

77615

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK KROM NİKEL ALAŞIMLI PASLANMAZ ÇELİĞİN
ALAŞIMSIZ DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKLE DİFÜZYON KAYNAĞININ
ARAŞTIRILMASI

Sermin KOÇER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

77615

METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

1998
ELAZIĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
DİFÜZYON KAYNAĞI
KURULU

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK KROM NİKEL ALAŞIMLI PASLANMAZ ÇELİĞİN
ALAŞIMSIZ DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKLE DİFÜZYON KAYNAĞININ
ARAŞTIRILMASI

Sermin KOÇER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu Tez/...../ 1998 Tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

(İmza)

(İmza)

(İmza)

Danışman

Yrd.Doç.Dr.Nuri ORHAN

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****YÜKSEK KROM NİKEL ALAŞIMLI PASLANMAZ ÇELİĞİN
ALAŞIMSIZ DÜŞÜK KARBONLU ÇELİKLE DİFÜZYON KAYNAĞININ
ARAŞTIRILMASI****Sermin KOÇER****Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metal Eğitimi Anabilim Dalı
1998 Sayfa: 77**

Difüzyon kaynağı birleştirilmek üzere eşleşmiş aynı yada farklı iki yada daha çok malzemenin, bu malzemelerin ergime sıcaklıkları altında, yeniden kristalleşme üzerinde bir sıcaklıkta malzemelerde bir plastik akmaya neden olmayan bir basınç altında aktı halde bir difüzyon yolu ile malzemeler arası metalujik bir bağ oluşturacak bir süre ile tutulması ile uygulanan bir birleştirme yöntemidir.

Bu çalışmada alaşımsız, düşük karbonlu bir çelik ile dubleks bir paslanmaz çeliğin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, konuya giriş yapılmış, ikinci bölümünde difüzyon kaynağı, difüzyon kaynağı parametreleri hakkında kapsamlı bir literatür

verilerek, süperplastiklik hakkında kıs bir bilgi sunulmuştur. Üçüncü bir bölümde, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş malzemeler, türlerine göre verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar, beşinci bölümde deney sonuçları sunulmuştur. Altıncı ve son bölümde, sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sonuçlardan, bu malzeme cinsinin argon korumalı bir atmosferde 900-1000 ve 1100⁰ C'de , 1.7 ve 3 MPa basınçlar altında 15 dakika süre içinde birleştirileceği anlaşılmıştır. En iyi bağlantıya 900⁰ C'de 3 MPa basınçta 15 dakika süre ile kaynak edilen numunede ulaşılmıştır. Ayrıca, mikro yapı dönüşümlerinin difüzyon hızını etkilediği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Difüzyonla Birleştirme, Difüzyon Kaynağı, Katı Hal Kaynağı, Sade C'lu Çelik, Dupleks Paslanmaz Çelik.



SUMMARY**Master Thesis****INVESTIGATION OF THE DIFFUSION BONDING OF
A STAINLESS STEEL WITH A HIGH CHROMIUM AND NICKEL CONTENT
TO A PLAIN-LOW CARBON STEEL****Sermin KOÇER****Firat University****Graduate School of Natural and Applied Sciences****Department of Metallurgy Education****1998, Page: 77**

Diffusion bonding is one of the advanced bonding processes in which two materials, similar or dissimilar, can be bonded in solid state. This provides to bond materials in a large range from composites to ceramics which cannot be bonded with conventional bonding methods. One of the most important advantages of this method is to produce new bimetals or dissimilar material couples.

In this study diffusion bonding conditions of a low- carbon steel and a duplex stainless steel were investigated.

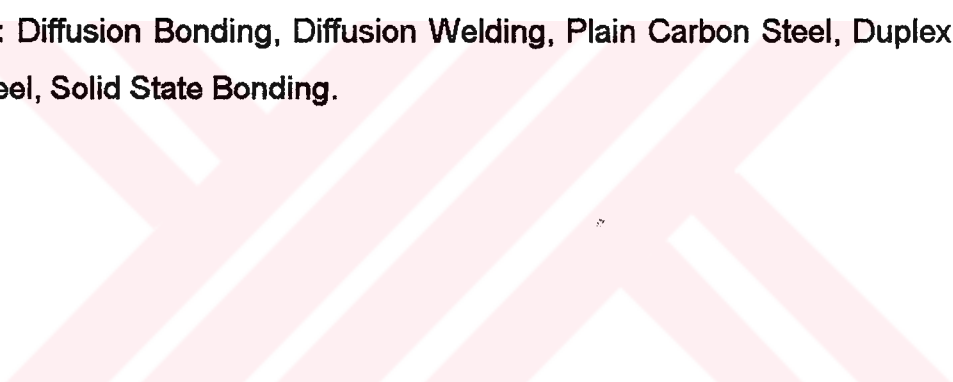
In the first chapter of the study an introductory information is given. In the second chapter, a comprehensive literature research about diffusion bonding and its parameters and a short description on superplasticity are presented. In the third chapter, the materials which have bonded by diffusion bonding are dealt with by a classification with respect to the kind of materials. In the fourth chapter the experimental studies are given. In the fifth chapter the results of the

studies are presented. In the sixth and final chapter, the results are evaluated and some recommendations are given.

From the results it was seen that this material couple could be bonded effectively by diffusion bonding in an argon-protective atmosphere at 900, 1000 and 1100°C under the pressures of 1.7 and 3 MPa in fifteen minutes. The best result was obtained with the specimen bonded at 900°C under 3 MPa and 15 minutes.

It can be concluded from the results that micro structure transformations could have a considerable effect on diffusion rate and consequently on the bonding process itself.

Key Words: Diffusion Bonding, Diffusion Welding, Plain Carbon Steel, Duplex Stainless Steel, Solid State Bonding.



TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması esnasında, yardım ve desteklerini esirgemeyen başta danışman hocam Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Bölümü öğretim üyesi sayın Yrd. Doç. Dr. Nuri ORHAN'a, bölüm başkanım sayın Doç. Dr. Ayşen HAKSEVER'e, yol göstericiliği ile hepimizi yönlendiren, çok değerli büyüğüm ve hocam, Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa AKSOY'a teşekkürlerimi arz etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca, deneylerde kullandığım malzemeyi temin eden ve bu konudaki bilgilerini bizimle paylaşan bölümümüz Öğr. Gör. Sayın Dr. Mehmet Kaplan'a ve deney aparatının hazırlanması hususunda yardımcı olan Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi teknisyenlerine de özellikle teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	Sayfa iii
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiii
 1. GİRİŞ	 1
 2. KATI HAL BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	 2
2.1. Difüzyon Kaynağı	3
2.2. Difüzyon Kaynağına Tesir Eden Faktörler	7
2.2.1. Kaynak sıcaklığı	7
2.2.2. Yüzey şartları	9
2.2.3. Kaynak basıncı	13
2.2.4. Kaynak süresi	15
2.2.5. Kaynak ortamı (atmosferi)	17
2.2.6. Birleştirilecek malzemelerin mikroyapıları ve tane boyutları	17
2.3. Difüzyon Kaynağı Teknikleri	21
2.4. Difüzyon Kaynağına Uygulanan Muayene ve Testler	23
2.4.1. Tahribatlı muayeneler	23
2.4.2. Tahribatsız muayeneler	24
2.5. Difüzyon Kaynağı Uygulamaları	25
2.6. Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Metotlarıyla Karşılaştırılması	29
2.7 Süperplastiklik	30

