretim düzeninin kurulması, kontrolü veya izlenmesi için uzman personel gerektirir. Birleştirme işlemlerini mümkün olduğu kadar çabuk yapmak her ne kadar arzulanır ise de, bu her uygulama için birinci dereceden önemli değildir. Geçekte bazı bağlantıların yerinde yapılması zorunlu bir faktör olarak karşımıza çıkabilir.

İmalat teknolojisinin amacı, teknik resimlerde veya başka tür bilgi ortamlarında oluşturulan parçaların ekonomik olarak imal edilmesidir. Konstrüksiyon aşamalarında,

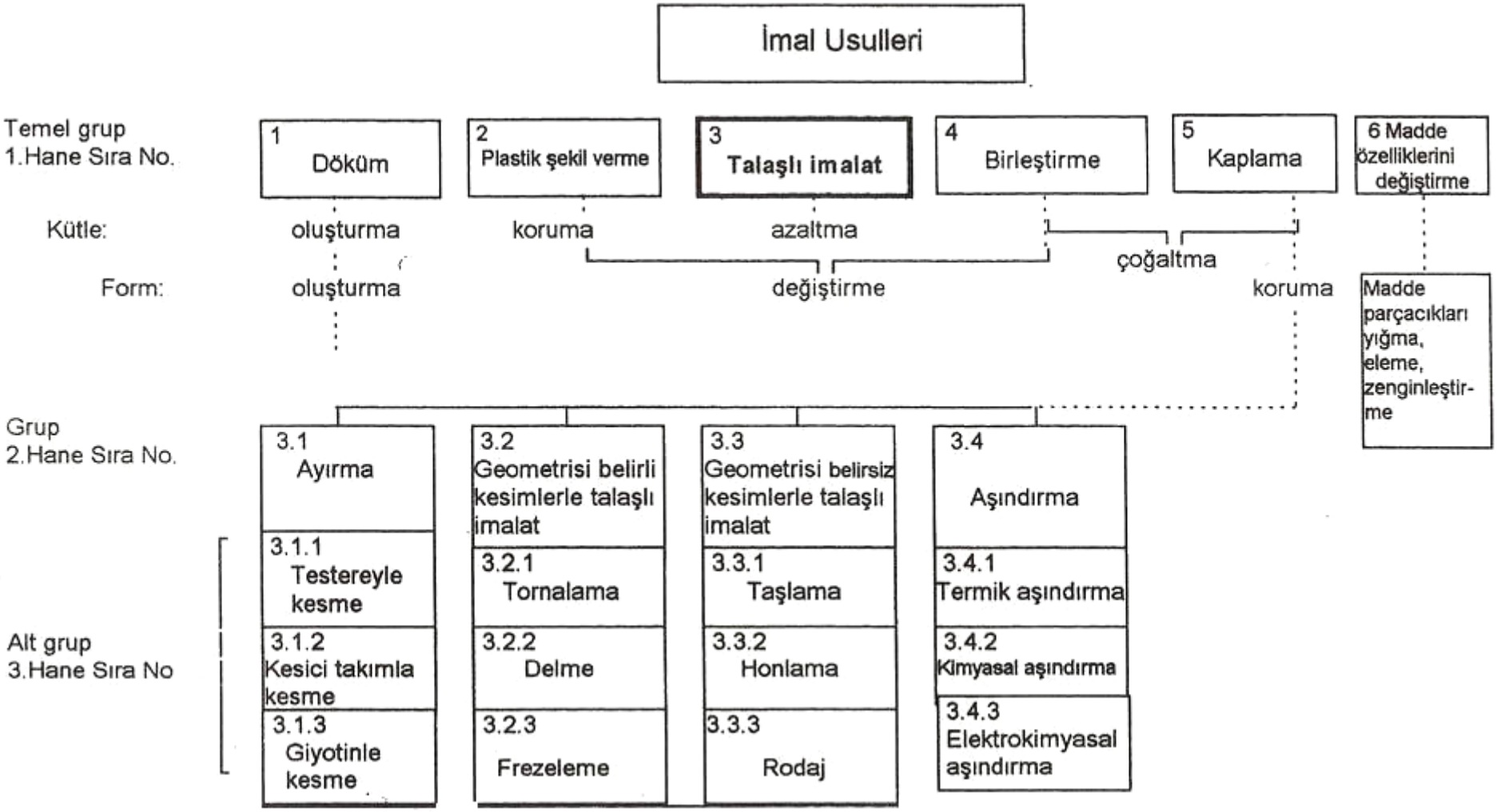
parçaların imalatını mümkün kılan prosedürler ve özellikler tespit edilir. Bunlar arasında parçanın boyutları, malzemeleri, gerekli ölçü toleransları, imalat sırasındaki veya sonrasındaki yüzey kalitesi ve bunun için gerekli muayene ve ölçü aletleri bulunur. Doğaldır ki, işletmenin olanakları da göz önünde tutularak parçanın imalatında gerekli olan imal usulleri de önceden tespit edilmek zorundadır.

Birim zamanda imal edilecek parça sayısı ve ayrıca işletme ve personel giderleri, imalatın otomasyon derecesini belirler. Günümüzde imalat olanakları, elle kontrol edilen üniversal makinelerden, işlenecek bilginin programlar şeklinde iletildiği nümerik kontrollü tezgâhlara ve çok sayıda CNC tezgâhın kullanıldığı esnek imalat sistemlerine kadar uzanmaktadır.

Değişik standartlarda, imal usullerinin sistematik şekilde sınıflandırılmaları verilmiştir. Tablo 1.1., DIN 8580'in sıralama sisteminde örnek olarak talaşlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılışını göstermektedir. Bu standartta temel sınıflandırma prensibi, malzeme kütlesinin değiştirilmesine dayanmaktadır. Ya bir katı cismin parçacıklarından ya da karmaşık bir yapı elemanının parçalarından oluşan kütle, aşağıdaki temel prensiplerden biriyle değiştirilir:

- Kütleyi oluşturarak (Döküm)
- Kütleyi koruyarak (Plastik şekil verme)
- Kütleyi azaltarak (Talaşlı imalat)
- Kütleyi çoğaltarak (Kaplama)

Tablo 1.1 İmal Usullerinin Sınıflandırılması



Tespit edilen imal usullerinin sonradan iyileştirilmesi, karmaşık işlemlere göre daha kolaydır. Bu nedenle endüstriyel imalatta döküm veya plastik şekil verme ile ön şekillendirilmiş parçalar sonradan bir talaşlı imalatla son ölçülerine getirilir. Klasik imalat sırası, böylece maliyetin düşürülmesi ile eşzamanlı olarak bitmiş parçanın kalitesinde ulaşılabilecek en yüksek kalite taleplerine ulaşmayı amaçlar.

Geleceğe yönelik imalat stratejileri, bilinen taleplere ek olarak daha yüksek verimlilik ve imalatın esnekliğini ve güvenilirliğini de dikkate almaktadır (S. Anık ve diğ. 1999; A. Aran, 1993; F. Sönmez, 2007).

BÖLÜM 2. KAYNAK TEKNİĞİ

Kaynak tatbik edileceği malzemenin cinsine göre metal kaynağı ve plastik malzeme kaynağı olarak ele alınır (S. Anık, 1993; M. Şahin, 2001; F. Sönmez, 2007).

Metal kaynağı: Metal malzemeyi ısı veya basınç veya her ikisini birden kullanarak ve birleştirilen malzemelerde aynı cinsten ve erime aralığı aynı veya yaklaşık bir malzeme katarak veya katmadan birleştirmeye "Metal kaynağı" adı verilir. İki parçanın birleştirilmesinde ilave bir malzeme kullanılırsa, bu malzemeye "İlave metal" adı verilir.

Plastik malzeme kaynağı: Aynı veya farklı cinsten termoplastik (sertleşmeyen plastik) malzemeyi ısı ve basınç kullanarak ve aynı cinsten bir plastik ilave malzeme katarak veya katmadan birleştirmeye "Plastik malzeme kaynağı" adı verilir.

2.1. Kaynak Tekniğinin Gelişimi

İnsanoğlu günümüzden yaklaşık 3500 yıl kadar önce, iki metal parçasını sıcak veya soğuk halde çekiçleyerek kaynak edip birleştirmeyi gerçekleştirmiştir. Demirci kaynağının, özellikle orta bronz devrine ait bu tür örneklerine dünyanın çeşitli müzelerinde rastlanmaktadır. Batılı tarihçiler, demirci kaynağı yardımı ile demirin M.Ö.1400 yıllarında Ön Asya'da yaygın bir şekilde birleştirildiğini yazmaktadırlar.

Mısır Firavunları devrinde yapılmış çok orijinal metal işleri üzerinde de, bu tür birleştirmeler ve lehim bağlantılarının izleri görülmektedir. Lehimleme yolu ile birleştirme tarihinin demirci kaynağından çok daha eskilere dayandığı konusunda bütün tarihçiler uyum içindedir.

Roma çağında metal işçiliği çok gelişmiştir; bu çağa ait pek çok eser üzerinde de bu tür birleştirmeler görmek mümkündür. Roma medeniyetinde metal işçiliğine çok büyük önem verilmiştir; ateş tanrısı Vulkan aynı zamanda demircilik ve metal işçiliğinin de tanrısı olarak kabul edilmiştir.

Bütün endüstrileşmiş ülkelerde demircinin çekici ile yaptığı işlem hemen hemen tarihe karışmıştır; örs, antik koleksiyon eşyaları arasına girmiştir; yalnız kıyıda köşede kalmış demirci atölyelerinde ve yarış hipodromlarının nalbant atölyelerinde görülebilir hale gelmiştir. Kaynak yönteminin endüstriyel uygulamaları ise, 19. yüzyılın ikinci yarısında başlamıştır. Oksijenin endüstriyel çapta eldesi, özellikle tamir işlerinde oksi-asetilen kaynağının

yaygınlaşmasını sağlamıştır. Elektrik arkının 18. yüzyılın son yıllarında Volta tarafından keşfedilmesine rağmen bu enerjinin kaynakta uygulama alanı için 19. yüzyılın son çeyreğini beklemek gerekmiştir.

2.2. Kaynak Metalürjisi

Genellikle kaliteli kaynak bağlantısı sağlamak için kaynak yerini havanın etkisinden korumak ya da diğer bir deyişle oluşacak kimyasal ve metalürjik reaksiyonları kontrol altına almak gerekir. Deneyimli her kaynakçı tamamen hatasız bir kaynak yapmanın kolay olmadığını gayet iyi bilir. Bazıları içinde hiçbir güçlüğün olmamasına karşın hatalardan arınmış, tatminkâr bir kaynak kalitesinin sağlanması bakımından özel önlemlere ihtiyaç vardır. Bu durumda kaynak kabiliyeti, karbon eşdeğeri, segregasyon ve ITAB (Isının Tesiri Altındaki Bölge) kavramlarından söz etmek yerinde olacaktır.

2.2.1. Kaynak Kabiliyeti

Kaynaklı yapı elemanlarının imalat amacı, mümkün olan en düşük maliyette imal edilmesi, fonksiyonunu tam olarak yerine getirmesi ve işletmede uzun süre kullanılmasıdır. Metal malzemeden bir yapı elemanının kaynak prosesinde, belirli bir kaynak yönteminin kullanıldığı uygun bir imalat sürecinde, maddelerin kaynakla birleştirilmesi söz konusudur. Burada kaynak bölgesinin yerel özelliklerinin ve birleştirilen parçaların tüm yapıya etkilerinin, önceden belirlenmiş koşulları sağlaması gerekir. Kaynak kabiliyeti, üç temel faktöre, malzeme, konstrüksiyon ve imalata aynı ağırlıkla bağlıdır.



Şekil 2.1. Kaynak Kabiliyetinin Temel Faktörler ve Özelliklerle İlişkisi

Kaynak kabiliyeti ile bu temel faktörler arasında, aşağıdaki üç özellik yer alır;

- Malzemenin kaynağa uygunluğu
- Konstrüksiyonun kaynak emniyeti
- İmalatın kaynak yapılabilirliği

Bu özelliklerin her biri, kendi içinde malzemeye, konstrüksiyona ve imalata bağlı olmasına rağmen ağırlıkları birbirinden farklıdır.

Bir malzeme, eğer belirli bir konstrüksiyon ve imalat şeklindeki özellikleri, kendisinden beklenen her talebe uygun bir kaynak kalitesine ulaşabiliyorsa, o malzeme *kaynağa uygun* demektir.

Bir konstrüksiyon, eğer belirli malzeme ve imalat yöntemleri ile oluşturulduktan sonra, önceden tespit edilmiş işletme şartları altında kendisinden beklenen fonksiyonları yerine getirebiliyorsa, *kaynak emniyetine sahip* demektir.

Bir kaynaklı imalat, belirli malzemelerden oluşturulmuş bir konstrüksiyon halinde, önceden tespit edilmiş imalat şartları altında kolayca imal edilebiliyorsa, *kaynak yapılabilirliğe sahip* demektir. Tablo 2.1.' de bu faktörler bir arada gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Kaynak Kabiliyetini Etkileyen Faktörler

Malzeme (Kaynağa uygunluk)	Kimyasal bileşim	Sertleşme eğilimi Yaşlanma Gevrek kırılma Sıcak çatlama Kaynak Metali Karışım Oranı
	Metalurjik özellikler	Segregasyon Kalışkılar Tane büyüklüğü İçyapı Anizotropi
	Fiziksel özellikler	Genleşme özelliği Isıl iletkenlik Erime sıcaklığı Mukavemet Tokluk
Konstrüksiyon (Kaynak emniyeti)	Konstrüktif Şekillendirme	Kuvvet hatlarının akışı Dikişlerin konumu Parça kalınlığı Çentik etkisi Rijitlik farklılıkları
	Gerilme durumu	Gerilmelerin tür ve şiddeti Gerilmelerin eksen sayısı Zorlanma hızı Sıcaklık Korozyon
İmalat (Kaynak yapılabilirlik)	Kaynağa hazırlık	Kaynak yöntemi İlave malzemenin türü Birleştirme türü Ağız biçimi Ön tavlama İklim koşulları
	Kaynağın uygulanması	Isı girdisi Isının uygulanışı Kaynak sırası
	Kaynaktan sonraki işlemler	Isıl işlem Taşlama Dekapaj, temizleme

Kaynak işleminde tatminkâr bir kalitenin sağlanması, özellikle aşağıdaki nedenlerden güçtür:

- Kaynak işlemi, üretim sürecinde optimize edilmiş malzeme yapısına sürekli olarak müdahale edilmesi demektir, çünkü termik olarak sınırlı içyapı dönüşümü, atmosferden gaz kapma, birleştirme yüzeyindeki katışıklıklar nedeniyle, malzemenin mekanik-teknolojik özellikleri değişir.

- Kaynak işlemleri, günümüzde hala çoğunlukla elle veya ancak kısmen mekanize şekilde uygulanmaktadır. Bu nedenle mamullerin kalitesi, diğer bir imalat yönteminde olmadığı kadar insana ve tekrarlanabilir performans açısından operatörün yeteneklerine bağlıdır.

- Kaynaklı birleştirmelerin kalitesinin değerlendirme olanakları sınırlıdır. Özellikle eritme kaynağıyla birleştirilmiş kalın levhalarda, ayrıca içköşe ve bindirme dikişlerinde, mevcut muayene yöntemleri, güvenilir kalite değerlendirmesi açısından yeterli bilgi vermez.

2.2.2. Karbon Eşdeğeri ($C_{eş}$)

Çeliklerde genel olarak, özellikle de sertleşme kabiliyetini arttıran alaşım elementlerinin artışı kaynak kabiliyetini kötüleştirir. Burada alaşım elementlerinin etkisini dikkate alabilmek üzere bir "endeks" tanımlama yoluna gidilmiştir. Bu endeks "Karbon Eşdeğeri ($C_{eş}$)" olup;

Alaşımsız Çeliklerde: $C_{eş}=C+Mn/6$ (2-1)

Alaşımlı Çeliklerde: $C_{eş}=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$ (2-2)

ifadeleri ile hesaplanır.

Yapı çeliklerinin kaynağından kaynağın sonuçlarına etki eden en önemli faktör esas metalin bileşimidir. Özellikle C ve Mn alaşımsız çeliğin kaynak kabiliyetine etki eden başlıca iki elementtir. Alaşımsız yapı çeliklerindeki Mn miktarı bileşimde bulunan C miktarına bağlı olarak değişir.

Genel olarak C miktarı arttıkça Mn miktarı azalır ve

$$C_{eş} = C + Mn/6 \ (\%) \qquad (2\text{-}3)$$

eşitliği sağlanır.

Düşük alaşımlı ve yüksek mukavemetli çeliklerde C ve Mn den başlayarak diğer elementlerin de geçiş bölgesindeki sertleşme ve çatlak oluşumu üzerine etkileri vardır. Bu alaşım elementleri belirli oranda C miktarına eklenir ve sonuçta C'un etkisine benzer şekilde yorumlanır. Elde edilen eşitlik şudur:

$C_{eş}=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$ değerine **karbon'un eşdeğeri** denir.

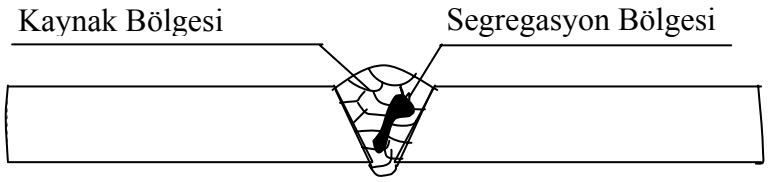
Karbon eşdeğerine bağlı olarak tavlama değerleri için Tablo 2.2. verilmiştir:

Tablo 2.2. Karbon Eşdeğeri-Tavlama İlişkisi

Karbon Eşdeğeri ($C_{eş}$)	**Ön Tavlama**
0,45	Gerek Yok
0,45-0,60	100-200 °C
> 0,60	200-300 °C

2.2.3. Ergiyen Bölge

Ergiyen bölge genellikle kaynak banyosunda oluşan türbülanstan dolayı katılaşmadan önce iyice birbirine karışmış esas ve kaynak metalinden ibarettir. Eğer hava atmosferine karşı koruma tam değilse ergime sırasında O_2 ve N_2 absorbe olur. Oksijen kaynak yerinde önemli bir rol oynar ve giderilmesi zor birçok yanmalara neden olur. Ergiyen bölgenin katılaşması kendini çevreleyen esas metale karşı ısı iletimi ile olur ve oldukça iri sütunlar şeklinde kristaller oluşturur. Özellikle kalın parçalarda bu iri silindirik kristallerin birleştiği yerde segregasyondan dolayı bir boşluk oluşur ve kaynak dikişinde zayıflama olur.



Şekil 2.2. Alın Birleştirmede Segregasyon Bölgesi

2.2.4. ITAB (Isının Tesiri Altındaki Bölge)

Isının tesiri altındaki bölge kaynak metalinin yani ergiyen bölgenin esas metalle birleştiği kısımdan itibaren yaklaşık 1400–700 °C arasındaki bir sıcaklığa maruz kalan bölgedir. Eğer ITAB'da erişilen en yüksek sıcaklık, esas metalin birleşimi, kaynak koşulları tanınırsa kaynak işlemi sonunda oluşacak yapıyı önceden tahmin etmek mümkündür. Ayrıca, soğuma hızının da hesaba katılması gerekir.

Özellikle, 900 °C üzerinde tavlanan bölge kalın parçaların kaynağında soğuma daha çabuk olacağından bu kısımda çok yüksek bir sertlik elde edilir. Uluslar arası kaynak enstitüsünün 9 numaralı kaynak kabiliyeti komisyonunun raporuna göre ITAB 'ın maksimum sertliği için 350 – 400 HV (Vickers Sertliği) değeri kıstas olarak teklif edilmiştir. Teklifte sertliğin daha fazla olması halinde özel tedbirlerin alınmasının gerekliliğine de ayrıca değinilmiştir.

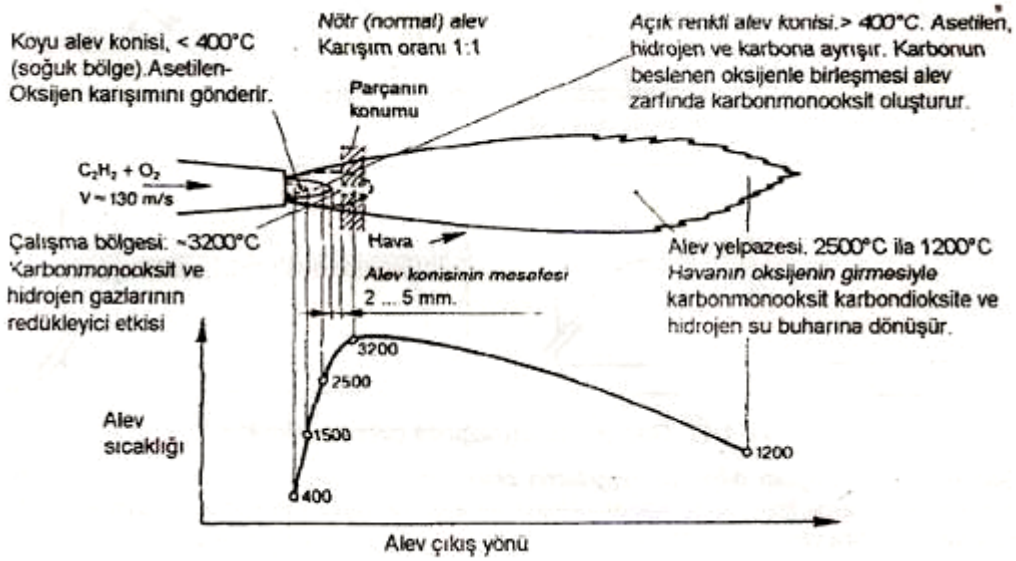
Birleştirme yapıldıktan sonra parçaların mukavemet özellikleri, kaynak bölgesinin metalurjik olarak incelenmesi (birleşmenin tam olup olmadığı, ITAB' de istenmeyen bir oluşum olan artık östenit oluşup oluşmadığı varsa diğer oluşumların, karbon' un veya varsa alaşım elemanlarının difüzyona uğrayıp uğramadığına) ve kaynak bölgesinin sertliğinin dikkatli olarak incelenmesi gerekmektedir.

2.3 Kaynak Yöntemleri

2.3.1 Gaz Kaynağı

Gaz eritme kaynağı, en eski kaynak yöntemlerinden birdir; ancak, TIG kaynağı gibi modern kaynak yöntemleri için öncülük etmiştir.

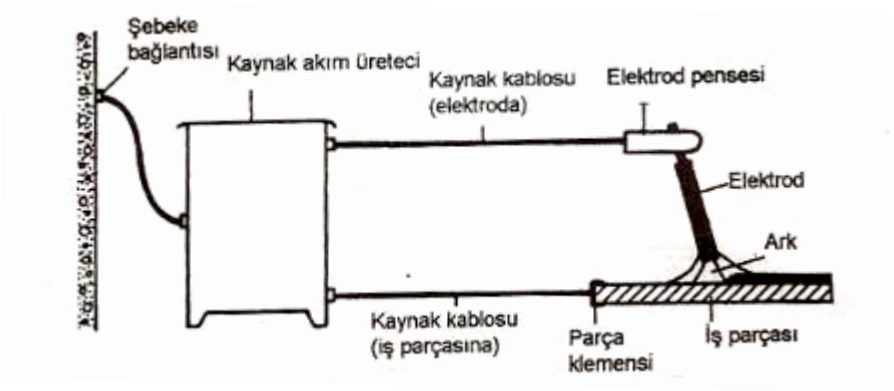
Oksi-asetilen kaynağı olarak da bilinen gaz kaynağında, ısı membaı olarak bir alev kullanılır. Alevin oluşturulması ve sürdürülmesi için oksijen gibi bir yakıcı gaz gerekir. Alev, hem esas metali hem de kaynak bölgesine sevk edilen çubuk şeklindeki ilave metali eritir. Oksi-asetilen alevinin ayrıntılı gösterimi Şekil 2.3.' de verilmiştir. Gaz eritme kaynağı düşük yatırım maliyetiyle üniversal bir uygulama kabiliyetine sahiptir.



Şekil 2.3 Asetilen-oksijen Alevi

2.3.2 Elektrik Ark Kaynağı

Bu yöntemde ark, eriyen bir çubuk elektrod ile iş parçası arasında yanar. Ark ve kaynak banyosu, havanın zararlı etkilerinden, elektrod tarafından sağlanan gazlar ve\veya cüruf ile korunur. Şekil 2.4.'de elektrik ark kaynağının prensip şeması verilmiştir.

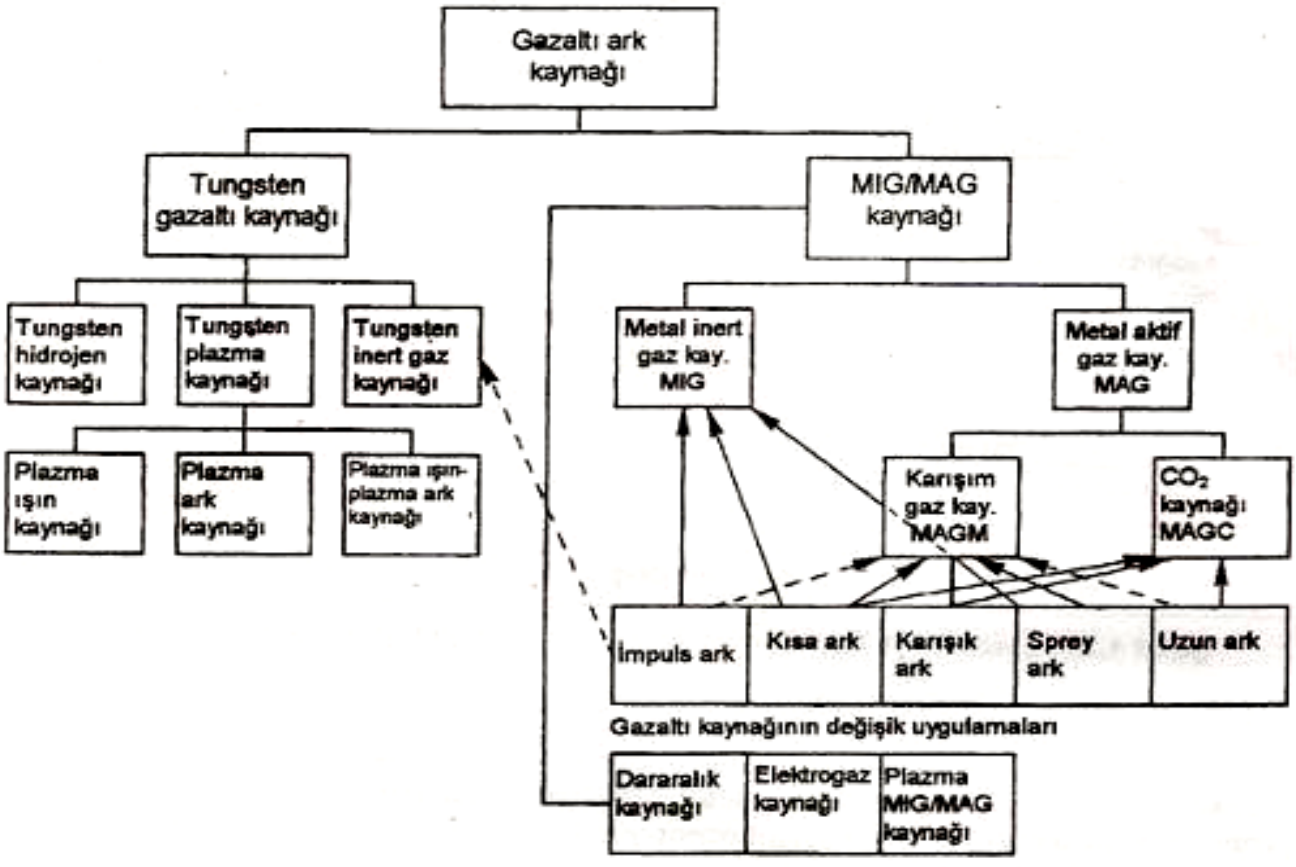


Şekil 2.4. Elektrik Ark Kaynağının Prensip Şeması

2.3.3 Gazaltı Ark Kaynağı

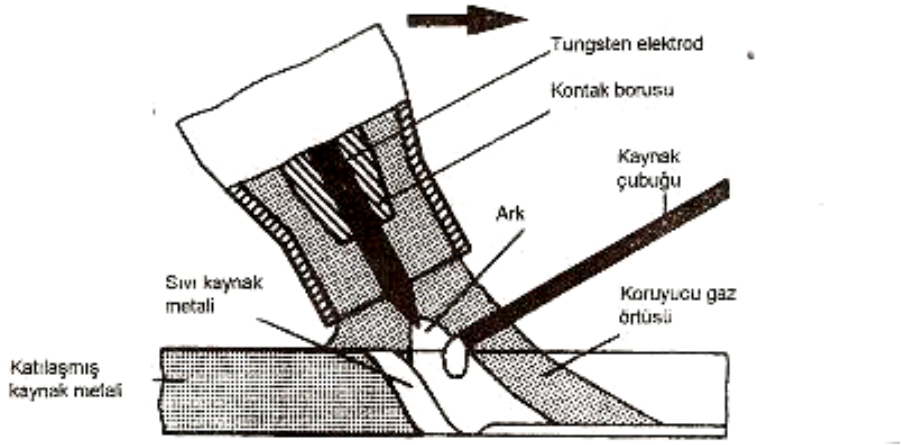
Gazaltı kaynağı, kaynak bölgesinin bir koruyucu gaz yardımıyla korunduğu kaynak yöntemler grubudur. Kullanılan koruyucu gaz türüne göre ve elektrodun ark taşıyıcı olup olmadığına göre alt gruplara ayrılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan kaynak yöntemidir. Tablo 2.3., gazaltı kaynak yöntemlerinin sınıflandırılmasını vermektedir.

Tablo 2.3. Gazaltı Kaynak Yöntemlerinin Sınıflandırılması



2.3.3.1. Tungsten Inert Gaz (TIG) Kaynağı

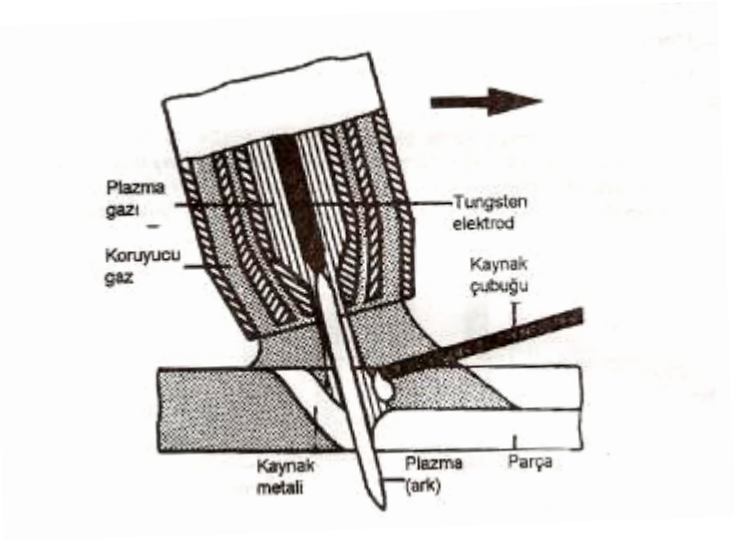
TIG kaynağının prensibi Şekil 2.5.' de gösterilmiştir. Ark, tungstenden mamul erimeyen bir elektrod ile iş parçası arasında yanar. Tungsten elektrodla eşeksenli olarak beslenen koruyucu soy gaz (Argon, Helyum), hem erimiş kaynak banyosunu hem de elektrodu korur. Kaynak ilave malzemesi olarak kaynak bölgesinde elle beslenen çubuk formundaki teller kullanılır.



Şekil 2.5. TIG Kaynağının Prensibi

2.3.3.2. Plazma Kaynağı

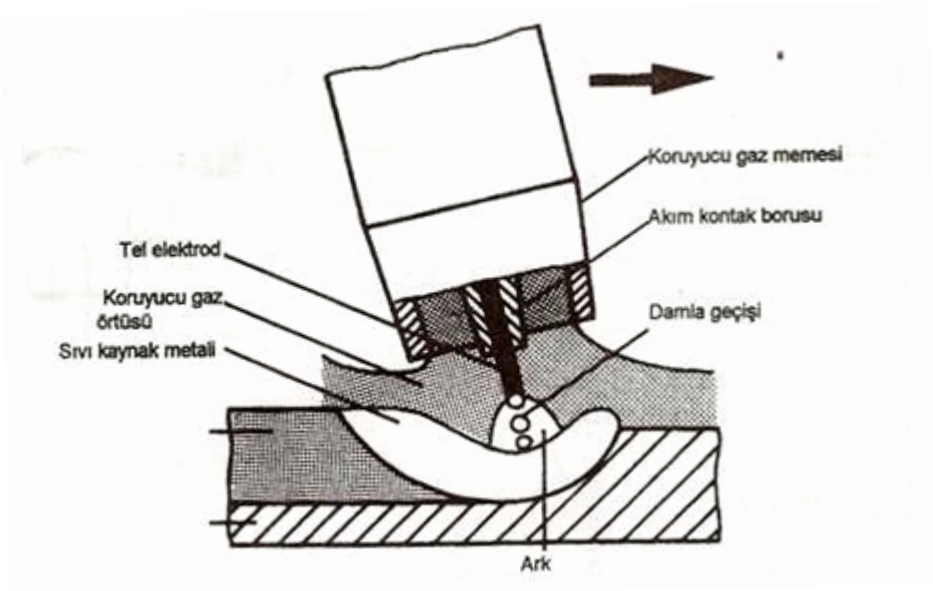
Plazma kaynak yöntemi, TIG kaynağındaki gibi erimeyen bir tungsten elektrod ve soy bir koruyucu gaz yardımıyla yapılır. Ancak TIG kaynağına göre ark, özel bir torç yapısı tarafından sınırlanmış ve büzülmüştür. Arkın sınırlanması, özel torç konstrüksiyonu sayesinde gerçekleşir. Bu mekanik sınırlamaya ek olarak, ark, meme dışından akan soğuk koruyucu gaz tarafından da termik olarak büzülür. Şekil 2.6.' de plazma kaynağının prensip şeması verilmiştir.



Şekil 2.6. Plazma Kaynağının Prensibi

2.3.3.3. MIG\MAG Kaynağı (Eriyen Elektrodla Gazaltı Kaynağı)

MIG\MAG kaynağı, koruyucu gaz kullanılarak yapılan (gazaltı) ark kaynak yöntemleri arasında yer alır. Koruyucu gaz türüne göre Metal Inert Gaz (MIG) veya Metal Aktif Gaz (MAG) kaynağı olarak ayrılır. MAG kaynağı da kendi içinde ayrıca kullanılan koruyucu gaz türüne göre MAGC (CO_2) kaynağı ve MAGM (Karışım gaz) kaynağı olarak ikiye ayrılır. Şekil 2.7. MIG\MAG Kaynağının Şematik Görünümü verilmiştir.

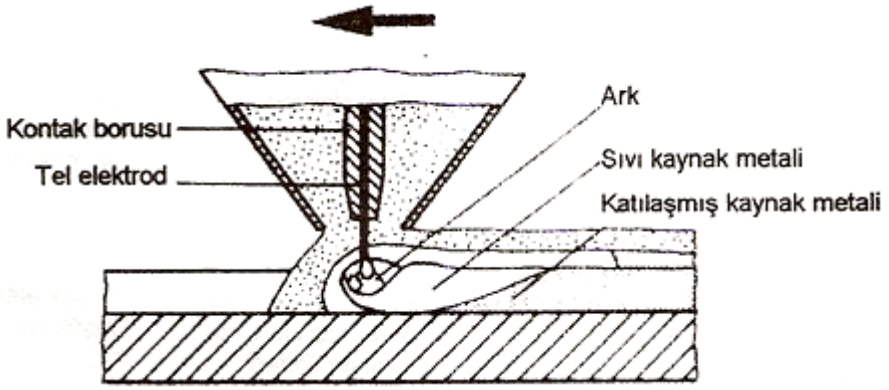


Şekil 2.7. MIG\MAG Kaynağının Şematik Görünümü

2.3.4. Tozaltı Kaynağı

Tozaltı kaynağı, yüksek eritme gücü ve yüksek kalitede kaynaklı bağlantılar sağladığından, kaynaklı imalat yapan işletmelerde sabit bir konumda uygulanır.

Tozaltı kaynağında ark, eriyen bir elektrod ile parça arasında gözle görülmeyecek şekilde yanar. Ark ve kaynak bölgesi, bir toz yığını arasında bulunur. Kaynak banyosu, atmosferin etkilerinden, tozun oluşturduğu cüruf tarafından korunur. Şekil 2.8. Tek Telli Tozaltı Kaynağının Prensip şeması verilmiştir.



Şekil 2.8. Tek Telli Tozaltı Kaynağının Prensibi

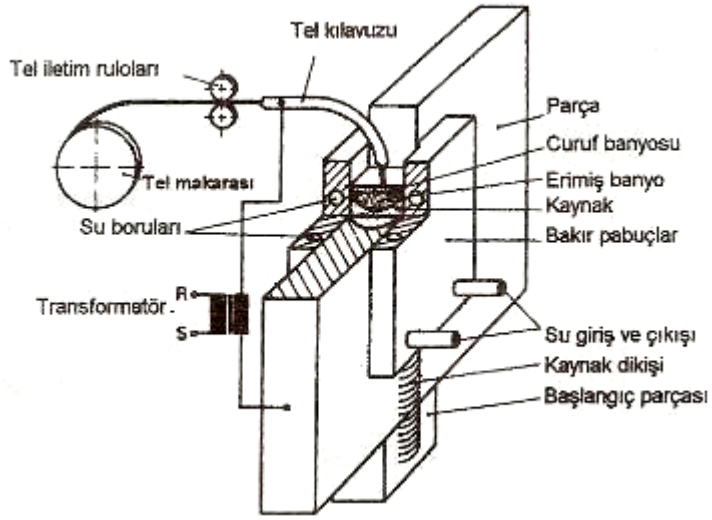
2.3.5. Direnç Kaynağı

Direnç kaynağında kaynak için gerekli ısı, elektrik akımının kaynak bölgesinden geçişi sırasında malzemenin akıma karşı gösterdiği elektriksel direnç nedeniyle ortaya çıkan ısıdır. Kaynak işlemi, basınç uygulanarak veya uygulanmadan ve ilave metal kullanarak veya kullanmadan oluşturulur.

2.3.6. Özel Kaynak Yöntemleri

2.3.6.1. Elektrocuruf Kaynağı

Elektrocuruf kaynağı, kalın metallerle çeşitli kaynaklar oluşturmakta kullanılır. Kaynak dikey olarak yukarıdan aşağıya yapılır. Kaynağa başlamadan önce, iki esas metal arasına ve alt kısma, birkaç cm kalınlığında cüruf yapıcı madde yerleştirilir. Cüruf elektrik iletkenliğine sahiptir. Şekil 2.9., elektrocuruf kaynağının şematik gösterimini içermektedir.



Şekil 2.9. Elektrocuruf Kaynağının Prensip Şeması

2.3.6.2. Sürtünme Kaynağı

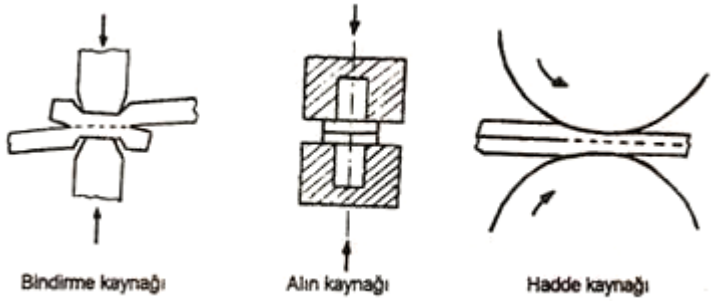
Sürtünme kaynağı, iki metal parçasını birleştirmek için sürtünme tarafından üretilen ısıyı kullanır. Bu işlem esas olarak, geniş, büyük çubukların ve boruların alın kaynağı için kullanılır. İşlem sırasında dış bir ısı kaynağı kullanılmaz. Birleştirilecek parçaların uçları düşük bir basınçla bir araya getirilir. Hareketli ve sabit parçalar arasındaki sürtünme, kaynak oluşumu için gerekli ısıyı üretir. Metal yüzeyleri plastik hale geldiğinde döndürme hareketi durdurulur ve büyük bir basınçla birbirlerine bastırılır.

Bu yöntemin ayrıntılarına ve işleyiş prensiplerine ileride geniş biçimde değinilecektir.

2.3.6.3. Soğuk Basınç Kaynağı

Bu işlemde bir dış ısı kaynağı kullanılmaz. Soğuk basınç kaynağı, metalleri birleştirmek için büyük basınçlar kullanır. Sadece yüzey molekülleri ısıtılır ve bir kaynak oluşturmak üzere birleştirilir. Bu yöntem genellikle alüminyum-alüminyum, bakır-bakır ve alüminyum-bakır gibi yumuşak metalleri birleştirmek için kullanılır. Güvenilir kaynak dikişleri elde edilir.

Kaynağı oluşturan enerji, genellikle hidrolik preslerle sağlanan yüksek seviyeli basınçtır. Şekil 2.10.'da yöntemin prensip şeması verilmektedir.

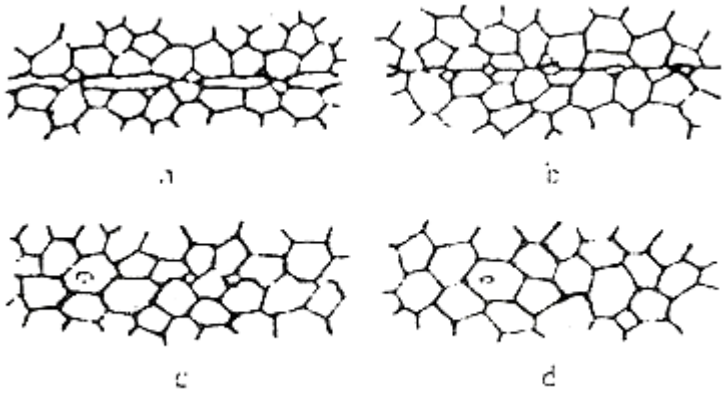


Şekil 2.10. Soğuk Basınç Kaynağının Prensip Şeması

2.3.6.4. Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağı, aynı veya farklı, çoğunlukla metal malzemelerin birleştirilmesinde kullanılır. Özellikle uçak-uzay ve nükleer teknoloji için geliştirilmiştir.

Yüksek sıcaklıkta etkiyen kaynak basıncı, yüzeydeki pürüzlülük tepelerinin plastik şekil değişimini sağlar. Bu şekilde arttırılan temas yüzeyi, madde bağlarının oluşumuna yol açar ve kaynak işlemi böylece gerçekleşir. Şekil 2.11. Difüzyon Kaynağının Prensip Şeması verilmiştir.