3. DİFÜZYON KAYNAĞI UYGULANAN MALZEMELER	33
3.1. Titanyum Alaşımlarının Difüzyon Kaynağı	36
3.2. Alüminyum Alaşımları	37
3.3. Demir Esaslı Malzemelerin Difüzyon Kaynağı	38
3.4. Kompozit Malzemelerin Difüzyon Kaynağı	38
3.5. Refrakter Malzemelerin Difüzyon Kaynağı	38
3.6. Diğer Malzemeler	39
3.7. Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi	41
3.8. Dubleks Paslanmaz Çelikler	42
 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	 44
4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	44
4.2. Malzemelerin Mikroyapıları	44
4.3. Malzemelerin Mekanik Özellikleri	47
4.4. Difüzyon Kaynağının Yapılışı	48
 5. DENEY SONUÇLARI	 51
5.1. Arakesitte Kusurlar	51
5.2. Metalografik Muayene ve Sertlik Ölçüm Sonuçları	52
5.3. Tane Boyutu Ölçüm Sonuçları	64
 6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	 67
6.1. Alaşım Elementleri ve Mikro Yapının Difüzyon Kaynağı Üzerindeki Etkisi	67
6.1.1. Tane Boyutu Değişimi	68
6.2. Sertlik Dağılımının Değerlendirilmesi	70
6.3. Basıncın Difüzyon kaynağı Üzerindeki Etkisi	71
6.4. Sıcaklığın Difüzyon Kaynağı Üzerindeki Etkisi	71
6.5. Öneriler	72
KAYNAKLAR	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Difüzyon Kaynağı Mekanizması	6
Şekil 2.2. Sıcaklık ve Uygulanan Basıncın Sürünme Eğrisine Tesiri ..	8
Şekil 2.3. Sıcaklığın Birleşme Miktarı Üzerindeki Etkisi	9
Şekil 2.4. Yüzey Kusurları	10
Şekil 2.5. Yüzey Deformasyonu ile Pürüzlülük Arasında Sıcaklığa Bağlı Değişme	12
Şekil 2.6. Bağlantının Kayma Mukavemeti İle Kaynak Süresi Arasındaki ilişki	16
Şekil 2.7. Ara Tabakanın Tesiri	21
Şekil 2.8. Süperplastiklik Mekanizması	32
Şekil 4.1. Dökülmüş Paslanmaz Çelik Numunenin Mikroyapısı	45
Şekil 4.2. Deneylerde Kullanılan Dökülmüş Dupleks Paslanmaz Çeliğin Mikroyapısı	46
Şekil 4.3. AISI 1010 Çeliğinin Kaynak Öncesi Mikroyapısı	46
Şekil 4.4. Difüzyon Kaynağı Aparatı	48
Şekil 4.5. Basınç Uygulama Aparatı	49
Şekil 5.1. 1100 ⁰ C'de 3 MPa Basıncıta 15 Dakika Süre ile Birleştirilen Numunenin Arakesitindeki Boşluklar	51
Şekil 5.2. 1000 ⁰ C'de 3 MPa Basıncıta 15 Dakika Süre ile Birleştirilen Numunenin Arakesitindeki Boşluklar	52
Şekil 5.3. 1100 ⁰ C, 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme	54
Şekil 5.4. 1100 ⁰ C, 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme	54
Şekil 5.5. 1000 ⁰ C, 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme.	55
Şekil 5.6. 1000 ⁰ C 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme.	55

Şekil 5.7.	900 ⁰ 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme.	56
Şekil 5.8.	900 ⁰ C 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme.	56
Şekil 5.9.	Temas Yetersizliğinden Dolayı 900 ⁰ C ve 3 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Ferritleşmeyen Bölge ..	57
Şekil 5.10.	1100 ⁰ C ve 3 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunenin Arakesit Mikroyapısı	58
Şekil 5.11.	1100 ⁰ C ve 3 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı	58
Şekil 5.12.	1100 ⁰ , 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı.....	59
Şekil 5.13.	1100 ⁰ C ve 1.7 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı.....	59
Şekil 5.14.	1000 ⁰ C ve 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı	60
Şekil 5.15.	1000 ⁰ C ve 3 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı	60
Şekil 5.16.	1000 ⁰ C, 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı	61
Şekil 5.17.	1000 ⁰ C ve 1.7 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı	61
Şekil 5.18.	900 ⁰ C, 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı	62
Şekil 5.19.	900 ⁰ C ve 3 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı	62
Şekil 5.20.	900 ⁰ C, 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı	63
Şekil 5.21.	900 ⁰ C 1.7 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı	63
Şekil 5.22.	3 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunelerde Tane Boyutu.	65

Şekil 5.23.	1.7 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunelerde Tane Boyutu Değişimi	65
Şekil 6. 1.	Ferritleşme Mesafesi İle Kaynak Sıcaklığı Arasındaki İlişki ..	67
Şekil 6.2.	Tane Boyutu Değişimi	69
Şekil 6.3.	Demir-Sementit Denge Diyagramı (Ötektoidik Bölge)	69
Şekil 6.4.	Sertlik Dağılımı Grafiği	70



TABLOLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Difüzyon Kaynak Yöntemine uygun Metal Çiftleri ve Ara Tabaka Malzemeleri	34
Tablo 3.2. Metal Çiftleri İçin Difüzyon Kaynağı İşlem Parametreleri	35
Tablo 3.3. Difüzyon Kaynağı Uygulanabilirlik Tablosu	41
Tablo 4.1. Süper Dupleks Paslanmaz Çeliğin Bileşimi	44
Tablo 4.2. AISI 1010' un Bileşimi	44
Tablo 4.3. Dupleks Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özellikleri	47
Tablo 4.4. AISI 1010 Çeliğinin Mekanik Özellikleri	47
Tablo 4.5. Kaynak Şartları Tablosu	50
Tablo 5.1. Ferritleşme Mesafesi	53
Tablo 5.2. Arakesitte AISI 1010 Tarafında Tane Boyutu Değerleri	64



1.GİRİŞ

Difüzyon kaynağı, aynı ya da farklı cins iki ya da daha çok malzemenin, bu malzemelerin akma dayanımlarının çok altındaki bir basınç ve yeniden kristalleşme sıcaklıkları üzerindeki bir sıcaklıkta, ergitilmeksizin birleştirildikleri bir katı hal kaynağıdır. Bu yöntem ile temas yüzeyleri uygun bir şekilde hazırlanmış, kimyasal ve metalurjik özelliklerinin uygunluğuna dikkat edilen bütün malzemeleri birleştirmek mümkündür. Özellikle, son yıllarda modern teknolojinin geliştirdiği yeni malzemelerin bir çoğu bilinen kaynak yöntemleriyle birleştirilememektedir. Buna daha çok bu malzemelerin belirli sıcaklıklarda istenmeyen yapı dönüşümlerine maruz kalmaları sebep olmaktadır. Difüzyon kaynağı, aralarında seramik ve kompozitlerin de yer aldığı bir çok yeni ve birbirleriyle birleştirilmeleri ergitme kaynağı ile mümkün olmayan demirli ve demir dışı metal ve alaşımlarının birleştirilmesini mümkün kılmıştır.

Demirli malzemelerin difüzyon kaynağı, bu malzemeler bilinen kaynak yöntemleriyle birleştirilebildikleri için pek fazla incelenmemiştir. Yalnız, bu yöntem, elektronik ve elektrik sanayi ile imalat sanayinde bu malzemelerden sırasıyla entegre devre ve düşük maliyetli metal çiftleri üretmek amacıyla kullanılmıştır (Kurşungöz, 1996; Orhan, 1996). Ayrıca bu malzemelerde difüzyon kaynağı kullanılarak difüzyon olayı bilimsel olarak incelenmiştir (Orhan, 1996).

Bu çalışmada AISI 1010 çeliği ile dupleks bir paslanmaz çelik difüzyon kaynağı ile birleştirilerek, bir metal çift oluşturulmuştur. Bu tip bir birleştirmenin korozi ortamlar için ekonomik bir malzeme üretme yöntemi olarak kullanılabileceği gösterilmiş; kaynak esnasında meydana gelen metalurjik değişimler basınç ve sıcaklık açısından incelenerek, iç yapı dönüşümlerinin difüzyon kaynağı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar iç yapı dönüşümlerinin difüzyon hızı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterir biçimdedir.

2. KATI HAL BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Kaynak yöntemleri mekanizmalarına göre :

1. Ergitme Kaynağı,
2. Lehimleme,
3. Katı Hal Kaynağı olmak üzere üç ana grupta toplanabilir (Meahara,1986).

Katı Hal Kaynağı, aynı ya da farklı iki malzemenin, malzemeler ergitilmeksizin; eğer ergime olmuş ise, ergimiş metalin ekstrude edildiği ve nihai birleştirmenin iki katı yüzey arasında meydana geldiği bir kaynak usulüdür.

Katı hal kaynağını yapmak için iki malzemenin temiz yüzeylerini, aralarında bir bağ oluşacak kadar birbirlerine yaklaştırmak gerekir. Bunu sağlamak üzere birçok teknik uygulanmakta ise de, bütün işlemlerde esas olan, üzerinde bir tabaka bırakmayacak şekilde iki yüzeyi deforme edecek bir basınç uygulamaktır (Lancaster, 1987). Birleştirme işlemine tesir eden diğer faktörler daha sonra izah edilecektir.

Başlıca katı hal kaynak işlemleri şu şekilde gruplandırılabilir:

1. Yüksek sıcaklıkta basınç kaynağı,
2. Soğuk basınç kaynağı,
3. Sürtünme kaynağı,
4. Patlama kaynağı,
5. Ultrasonik kaynak,
6. Difüzyon kaynağı.

Bu kaynak türlerinden ilk dördü plastik deformasyon kaynağı adı altında da gruplandırılmaktadır (Meahara, 1989).

2.1. Difüzyon Kaynağı

İngiliz Standartları 499'da difüzyon kaynağı: Birleştirilmek üzere; eşleşmiş iki yüzeyin, malzemelerin ergime noktaları altındaki bir sıcaklıkta, malzemelerde tespit edilebilir plastik akmaya sebep olmayan bir basınç altında, katı hal difüzyonu yoluyla malzemeler arasında metalurjik bir bağ oluşuncaya kadar, malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek bir süre tutulmasıyla uygulanan kaynak yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Fitzpatrick, 1988). Malzemelerin ara yüzeylerinde uygulanan sıcaklıkla ergiyen bir ara tabaka kullanıldığı taktirde, buna "Sıvı Faz Difüzyon Kaynağı" denir.