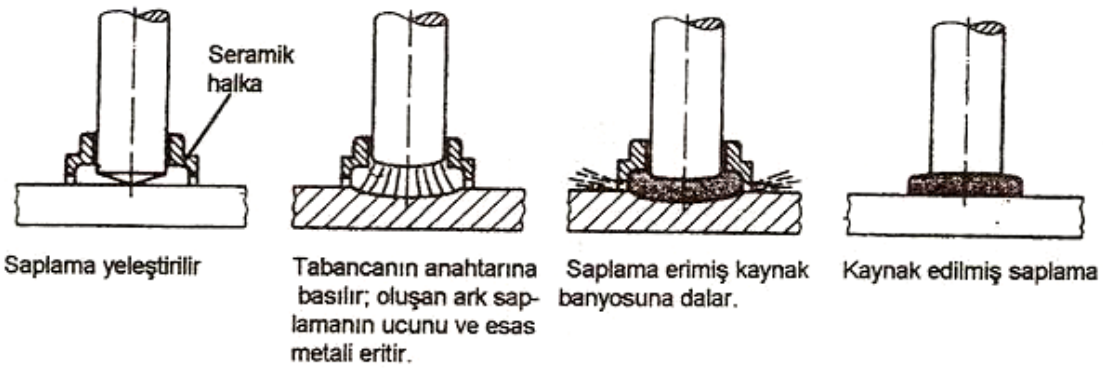


Şekil 2.11. Difüzyon Kaynağının Prensip Şeması

2.3.6.5. Ark Saplama Kaynağı

Ark saplama kaynağı, yarı-otomatik bir kaynak yöntemidir. Genellikle metal tespit elemanlarının, delik veya tapa açmadan metal levhalara, kirişlere birleştirilmesini sağlar. Cıvatalar, vidalar, perçinler ve saplamalar bu yolla birleştirilebilir. Isı kaynağı olarak ark, enerji kaynağı olarak elektrik kaynak transformatörü kullanılır. Kaynakçı bir saplamayı tabancaya yerleştirir, tabanca esas metal üzerinde konumlandırılır ve tabanca üzerindeki bir

anahtar, kaynak çevrimini başlatır. Ark Saplama Kaynağında İşlem Sırası Şekil 2.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Ark Saplama Kaynağında İşlem Sırası

BÖLÜM 3. SÜRTÜNME KAYNAĞI YÖNTEMİ

3.1. Yöntemin Tanımlanması

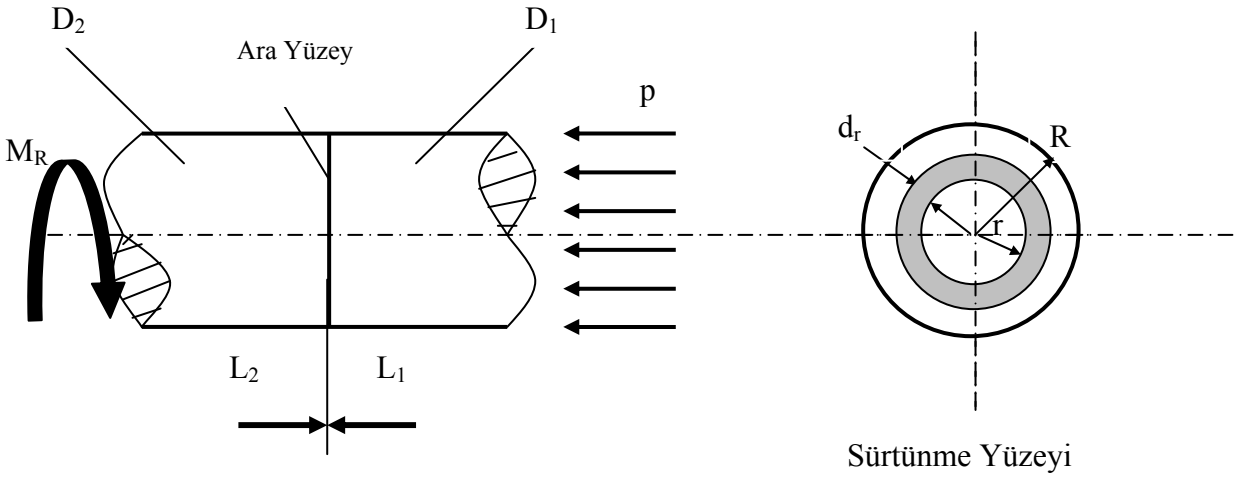
Sürtünme kaynağı, çağımızda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Malzemelerin sürtünmesinden faydalanılarak, mekanik enerjiyi termal enerjiye dönüştürerek oluşan ısıyla malzemelerin kaynak edilmesi fikri yeni değildir. Sürtünme kaynağının başlangıcı 15 yy' a kadar gitmesine rağmen, fakat konu ile ilgili ilk patent 19'yy da 1891 de Amerikalı makinist J.H. Bevington tarafından alınmıştır. Bevington sürtünme ısısını kullanarak metal boruların kaynağını gerçekleştirmiştir. Daha sonraları konu ile ilgili W. Richter tarafından 1924 yılında İngiltere' de /British patent no: 572789 ve 1929 yılında Almanya'da (Dr-patent no: 477084), H. Klopstock tarafından 1924 yılında Sovyetler Birliği'nde birer patent alınmıştır. H. Klopstock ve A.R. Neelands silindirik parçaların sürtünme kaynağı için 1941 yılında bir patent almışlardır. Ayrıca II. Dünya savaşı sırasında Almanya ve Amerika'da plastik malzemelerin kaynağı için sürtünme kaynağı kullanılmıştır. Bununla birlikte sürtünme kaynağının ticari bir proses olarak gelişimi ve konu ile ilgili bilimsel çalışmaların başlaması bir Rus makinist tarafından gerçekleştirilmiştir. Rus makinist A.J Chdikov iki metal çubuk arasında başarılı bir kaynak gerçekleştirerek 1956 yılında Sovyetler Birliği'nde konu ile ilgili bir patent (No: 106207) almıştır. Sovyetler Birliği'nde ki daha yoğun çalışmalar Vill ve arkadaşları tarafından yürütülmüştür. Bu proses ABD'ye 1960 yılında girmiştir. American Machine and Fondry Co.' da Holland Cheng adlı araştırmacılar sürtünme kaynağının termal ve parametre analizleri üzerine çalışmışlardır. İngiltere'de ilk sürtünme kaynağı kaynak enstitüsü tarafından 1961 yılında gerçekleştirilmiştir. 1962 yılı itibariyle ise Sovyetler Birliği'nde, bir çok fabrikada sürtünme kaynağı kullanılır hale gelmiştir (Kharkov ısıtma ve havalandırma fabrikası, Lysbenk metal fab., Vitbesk takım fab., K. Gotwal'd otomobil fab., Minsk traktör fab. v.b.). Yine 1952 yılında ABD'de Caterpillar Tractor Co. sürtünme kaynağını modifiye ederek atalet kaynağı olarak anılan yöntemi geliştirmişler ve bundan sonra konvansiyonel sürtünme kaynağı Rus tipi proses, atalet kaynağı ise Caterpillar tipi proses olarak adlandırılmıştır. Bu tarihten itibaren daha hızlı gelişme gösteren proses hızla bütün dünyada çabucak yayılmış ve bir çok endüstride uygulama alanı bulmuştur. Günümüzde sürtünme kaynağı modern kaynak yöntemleri arasında elektron ışın kaynağından sonra pratikte en çok uygulama alanı bulmuş olan bir yöntemdir (M. Yılmaz, 1991).

Sürtünme kaynağı elektriksel enerji veya diğer enerji kaynaklarından yararlanmaksızın, çalışma parçalarının ara yüzeylerinde mekanik olarak oluşturulan sürtünme yoluyla üretilen

mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısıdan yararlanılarak yapılan bir katı hal kaynak tekniğidir.

Parçaların temas yüzeyleri arasında genellikle bir parçanın döndürülmesiyle rölatif bir hareket meydana gelir. Aynı zamanda etkili olan basınç başlangıç periyodunda noktasal temasla yerel kaynaklar oluşur ve bunun ardından kaynaklanmış bölgelerin makaslanmasına yol açar. Böylelikle yerel sıcaklık yükselmeleri meydana gelir. Bu olaylar, ısı iletimiyle çok kısa sürede tüm temas yüzeylerinde bir sıcaklık dengelenmesi meydana gelecek şekilde tekrar eder. Yerel olarak erime sıcaklığına erişilebilir. Rölatif hareketin durdurulmasından sonra genellikle basınç yükseltilir. Plastik hale gelen malzeme bir fışkırma(çapak) halkası oluşturacak şekilde bastırılır. Bu arada birleştirilen parçalar eksenel yönde kısalır. Böylece ilave malzeme kullanmaksızın, genellikle ısının tesiri altındaki bölgesi (ITAB) çok dar olan bir kaynak bağlantısı elde edilmiş olur. Çelikler için bağlantı bölgesindeki sıcaklık 900 – 1300 °C arasındadır (M. Şahin, 2001).

Sürtünme kaynağı uygulamalarının büyük çoğunluğunu dairesel kesitli çubukların ya da boruların kaynağı oluşturmaktadır. Bu tür uygulamalarda sürtünmeyi oluşturan temel hareket dönme hareketidir ve proses konvansiyonel sürtünme kaynağı olarak adlandırılır.



Şekil 3.1. Kaynak Edilen Parçalar

D : Parça Çapı (mm)
p : Basınç (N/mm^2=MPa)
M_R: Döndürme Momenti (Nmm)
L : Parça Uzunluğu (mm)

Sürtünme yüzeyindeki halka elemanda ortaya çıkan frenleme momenti sürtünme yüzeyi boyunca toplandığında Döndürme momenti (M_R):

$$M_R = {}_0\int \mu\ p\ 2\pi\ r\ d_r\ r \qquad (3\text{-}1)$$

Buradan;

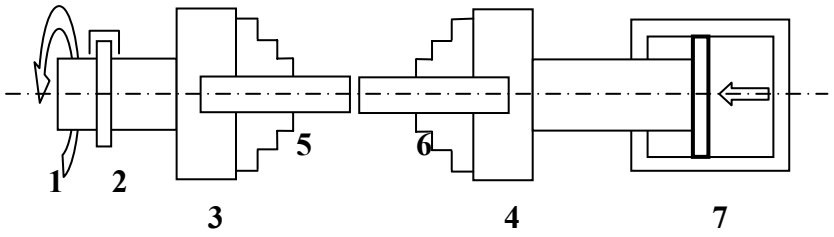
$$M_R = \mu\ (2\backslash 3)\pi\ p\ r^{3} \qquad (3\text{-}2)$$

bulunur.

Sürtünme kaynağında, sürtünme için kullanılan dönme hareketi yanında, yörüngesel hareket, lineer titreşim hareketi ve açısal titreşim hareketi de uygulanabilir. Yörüngesel hareket silindirik olmayan parçaların kaynağı içindir. Bu uygulamada sabit duran parça üzerinde diğer parça bir köşesi dairesel bir yörünge çizecek şekilde hareket eder. Lineer titreşim hareketinde parçalardan biri uygulanan basınç altında ileri geri titreşim hareket yapar. Bu yöntem ilk defa V.I. Vill (1962) tarafından önerilmiştir. Açısal titreşim hareketinde ise parçalardan biri uygulanan basınç altında belli bir açıyı gören yay parçası yörüngesinde hareket eder. Daha öncede belirtildiği gibi sürtünme kaynağı, gerekli mekanik enerjiyi sağlayan kaynağa göre iki ayrı yöntemle uygulanabilir. Günümüzde bu iki yöntemin bileşimi olan kombine kaynak yöntemleri de geliştirilmiştir.

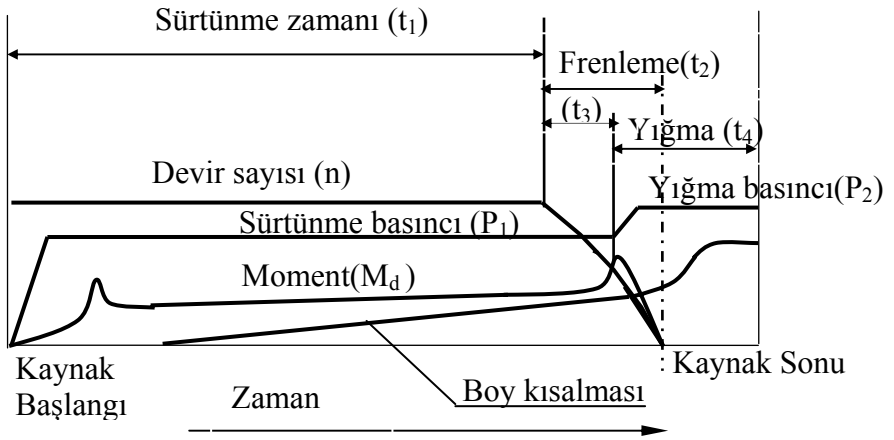
3.1.1. Klasik (Sürekli Tahrikli) Sürtünme Kaynağı

Birleştirilecek parçalardan biri ekseni etrafında döndürülmekte diğeri ise eksenel yönden hareketli olarak dönen parçaya belirli bir süre bastırılmaktadır. Sürtünen yüzeylerde yeterli sıcaklığa erişilince dönme işlemi ani olarak durdurulurken basınç arttırılmakta ve yumuşak malzeme bu yüksek basınç altında soğumaya bırakılmaktadır. Açıklamadan da anlaşılabileceği gibi basınç iki kademeli olarak uygulanmaktadır. Basıncın birinci kademesine "Isınma veya Sürtünme Basıncı" ve ikinci kademesine de "Yığma veya Dövme Basıncı" denir.



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

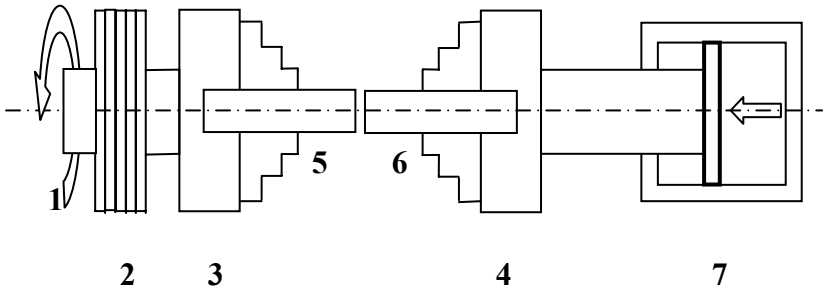
Şekil 3.2. Sürekli Tahrikle Sürtünme Kaynağı



Şekil 3.3. Klasik Sürtünme Kaynak Parametreleri

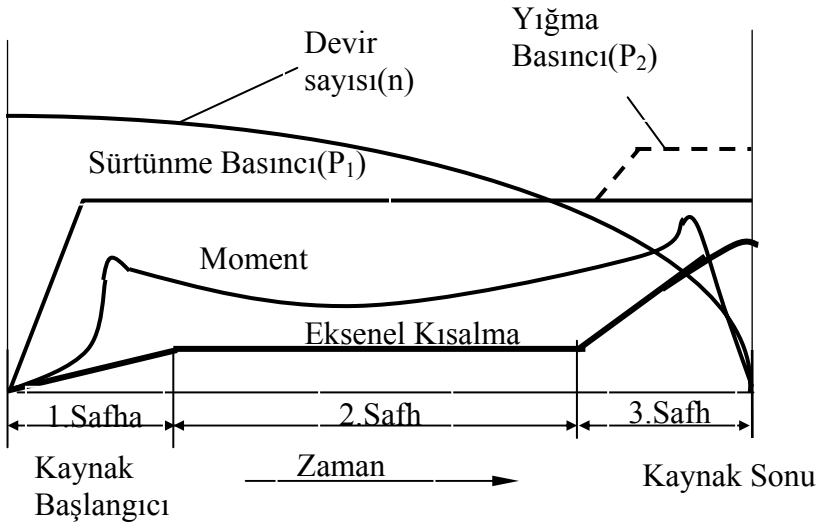
3.1.2. Volanlı (Atalet) Sürtünme Kaynağı

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



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

Şekil 3.4. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynağı

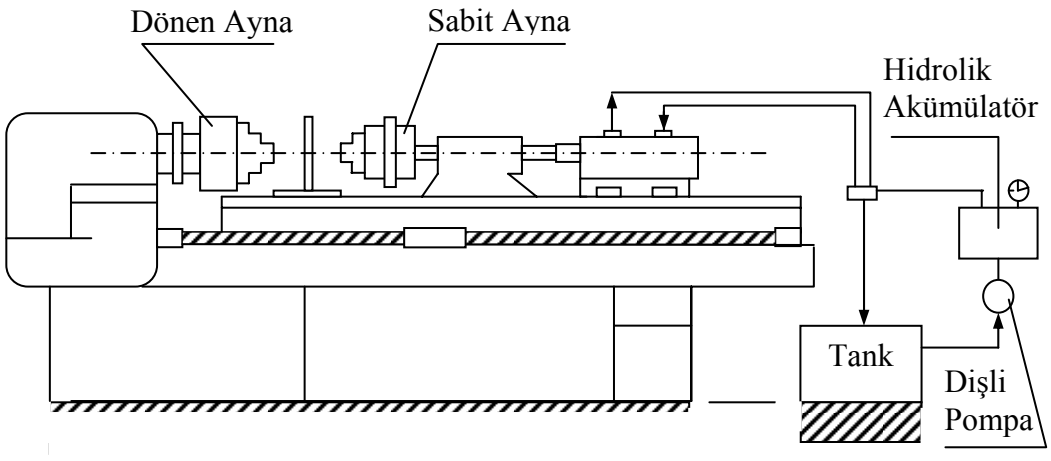


Şekil 3.5. Volan Tahrikli Sürtünme Kaynak Parametreleri

3.1.3. Kombine Sürtünme Kaynağı

Her iki kaynak işleminin yapıldığı kaynak türüdür.Kaynak işlemi sürtünme ve yığma safhalarını içermektedir. Hem atalet ve hem de sürtünme kaynağı için moment eğrilerinin değişimi işlemin izahı için önemli değer taşımaktadır. Prosesin başlangıcında kuru sürtünme hakimdir ve bu sürtünmenin etkisiyle moment eğrisi bir zirve yaptıktan sonra dengeye gelir. Süreç içersinde oksit tabakalarının parçalanması sonucu çıplak yüzeyde temaslar sırasında kuvvetli atomsal bağlar oluşmaya başlar. Sürtünme hareketi ile bu bağlar koparılmaya çalışılır. Sonuçta bu temas noktalarında büyük adezyon kuvvetleri oluşur, moment artar ve sıcaklık istenilen düzeye ulaşır. Frenleme sonrası hız azalırken moment de sıfıra düşer.

Tasarım olarak sürtünme kaynağı makineleri torna, matkap gibi metal işleme makinelerini andırmaktadır ve ilk sürtünme kaynağı makineleri bu tezgâhların modifiye edilmiş şekilleridir. Şekil 3.6. ‘da tipik bir sürtünme kaynağı makinesi görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere bir sürtünme kaynağı, ana gövde bağlama tertibatları, dönme ve yığma mekanizmaları, fren sistemi, güç ünitesi, kontrol üniteleri ve kumanda tablosu kısımlarından oluşmaktadır. Sürtünme kaynağı makineleri tam mekanize makineleridir. Parçaların bağlanması, çözülmesi ve oluşan çapakların alınması otomotize edilebilir. Bilindiği gibi sürtünme kaynağının ana fonksiyonları parçaların bağlanması ve sıkıştırılması, basınç altında dönme ve sürtünme, frenleme, yığma ve gerekli sürelerin hassas olarak ayarlanmalıdır. Numune bağlama aparatları gerekliği rijitliğe sahip olmalı, üzerine gelecek momentleri karşılamalı, radyal kaçıklıklar ve titreşimler, gerekli incelemeler ve araştırmalar yapılarak sönümlenecek şekilde makine tasarlanmalıdır. Titreşimler yanında oluşacak radyal ve eksenel kuvvetlerden dolayı parçaların sabitlemesi ve eksenel kaçıklıkların önlenmesi zordur. Bu nedenle bağlama tertibatı parçaları gereken miktarda sıkıştıracak dizayna sahip olmalıdır. Bu işlem için genellikle V şekilli iki çene veya özel çeneler kullanılır. Kaynak ekipmanlarını tutmak için kullanılan bütün durdurma elemanları güvenilir olmalıdır. Bağlantısı yapılacak parçalarda oluşabilecek küçük bir kayma hem kaynak bağlantısına ve hem de frenleme sisteminin zarar görmesine neden olur. Uygulamaların çoğunda otomatik olarak merkezleyen frenleme tertibatları kullanılır.



Şekil 3.6. Sürtünme Kaynak Makinası

3.2. Sürtünme Kaynak Parametreleri

Sürtünme kaynağı kontrolü gereken dönme hızı, sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi, frenleme süresi, yığma geciktirmesi süresi ve yığma süresi gibi parametreleri içermektedir. Bu değişkenler dışında numune geometrisi ve numunenin yapıldığı malzemeden kaynaklanan diğer parametreler de söz konusudur. Ancak yapılan çalışmalar yöntem üzerinde en etkili olan ve optimizasyonu gereken parametrelerin dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi olduğunu göstermiştir. Konu ile ilgili temel eserler incelendiğinde kaynak parametreleri ile ilgili şu genel sonuçlar çıkartılabilir:

Dönme hızı özellikle ITAB'ın genişliğine etkir. Genellikle çelikler için çevresel hız 1.2-1.8 m/s arasında önerilmektedir. Çevresel hız 1.2 m/s altında olursa çok yüksek momentler, dolayısıyla da üniform olmayan bir yığma oluşur. Eğer çevresel hız 1.8 m/s 'den büyük ise, yani yüksek hızlar kullanılırsa, kaynak bölgesinde oluşan aşırı ısınmayı önlemek için sürtünme basıncı ve sürtünme süresi çok dikkatli kontrol edilmelidir. Genelde sürtünme basıncı ve yığma basıncı numune geometrisi ve yapıldığı malzemeye bağlıdır. Sürtünme basıncı ve yığma basıncı değişimi kaynak bölgesindeki sıcaklık derecesi ve eksenel kısalma miktarı ile kontrol edilebilir.

Sürtünme basıncı, temas eden yüzeylerden oksitleri uzaklaştırabilecek, yüzeylerin atmosfer ile ilişkisini kesebilecek ve ara yüzeylerde üniform bir ısıtma sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Sürtünme periyodu sonrasında, eğer çelikler söz konusu ise bir yığma basıncının uygulanması bağlantı kalitesini arttırır. Uygulanan yığma basıncı malzemenin sıcak akma sınırına bağlı olup; aşırı kaynak yığılmasına sebep olacak kadar düşük olmamalıdır. Farklı malzemelerin kaynağında ise daha düşük mukavemetli malzeme esas alınarak yığma basıncı değerleri bulunur. Genellikle yumuşak çelikler için sürtünme basıncı 30–65 MPa, yığma basıncı 75–140 MPa, orta karbonlu ve yüksek karbonlu çelikler için sürtünme basıncı 70–210 MPa, yığma basıncı 100–420 MPa değerleri arasındadır.

Sürtünme ve yığma süreleri ise malzemeye bağlıdır. Sürtünme süresi, sürtünen yüzeylerdeki olası kalıntı ve pislikleri temizleyecek ve gerekli plastisite için üniform bir kaynak bölgesi sıcaklığına ulaşmayı sağlayabilecek düzeyde olmalıdır. Tatminkâr bir kaynak bağlantısı için belirli bir minimum bir ısıtma süresi değeri aşılmalıdır. Elverişsiz bir ısıtma bağlantıda yetersiz plastisiteye, yetersiz kaynaklanmaya sebep olacaktır (M. Şahin, 2001).