Kristal yapıya sahip katı bir malzemenin atomları arasındaki çekim, kohezyon kuvvetlerini doğurur. Normal olarak her bir atom, üzerine tesir eden kuvvetin sıfır olduğu bir pozisyonu işgal eder. Ne var ki, katı malzeme, harici kuvvetlerin etkisiyle gerildiği zaman; atomlar denge pozisyonlarını terk ederler ve kristalin içinde, dış kuvvet tarafından dengelenen bir gerilme meydana gelir. Atomlar arasındaki çekim kuvveti, birbirlerinden uzaklaşma dereceleri ile orantılı olarak artar, bir maksimumdan geçer ve sonra azalır.

Farklı iki katının yüzeyleri arasındaki çekim ise, adhezyon olarak adlandırılır. Aynı ya da farklı iki katının bir araya getirilmesi, yüzeyleri arasında bağ oluştururken; aynı cins katı yüzeyleri arasında kohezyon kuvvetlerinden dolayı kohezyon, farklı cins yüzeyler arasında da adhezyon kuvvetlerinden dolayı adhezyon işi yapılmış olur. Kohezyon ve adhezyon işi, yüzeyin serbest enerjisinin fonksiyonudur. Ayrıca, iki gevrek malzeme, ya da bir gevrek, bir sünek malzemeden oluşan bir bağlantı için (mesela metal-seramik) adhezyon işi, bağlantı mukavemetinin bir ölçüsüdür (Lancaster, 1987).

Adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin teşekkülü, yani malzeme yüzeyleri arasında birleşmenin sağlanması için, malzeme yüzeylerinin, atomlar arası bağın oluşabileceği yakınlıkta temas haline getirilmeleri gerekir.

İki malzemenin difüzyonla birleştirilmesinde, birleştirmenin davranışını önemli ölçüde etkileyen bir diğer kuvvet de, malzemelerin kimyasal yapısına bağlı olmaksızın, moleküller arasında etki eden Van der Waals kuvvetleridir. Van der Waals kuvvetleri, gres, su buharı, gaz gibi metal yüzeyindeki yabancı moleküllerin adsorbsiyonunun baş sebebidir. (Lancaster, 1987). Öte yandan metalik malzemelerin yüzeyleri temas ettirildiğinde Van der Waals kuvvetleri, birleşmeyi sağlayan önemli unsurlardan birisi olmaktadır(Guo, 1985).

Kısaca ifade etmek gerekirse; difüzyon kontrollü birleşme işlemini başlatabilmek için, iki yüzey artıklardan ve makro pürüzlülüklerden arındırılmış bir şekilde temas haline getirilmelidir. Bu temas, atomlar arasında bağ oluşumuna imkân verecek bir yakınlıkta olmalıdır. İlk bağ oluşuktan sonra, sıcaklık yardımıyla difüzyon başlar ve yüzeylerin ara kesitindeki boşluklar doldurulur.

Difüzyon kaynağı mekanizması ile ilgili günümüze kadar birbirinden farklı birçok model sunulmuştur. Çünkü, sınırlı bir süre için basınç ve ısınin birlikte uygulanmasıyla bağ oluşturma mekanizmaları oldukça karmaşıktır (Egan, 1980).

Derby ve Wallach difüzyon kaynağını, basınç altında sinterlemeye benzer bir işlem olarak incelemişlerdir. Buna bağlı olarak da şu mekanizmaları sunmuşlardır (Guo, 1985).

1. Yüzeyden kaynaklanan mekanizmalar: Arakesitteki boşluk yüzeyinden, boşluk uzunluğu boyunca yüzey difüzyonu ve hacim difüzyonu . Burada tahrik edici kuvvet, bir ara yüzey boşluğunun yüzeyindeki eğrilik farkıdır.

2. Arakesitteki yüzeylerden kaynaklanan mekanizmalar: Birleşme hattı boyunca kimyasal potansiyel değişiminin belirlediği, tane sınırı difüzyonu ve hacim difüzyonu.
3. Uygulanan basınçtan kaynaklanan akma ve sürünmenin yol açtığı plastik deformasyon.
4. Sıvı faz kütle transferi: Gibbs-Thomson etkisi, yani yüzey eğriliğindeki bölgesel farklardan doğan basınç farkı.

Yazarlar, başlangıç safhasında plastik deformasyonu, birleşecek yüzeylerin büyük bir kısmı temas ettiği zaman ise yüzeyden kaynaklanan ve ara yüzey mekanizmalarının etkili olduğu konusunda hem fikirdirler. Sıvı faz kütle transferi, ancak yüksek sıcaklıklarda çalışıldığı zaman söz konusudur.

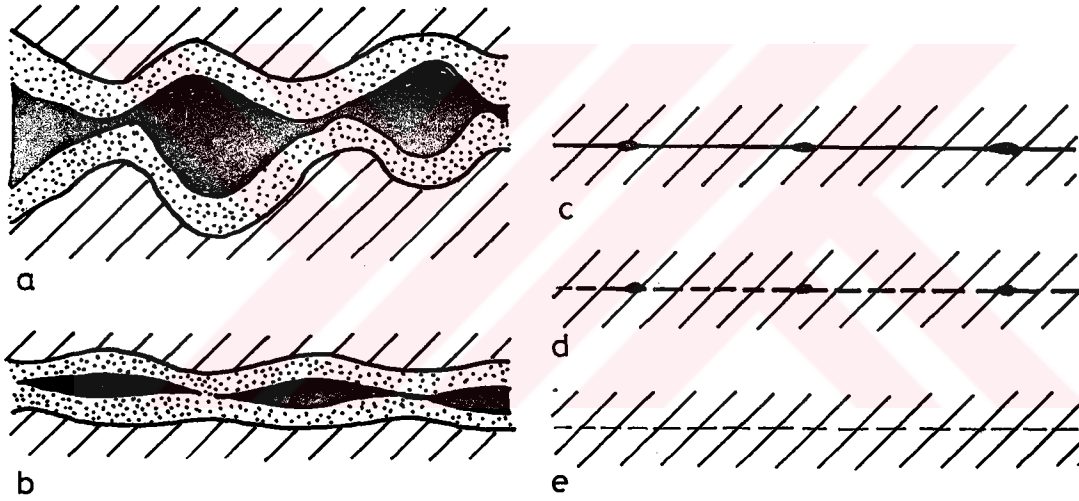
Difüzyon kaynağının modellenmesi konusunda King ve Owczarski, Garmon ve arkadaşları (Guo' dan, 1986), White ve Allen (1981), Derby ve Wallach (1989), Pilling ve Ridley (1984), Meahara (1984), gibi araştırmacılar çalışmalar yapmış ve sonuçlarını yayınlamışlardır. Kurulan modeller, pratik çalışmalarla uyum göstermişlerdir.

Yapılan çalışmaların ışığında, difüzyon kaynağı mekanizması şu şekilde genelleştirilebilir:

1. Yük altında plastik deformasyon,
2. Sürünme deformasyonu,
3. Difüzyon,
4. Yeniden kristalleşme ve tane sınırı göçü.

Metal folyo veya kaplama şeklindeki ara tabakalar kullanılarak, kaynak için gerekli sıcaklık, basınç ve zaman değerlerini azaltmak mümkün olmaktadır (Partridge, 1989).

Son yıllarda Guo (1985) ve Salehi (1990) gibi araştırmacılar, difüzyon mesafesi ve süperplastiklik gibi hususları da hesaba katan araştırmalar yapmışlardır. Şekil 2.1'de Spanswick (1989) tarafından verilen difüzyon kaynağı mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 2.1. Difüzyon kaynağı mekanizması: a-İlk nokta teması ve oksit tabakası; b- Plastik deformasyon ve sürünme sonrası, daha ince bir oksit tabakası ve geniş boşluklar; c- Nihai sürünme ve akma sonrası; d- Yüzey ve hacim difüzyonu ile boşlukların doldurulması; e- Tamamlanmış kaynak (Spanswick, 1989).

2.2. Difüzyon Kaynağına Tesir Eden Faktörler

Difüzyon kaynağı aşağıdaki faktörlerin tesiri altındadır.

- a. Kaynak şartları: Sıcaklık, zaman, basınç, yüzey pürüzlülüğü ve çalışma ortamı (atmosfer).
- b. Birleştirilecek malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri: Mekanik özellikler, kristal yapıları, tane boyutlu, atom yarıçapı, yeniden kristalleşme sıcaklıkları ve yüzey enerjileri.
- c. Metalurjik özellikler: Farklı metal ya da malzeme çiftlerinin karşılıklı çözünabilirliği ve metaller arası bileşik teşekkülü (Guo, 1985; Lancaster, 1987; Salehi, 1990).