3.3. Malzemelerin Sürtünme Kaynak Kabiliyeti

Demir ve demir dışı metaller sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilir. Ayrıca sürtünme kaynağı, diğer kaynak yöntemleri ile kaynak edilemeyen farklı termik ve mekanik özelliklere sahip metallerin kaynağında da kullanılabilir. Erime sıcaklığı altındaki sıcaklıklar ve kısa kaynak süresi sürtünme kaynağına bu olanağı vermektedir. Farklı termik ve mekanik özelliklere sahip metallerin sürtünme kaynağı simetrik olmayan deformasyon miktarlarına yol açar. Yüksek bir kaynak mukavemeti ise relatif olarak simetrik plastik deformasyon veren farklı malzemelerin kaynağında elde edilebilir.

Sürtünme kaynağında dövülebilen iyi kuru sürtünme özellikleri olmayan bütün malzemeler kolaylıkla kaynak edilebilir. Kuru yağlama sağlayan alaşım elementleri bağlantı bölgesinin kaynak sıcaklığına erişmesini engeller. Demir esaslı malzemeler, yumuşak çelikten, yüksek alaşımlı çeliklere kadar kaynak edilebilmektedir. Yumuşak çelikler relatif olarak daha kolay kaynaklanmakta ve geniş bir parametre aralığına sahiptirler. HSS türü yüksek alaşımlı çelikler ise daha dar parametre aralığında ve daha yüksek eksenel kuvvetlerde kaynaklanabilir. Bunların, tokluğu ve çatlak hassasiyeti dikkat edilmesi gereken bir konudur, parçalarda oluşan çapaklar mutlaka alınmalıdır. Çünkü bu çapaklar çatlak başlangıcı için uygun yerlerdir.

Paslanmaz çelikler, sinterlenmiş çelikler ve maraging çelikleri literatürde verilen kaynak parametrelerinde kolaylıkla kaynaklanabilir. Isıl işlemli paslanmaz çelikler diğer yüksek alaşımlı çelikler gibi kaynak değişkenlerine çok hassastır ve ITAB ‘da arzu edilen özellikler için kaynak sonu prosesler gerektirir. Bunların dışında sinterlenmiş malzemeler, Al ve alaşımları, Cu ve alaşımları, Ti alaşımları, Zr alaşımları, Mg alaşımları, ısıl direnç alaşımları olan Ni-Co alaşımları, refrakter metaller olan T, Mo, Ni ve Ta alaşımları da sürtünme kaynağı ile kaynak edilebilmektedir. Bazı metal ve alaşımlarında aşağıda belirtilen metalürjik içeriklerinden dolayı başarılı bir kaynak yapılamaz. Bu sınırlamalar genelde sürtünme ısısı ve dönmeye yöneliktir.

- Bazı dökme demirler, serbest grafitin sürtünme sıcaklığını sınırlaması nedeniyle
- %0,3’ün üzerinde kurşunlu bronz ve pirinçler, sürtünme aralığının sınırlanmasından
- %0,13’ün üzerinde S, Pb içeren çelikler, sürtünme sıcaklığını sınırlanmasından
- Yüksek derecede anizotropik malzemeler geçiş bölgesi kırılganlığından
- Yapısında hazır olarak grafit, Mn, serbest Pb gibi zayıflatıcı faz içeren malzemeler (M. Şahin, 2001).

3.4. Kaynak Öncesi Hazırlık ve Bağlantı Dizaynı

Tasarımcı; iş parçasının şekli, her bir parçanın gruplandırılması ve üretim şartlarının seçimi vasıtasıyla sürtünme kaynağının avantajlarından yararlanabilir. Sürtünme kaynağı bağlantısı genel olarak anma yüzeyini kapsadığından aşağıdaki hususlara özellikle dikkat etmek gerekir (M. Şahin, 2001):

- Dönel simetrik alın kaynağı öncelik taşımalıdır.
- Parçaların bağlanmasında yeterli uzunluk ve rijitliğe dikkat edilmelidir.
- Büyük çaplı parçalarda küresel veya kesik koni şekilli bir ağız sürtünmeye yardımcı olabilir.
- Ayrılma kesitlerine dikkat etmek gerekir.
- Büyük masif kesitlerde, sürtünme kaynağı sırasında malzeme transferini kolaylaştırmak amacıyla yeterli çap ve derinlikte eksenel girinti yapılabilir.
- İnce cidarlı borularda tesviye işlemi mümkün olduğu kadar az tutulmalıdır.

3.4.1. Kaynak Yüzeyinin Hazırlanması

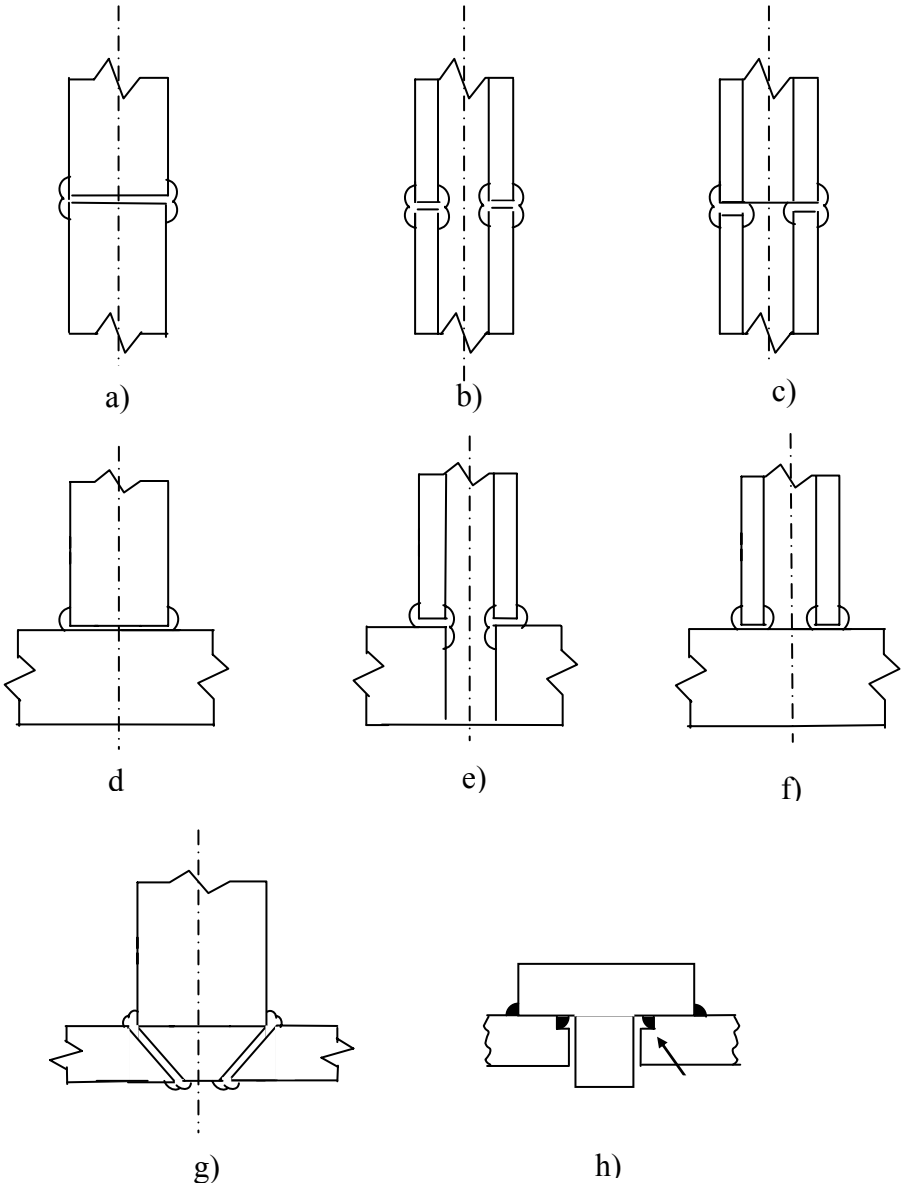
Kaynak yapılacak parçaların yüzeyleri hazırlanırken aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır (M. Şahin, 2001):

- Sürtünmeyi önleyecek veya azaltacak, kav, hadde ve döküm tabakaları, kalın oksit tabakaları, çekme veya dövme işlemi tozları, yağlama maddeleri, kaplama tabakaları gibi yabancı maddeler kaynak yüzeylerinden uzaklaştırılmalıdır. Kaynaklı parçada az bir kısalma söz konusu ise yağ, gres, boya, ince pas tabakası da giderilmelidir.
- Ağız bölgesindeki su verilmiş sert tabakalar da yumuşatma tavlamasıyla giderilmelidir veya bu tabaka kaynak işlemi sırasında ortadan kalkabilecek şekilde ince olmalıdır.
- Malzeme kombinasyonlarında kaynağın cinsi malzemenin özel şartlarına uygun olmalıdır.
- Malzeme kombinasyonlarında farklı deformasyon kabiliyetinin dengelenmesi amacıyla, sıcakta yüksek mukavemetli parçalar bir ön tavlamaya tabi tutulmalıdır.

3.4.2. Kaynak Yapılacak Parçaların Bağlanması

Kaynakta söz konusu olan dönme momentleri ve eksenel kuvvetler iletilebilmelidir. Kuvvet ve momentlerin alınabilmesi için, sürtünme (kuvvet) bağlı veya şekil bağlı bağlama tiplerinde yeterli bağlama boyu ve mümkünse bir destek öngörülmelidir. Sınırlı bağlama boyu için yüzeyleri işlenmiş parçalarda şekil bağlı tip gereklidir. Bağlama yüzeylerinin kirlenmesi önlenmelidir. Parçalar her şeyden önce en az kaçıklığı verecek şekilde tasarlanmalıdır.

Sürtünme kaynağının doğasından dolayı özel sürtünme hareketi durumları hariç, parçaların en az bir tanesinin dönel olması arzu edilir. Karışık şekilli parçalar ya da dövülmesi çok zor parçalar için, dövülerek şekillendirilmiş iki veya üç parça sürtünme kaynağı ile bir araya getirilerek üretilebilir. Sürtünme kaynağı ile ilgili temel tasarım şekilleri, Çubuk-çubuk, boru-boru, çubuk-boru, çubuk-levha, boru-levha ve boru-disk (Şekil 3.7.a-f) şeklindedir. Sürtünme kaynağı ile yapılacak açılı bağlantılarda eksenle olacak açının 30° den büyük olması D.L. Kuruzar (1979) tarafından önerilmiştir. Genel literatürde bu açının 30-45° ve 45-60° arasında olması önerilmiştir. Açılı bağlantıya ilişkin bir örnek Şekil 3.7.g ‘de görülmektedir. Bazı birleştirmelerde yığmanın yapılması zor olduğundan yığma aralıkları (Şekil 3.7.) bırakılmaktadır (D. L. Kuruzar, 1979; M. Şahin, 2001).



Şekil 3.7 Sürtünme Kaynağı Bağlantı Tasarımları

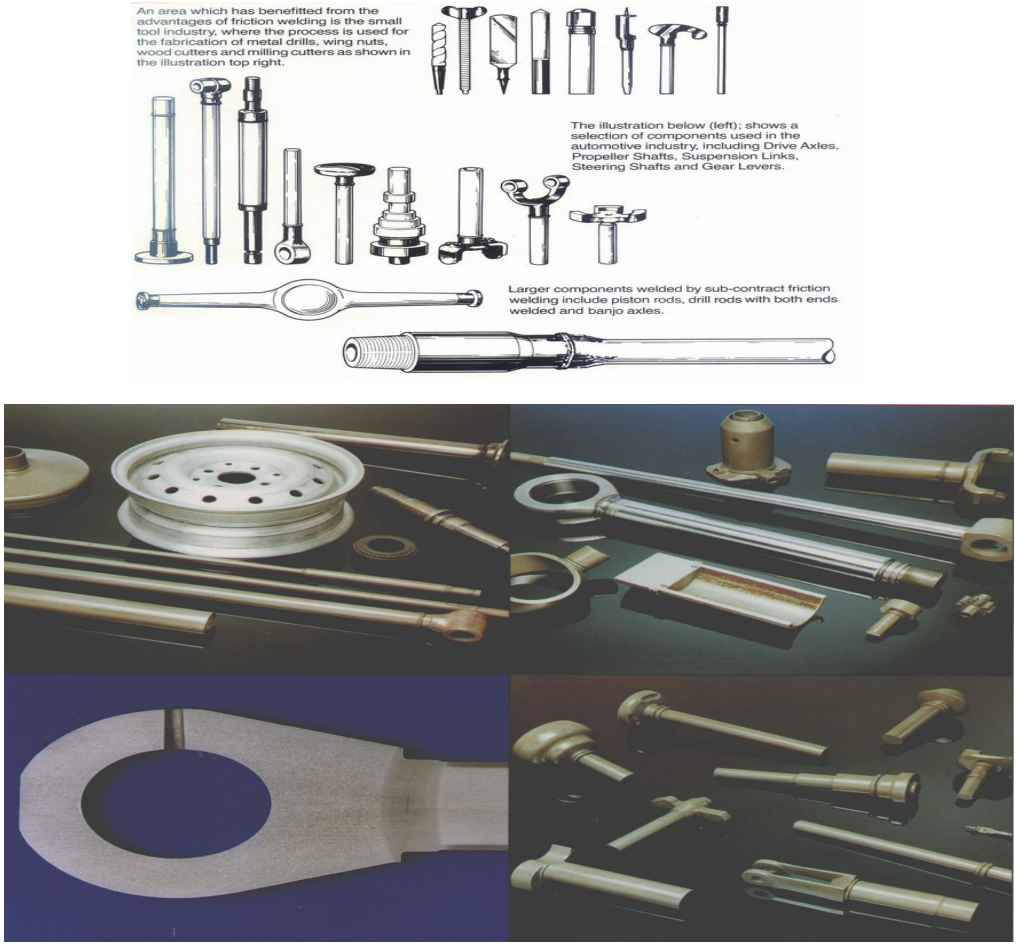
3.5. Sürtünme Kaynağının Uygulama Alanları

Daha öncede belirtildiği gibi çağımızda sürtünme kaynağı birçok endüstride geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Aşağıda, sürtünme kaynağının uygulama alanlarına dair örnekler verilmiştir [3]:

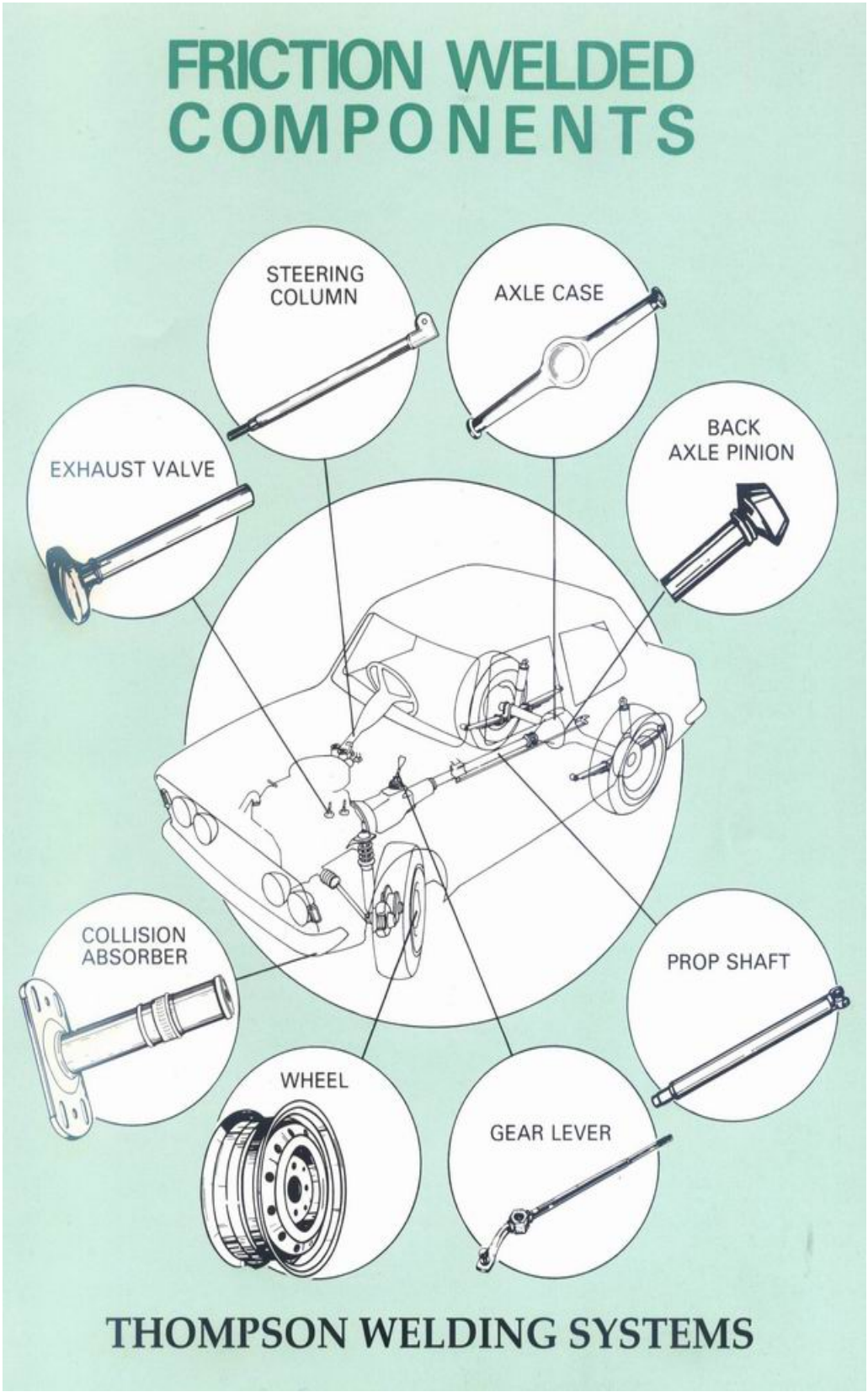
- **Makine imalatı:** Dişli çarklar, piston kolları, hidrolik silindirler, radyal pompa pistonları ve piston kolları, iğler, sonsuz vidalı miller, krank milleri, matkap uçları.

- **Otomotiv Endüstrisi:** Aks köprüleri, ekzos sübapları, kardan milleri, vites kolları, yürekli fren milleri, türbe doldurucular, şanzıman parçaları, ön yanma odaları, boru miller, taşıyıcı aks boruları.
- **Havacılık ve uzay tekniği:** Rotorlar, türbinler, miller, yanma odaları, itme jetleri (memeleri), borular, flanşlar, fittingsler.
- **İş takım Endüstrisi:** Spiral matkaplar, freze bıçakları, delik zımbaları, çelik kalemler (munçlar), raybalar.
- **Elektronik ve elektroteknik Endüstrisi:** Gaz analizleri için alıcı kamaraları, kromatograflar için ayırma sütunları, röntgen cihazı tüpleri için döner anod milleri, sürekli lehim uçları, devre kontakları, geçiş parçaları, cihazlar ve borular, flanşlar, fittingsler, sübap yuvaları, boru tesisatı bağlantıları.

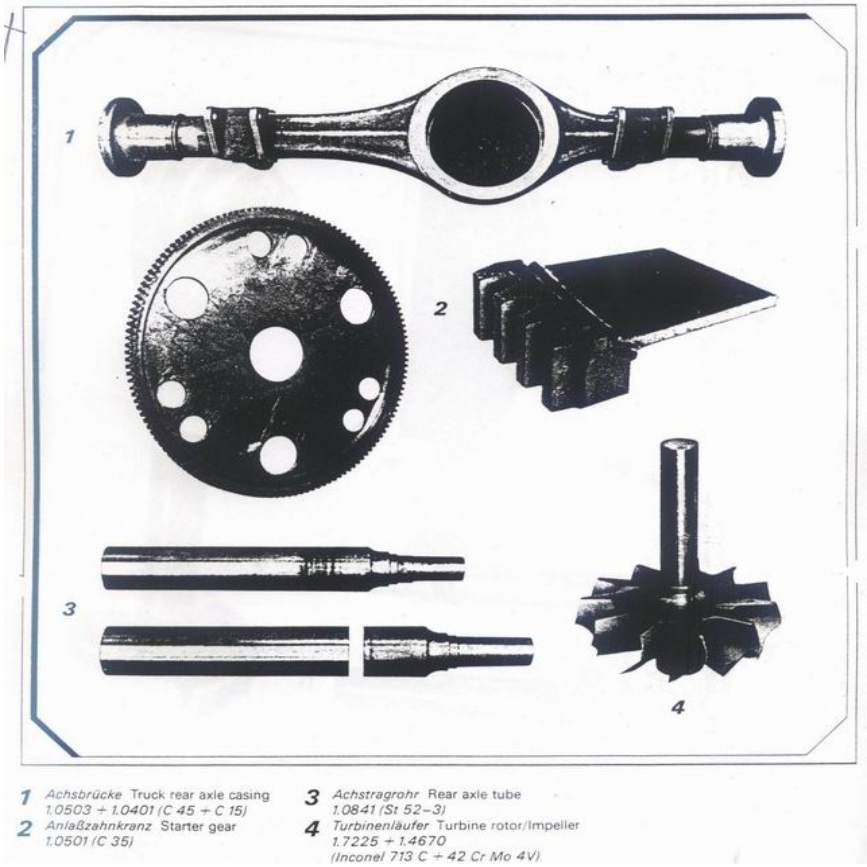
Aşağıda sürtünme kaynağı ile üretilmiş çeşitli parçalara ait örnekler verilmiştir. (Şekil 3.8-3.10).

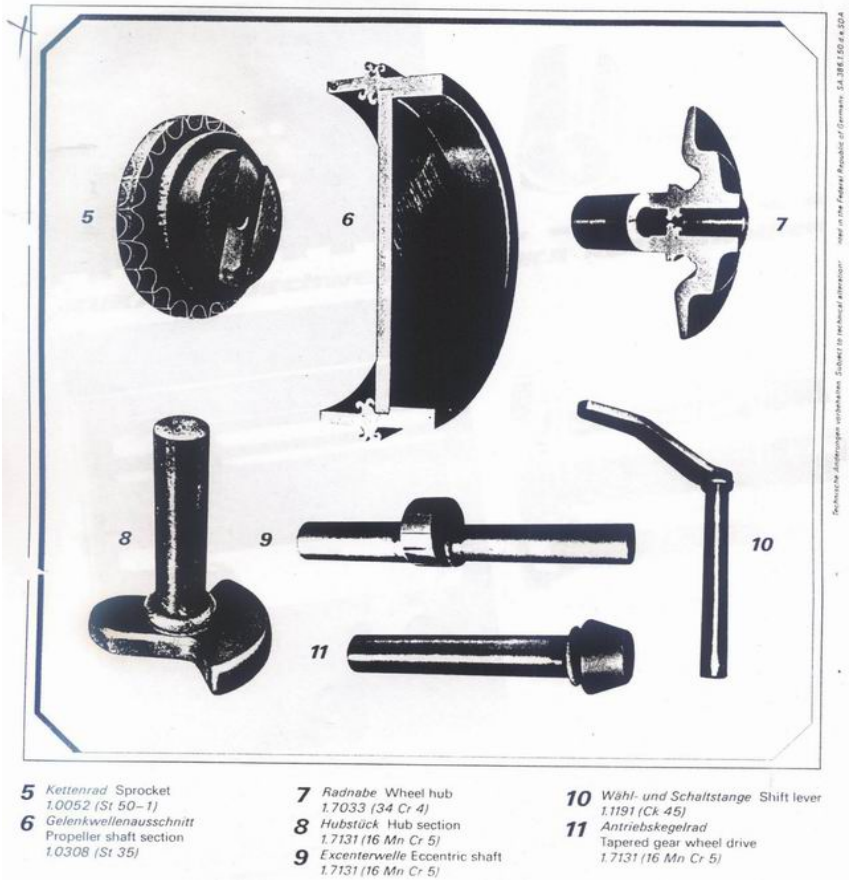


Şekil 3.8. Sürtünme Kaynaklı Parçalar



Şekil 3.9. Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmiş Parçalar





Şekil 3.10. Sürtünme Kaynaklı Parçalar

3.6. Sürtünme Kaynağının Üstünlükleri ve Sakıncalı Yönleri

Yukarıda da açıklandığı gibi birçok endüstriyel uygulama alanı bulunan yöntemin aşağıda topluca sıralanan üstünlükleri bulunmaktadır.

- Sürtünme kaynağı işlemi süresince ısıtılan metal miktarı çok küçüktür.
- Sürtünme kaynağında ısıtma ve dövme periyotları arasında metal kaybı azdır.
- Sürtünme kaynağında operasyon temizdir.
- Sürtünme kaynağı oldukça kısa zamanda tamamlanır.
- Sürtünme kaynağı otomatik işlemlere adapte edilebilir (parçaların otomatik yüklenmesi, boşaltılması, diğer operasyonlara transfer gibi).
- Ayrıca sürtünme kaynağı bir katı hal kaynak yöntemi olduğu için kaynak bölgesinde cüruf vb. içermez.
- Sürtünme hareketi ile bütün oksit ve diğer tabakalar parçalanarak yüzeyden uzaklaştırılır ve sürtünen yüzeyler arasındaki sürekli temas kaynak sırasında oksit filmlerinin oluşmasını önler.
- Sürtünme kaynağı sırasında kaynak kalıntılarının büyük bir kısmı yok edilir.
- Bağlantı bölgesi, hızlı lokal ısıtma ve soğutma sonrası uygulanan yüksek basınç nedeni ile ince taneli bir yapıya sahiptir.
- Hızlı lokal ısıtma ve ayrıca bağlantıya bitişik olan relatif olarak geniş ısıtılmamış alanla, lokal ısınmış alanlardan hızla ısıyı çekmesi sonucunda çok dar bir ITAB oluşur.

Bütün bu üstünlüklerinin yanında sürtünme kaynağının bazı sakıncalı yönleri de vardır. Sürtünme kaynağının sınırlandıran en büyük etken parçanın sahip olduğu geometrik şekildir. Her ne kadar günümüzde özel yöntemler geliştirilmişse de bağlantısı yapılacak parçalardan birinin bir eksene göre simetrik olması ve çoğu kez bir eksen etrafında dönebilir olması istenir. Sürtünme kaynağını sınırlandıran diğer önemli bir etken ise "kesit alanıdır". Kesit alanının çok büyük olması, motor gücünün ve yığma basıncının değerlerinin çok yüksek olmasına neden olur (M. Şahin, 2001).

BÖLÜM 4. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

4.1. Sürtünme Kaynağı Araştırmaları

Sürtünme kaynağı ile ilgili çalışmalar dört başlık altında toplanarak özetlenecektir.

1. Kaynak parametreleri üzerine yapılan araştırmalar.
2. Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş parçalarda elde edilen mekanik özellikler üzerine yapılan araştırmalar.
3. Birleştirilmiş parçaların sertlik dağılımı ve mikro yapısı üzerine yapılan araştırmalar.
4. Birleştirilmiş parçalardaki ısı dağılımı üzerine yapılan araştırmalar.

4.1.1. Kaynak parametreleri üzerine yapılan araştırmalar

Bu konudaki ilk çalışmalar V.I. Vill (1962) tarafından yapılmıştır. V.I. Vill çalışmasında sürtünme basıncının bu kaynak çeşidinde büyük öneme sahip olduğu görmüş ve sürtünme basıncının yaklaşık olarak 25 MPa–250 MPa arasında alınması gerektiğini ileri sürmüştür. Bu çalışma dönme hızının, birleştirmeyi etkilemeden geniş bir aralıkta kullanılabileceğini vurgulanmış ve kaynak kalitesinin arttırılması için düşük dönme hızlarının daha yararlı olacağını belirtmiştir. V.I. Vill tarafından numune çapına bağlı olarak ampirik formüller önerilmiştir.

R.Y. Tylecote (1968) tarafından sürtünme basıncı, yığma basıncı ve dönme hızı en önemli üç parametre olarak belirlenmiştir. Bunlardan sürtünme basıncının temas yüzeyleri arasındaki yüzey sıcaklığını ve gerekli momenti etkilediği saptanmıştır. R.Y. Tylecote sürtünme basıncını yumuşak çelikler için 56.2 MPa, orta karbonlu çelikler için 70.3 MPa olduğunu çeşitli araştırmacıların yaptıkları çalışmalara dayanarak önermiştir.

P. Jenning (1971) yaptığı çalışmada, 19mm çaplı Cr-Mo/Cr çelik çifti için kaynak öncesi ısıl işlemler de uygulayarak, değişik tutulan kaynak parametrelerinde kaynak işlemleri gerçekleştirmiştir. Elde edilen bu kaynaklı bağlantılara tarafından eğme, çekme ve yorulma deneyleri uygulanarak bağlantının mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada uygulanan kaynak parametreleri eğme deneyleri yardımıyla eğme açısı ve kırılma pozisyonu baz alınarak tespit edilmiştir. Numunelere uygulanan çekme deneyleri sonrasında bütün kopmalar kaynak

bölgesi dışında oluşmuştur. Kaynak sonrası numunelere uygulanan ısıl işlemlerin çekme özellikleri üzerine önemli etkileri olmuştur. Ayrıca bu çalışmada düşük sürtünme basıncı yüksek yığma basıncı değerleri en iyi çekme özellikleri vermiştir. P. Jenning elde ettiği numunelere yorulma deneyleri uygulayarak kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemlerine göre hem eğmeye ve hem de burulmaya göre sürekli mukavemet eğrilerini de elde etmiştir.

W. Kinley (1979) klasik ve atalet sürtünme kaynak yöntemleri hakkında bilgi vermiştir.

N.I. Fomichev (1980) yığma basıcının yanında sürtünme basıncı ve süresi içinde amprik formüllerde elde etmiştir.

K.G.X. Murti ve S. Sundaresan (1986) isimli araştırmacılar 22 mm. çaplı HSS (Yüksek Hız Çeliği) - C45 (Orta Karbonlu Çelik) çelik çiftleri, sürtünme kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynak işlemi optimize edilen şartlarda yapılmıştır. Birleştirmelere ısıl işlem uygulanmış ve birleştirme performansı dinamik burulma altında incelenmiştir. Kaynak ve ısıl işlem süresince oluşan yapısal değişiklikler, metalografik inceleme ve sertlik testi yapılarak araştırılmıştır. Deneyler kaynağa yakın C45 tarafında kaynak süresince karbonsuzlaşma oluşmasına rağmen birleştirme özelliklerinin yeterli olduğu görülmüştür.

4.1.2. Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş parçalarda elde edilen mekanik özellikleri üzerine yapılan araştırmalar

A.N. Dobrovidov (1975) tarafından yapılan çalışmada, 21mm çaplı HSS (Yüksek Hız Çeliği) - C45 (Orta Karbonlu Çelik) çelik çifti için pratik datalardan yola çıkılarak istatistiki bir çalışma sonrasında elde edilen "P_s= 8–280 MPa, P_y= 138–300 MPa, t_s= 8–18 s, t_y=0.5–5.4 s, V=0.5–2.65 m/s" parametreleri kullanılarak üretilmiş sürtünme kaynaklı bağlantılara burulma deneyleri uygulanmıştır. Bu çalışmada C45 çeliğinin burulma mukavemeti olan 350 MPa değeri sınır alınarak, bu değerin %70'inden büyük değerler veren numuneler kaliteli varsayılmış ve regresyon yardımı ile parametre optimizasyonu yapılmıştır.

Kurban, A. O. ve Kahraman, N. (1995) çalışmalarında, farklı özellikteki malzemelerin (H2210 - St42) birleştirilmeleri konusunun uygulamada önemli olduğunu, bunların klasik kaynak yöntemleriyle birleştirilmelerinin oldukça zor ve pahalı olduğunu, bu nedenle günümüzde bu tür malzemelerin özel kaynak yöntemleriyle birleştirilmelerinin araştırıldığını belirtmişlerdir. Çalışmanın deneysel kısmında farklı özellikteki (H2210 - St42) çelik malzemelerin sürtünme kaynağı ile birleştirilmeleri gerçekleştirilmiş ve kaynak parametrelerinin (kaynak süresi, devir sayısı, yükleme basıncı ile kaynak basıncı) kaynak

numunesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deney numuneleri mekanik testlere tabi tutularak bunların çekme, sertlik ve mikro yapıları incelenmiştir.

Nentwig, Andreas W. E., Appel, Ludwig., (1996) çalışmalarında farklı kesitli parçaların sürtünme kaynağı, parçaların ısıl iletkenliklerinin ve akma kuvvetlerinin farklı olması nedeniyle, eşit kesitli parçaların kaynağına kıyasla bazı özellikler gösterdiği için ortaya çıkan sorunların giderilmesinde baskı kuvvetlerinin farklı uygulanması ve devir sayılarının değiştirilmesi şeklinde bir yaklaşım uygulanmıştır.

4.1.3. Birleştirilmiş parçaların sertlik dağılımı ve mikro yapısı üzerine yapılan araştırmalar

Yılbaş, Bekir S., Sahin, Ahmet Z., Kahraman, N., Al – Garni (1995) çalışmalarında; sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş çelik-alüminyum ve alüminyum- bakır çubukların mekanik ve metalurjik özelliklerini araştırmışlardır. Çekme, akma ve kırılma mukavemeti gibi kaynaklı parçaların mekanik ve metalurjik özelliklerine; devir sayısı, sürtünme yükü ve kaynak süresinin etkileri deneysel ve istatiksel olarak araştırılmıştır. Kaynaklı parçaların metalurjik özellikleri, elektron ve optik mikroskop kullanarak incelenmiştir.

Şahin, A. Z., Yılbaş, B. S., Al - Garni, A. Z. (1996) çalışmalarında; Al-Al, Al-çelik ve çelik-çelik sürtünme kaynağı birleştirmelerinden çıkan sonuçları karşılaştırmışlardır. Kaynak işlemi boyunca geçici ısı üretimi ve sıcaklık artışı modellenmiştir. Kaynak bölgesi kesitinde çekme testleri ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. ITAB(Isının Tesiri Altındaki Bölge)' daki metalurjik değişiklikler SEM' le incelenmiştir. Yüzey düzlemindeki sıcaklık artışı hesaplanmıştır ve kaynak özelikleriyle bağlantı kurulmuştur. Kaynak kalitesinden etkilenen parametreler istatistiksel analizle tanımlanmıştır. Sonuçlar, kaynak parametrelerinin karşılıklı etkisinin akma, çekme ve kırılma mukavemetinin etkilediğini ve Al' un kenarındaki ITAB 'ın Al-Çelik kaynaklı birleştirmelerinden daha geniş olduğunu göstermiştir.

A.N. Dobrovidov ve arkadaşları (1975) HSS-karbonlu çelik çiftinin mikro yapısı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada HSS yönüne doğru bir karbon difüzyonu olduğu, dolayısı ile C45 çeliği tarafında bir dekarbürüze bölgenin geniş genişliği üzerinde çok etkili olduğu tespit edilmiştir. Oluşan dekarbürizasyon tabakasının kalınlığı 0,1 mm civarındadır ve bu bölge sadece rekrastilize olmuş ferrit taneleri içerir. Araştırmacılar karbon difüzyonu HSS tarafındaki kuvvetli karbür yapıcı elementlere atfetmektedirler. Dekarbürizasyon olayı 550 °C -800 °C sıcaklıkları arasında oluşmakta ve maksimum dekarbürizasyon ise 760 °C civarında meydana gelmektedir. Yapılan bu çalışmada araştırmacılar 830°C -860 °C sıcaklıklar arasında

yaklaşık 15 dakikalık bir ısıl işlem ile karbon difüzyonu yön değiştirmektedir. Bu durumda HSS' nin ostenit fazındaki karbon konsantrasyonunun karbonlu çeliktekinden daha geniş olmasına atfedilmektedir. A.N. Dobrovidov ve arkadaşları tarafından karbon difüzyonunun önlenmesinde, eğer çalışma şartlarını etkilemeyecek ise üçlü metalik bağlantı önerilmiştir; örneğin paslanmaz çelik-karbonlu çelik çifti arasında Ni alaşımları tavsiye edilmektedir.

Akira Ishabashi ve arkadaşları (1983) ise yaptıkları çalışmada ostenitik paslanmaz çelik (SUS304), martenzitik paslanmaz çelik (SUS440), yükse hız çeliği (SKH9) ve karbonlu çelik (C45) kullanmışlardır. SKH9/C45 çelik çifti için "d=15–20 mm V=2.6–3.5 /s1, P_s= 78–157 MPa, P_y= 78–157 MPa, t_s= 12–24 sn ve t_y= 5 sn" parametrelerinde kaynak işlemi gerçekleştirmişlerdir. Değişik sürtünme kaynaklı malzeme kombinasyonlarına dönel durumda eğmeli yorulma deneyi uygulanmıştır. SUS304/S45 çelik için daha yüksek dönme hızları daha iyi yorulma kırılması daha çok SKH9 tarafında oluşmuştur. Bu çalışma sonuçlarına göre yazarlar tarafından genelde paslanmaz çelikler için P2=2P1 önerilirken, SKH9/C45 çelik çifti için P2=P1+0.3P1 elde edilmiştir. Ayrıca X ışını ve elektron mikroskobu ile mikro yapı analizi yapılmıştır.

S.B Dunkerton (1986) yaptığı bir çalışmasında 25mm çaplı değişik kimyasal kompozisyonlara sahip C-Mn çelikleri için sürtünme kaynaklı bağlantılarda "P_s= 80 MPa , P_y= 180 MPa, Δl=5.0 mm" değerlerini sabit tutarak "n= 750-1460" d/dak. gibi iki farklı dönme hızı uygulanmış ve yüksek dönme hızının daha kötü metalurjik özellikler verdiğini tespit etmiştir.

Yılmaz, M., Kaluç, E., Karagöz, Ş., Tülbentçi, K. (1995) çalışmalarında, deney malzemesi olarak 11.5 mm çapında, C45 alaşımsız ve HS 6-5-2 yüksek hız çeliği çubuklar kullanılmıştır. Deney parçalarının büyük bir bölümü, endüstriyel bir sürtünme kaynak makinasında değişik kaynak parametreleri kullanılarak; diğer bir bölümü ise, endüstriyel bir yakma alın kaynak makinasında sabit kaynak parametreleri kullanılarak C45 tarafına farklı ön tav sıcaklıkları verilerek kaynak edilmişlerdir. Tüm bağlantılar, kaynaktan sonra fırın içinde 650 °C' de 4 saat süre ile tavlanmışlardır. Kaynaklı bağlantıların tümünde çubuk ekseni boyunca sertlik değişimleri ölçülmüş, kaynak bölgeleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş, yapılan EDX ve WDX analizleri ile karbon ve ana alaşım elementleri olan Cr, W, V ve Mo' nin kaynak bölgesindeki difüzyonları ile metalürjik içyapıya etkileri incelenmiştir.

4.1.4. Birleştirilmiş parçaların ısı dağılımı üzerine yapılan araştırmalar

Sürtünme kaynağı üzerine yapılan çalışmalar son derece geniş bir alana yayılmaktadır. Kaynak bölgesinin sıcaklığı ve ısı dağılımı en çok ilgi çeken konuların başında gelmektedir.

S.A. Seregin ve S.B. Sabantsev (1977) ise sürtünme kaynaklı bağlantılarda iki farklı devir sayısı uygulayarak kaynak bölgesinden itibaren değişen mesafelerdeki sıcaklık farklarını incelemiştir.

A. Sluzalec (1990) yaptığı çalışmada kaynak bölgesinde ısı dağılımı analitik olarak incelemiştir.

By L. Fu ve L. Duan (1998), bu mevcut çalışmada, sürtünme kaynağı için bağlantılı (coupled) deformasyonun sonlu eleman metodu ile hesabı ve ısı akış analizi yer almıştır. GH4169 nikel esaslı süper alaşımın sürtünme kaynak bağlantısı için geçici sıcaklık, çekme ve gerilme alanları verilen sınır şartlar altında hesaplanmaktadır. Hesaplanan sonuçlar, daha önceden elde edilen deney sonuçları ile mukayese edilmektedir. Sıcaklık, gerilme ve gerilme alanları, sürtünme kaynağının üç temel fiziksel parametresidir. Bilgisayar ve nümerik hesaplama tekniklerinin gelişimiyle beraber bu üç ana alanın teorik olarak anlaşılabilmesi, sürtünme kaynağının da içine alan termal işleme teknolojisinin en önemli konularından biri haline gelmiştir. Bu sayede, sonlu eleman metodunun gerçek iş prensibi ve geniş elastoplastik deformasyon arasındaki ilişkiye göre kullanılmasıyla, sürtünme kaynağı esnasında meydana gelen termomekanik problemlerin ne oldukları açığa çıkarılmaktadır. Sürtünme kaynağı esnasında oluşan gerilim, gerilme ve sıcaklığın değişim kanunu incelenmektedir. Buna göre, kaynaklı bağlantının plastik deformasyona uğrayan bölgesinin oluşumu ve deformasyon derecesindeki düzensiz dağılım analiz edilmektedir. Hesaplanan sıcaklık sonuçları, ölçülebilir bazı noktalarda elde edilen deneysel verilerle uygunluk göstermektedir. Sürtünme yüzeyinin farklı mesafelerde hesaplanmış eksenel gerilme dağılımı, eksenel basıncın daha önceden ölçülmüş sonuçlarıyla kıyaslanarak tamamlanmaktadır ve aralarındaki mükemmel uygunluk göze çarpmaktadır.

BÖLÜM 5. TEZİN ÖNEMİ VE TEZ ÇALIŞMA PLANI

5.1. Tezin Önemi, Kapsamı ve Gerekçesi

Kaynak teknolojisi, üretim sektöründe sağladığı faydalar ve elverişli koşullar ile üretimin her aşamasında kullanılmaktadır. Gelişen teknolojik koşullara paralel olarak kaynak tekniği de giderek önem kazanmakta ve daha çok ihtiyaç duyulur hale gelmektedir.

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

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

Benzer olmayan metallerin sürtünme yoluyla kaynakları esnasında ortaya çıkan sorunlar yalnızca malzemelerin sahip olduğu farklı sertlikler ve farklı erime noktalarından kaynaklanmamaktadır. Ayrıca gevrek ara metalik fazlar veya düşük erime noktalı ötektikler oluşturan ara hareket olasılığıda bir problem kaynağı olarak karşımıza çıkabilmektedir.

Sürtünme kaynağında; artan sürtünme, dönme hızı ve kaynak sürekliliği için kullanılan yükün kaynak parametreleri, kaynak işlemi boyunca meydana gelen ısı kavramının daha iyi anlaşılmasını sağlar. Numunelerin temizliği ikincil öneme sahip bir parametre olarak göz önüne alınabilir. Artan sürtünme yükü, daha az ara metalik olan bileşiklerin yüzeyde ardı ardına oluşumlarıyla beraber kaynak bölgesi sıcaklığının güvenli bir şekilde azalmasını sağlar.

Parametrelerin kaynak sonucu oluşan özellikler üzerindeki etkilerinin incelenmesinde, dönme hızının ve sürtünme derecesinin ısıtma periyodu boyunca arttırılmasının temas

halindeki yüzeylerde oluşan deformasyon durumlarını verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca kaydedilen parametrelerin, sonuç kaynak üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı da gözlenmiştir. Özellikle gres gibi kirliliklere bağlı olarak azalan yüzey temizliği kaynaklı birleştirmenin de kalitesini azaltmaktadır.

Örneğin; Alüminyum-Çelik çiftinde genelde ortaya çıkan temel problem, istenmeyen ara metalik fazların (FeAl) formasyonlarıdır. Bunun için uygun kaynağın, bekleme (kuluçka) periyodunun kaynak zamanından uzun olması gibi bazı kaynak şartlarına bağlı olarak yapılabileceği göz önüne almıştır. Bununla beraber, ara metalik formasyon için gerekli olan bekleme periyodu halen araştırılmakta ve bununla ilgili kontrol, kullanılan bekleme periyodundan ziyade ara metalik kalınlığının sınırlandırılmasına dayanmaktadır. Yine Alüminyum-Bakır çiftinde, alüminyum ile bakır arasındaki yapışma eksikliği ve bakırın çatlak yüzlerinin zayıf bir gri alüminyum tabakası şeklinde görünmesi (bu tabaka önemli oranda ara metalik bileşiği ara yüzeyde kapsayabilen bir tabakadır) nedeniyle ortaya çıkan hatalardır.