2.2.1. Kaynak sıcaklığı

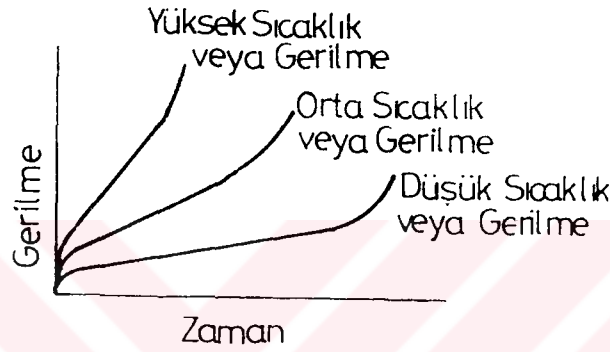
Difüzyon kaynağında sıcaklık, deformasyona, oksit çözünürlüğüne, allotropik dönüşüme, yeniden kristalleşmeye, sürünme ve difüzyona ve işlemin kısa sürede oluşmasına etkili olduğundan, en önemli kaynak parametresidir. Aynı cins metallerin birleştirilmesinde işlem sıcaklığı, T_m ($^{\circ}\text{K}$) metalin ergime sıcaklığı olmak üzere:

$$T_k \approx (0.5-0.7)T_m$$

olarak alınır.

Difüzyon yönteminde sıcaklık kadar ısıtma ve soğutma hızları da önemlidir. Endüstriyel çalışmalar için $50\text{ }^{\circ}\text{C/dakika}$ 'lık ısıtma hızı olumlu sonuçlar verirken, farklı metallerin birleştirilmesinde lineer ısı genleşme katsayılarına bağlı olarak $15\text{ }^{\circ}\text{C/dakika}$ 'lık bir maksimum ısıtma hızı önerilmektedir (Ceyhun, 1996).

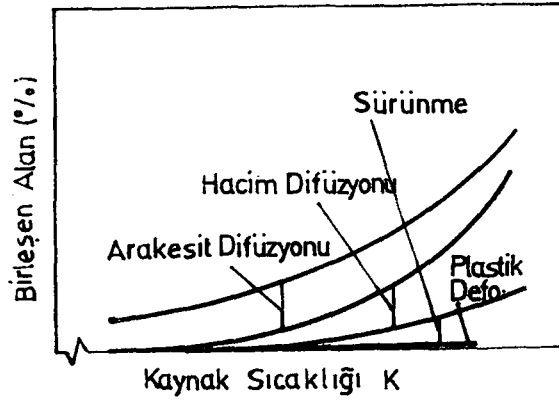
Sıcaklık arttıkça ana malzemelerin akma gerilmeleri azalır. Böylece hem ilk plastik deformasyon, hem de yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Dolayısıyla kaynak için gerekli temas alanını elde etme süresi kısalır. Şekil 2.2.'de uygulanan basınç ve sıcaklığın sürünme eğrisine tesiri görülmektedir.



Şekil 2.2. Sıcaklık ve Uygulanan Basıncın Sürünme Eğrisine Tesiri (Askeland, 1989).

Diğer yandan $D = D_0 \exp (-Q / RT)$ denkleminde (D : T sıcaklığında difüzyon katsayısı; D_0 : Atomik titreşim frekans faktörü; Q Aktivasyon enerjisi (Jmol^{-1}); R : Gaz sabiti ($8.314 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)), Difüze olabilirliğin, sıcaklıkla eksponansiyel olarak değiştiği görülmektedir (Askeland, 1989; Salehi, 1990).

Pratikte, difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklığın değeri malzemenin mutlak ergime sıcaklığından daha büyük olan sıcaklık değerleridir (Partridge, 1989). Bu sıcaklığın, mümkün olduğu kadar yüksek, sabit ve üniform olarak uygulanması gerekir (Salehi, 1990). Sıcaklığın birleşen alan üzerindeki etkisi Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3. Sıcaklığın Birleşme Miktarı Üzerindeki Etkisi (Partridge, 1989).

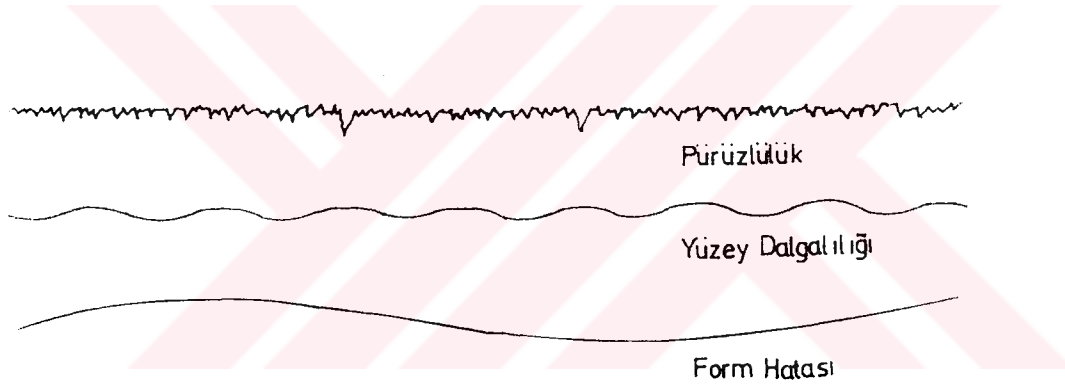
2.2.2. Yüzey şartları

Bir metal yüzeyinde, özenli bir çalışma ile hazırlanmış olsa da, çeşitli yabancı maddeler bulunmaktadır. Kaynak yapılacak metallerin bağlantı yüzeylerinin yeteri kadar kir ve oksit artıklarından temizlenmesi gerekir. Birleşme yüzeylerinde oksit oluşumunu sağlayan gazlar giderilmelidir. Bu nedenle kaynak işlemi vakum ya da koruyucu gaz altında yapılmalıdır. Oksitler gibi organik filmler, mekanik olarak kırıldıkları için genelde kaynak işlemine engel olmazlar. Hareketli organik yüzey kirleri ise kaynak işlemine büyük engel yaratırlar.

Pürüzlülük, yüzeyler arasında tam temasa ulaşmak için gereken süreyi etkiler. Pratikte, bir metal, yükseklik ve dalga boyu küçük olan bir yüzey pürüzlülüğüne sahiptir; yani yüzey dalgalılığı hakim özelliktir. Difüzyon kaynağında ise, özellikle, uzun dalga boyuna sahip olan pürüzler önemlidir. Çünkü, difüzyon kaynağının kendisi sıcaklık ve mesafeye bağlı olduğundan, boşlukların yok edilmesi için hem çok yönlü basınç uygulanması hem de uzun zamana gerek olmaktadır (Salehi, 1990; Guo, 1987).

Haddelenmiş halde, bilhassa ince levhalar, iyi bir yüzeye sahip olma açısından avantajlıdır (Partridge, 1989).

Yüzey pürüzleri 1. safha sonundaki kalıntı gözeneklerin başlıca sebebidir. Pürüzlülük sıcaklık ve deformasyonla artar. Yine süperplastik deformasyon esnasında, yüzey pürüzlülüğü artarak, tane sınırı hareketine katılmaktadır. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5, sırasıyla, yüzey kusurlarını ve pürüzlülüğün sıcaklıkla değişimini göstermektedir.



Şekil 2.4. Yüzey Kusurları.

Klappaak (1987), yüzey pürüzlülüğünün matematik modellemesini yapmış ve işleme izlerinin periyodik ve tekrarlı bir sinüs dalgası şeklinde olduğunu göstermiştir.

Yüzey artıkları deneysel değişkenler olmamakla beraber, hemen hemen bütün yüzeylerde, bazı şekillerde mevcuttur. Bunlar iki gruba ayrılabilir.

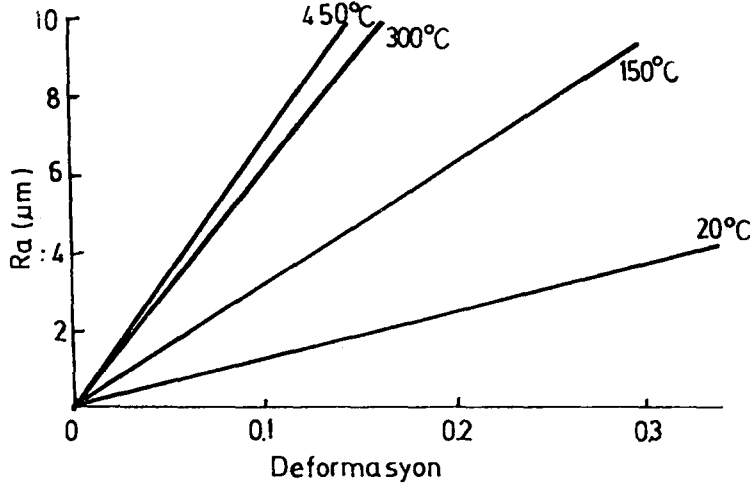
1. Normalde oldukça kırılğan olan oksit filmleri.

2. Yağ, gres, toz gibi organik ya da inorganik tabakalar.

Oksit filmleri, yaklaşık 10 -20 atom mertebesinde bir derinliğe nüfuz eden tabakalardır. Bütün sıcaklık değerlerinde H_2O , CO_2 ve SO_2 gibi gazlar, oksit film kalınlığını artırmaktadır. Oksit tabakaları birleşecek yüzeylerin temasını önleyip, birleşme esnasında difüzyon yoluyla sinterlemeye yol açarak, bağ teşekkülünü geciktirir ve arakesitte tane sınırı difüzyonunu engelleyerek, boşluk kalmasına sebep olur (Guo, 1985). Oluşması muhtemel, makro, mikro ve başlangıç teması boşluklarından sonuncusunun sebebi oksit filmleridir (Partridge, 1989).

Yüksek sıcaklıklarda ($<0.5 T_e$, T_e : Mutlak ergime sıcaklığıdır) birçok metal oksidi (Cu, Ti, Zr, Nb, Ta ve Mo gibi elementlerin oksitleri), ana metal içinde çözünür ya da dağılır (Ag_2O gibi). Dolayısıyla bağlantıya zarar vermez. Al_2O_3 gibi oksitlerle, nitrür ve karbür filmleri ise metaller arası bağ oluşmasına engel olurlar (Salehi, 1990).

Brynt (1975), metal oksitlerinin meydana getirdiği oksit filmlerini, difüzyon kaynağı üzerindeki etkilerine göre, metalde oksijenin çözünürlüğü ve standart oksit oluşum enerjisi (ΔE_G°)'nin bir fonksiyonu olarak sınıflandırmıştır. Buna göre, -350 kcal / mol' den daha düşük bir standart serbest oksit oluşum enerjisine sahip olan, oksijen çözünürlüğü az metallerin difüzyon kaynağı zordur.



Şekil 2.5. Yüzey Deformasyonu ile Pürüzlülük Arasında Sıcaklığa Bağlı Değişme (Partridge, 1989).

Sunwoo (1994), alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağında vakum altında bile alüminyum oksidi çözmenin mümkün olmadığını belirtmiştir. Yalnız, alüminyum lityum alaşımlarının difüzyon kaynağında oksit tabakası yerine Al-Li spinalleri oluştuğu tespit edilmiştir.

Calvo v.d. (1988), bakır ile demirin difüzyon kaynağında difüzyon bölgesi oluşumunun bakırdaki oksitten fazla etkilenmediğini ileri sürmektedirler. Oksijenin demire olan afinitesinin daha yüksek olması sebebiyle, bilhassa düşük sıcaklıklarda, demirin bakırdaki çözünürlüğünün azalması ile demir oksit oluşumu artmaktadır.

Yağ, gres, toz, hatta parmak izi gibi artıklar, aşağı yukarı oksit filmleriyle aynı etkiye sahiptirler. Dolayısıyla, kaynaktan önce yüzeyden uzaklaştırılmaları gerekir.

Oksit filmlerinin kaldırılması için, kimyasal dağlama ve asitle temizleme yöntemleri kullanılır. Diğer artıklar, yıkama, 300°C'ye kadar sıcaklıkta kurutma ile uzaklaştırılabilir.

2.2.3. Kaynak basıncı

Difüzyon kaynağında basınç, iki yüzey arasında ilk teması gerçekleştirmek ve difüzyon işlemini başlatmak üzere kimyasal bir potansiyel farkı üretmek için gerekli olmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi, yüzey oksitleri kırılmadan teması başlatmak mümkün değildir. Basınç değerı, uygulanacak kaynak sıcaklığında, birleştirecek malzemelerin mekanik özelliklerine ve gerekli olan biçimlendirme derecesine bağlıdır.

Kaynak esnasında uygulanması gereken basınç, difüzyon kaynağına şu şekilde tesir eder.

1. Yüzey pürüzlerinin plastik akmasına yardım eder.
2. Çözülmesi mümkün olmayan yüzey oksitlerini metalin metalle temasını sağlamak için kırar ve temas alanını artırır.
3. Birleşecek yüzeleri birbirlerine atomlar arası mesafede yaklaştıarak, atomlar arası çekim kuvvetlerinin faaliyete geçmesini temin eder.
4. Difüzyon için kimyasal potansiyel farkı meydana getirir.

Uygulanan basıncın olumsuz tesirlere sebep olmaması için aşağıdaki hususlara da dikkat edilmektedir:

- a. Uygulanacak basınç, yüzey pürüzlerinin sürünme hızı ve plastik deformasyonunu artıracak kadar büyük; kaynak edilecek parçaların makroskobik deformasyonuna yol açmayacak kadar küçük seçilir (Nichting, 1986; Lancaster, 1987; Guo, 1985; Egan, 1980; Partridge 1989; Salehi, 1990).
- b. Kaynak basıncı, birleştirilecek parçaların plastik hacim deformasyonunu en aza indirmek için, akma gerilmesinin belirgin şekilde altında tutulur.
- c. Uygulanacak basınç izostatiktir. Mohammad basıncın uygulanma hızının kaynak deformasyonu veya mukavemeti üzerinde önemli herhangi bir tesiri olmadığını bildirmiştir (Salehi'den, 1990).

Dubrovsky (1986), temas alanındaki deformasyon miktarı arttıkça difüzyon hızının arttığını belirtmektedir. Aynı araştırmacı bakır ve demirin difüzyon kaynağı üzerinde yaptığı çalışmada basıncın difüzyon kaynağı üzerindeki etkisini efektif difüzyon katsayı ile tanımlamıştır. Buna göre:

$$\text{Efektif Dif. Kts.} = \frac{\text{Deformasyonlu Dif. Kts.} - \text{Deformasyonsuz Dif. Kts.}}{\text{Deformasyonsuz Difüzyon Katsayısı}}$$

dir.

Uygulanan basınç malzemede kusurlar ve arakesit bölgesinde nispeten daha küçük bir tane yapısı meydana getirerek kısa devre difüzyon yolları da indükleyebilmektedir (Haufler v.d., 1986) .

Uygulanan basıncın allotropik dönüşüm gösteren Fe gibi metallerde, allotropik dönüşüm sıcaklıklarında, yavaşlayan difüzyonu hızlandırdığı da söylenebilir.

Kaynak basıncının artması, yüzeydeki oksit tabakasını kırması yanında, yapıda arakesite yakın sert oluşumların kopması ya da kırılması ve böylece kaynak süresinin kısılmasına yol açmaktadır (Calvo v.d., 1989).

Uygulamalarda genellikle basınç üst sınırı olarak malzemenin kaynak sıcaklığındaki akma dayanımı alınmaktadır. Yapılan araştırmalarda 0.007-4000Mpa arasında değişen basınçlarla başarılı denemeler yapılmakla birlikte, tatminkar sonuçlar 15-300 MPa arasında alınmaktadır.

Salehi (1990), günümüze kadar difüzyon kaynağında çeşitli malzemeler için uygulanan basınç değerlerinin 41 KPa ile 27 MPa arasında olduğunu söylemekte ise de, Walsh (1986) 32 MPa ve Meada (1988) 50 MPa' lık kaynak basınçları kullanmışlardır.

2.2.4. Kaynak süresi

Süre bağımlı bir işlem parametresi olup; sıcaklık, basınç ve birleşme türü ile ilişkilidir. Her malzeme ya da malzeme çifti için gerekli süre birkaç saniyeden, birkaç saate kadar değişebilir.(Gedik Eğitim Vakfı, Uluslararası Kaynak Teknolojisi'96 sempozyum Bildirileri).Kaynak süresi, sıcaklık ve basınç artırılarak kısaltılabilmektedir. Kirli yüzeyler ve düşük sıcaklıklarla çalışması halinde, süre uzamaktadır.

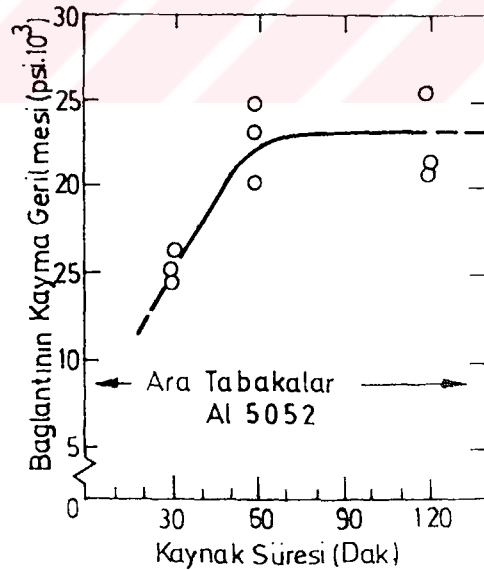
Kazakov (1962), sabit basınç ve sıcaklıkta birleştirme süresini uzatmanın, bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar artırdığını göstermiştir (Salehi, 1990'dan). Bu durum şekil 2.6'da görülmektedir.

Bağlantı mukavemeti ile kaynak süresi arasındaki ilişki, aslında bu kadar basit değildir. Metaller arası bileşiklerin meydana gelmesi, tane büyümesi;

özellikle, süper plastik şekillenme performansı ve bağlantı mukavemeti, süre uzadıkça olumsuz bir şekilde gelişmektedir.

Metalujik tesirlerin birleşme süresi üzerinde fazla etkili olmadığı tespit edilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda birleşme süresini kısa tutmak, ekonomiklik açısından önemlidir. Kaynak süresinin uzun olması kaynak ekonomisi açısından bir dezavantaj oluştururken, boşlukların oluşumunu, bileşimin değişimini ve kırılğan metaller arası bileşiklerin oluşumunu teşvik etmesi gibi bağlantının mekanik özelliklerini bozan olumsuzluklara da neden olabilir.