Bu amaçla, sürtünme kaynak yöntemiyle paslanmaz çelik ve bakır çiftlerinin birleştirilmesi, optimum parametrelerin tespiti, birleştirilen parçaların çekme dayanımlarının tespiti ve birleştirilen parçaların birleştirme bölgesinde ki sertlik dağılımı ve mikro yapı değişimi deneysel nitelikteki bu Yüksek Lisans Tezi'nin konusunu oluşturmaktadır.

5.2. Uygulanacak Araştırma Teknik ve Yöntemleri

Temin edilecek paslanmaz çelik ve bakır parçalar T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuarlarında talaşlı şekil verme yoluyla işlenecek, daha önce dizayn edilen ve oluşturulan klasik sürtünme kaynağı deney tesisatında bu parçalar birleştirilecektir.

Daha sonra birleştirilen bu parçaların çekme dayanımları tespit edilecek, bu özelliklerin parametrelerle ilişkisi araştırılıp optimum parametreler tespit edilecektir. Ayrıca, birleştirilen parçaların kaynak bölgesi sertlik dağılımı ve mikro yapı incelemesi tamamlanacak ve sonuçlar yorumlanacaktır.

5.3. Tez Çalışma Planı

Deneysel çalışma, iki aşamada yürütülmüştür;

- **Materyallerin temini ve birleştirilmesi:**

  Temin edilecek paslanmaz çelik-bakır parçalar T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuarlarında talaşlı şekil verme yoluyla işlenecek, daha önce dizayn edilen ve oluşturulan klasik sürtünme kaynağı deney tesisatında bu parçalar birleştirilecektir.

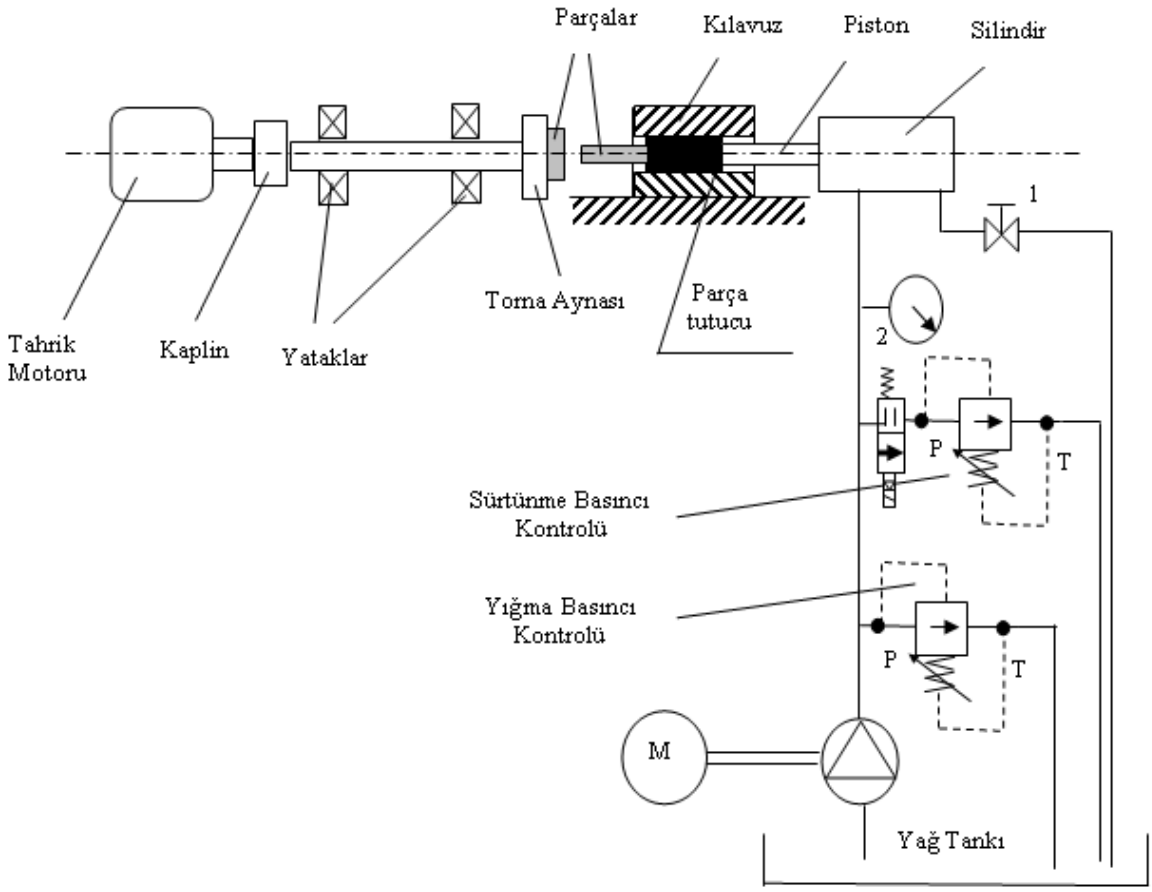
- **Deney parçası ve işlem değişkenlerinin kaynaklı birleştirmelerde mukavemet, sertlik dağılımı ve kaynak bölgesindeki içyapıya etkilerinin araştırılması:**

  Daha sonra birleştirilen bu parçaların çekme dayanımları tespit edilecek, bu özelliklerin parametrelerle ilişkisi araştırılıp optimum parametreler tespit edilecektir. Ayrıca, birleştirilen parçaların kaynak bölgesi sertlik dağılımı ve mikro yapı incelemesi tamamlanacak ve sonuçlar yorumlanacaktır.

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

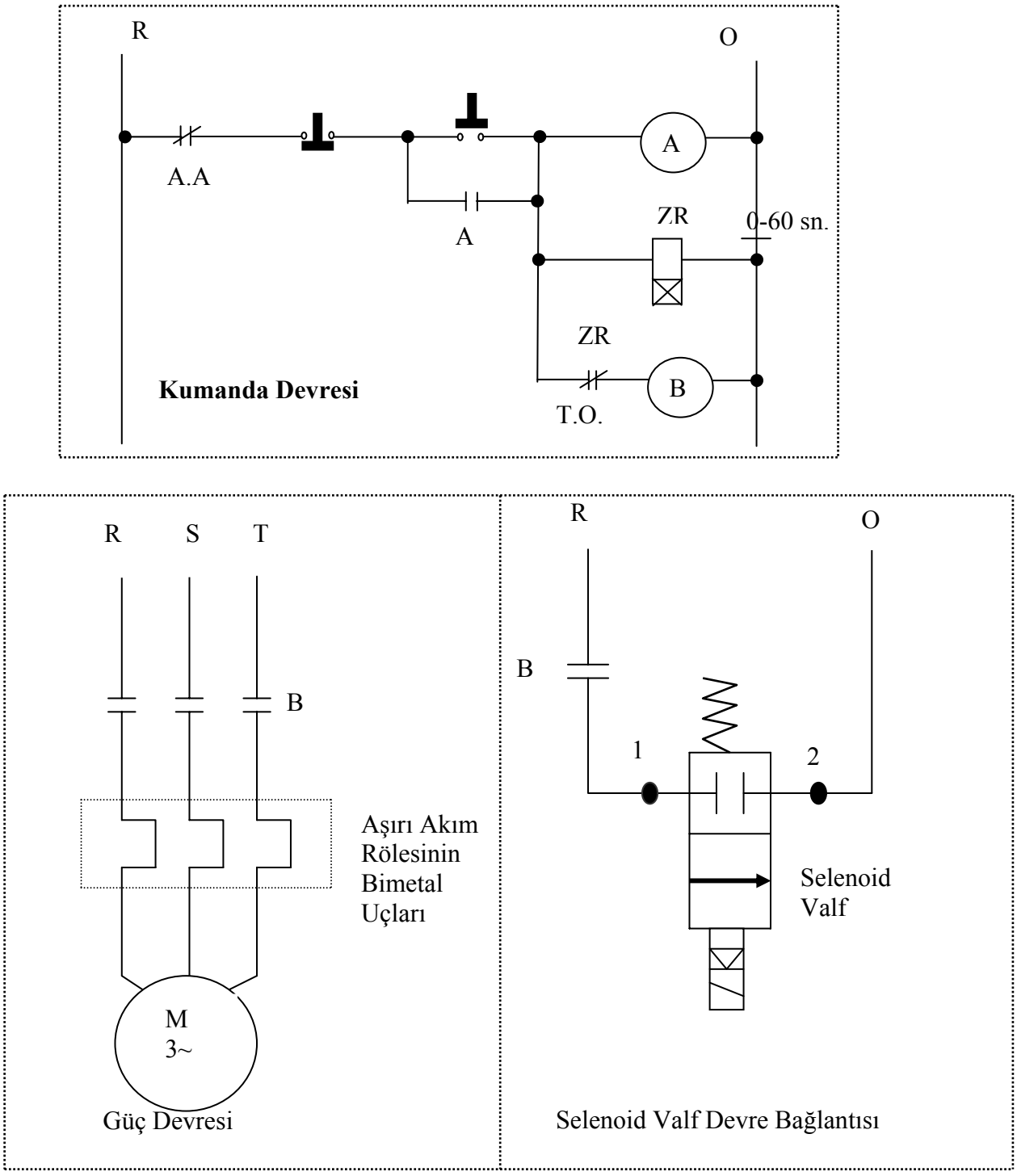
6.1. Deneysel Prosedür

Bu sürtünme kaynağı deneyinde kullanılacak sistem Şekil 6.1.'de gösterilmiştir. Sistem, sürekli tahrikli olacak şekilde tasarlanmış ve oluşturulmuştur.



Şekil 6.1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynağı Mekanizması Şematik Gösterimi.

Deneylerde sürtünme süresinin ayarlanabilmesi ve aynı tür deneylerde sabit tutulabilmesi için sisteme elektriksel kontrol devresi ilave edilmiştir. Kontrol devresi Şekil 6.2.'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Sürtünme Süresi Elektriksel Kontrol Devresi.

Şekil 6.1.'de gösterilen hidrolik devredeki motor çalışıp, pompadan yağ basmaya başlayınca start butonuna basıldığında Şekil 6.2.'deki devrenin A kontaktörü, zaman rölesi ve

B kontaktörü enerjilenir. B kontaktörü çekilince güç devresindeki ve selenoid valf devre bağlantısındaki açık kontaklarını kapar.

Güç devresindeki kontaklar kapanınca elektrik motoru çalışır. B kontaktörünün selenoid valf devresindeki açık kontağı kapanınca selenoid valf çalışır ve yağ akışı başlar. Zaman rölesi ayarlanan sürenin sonunda B kontaktörü önündeki gecikmeli açılan kontağını açar ve B kontaktörü enerjisiz kalır. Kontaktör enerjisiz kalınca güç devresi ve selenoid valf devresi kapamış olduğu kontaklarını açar. Bu esnada elektrik motorunun ve selenoid valfin çalışması durur. Kumanda devresi stop butonuna basıldığında tamamen enerjisiz kalır. Bu esnada pompa çalışmaya devam etmektedir ve piston dövme (yığma) basıncına geçmiştir.

Deneyde, motor çalışmaya başladığı sırada 1 numaralı küresel vana kapatılmakta ve pompadan gelen yağ basıncı ayarlanabilen selenoid valf tarafından düşük basınçta (sürtünme basıncı), parçalar sürtünmeye başlayıp birleşme sıcaklığına ulaşıldığında zaman röleli kumanda devresi tahrik motorunu durdurmakta ve aynı anda yığma basıncına ayarlanmış selenoid valfte kontrol edilerek dövme uygulanmaktadır.

6.1.1. Deney Parçalarının ve Numunelerin Geometrisi

Deney numuneleri, satın alınan ostenitik-paslanmaz çelik ve bakır'ın işlenmesiyle elde edilmiştir. Malzemelerin standart kimyasal bileşimleri Tablo 6.1. ve 6.2.'de gösterilmiştir.

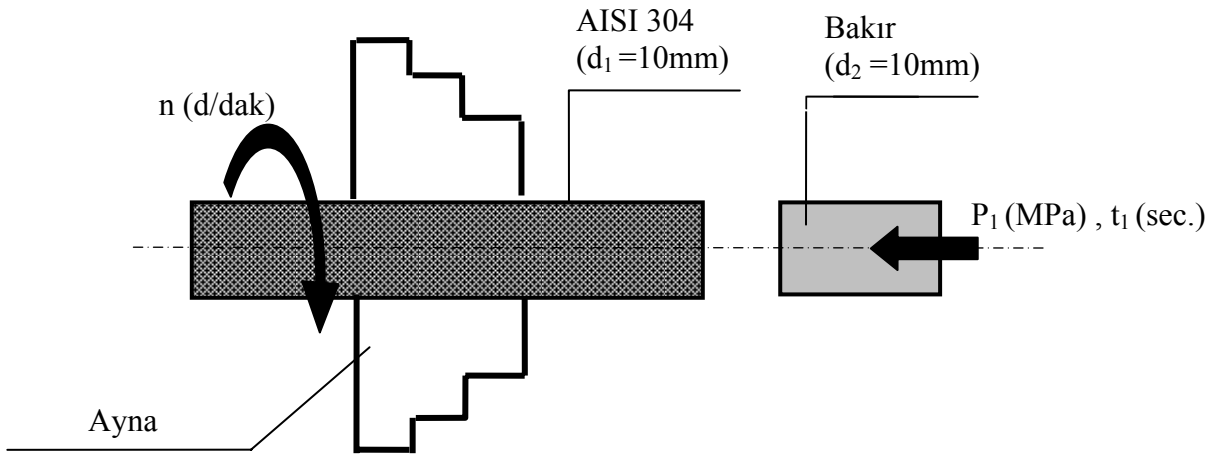
Tablo 6.1. Ostenitik-Paslanmaz Çeliğin Standart Kimyasal Bileşimi

Malzeme	% C	% P	% S	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	Tensile Strength (MPa)
AISI 304 (X5CrNi1810)	< 0,07	< 0,045	< 0,030	< 2,0	< 1,0	17 - 19	8,5 – 10,5	825

Tablo 6.2. Bakırın Standart Kimyasal Bileşimi

Bakır	%Sn	%Pb	%Zn	%P	%Mn	%Fe	%Ni	%Si	%Mg	%Al	%Bi	%S	%Sb	%Cu	Tensile Strength (MPa)
	0,00222	<0,00200	<0,00100	0,00137	<0,00050	0,0381	<0,00100	0,00745	0,00376	0,00500	<0,00050	0,00251	<0,00200	99,93	300

Deneylerde kullanılan parçaların boyutları da Şekil 6.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Deneylerde Kullanılan Parçaların Boyutları

6.1.2. Kaynak Parametrelerinin İstatistiksel Yaklaşımla Belirlenmesi

İstatistiksel analiz 2 adımdan oluşmaktadır: Birincisi, modelin yeterliliği test edilir. Kabul edilen doğrusal fonksiyondaki parametrelerin istatistiksel olarak kayda değer olup olmadığını doğrulamak için kullanılacak uygun metot, Fischer veya 'F' oranına dayanır. İkinci adım ise, kayda değer faktörlere ilişkin regresyon katsayılarının en uygun şekilde tahmin edilmesidir. Bunun için de 'en küçük kareler' metodu kullanılabilir.

Parametre optimizasyonu, deneylerin faktörsel dizaynlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Sürtünme zamanı ve sürtünme basıncı, bunun için seçilen faktörlerdir. Yığma zamanı, yığma basıncı ve dönme hızı gibi parametreler sabit tutulmuştur. Bu faktörler için elde edilen deneysel sonuçlar Tablo 6.3.'de verilmiştir.

Tablo 6.3. Faktörlere Göre Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

DENEME NO	**Sürtünme Basıncı (MPa) (x_1)**	**Sürtünme Zamanı (sn.) (x_2)**	**Çekme Mukavemeti (MPa)**
1	54	8,5	30
2	66	8,5	203,8
3	75	8,5	223
4	75	6	143
5	75	12	190

Regresyon katsayılarının en uygun tahmini, 'Fischer Oranı' metoduyla elde edilmiştir. Ayrıca, elde edilen eşitlik aşağıda verilmiştir;

$$y=-346,079 + 6,545.x_1 + 6,026.x_2 \quad (6.1)$$

Daha sonra, en küçük kareler metoduyla elde edilen en az hata oranına sahip parametreler, en uygun kaynak parametreleri olarak alınmıştır. Optimum kaynak şartları, Tablo 6.4.'de gösterilmiştir.

Tablo 6.4. Sürtünme Kaynağı Deneylerinde Kullanılan Parametreler

AISI 304 d_1 (mm)	Bakır d_2 (mm)	Sürtünme Zamanı-t_1 (sn.)	Sürtünme Basıncı-P_1 (MPa)	Yığma Zamanı-t_4 (sn.)	Yığma Basıncı-P_2 (MPa)
10	10	8,5	75	20	160

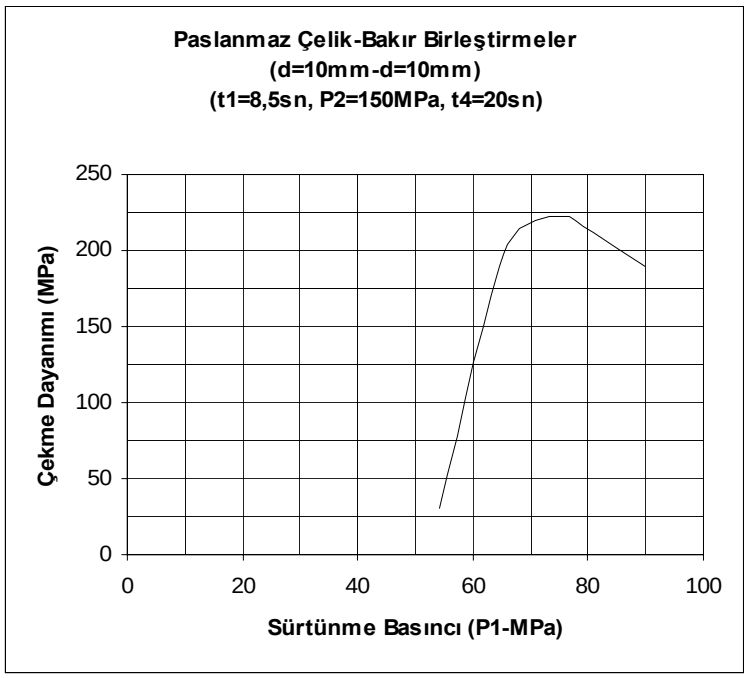
Daha sonra kaynak yapılan parçalara çeşitli testler uygulanmıştır.

6.2 Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

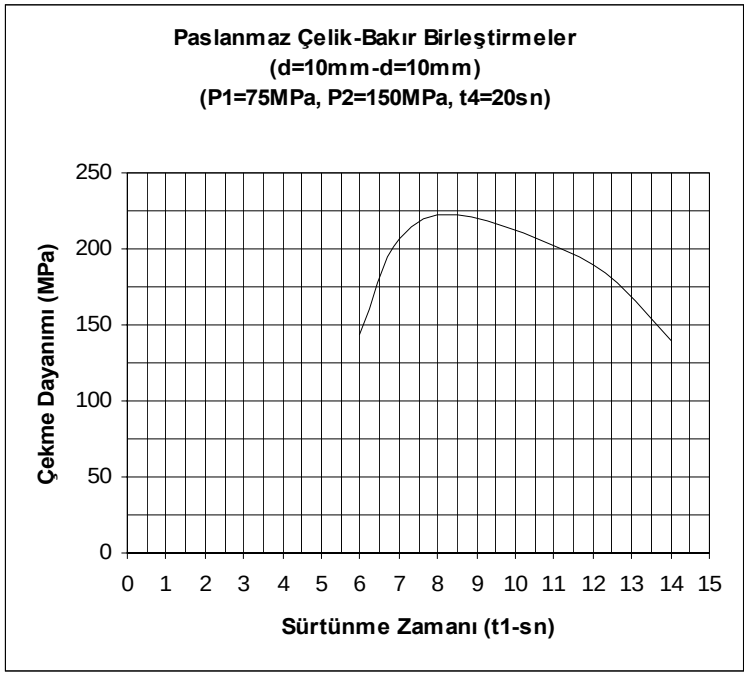
6.2.1. Çekme Deneyleri

Sürtünme zamanının ve sürtünme basıncının birleştirilen parçaların mukavemeti üzerindeki etkileri, eşit çaplı parçaların kaynaklanmasıyla incelenmiştir.