Difüzyon kaynağında geçen süre, iki evre olarak tanımlanmaktadır. Birinci evre bir olgunlaşma(kuluçka) sürecidir. Burada yüzeyler arasında temas alanı artmakta ve aşırı deformasyon bölgeleri oluşmaktadır. İkinci evrede ise kayma ve tane sınırı göçünün görüldüğü yoğun sürünme ile birlikte yeniden kristalleşme olayları hakimdir.



Şekil 2.6. Bağlantının Kayma Mukavemeti İle Kaynak Süresi Arasındaki ilişki (Partridge, 1989).

2.2.5. Kaynak ortamı (atmosferi)

Difüzyon kaynağında, parça yüzeyleri ve arakesitte oksidasyondan sakınmak için koruyucu bir atmosfer kullanılır. Bu amaçla, ya vakum altında ya da bir soygaz atmosferinde çalışılır. Kararsız ya da oksijen çözünürlüğü yüksek oksitlere sahip metallerle, normal atmosferde de tatminkâr bir bağlantı elde edilebilmektedir.

Soygaz olarak argon, helyum ve azot kullanılabilir. Oksijen miktarını en aza indirmeye yardım eden hidrojen de redükleyici bir atmosfer olarak düşünülmektedir. Ancak, hidrojenin, titanyum, zirkonyum, hafniyum ve kolombiyum ile tantal alaşımlarında hidrat oluşturması, dikkat edilmesi gereken bir husustur (Salehi, 1990).

Soygazlar atmosferik oksijenin tesirini ancak belli bir dereceye kadar azalttığından, kararlı oksitlere sahip metallerde vakum kullanılmaktadır. 1.3×10^{-3} Pa'dan daha fazla bir vakum oksit filmlerinin çözünmesini sağlayabilmekte ise de, uygulamada 1.3×10^{-2} ile 1.3×10^{-5} Pa'lık basınçlar kullanılmaktadır (Maeda, 1988; Calvo v.d., 1988; Andrzejewski, 1993). Vakum sırasında parçanın birleştirilecek arayüzeyi oksitlenmeden korunduğu gibi, yüzeydeki yabancı maddelerin süblimasyonu da sağlanmaktadır. Vakum ortamında yapılan kaynaklı birleştirmeler, vakum çok yüksek olmasa bile, yeterince saf olmayan asal gazların koruyuculuğu altında yapılan birleştirmelerden daha iyi dayanım sağlamaktadır.

2.2.6. Birleştirilecek malzemelerin mikroyapıları ve tane boyutları

Difüzyon kaynağına tesir eden birçok metalurjik faktör vardır. Bunlar:

- a. Mikroyapı,
- b. Tane boyutu,

c. İlave (ara) tabaka kullanılması şeklinde gruplandırılabilir.

İlâve fazlı (α / β) titanyum alaşımları üzerinde yapılan araştırmalar, farklı mikroyapıların farklı sürünme hızına sahip olduklarını göstermiştir.

Mikroyapılar üç gruba ayrılmıştır:

1. İnce taneli küresel,
2. Lamelli,
3. Tabaka tipi (Salehi, 1990).

Araştırılan alaşımların sürünme hızları kararlı sürünme kanunu bağıntısına göre, efektif aktivasyon enerjileri ile, başlangıçtaki yapı ile değişmektedir (Guo, 1985).

Kararlı bölgede sürünme bağıntısı:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp (-Q_c / RT) \quad 2.1.$$

şeklindedir. Burada $\dot{\epsilon}$ = sürünme hızı, σ = gerilme, Q_c = difüzyon aktivasyon enerjisi, A ve n ise sabitlerdir (Partridge, 1989).

Difüzyon kaynağı için en ideal yapının ince taneli yapı olduğu bulunmuştur. Bu yapı süper plastik alaşımlarda mevcuttur.

Tabaka şeklindeki taneler arttıkça, sürünme hızı azalmakta ve sonuçta arakesitte boşluklar kalmaktadır.

Lamelli yapı (α / β bölgesinde), diğer iki yapı ile karşılaştırıldığında daha düşük sürünme hızına sahiptir (Guo, 1985; Salehi, 1990). α / β yapısındaki alaşıma ait denge diyagramı şekil 2.7.'de verilmiştir.

İki fazlı alaşımlar için, iki fazın oranı difüze olabilme ve sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek difüzyon hızına sahip fazın, düşük difüzyon hızına sahip faza oranı, sıcaklığın tesiriyle arttıkça; bağ oluşumu olumlu yönde etkilenmektedir (Guo, 1985, Salehi, 1990).

Haddelenmiş yapılar üzerinde yapılan araştırmalar, difüzyon kaynağı esnasında, haddelenmiş yüzeyin birleşme yüzeyi olarak kullanılması halinde, plastik deformasyona karşı en yüksek direnmeye rastlanıldığını göstermiştir. Birleştirme yüzeyi olarak, hadde düzlemine dik doğrultudaki düzlemin seçilmesi halinde ise, en yüksek bağlantı mukavemeti elde edilmiştir (Guo, 1985; Salehi, 1990).

Calvo v.d. (1988), alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı üzerinde çalışmış; katı halde birbiri içinde tamamen çözülmeyen bu metalleri, bilhassa, metaller arası bileşiklerin ve ara fazların oluşması açısından inceleyerek; başlangıçtaki mikroyapının, bu tür istenmeyen yapıların meydana gelmesinde etkili olduğunu göstermişlerdir.

Tane boyutunun hem kaynak esnasında, hem de kaynak sonrasında bağlantının mukavemeti açısından büyük önemi vardır.

Kaynağın ilk safhalarında boşluklar daha fazla sayıda tane sınırıyla kesişir. Dolayısıyla, boşluğu kapatmak için birden çok tane sınırı etki eder (Guo ve Ridley, 1987). Atomlar, bu tane sınırlarından boşluğa difüze olarak, onu küçültürler. Burada, tane sınırı difüzyonu için kimyasal potansiyel farkını doğuran tahrik kuvveti, kısmen, uygulanan basınç ile tane sınırı arasındaki açıya bağlıdır. Bu açı 90° olduğu zaman, kimyasal potansiyel farkı tahrik kuvveti en yüksek, 0° (paralel) olduğu zaman ise en az olmaktadır (Wallach v.d., 1989).

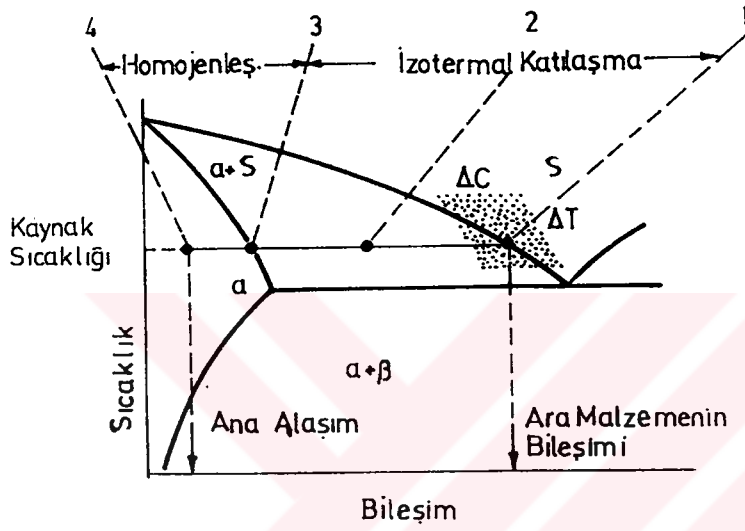
Görölmektedir ki; tane boyutu küçölüp, tane sayısı arttııkça, boşlukların difüzyonla doldurulması kolaylaşmakta ve arakesitte boşluk kalması ihtimali azalmaktadır.

Difüzyon kaynağında, birleşme işlemini hızlandırmak, bağlantının mekanik özelliklerini geliştirmek veya birbirinden farklı metal-metal olmayan (seramik, cam, kompozitler gibi) malzemelerin kaynağında karşılıklı difüzyon çifti oluşturmak için ara tabakalar kullanılmaktadır (Lancaster, 1987). Mesela, Enjo v.d. (1987), kompozit malzemelerin difüzyon kaynağında ara tabaka kullanılmaması halinde basınç ve sıcaklığın ancak sınırlı ve dar bir bölgede uygulanabildiğini tespit etmişlerdir.

Genel olarak ara (ilave) malzemenin fonksiyonları şunlardır (Guo, 1985):

- a. Metalik bir bağ oluşturmak için ana metalde çözünmek,
- b. Birbirinden farklı malzemelerin birleştirilmesi halinde intermetalik fazların oluşumunu bastırmak,
- c. Ön ısıtma esnasında, yüksek sıcaklıklarda, birleştirilecek yüzeyleri oksitlenmeye karşı korumak,
- d. Elektro-kaplama, evoparasyon veya iyon kaplama ile malzemenin difüzyon özelliğini geliştirmek.
- e. Düşük akma gerilmeli malzeme ya da sıvılar ihtiva eden bölgeler oluşturarak, oksit filmlerinin bozulmasını sağlamak,
- f. Arakesit boşluklarında, geçici sıvı fazlar oluşturarak, yüzey pürüzlerinin olumsuz tesirlerini en aza indirmek.

Ara tabaka kullanmanın şekli denge diyagramı üzerinde, Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Ara Tabakanın Tesiri (Partridge, 1989)

2.3. Difüzyon Kaynağı Teknikleri

Difüzyon kaynağı, günümüzde iki maksatla yapılmaktadır:

- Bilimsel çalışmalar için araştırma gayesiyle.
- Mevcut bir tekniği kullanarak bir parçayı üretmek için. Bunlardan birincisi ile teste tabi tutulabilecek difüzyon kaynağı tipleri geliştirilirken; ikincisi ile istenen elemanı elde etmek mümkün olur.

Birleştirilen malzemeler arasında ilave bir malzeme (levha) kullanılıp kullanılmamasına göre difüzyon kaynağı.

1. Difüzyon lehimleme (Ara tabaka kullanılan)
 - a- Tek ara tabaka kullanılan difüzyonla lehimleme.
 - b- Birden çok ara tabaka kullanılan difüzyonla lehimleme.
2. Ani sıvı faz kaynağı (Zhang, 1987).
3. Direkt difüzyon kaynağı, olmak üzere üçe ayrılabilir.

Difüzyonla lehimlemede, birleştirilecek yüzeyler arasına, ergime sıcaklığı ana malzemelerinkinden daha düşük, levha şeklinde bir ilave malzeme yerleştirilir. Isıl çevrim esnasında bu malzeme, Bölüm 2.2.6'da verilen fonksiyonları yerine getirir. Çok katlı ara tabakaları, hem termal gerilmeyi, hem de diğer gerilmeleri giderici ek bir etkiye de sahiptirler. Zhang (1987), ani sıvı faz kaynağını, ilk safhasında hızlı ısıtma ile, yüzeylerden biri ya da her ikisinin basınç altında, çok kısa bir süre için ergitilip hızla soğutulduğu bir difüzyon kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Hem difüzyonla lehimleme, hem de difüzyon kaynağında yüzeylerin, çok hassas bir şekilde işlenmiş olmaları gerekirken, ani sıvı faz kaynağında 80 numara zımpara ya da hassas tornalama ile işlenmesinin yeterli olduğu bildirilmektedir. Difüzyonla lehimlemede ara tabaka olarak, herhangi bir kaplama (iyonik-elektro v.s.) da kullanılmaktadır.

Difüzyon kaynağı, uygulanma ortamına göre de:

1. Koruyucu gaz atmosferinde difüzyon kaynağı.
2. Vakum altında difüzyon kaynağı, olarak ikiye ayrılabilir.

Endüstriyel maksatlarla uygulanan difüzyon kaynağı, büyük kütleli parçalara uygulanan difüzyon kaynağı ve ince parçalara uygulanan difüzyon kaynağı olarak ikiye ayrılır. Büyük kütleli difüzyon kaynağı, kalın kesitli işlenmiş parçaların, mekanik olarak uygulanan nispeten büyük (14 MPa) basınç altında

birleştirilmesini ihtiva etmektedir. Japon araştırmacılar, Ti-6Al-4V alaşımından birçok uçak parçasını 10^{-3} Pa vakum altında, 900°C sıcaklıkta, 2,94 MPa bir basınç uygulayarak 2 saatte kaynak etmişlerdir. Difüzyon kaynağı ile üretilen ağır parçalar malzeme kullanım ve masrafını azaltmak üzere, karmaşık şekilli, işlenmiş ya da dövülmüş parçaların yerini almaktadırlar (Partridge, 1989).

İnce Ti-6Al-4V alaşımlı levhalara da 2 MPa'lık gaz basıncı ile difüzyon kaynağı uygulanabilmektedir.

Özetle, difüzyon kaynağı teknikleri aşağıdaki faktörlere göre uygulanmaktadır (Salehi, 1990):

- a. Kaynak atmosferi; hava, soy gaz veya vakumdur.
- b. Kaynak basıncı; mekanik, hidrolik, izostatik ve diferansiyel termal genleşme şeklinde uygulanabilmektedir.
- c. Isıtma; dirençle ısıtma, atmosfer kontrollü fırında ısıtma ya da endüksiyonla ısıtma şeklinde yapılabilmektedir.

2.4. Difüzyon Kaynağına Uygulanan Muayene ve Testler

Difüzyon kaynağında, bağlantının kalitesini tespit için iki türlü muayene kullanılmaktadır. Bunlar:

1. Tahribatlı Muayeneler,
2. Tahribatsız Muayeneler'dir.

2.4.1. Tahribatlı muayeneler

Bunlar:

- Çekme Testi,
- Bindirme-Kayma Testi ,
- Darbe Testi,
- Eğme Testi'dir.

Çekme testi, çekme numunesi yapılabilecek uzunluktaki, difüzyon kaynaklı malzemeler için uygulanmaktadır.

Bindirme-kayma testi, levha şeklindeki malzemelerin bağlantı mukavemetini tespit etmek için kullanılmaktadır. Numuneler, bağlantının mukavemeti ana metalinkinden daha düşük olduğu zaman bile, çentikten kırılmaktadırlar. Bindirme alanı, genellikle, test esnasında eğilmektedir. Bu sebeple, kırılma yükünden doğrudan doğruya hesaplanan kayma mukavemeti, bağlantının mukavemetini vermekten uzaktır (Guo, 1985).

Darbe testi birçok araştırmacı tarafından kullanılmış olmasına rağmen, çentiği birleşme hattına yerleştirme güçlüğü vardır. Bu test daha çok çelikler için faydalıdır. Bağlantının darbe mukavemeti, arakesitteki mikro boşluklar yüzünden, birçok halde, ana metalinkinden düşüktür.

Eğme testi, genellikle, numune yuvarlak bir piston tarafından U şeklinde eğilerek uygulanmaktadır. Eğme anında, numunelerin çatlama durumlarına göre, bağlantı kalitesi tayin edilir.

2.4.2. Tahribatsız muayeneler

Bu muayeneler:

- Metalografi,
- Potansiyel düşmesi (Elektriki direnç değişmesi),
- Transmisyon akustik mikroskobi,
- Elektron mikroskobisi,
- Elektron probu metodu,
- Foto emisyonlu elektron mikroskobisi, diye sınıflandırılabilir (Guo,1985).

Metalografi, difüzyon kaynaklı bağlantıların mikroyapılarını muayenede esas metod olmasına rağmen; küçük boşlukların optik mikroskopla tayin güçlüğü, bağlantı kalitesini anlamada etkili bir yol olmasını engellemektedir.

Potansiyel Düşmesi Metodu (verilen akımdaki değişme), daha çok yorulma çatlak büyümesini tespit için kullanılır. Boşluk tespitinde kullanıldığı zaman ise, ancak büyük boşluklarda iyi sonuç vermektedir.

Geleneksel X ışını ve ultrasonik muayeneler, difüzyon kaynağının iç kesitini muayenede, mevcut kusurların tespitinde, oldukça faydalıdır. Elektron mikroskopisi, bağlantıdaki ara tabakaların kalınlıklarının tespitinde faydalı olurken, bağlantı mukavemeti hakkında fikir vermemektedir.

Fotoemisyona elektron mikroskopisi, yüksek sıcaklıklarda, dinamik metalurjik gözlem yapılmasını ve difüzyon kaynağının safha safha izlemesini mümkün kılmaktadır.

2.5. Difüzyon Kaynağı Uygulamaları

Daha önce ifade edildiği gibi, difüzyon kaynağı birçok avantajlara sahip bir imal usulüdür. Uygulama alanları:

- a Genel Mühendislik,
- b Havacılık ve Uzay Sanayii,
- c Savunma Sanayii,
- d Nükleer Sanayiler,
- e Elektronik Sanayii, şeklinde ana gruplara ayrılabilir.

Genel mühendislik alanında difüzyon kaynağı, kaynak çatlama, gevrek metaller arası yapıların oluşması tehlikesinin bulunduğu durumlarda

kullanılmaktadır. Difüzyon kaynağının özel avantajlar sunduğu bağlantı türleri şunlardır:

1. Yüzey kaplama.
2. Difüzyon kaynağıyla bir defada birleştirilmesi mümkün karmaşık şekilli ve içi boş yapı ve elemanlar.
3. Döküm ve dövme parçalarda difüzyon kaynağı. Dökümde karmaşık maçalardan, dövmede girinti açılarından doğan problemlerin üstesinden gelmede kullanılabilir.

Difüzyon kaynağı, havacılık sanayiinde, daha ucuz, daha verimli, daha hafif ve dizayna daha yatkın parçaların üretimini mümkün kılarak; adeta bir çığır açmıştır. Havacılık sanayii difüzyon kaynağını, yüzey-yüzeye ya da kenar kenara temas eden bağlantıların üretiminde, genellikle dövme ve geleneksel kaynak usüllerinin yerine kullanmaktadır. Havacılık sanayiinde difüzyon kaynağı uygulamalarına ait örnekler şunlardır.