Uygun sürtünme zamanının ve sürtünme basıncının belirlenebilmesi için, yığma zamanının (20 sn.) ve yığma basıncının (160 MPa) sabit tutulduğu 2 aşamalı bir kaynak deneyi yapılmıştır. Birinci aşamada, sürtünme basıncı (75 MPa) sabit tutulurken, sürtünme zamanı değiştirilmiştir. İkinci aşamada, sürtünme zamanı (8,5 sn.) sabit tutulurken, sürtünme basıncı değiştirilmiştir. Kaynak yapılan bölgelerin mukavemeti, çekme testleri yapılarak tespit edilmiş ve bu sonuçlar, tamamen işlenmiş parçaların mukavemetiyle kıyaslanmıştır. Birleşim bölgelerinin çekme mukavemeti, esas kuvvetin 10 mm çapındaki alana bölünmesiyle elde edilmiştir. Çekme mukavemetinin, sürtünme zamanı ve sürtünme basıncı ile değişimi Şekil 6.4. ve 6.5.'deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Çekme Mukavemetinin Sürtünme Basıncıyla Değişimi



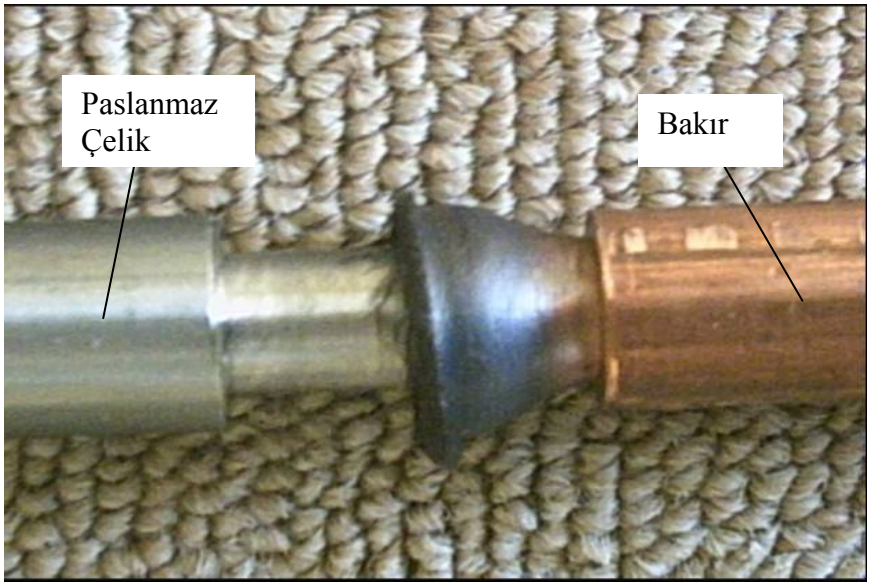
Şekil 6.5. Çekme Mukavemetinin Sürtünme Zamanıyla Değişimi

Birleşme bölgesindeki sürtünme zamanının ve basıncının Şekil 6.4. ve 6.5.'de görüldüğü gibi artmasıyla, bu bölgelerdeki çekme mukavemeti de artmaktadır. Fakat birleşim

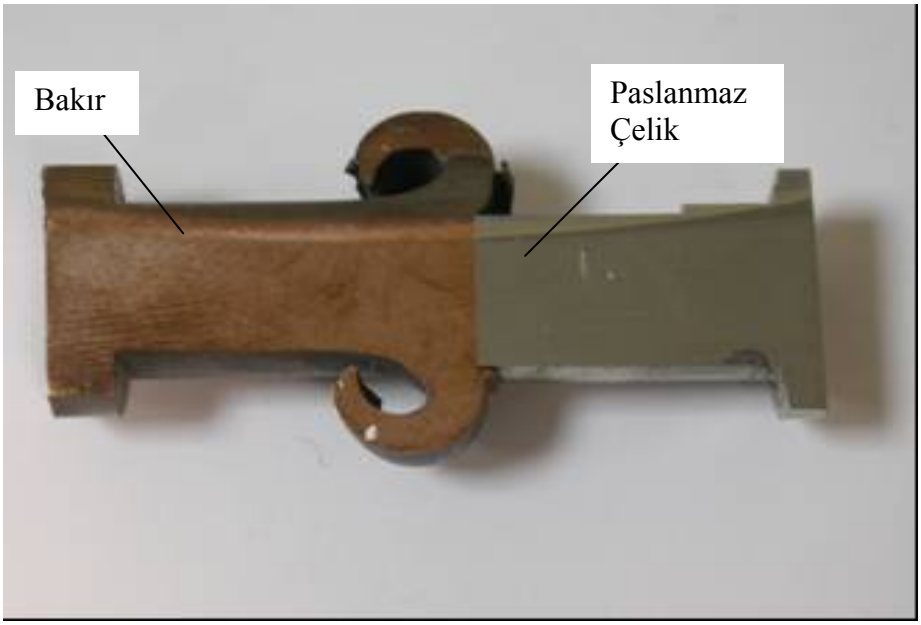
bölgelerinin mukavemeti bir noktaya kadar yükselmekte, daha sonra sürtünme zamanının ve basıncının artmasına karşılık, mukavemet düşmektedir. Bu sonuçlara göre elde edilen çiftin en yüksek mukavemet değeri, en düşük mukavemete sahip bakırın dayanımının yaklaşık olarak % 75'i kadar olmaktadır.

6.3. Kaynaklanan Parçaların Mikro Yapısı

Paslanmaz çelik-bakır birleştirmesinin kaynaklı haldeki makro fotoğrafı ve parçanın enine kesilmiş haldeki makro fotoğrafı Şekil 6.6 ve 6.7'de verilmiştir. Ayrıca, parçaların kendi mikro-yapıları ve ara-yüzeyinin görüntüsü Şekil 6.8–6.10' da ayrıntılı olarak verilmektedir.

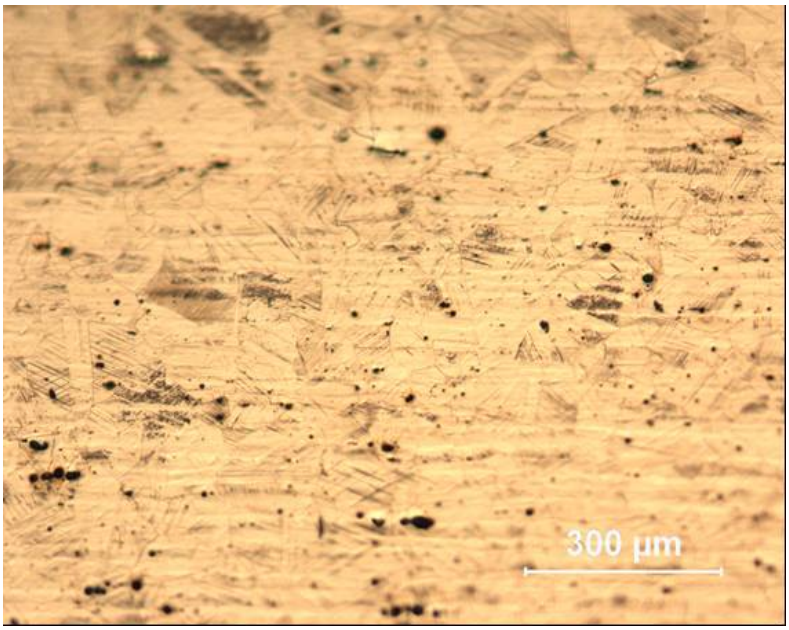


Şekil 6.6. Kaynaklı Haldeki Birleştirmenin Makro Fotoğrafı



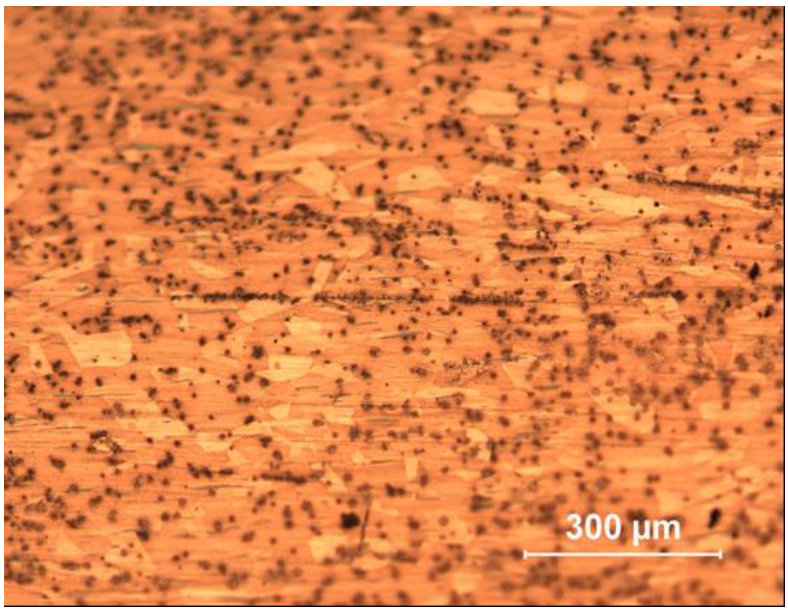
Şekil 6.7. Birleştirmenin Enine Kesilmiş Makro-Fotoğrafı

Şekil 6.7'den görüldüğü gibi bakır tarafındaki eksenel kısalma, paslanmaz çelik tarafından daha fazladır. Birleştirmelerin toplam eksenel kısalma değerleri 8,0 ile 8,3 mm arasındadır. Kaynak çapakları veya kaynak dudakları, bakırın ergime sıcaklığının çeliğe göre daha düşük olması nedeniyle ara yüzeyde bakır tarafında oluşur.

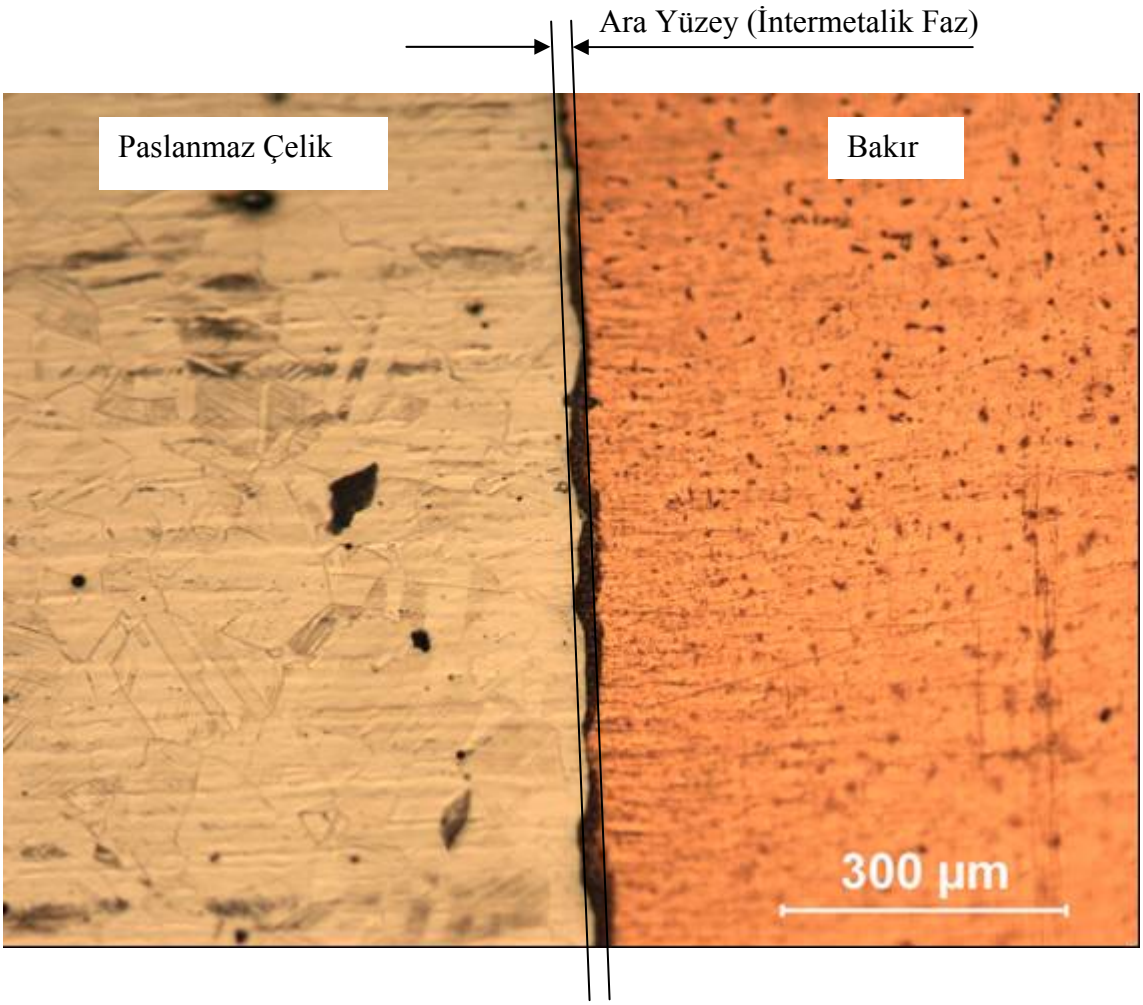


Şekil 6.8. Paslanmaz Çeliğin Mikroyapısı

Paslanmaz çeliğin mikro yapısı, bu tür çeliğin oda sıcaklığındaki doğal yapısı olan ostenitik tane yapısındadır.



Şekil 6.9. Bakırın Mikro Yapısı



Şekil 6.10. Birleştirmede Ara Yüzeyin Görünümü

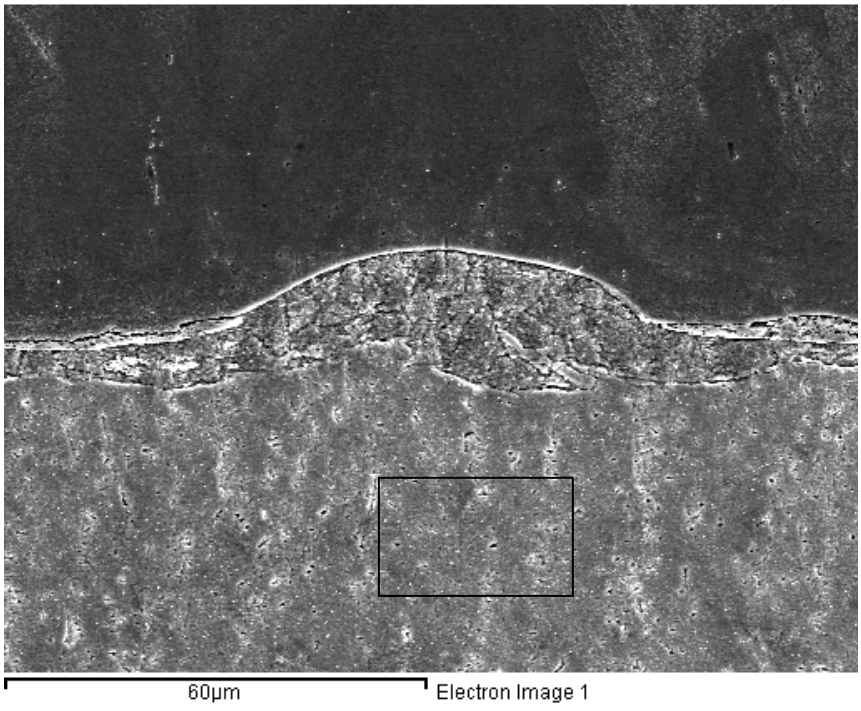
Birleştirmelerin ara yüzeyinde ısıdan etkilenen bölgeler (ITAB) ve nispeten küçük ergimeler vardır. Ergiyen bölge ve ısıdan etkilenen bölgelerin genişlikleri 0.2 μm ile 4.5 mm arasında değişir. Daha yüksek ısıl yayınmaya sahip olan bakır'ın tarafındaki ısıdan etkilenen bölgeler, çelik tarafındakinden daha geniştir.

Çelik tarafındaki tane boyutunda önemli bir değişim gözlenmezken, bakır tarafındaki küçük taneler sertleşme olduğunu ifade etmektedir. Bakır tarafında eş eksenli taneler ve Cu_2O partikülleri yer almaktadır. Ayrıca, ara yüzey boyunca her iki malzemenin elementleri difüze olmuşlar ve ara yüzeyde bazı intermetalik fazlar formlanmıştır.

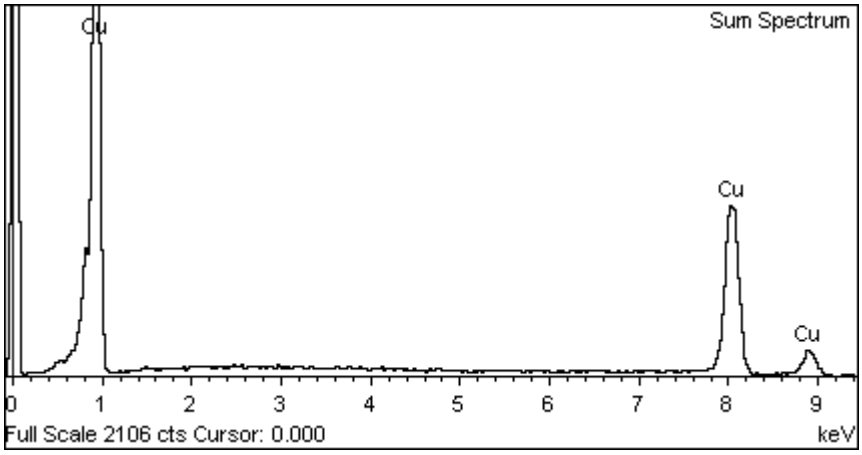
6.4. Kaynak Ara Yüzeyinin EDX Analizi

Birleştirilen parçaların ara yüzeyinde oluşan intermetalik fazları araştırmak için parçalara, SEM (Scanning Electron Microscopy) and EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis) analizi uygulanmıştır. İncelemeler SEM- JEOL JSM 5410 LV mikroskobuyla 200 kV sahasında gerçekleştirilmiştir. SEM mikroskobuyla EDS analizi, SEM fotoğraflarında tanımlanan bir bölge üzerinde yapılmıştır.

Birleştirmenin ara yüzeyinde bakır, çelik ve intermetalik fazın SEM mikroyapıları ve spectrum analiz sonuçları Şekil 6.11-6.16 arasında ayrı ayrı verilmektedir. Ayrıca, bu bölgelere ait EDS analiz sonuçları Tablo 6.5-6.7 arasında verilmektedir.



Şekil 6.11. Birleştirmede SEM Mikro Yapısı ve İşaretlenen Bakır

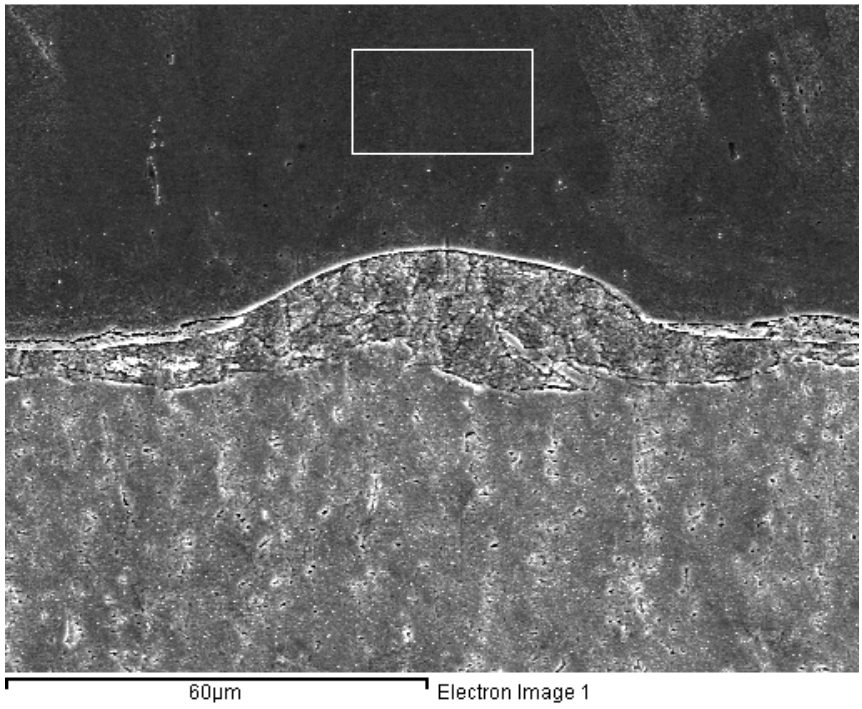


Şekil 6.12. Birleştirmede Bakırın Spectrum Analizi

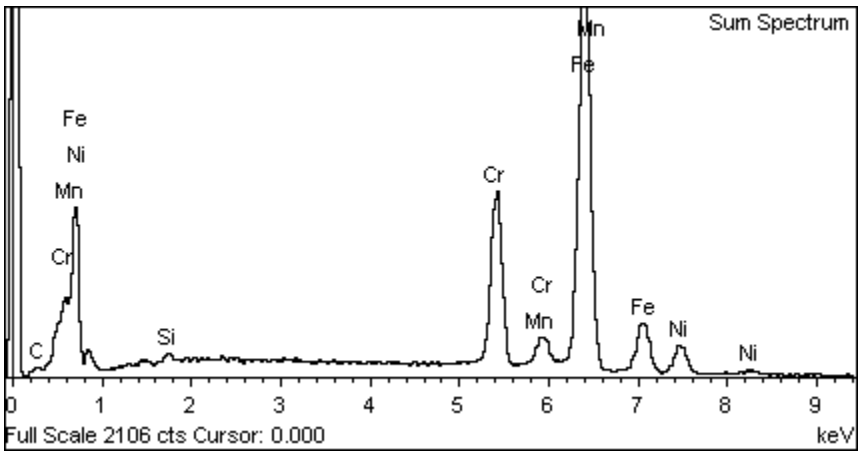
Tablo 6.5. SEM Mikroyapısı ve Bakırda İşaretlenen Bölgeye Göre EDS Analiz Sonucu

Element	Weight%	Atomic%
Cu	100.00	100.00
Totals	100.00	

Bakır tarafında tanımlanan bölgedeki EDS analizi %100 Cu' dan oluşmuştur (Tablo 6.5).



Şekil 6.13. Birleştirmede SEM Mikroyapısı ve İşaretlenen Çelik

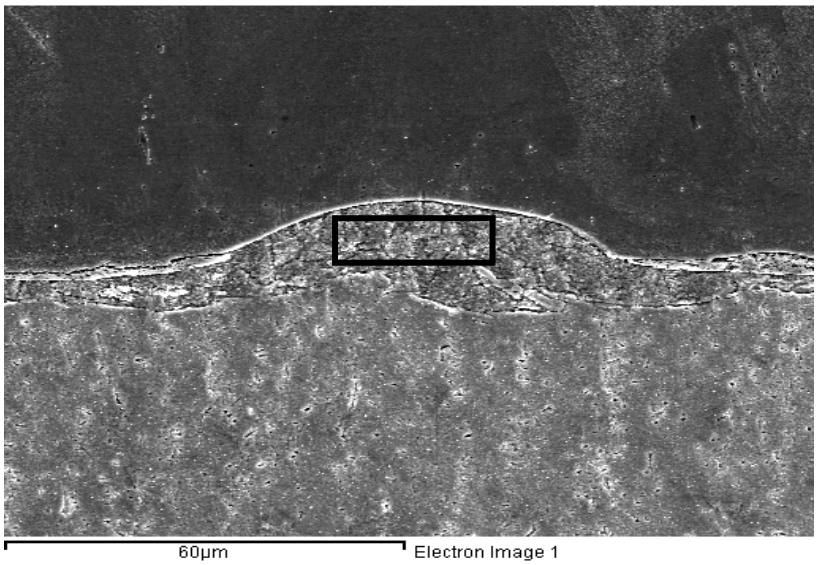


Şekil 6.14. Birleştirmede Çeliğin Spectrum Analizi

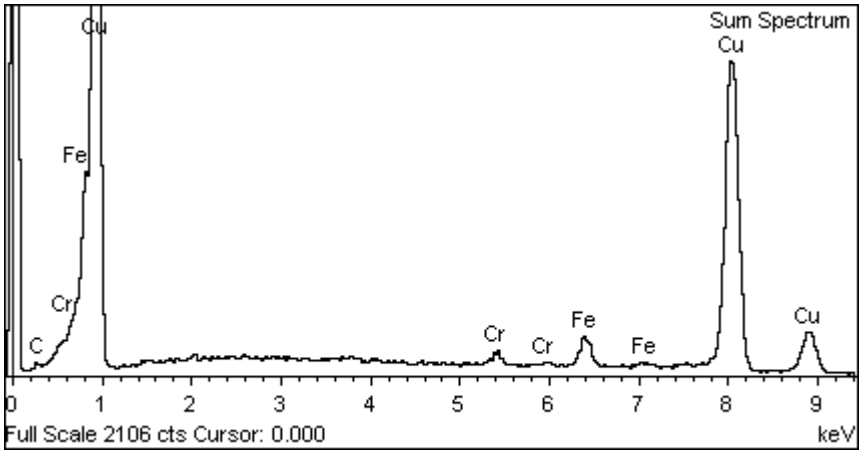
Tablo 6.6. SEM Mikroyapısı ve Çelikte İşaretlenen Bölgeye Göre EDS Analiz Sonucu

Element	Weight%	Atomic%
C	1.82	7.83
Si	0.50	0.92
Cr	18.86	18.73
Mn	1.48	1.39
Fe	69.60	64.33
Ni	7.74	6.80
Totals	100.00	

Çelik tarafında tanımlanan bölgedeki EDS analizi %1.82 C, %0.50 Si, %18.86 Cr, %1.48 Mn, %69.60 Fe ve %7.74 Ni' den oluşmaktadır (Tablo 6.6).



Şekil 6.15. Birleştirmede SEM Mikroyapısı ve İşaretlenen Ara Yüzey (İntermetalik Faz Bölgesi)



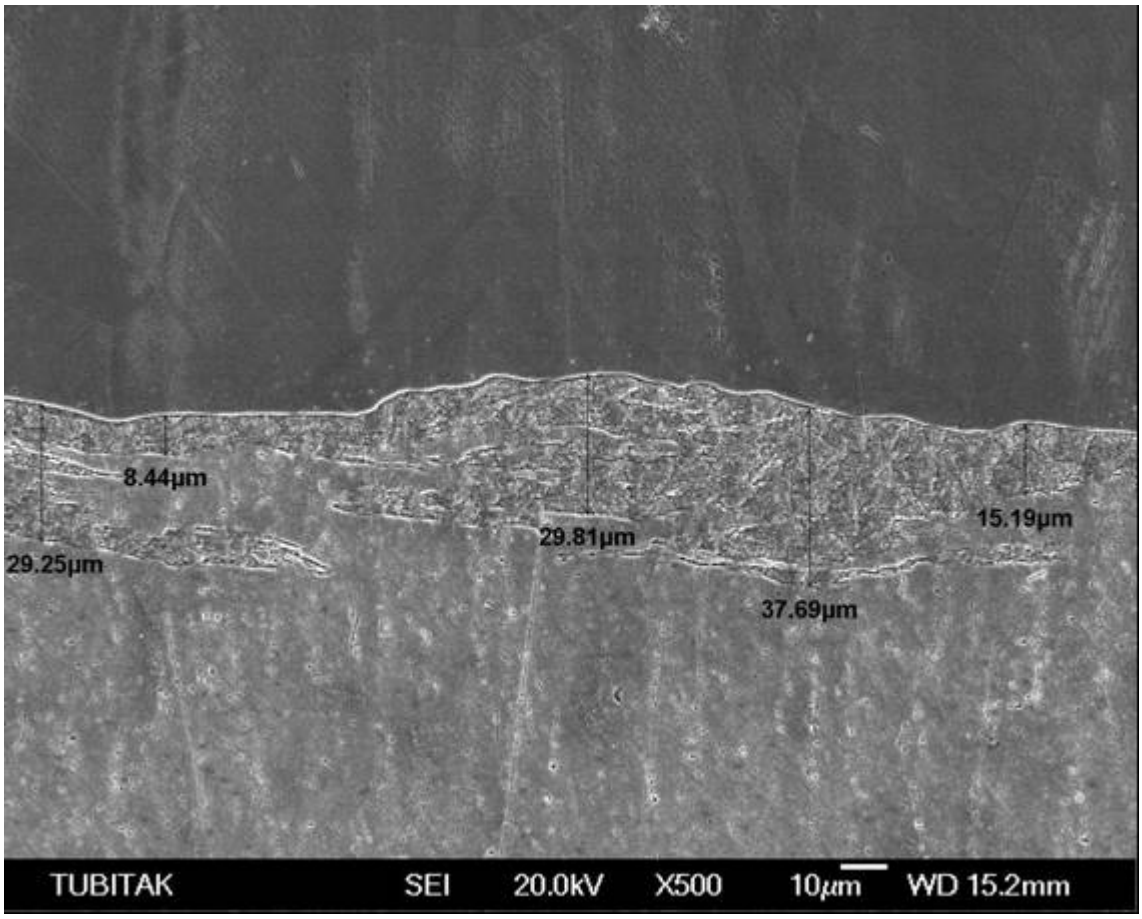
Şekil 6.16. Birleştirmede İntermetalik Fazın Spectrum Analizi

Tablo 6.7. SEM Mikroyapısı ve Ara Yüzeyde İşaretlenen Bölgeye Göre EDS Analiz Sonucu

Element	Weight%	Atomic%
C	2.55	12.09
Cr	1.16	1.27
Fe	3.71	3.78
Cu	92.58	82.86
Totals	100.00	

Ara yüzeyde tanımlanan bölgedeki EDS analizi %2.55 C, %1.16 Cr, %3.71 Fe ve %92.58 Cu' dan oluşmaktadır (Tablo 6.7). Böylece, ara yüzeyde çeşitli intermetalik fazların oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca, aşağıda ki ara yüzeyin SEM fotoğrafında (Şekil 6.17) intermetalik faz bileşiklerinin kalınlıkları görülmektedir.

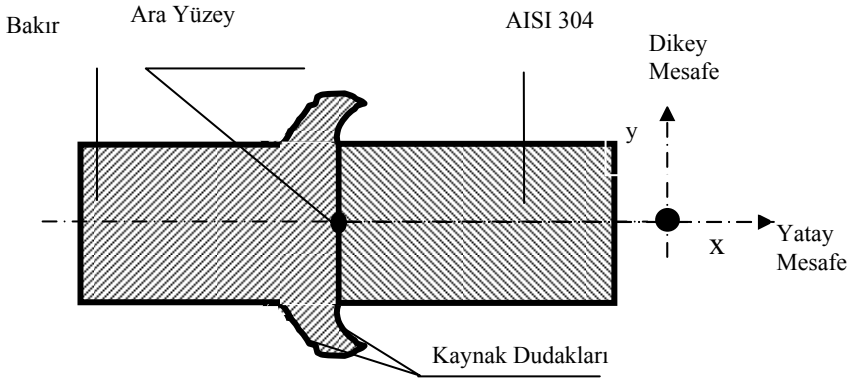


Şekil 6.17. Ara Yüzeyde İntermetalik Faz Bileşiklerinin Kalınlıkları

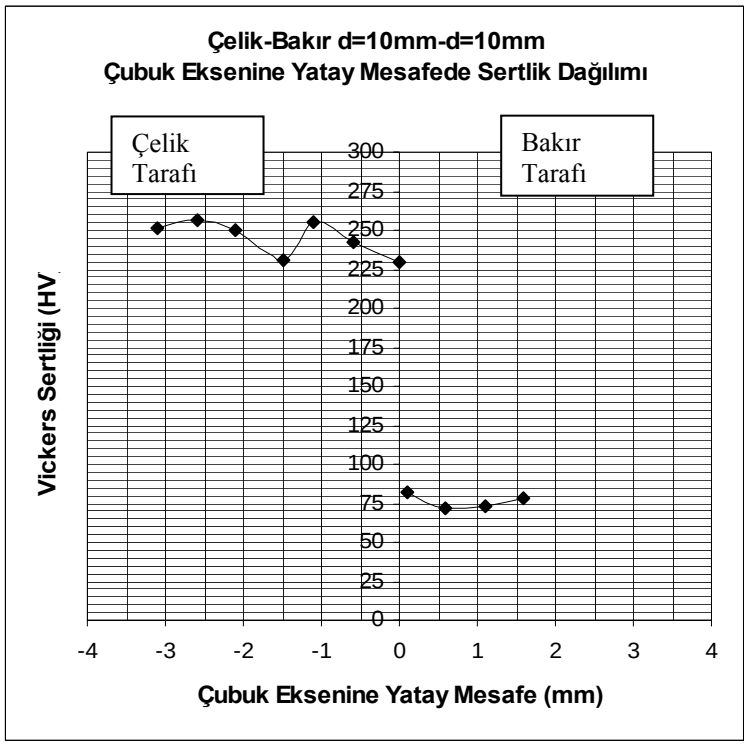
Ara yüzeydeki intermetalik fazların kalınlıkları, 8.44 µm ile 37.69 µm arasında değişmektedir (Şekil 6.17).

6.5. Kaynaklanan Parçaların Sertlik Değişimleri

Birleştirmelerin dayanımları sertlik değişimleriyle de ilişkilidir. Sertlik ölçümleri 300 g yük altında Vickers mikro-sertlik ölçümüyle yapılmış ve ölçümün şematik gösterimi Şekil 6.18' de verilmiştir. Birleştirmelerin yatay mesafede ve dikey mesafedeki sertlik ölçüm değerleri Şekil 6.19 ve 6.20' de verilmiştir.

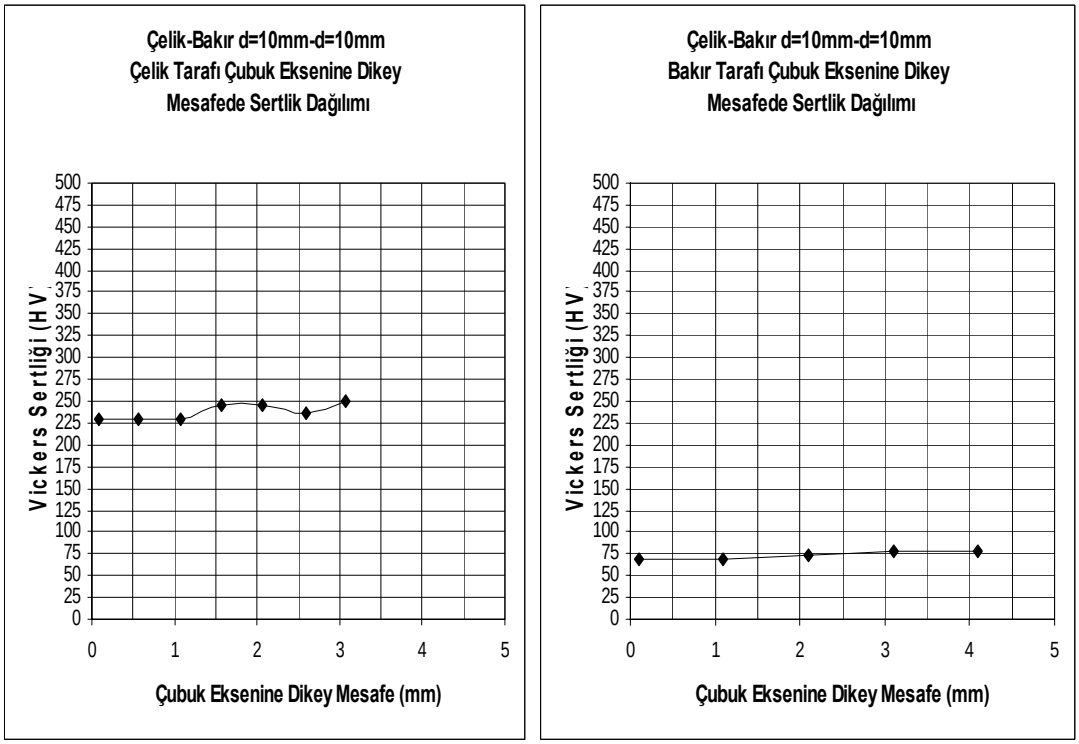


Şekil 6.18. Sertlik Testi Şematik Gösterimi



Şekil 6.19. Birleştirmenin Yatay Mesafesinde Sertlik Değişimi

Birleştirmelerin yatay mesafedeki sertlik ölçüm değerleri Şekil 6.19' da verilmiştir. Bu grafikte, bakırın sertliğinin hafifçe arttığı görülmektedir.



Şekil 6.20. Birleştirmenin Dikey Mesafesinde Sertlik Değişimi

Şekil 6.20'den görüldüğü gibi parçaların merkezden sona ilerledikçe parçaların sertliğinin bir miktar arttığı görülmektedir.

Ayrıca, parçaların ara yüzeyindeki sertlik değişimlerinin malzemelerin farklı ısıl yayınımlarından ve ara yüzeyde oluşan intermetalik fazlardan oluştuğu düşünülebilir.

BÖLÜM 7. İRDELEME VE SONUÇ

Birleştirilen parçalara uygulanan çekme deneyi ve metalürjik deneyler ile deney sonuçlarına ait çekme dayanımı ve sertlik dağılımları çizilen diyagramlarla geniş olarak Bölüm 6.'da gösterilmiştir.

Ayrıca birleştirilen parçalara ait makro kesit fotoğrafları ve parçaların içyapısındaki değişimler, yine Bölüm 6.'da çekilen fotoğraflar yardımıyla verilmiştir.

Bu bölümde, Bölüm 6.'da verilen grafiklerin ve içyapıların yorumları yapılmaktadır.

İlk olarak birleştirilen parçalara uygulanan çekme deneyleri, ikinci olarak parçaların kaynak bölgelerindeki içyapı değişimleri ve son olarak ta bu parçalardaki sertlik değişimleri yorumlanmaktadır.

7.1. Çekme Deneylerinin Yorumu

AISI 304 ve Bakır eşit çaplı birleştirmelerine uygulanan çekme deneylerinin çekme dayanımı-sürtünme süresine bağlı değişimi Şekil 6.5 'da gösterilmektedir. Deneylerde sürtünme basıncı, yığma basıncı ve yığma süresi sabit tutularak sürtünme süresi (t_s)=6 ile 14 sn arasında alınarak en iyi sonucun 8,5 sn. civarında olduğu bulunmuştur. Düşük sürelerde yeterli ısının oluşmadığı, daha uzun sürelerde ise malzemenin yığılmadan öteye erimeye başladığı görülmüştür.

AISI 304 ve Bakır eşit çaplı birleştirmelere uygulanan çekme deneylerinin çekme dayanımı-sürtünme basıncına bağlı değişimi Şekil 6.4 'de gösterilmektedir. Deneyler sürtünme süresi, yığma süresi ve yığma basıncı sabit tutularak, sürtünme basıncı (P_s)=55 ile 90 MPa arasında alınarak yapıldığında artan sürtünme basıncı ile çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Ancak en iyi birleşmenin 75 MPa civarında olduğu bulunmuştur.

Daha önce de belirtildiği gibi, birleştirilen parçaların çekme mukavemetleri, sürtünme zamanı ve basıncıyla artmakta, fakat bir noktadan sonra sürtünme zamanı ve basıncının artmasına karşılık çekme mukavemeti azalmaktadır.

7.2. Mikroyapı ve Sertlik Yorumu

Mikro yapı fotoğraflarından, numunenin ara yüzeyinde bakır bölgesi içerisine demir'in karışmadığı görülmektedir. Çünkü EDS analizlerinden görüldüğü üzere ara yüzeyde çeşitli intermetalik fazlar oluşmuştur. Ayrıca, sürtünme kaynağı vasıtasıyla ara yüzeyde dönme ve büyük deformasyonlar nedeniyle bakır-oksit filmleri parçalanır ve böylece kirlenmeyen yüzeyler oluşur.

Sertlik şekillerinden görüldüğü gibi; merkezde yatay mesafede bakırın sertliği hafifçe artarken, çeliğin sertliği hafifçe azalmaktadır. Çelikte sertliğin düşmesinin sebebi, kaynak işlemi süresince çeliğin tavlama sıcaklığına ulaşmasıyla açıklanabilir. Çünkü tavlama ile malzemelerin sünekliği artarken, sertlik ve mukavemetinde düşme olmaktadır. Diğer taraftan, bakır tarafta onun yüksek ısıl iletkenliği ve hızlı soğuması nedeniyle sertliğinde hafif artış görülmektedir.

Parçaların merkezde dikey mesafedeki sertlikleri incelendiğinde, parçaların merkezinden sona ilerledikçe parçaların sertliğinin bir miktar arttığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

ANIK, S., "Kaynak Teknolojisi El Kitabı", İstanbul,1993.

ANIK, S., DİKİCİOĞLU, A., VURAL, M., ‘’İmal Usulleri’’, Birsen Yayınevi, 1999.

ARAN, A., “ Metal Döküm Teknolojisi ”, Birsen Kitapevi, 1993.

DOBROVIDOV, A.N., et al, “Selection of Optimum Conditions for The Friction Welding of High-Speed Steel 45”, Weld.Prod., 22- 26. 1975.

DUNKERTON, S.B., “Toughness Properties of Friction Welds in Steels”, Weld. J., 193-201, Aug., 1986.

FOMICHEV, N.I., “The Friction Welding of New High Speed Tools Steels to Structural Steels”, Weld. Prod., 35- 38. 1980.

FU, By L., DUAN, L., "The Coupled Deformation and Heat Flow Analysis by Finite Element Method During Friction Welding", Welding Research Supplement, May, 202-207, 1998.

IMSHENNIK, K.P., “Heating In Friction Welding “, Weld. Prod., 76- 79. 1973.

ISHIBASHI, A., EZDE, S., TANAKA, S. “Studies on Friction Welding of Carbon and Alloy- Steels”, Bulletin of The JSME, 1080- 1087. June, 1983.

JENNING, P., “Some Properties of Dissimilar Metal Joints Made by Friction Welding”, Advances in Welding Processes, Solid Phase Joining Processes, Proceeding of Conference, The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge: 147-152., 1971.

KINLEY, W., “Inertia Welding: Simple in Principle and Application”, Weld. And Met. Fab. 585-589, Oct., 1979.

KURBAN, A. O. , KAHRAMAN, N. , "Farklı Metallerin Sürtünme Kaynağı ve Kaynak Parametrelerinin Kaynak Üzerine Etkisi", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu sa: 226-235, 12 - 13 - 14 Nisan 1995.

KURUZAR, D. L., "Joint Design for The Friction Welding Process", Welding Journal, 31-35, June, 1979.

MURTI, K.G., SUNDARESAN, S., "Structure and Properties of Friction Welds between High- Speed Steel and Medium- Carbon Steel for Bimetal Tools", Mat. Sci. And Tech. 865-870. Aug. 1986.

NENTWIG, A. W. E. , APPEL, L., " Friction Welding of Cross Section of Different Sizes", Schweissen und Schneiden/ Welding & Cutting v 48 n 12 Dec. 1996. PE 236 -E237 4qq.

RAJAMANI, G.P., SHUNMUGAM, M. S., RAO, K. P., "Parameter Optimization and Properties of Friction Welded Quenched and Tempered Steel", Weld. J., 225-230. June 1992.

SLUZALEC, A., "Thermal Effects in Friction Welding", Int. J. Mech. Sci. 467- 478. 1990.

SEREIGIN, S.A, SABANTSEV, V.P., "The friction Welding of Quenched Steel", Weld. Prod., 20- 23., 1977.

SLUZALEC, A., "Thermal Effects in Friction Welding", Int. J. Mech. Sci. 467- 478., 1990.

SÖNMEZ, F., "Sürtünme Kaynağıyla Birleştirilmiş Yüksek Hız Çeliği(HSS/S 6-5-2) ve Orta Karbonlu (AISI 1040) Çeliklerinde Mukavemet ve Metalürjik Özelliklerin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, Şubat, 2007.

ŞAHIN, A.Z., YILBAS, B.S., AL-GARNI, A.Z., "Friction Welding of Al-Al, Al-Steel and Steel-Steel Samples", Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 5, no. 1, pp. 89-99, February, 1996.

ŞAHİN, M., "Sürtünme Kaynağı İle Birleştirmede Parça Boyutları ve Plastik Şekil Değiştirmenin Etkilerinin Araştırılması", T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Edirne, 2001.

TYLECOTE, R.Y. "The Solid Phase Welding of Metals", Edward Arnold (Publisher) Ltd. London: 1-150., 1968.

VILL, V.I., "Friction Welding of Metals", AWS, Newyork, 1962.

YILBAS, B. S., SAHIN, A. Z., KAHRAMAN, N., AL – GARNI, Friction Welding of St - Al and Al- Cu Materials, Journal of Materials Processing Technology, v 49 n 3-4 Feb15., pp. 431-443., 1995.

YILMAZ, M., " Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi", Doktora Tezi, 1993.

YILMAZ, M. , KALUÇ, E., KARAGÖZ, Ş. , TÜLBENTÇİ, K. , "Alaşımsız C45 ve HSS 6-5-2 Yüksek Hız Çeliği Çiftinin Sürtünme ve Yakma Alın Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mikroyapısal Analizi", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, sa: 185-196, 12 - 13 - 14 Nisan 1995.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın çeşitli kademelerinde bilgi ve yardımlarından faydalandığım, her konuda desteğini esirgemeyen ve çalışmalarımı büyük bir titizlikle yönlendiren Değerli Hocam Sayın Doç. Dr. Mümin ŞAHİN ’e ve ayrıca tezle ilgili söz konusu deneylerin yapılmasında yardımlarından faydalandığım en başta Araş. Gör. Kaan ÖZEL Bey olmak üzere Teknisyen Reyhan SAĞLAM’ a teşekkürü borç bilir ve emeği geçen tüm meslektaşlara ve arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

ÖZGEÇMİŞ

Ender ÇİL 1971 yılında Bartın'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini burada tamamladı. 1988 yılında Bartın Lisesi'nden, 1994 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2007 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 1996 yılından beri Bartın'da Ender Mühendislik olarak proje ve taahhüt işleri yapmakta, 2002 yılında kurulmuş ve halen işlevini sürdüren Bartın Makine Sanayi Ltd. Şti.' nin kurucu ortakları arasındadır. Bekâr olan Ender ÇİL, İngilizce bilmektedir.