Amerika'da aralarında Northrop, Rockwell, Douglas Aircraft gibi şirketlerin bulunduğu 12 firma, 1000 ila 5000 tonluk presler kullanarak, difüzyon kaynağı ve süperplastik şekillendirme ile, Ti alaşımlarından F15, füze yuvası, B1 bombardıman uçağı için patlama lülesi, T 38 uçağı için ana iniş arka kapısı, rüzgar kanatçıkları, imal etmişler ve maliyetle % 40'lara varan tasarruflar sağlamışlardır (Williamson, 1986).

Yine Amerika'da, Rhor şirketi (California), petek şeklinde dizayn edilmiş olan bir hava kanalını, difüzyon kaynağı ile, bir tek defada işlemle üretmeyi başarmıştır (Guo, 1985).

İngiltere'de Rolls Royce şirketi, uçak türbin kantlarını (Ti-alaşımı), "uyarılmış difüzyon kaynağı" adını verdiği; (Cu ve Ni'den mamul ara tabakaları, iki panel arasına, mikro işlemci kontrollü bir elektrokaplama metoduyla

yerleştirip, basınç altında ve vakumda, yine mikroişlemci kontrollü bir ısıtma işlemle birleştirmişlerdir.) bir yöntemle üretmiştir (Fitzpatrick, 1988).

Difüzyon kaynağı ile piston, silindir blokları gibi hidrolik elemanlar da üretilmiştir. Burada esas gaye çeliklerin yüzeyinin bronz (% 80 Cu-%10 Sn-%10 Pb) ile kaplanarak, ağırlıktan tasarruf sağlamaktır.

Difüzyon kaynağının silah sanayindeki uygulamalarında amaç; diğer tekniklerle daha ekonomik ve entegre olarak üretilemeyen yapı ve elemanları üretmektir. Mesela, hidrojen mevcudiyetinin bir problem olduğu, martenzitik yapıdaki kaynaklı bağlantılarda, geleneksel kaynak usulleri yerine difüzyon kaynağı uygulanmaktadır. Yine planör tipi uçakların üretiminde, çelik ve alüminyumun difüzyon kaynağıyla birleştirilmesi, büyük kolaylıklar sağlamaktadır (Guo, 1985).

Nükleer endüstride difüzyon kaynağı çok yaygın olarak kullanılmamakla beraber; Battelle, "Sıcak-İzostatik Difüzyon Kaynağı" nı, küçük UO_2 levhacıklarıyla düz-plaka tipi yakıt elemanları üretiminde kullanmıştır. Bu elemanlar da Westinghouse Bettis basınçlı su reaktöründe ikinci çekirdek yüklemesi için kullanılmışlardır. İkinci bir uygulama, Amerikan ordusu için seyyar güç reaktörlerinin, tüp şeklindeki paslanmaz Çelik ve UO_2 'den oluşan yakıt elemanlarının üretilmesidir (Salehi'den, 1990).

Yine, sıcak izostatik difüzyon kaynağı ile, alüminyum kaplanmış tüp şeklindeki uranyum alaşımı yakıt elemanları da üretilmiştir (Salehi, 1990, Guo, 1985). Bunların dışında bir başka reaktör için tek parça termoelektrik bir pompa, elemanları difüzyon kaynağı ile birleştirilmek suretiyle, imal edilmiştir. Nükleer güç reaktörlerinde yaşanan tip Al (SAP 895) alaşımı ile 300 serisinden paslanmaz çelikler arasındaki tüp geçişi difüzyon kaynağı ile yapılmış, Fe - Al metaller arası bileşiklerin oluşmasını önlemek için kaynak bölgesinde, tungsten bir difüzyon engeli kullanılmıştır (Guo, 1985). Yine Hindistan' da ağır su ile

alışan nükleer santrallerde kullanılacak bimetale keçe üretiminde difüzyon kaynağı başarıyla uygulanmıştır (Kamat, 1988).

Elektronik devre üreticileri, silikon bir parçadan entegre devre üretildikten sonra, çipin bir alt tabakaya bağlanması, ip ve devrelerin elektriki iletken malzemelerle bağlanması gibi işlerde birçok birleşme tekniği kullanmaktadırlar. Mikro elektronik sanayiinde, silikon çiplerin bakır veya Ni-Fe esaslı led çerçevesine bağlanmasında, ara tabaka olarak devre paketlerinin imalinde kullanılan usullerden biri de difüzyon kaynağıdır (Riches, 1989).

Difüzyon kaynağı, plastik sanayiinde, ekstrüzyon hatlarında kullanılan basına dayanıklı ve tam sızdırmaz, enjektörlerin üretiminde de kullanılmaktadır.

Son yıllarda difüzyon kaynağının uygulama alanlarına, referans ve kalibrasyon bloklarının üretimi de girmiştir. Özellikle, hassasiyetin ve mukavemetin sağlanması amacıyla, farklı malzemeler birleştirilerek imal edilen, bileşik malzemeler, bu konuda difüzyon kaynağını avantajlı kılmaktadır.

Elektrik alanında esnek elektriği iletkenlerin, çok sayıda levhaciğın birleşmesinden meydana gelen yapısı, uçların difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi sonucu üretilebilmiştir.

Bu konuda diğer potansiyel uygulamaları: Isı değiştiricilerinin kaplanması ile gelişmiş malzemelerin metal matrisli kompozit ve seramiklerle birleştirilmesidir (Spanswick, 1989).

Difüzyon kaynağının diğer bir potansiyel uygulanma alanı biyomedikal mühendisliktir. Özellikle, çeşitli metal protezlerin, seramiklerle kaynağı veya kaplanması bu konudaki yeni ve ilginç alanlardan birisidir.

2.6. Difüzyon Kaynağının Diğer Kaynak Metotlarıyla Karşılaştırılması

Difüzyon kaynağını geleneksel kaynak usulleriyle karşılaştırılırsa, başlıca şu faktörler göze çarpmaktadır:

1. Eğitme kaynağında görülen deformasyonlar, ön ve son tavlama ihtiyaçları, bu teknikte görülmez.
2. Bu teknikle, metalurjik açıdan uyumsuz birbirinden tamamen farklı iki metal ya da bir metalle, metal olmayan bir malzeme birleştirilebilir.
3. Birleşme süresi, bağlantı alanından bağımsızdır. Dolayısıyla, bir kerede geniş alanlı ya da karmaşık şekilli bağlantılar birleştirilebilmektedir.
4. Uzay ortamında birleştirme imkân sağlamaktadır.
5. Birleştirme esnasında, ana malzemelerde istenmeyen metalurjik yapıların oluşma ihtimali düşüktür.
6. Seramik ve kompozitlerin, metal ve diğer malzemelerle birleştirilmesinde, günümüzde en verimli ve etkili metottur.

Diğer katı hal kaynak teknikleriyle karşılaştırıldığında ise, başlıca şu farklar vardır:

1. Difüzyon kaynağı, esas itibarıyla, difüzyon kontrollü bir tekniktir.
2. Seramiklerin kaynak tekniğini belirleyen en önemli faktör, bu malzemelerin gevrekliğidir. Bu ise, kaynakta deformasyon kullanmanın

mümkün olmadığı anlamına gelir. Dolayısıyla, seramiklerin kaynağında difüzyon kaynağı mümkün tek metottur.

Difüzyon kaynağının bazı dezavantajları da vardır. Bunlar:

1. Uygulanması özel ortam ve aparat gerektirmesi,
2. Bu sebeple pahalı bir teknik olmasıdır.

Metallurjik açıdan dikkat edilmesi gereken en önemli yönü, arakesitte metaller arası bileşiklerle, ara fazların oluşması ihtimalidir.

2.7 Süperplastiklik

Bazı alaşımlar, belli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, belli bir işleme tabi tutuldukları zaman, % 1000 şekil değiştirme özelliği gösterirler. İşte, boyun vermeksizin çok yüksek şekil değiştirebilme özelliğine süper plastiklik denir. Bu tür alaşımlardan yapılan parçalar, sadece bir ya da birkaç kalıpta, çok karmaşık şekillerde biçimlendirilebilirler. süper plastiklik, genellikle ötektik ve ötektoidik alaşımlarda görülen bir özelliktir. Süper plastikliğin mekanizması ile ilgili mevcut teoriler kristal yapının akma mekanizmalarıyla izah edilir.

Süper plastikliğe, genelde, iki fazlı bölgede, termomekanik işlemlerle ulaşılır. Bu işlemler difüzyon katsayısı daha düşük olan fazın çökmesi ve yeniden kristalleşmesi ile sonuçlanır. Bu faz, difüzyon katsayısı daha yüksek olan fazın tanelerinin büyümesini engelleyerek, süper plastiklik için gerekli olan çok ince taneli yapının oluşmasını sağlar (Askeland, 1989). Buna göre, Süper plastikliğin iki aşamada meydana geldiği söylenebilir:

1. İkinci fazın çökmesi ve yeniden kristalleşmesi ile, tane büyümesinin durdurulması,

2. Uygulanan gerilmenin bir sonucu olarak, tane sınırı kayması.

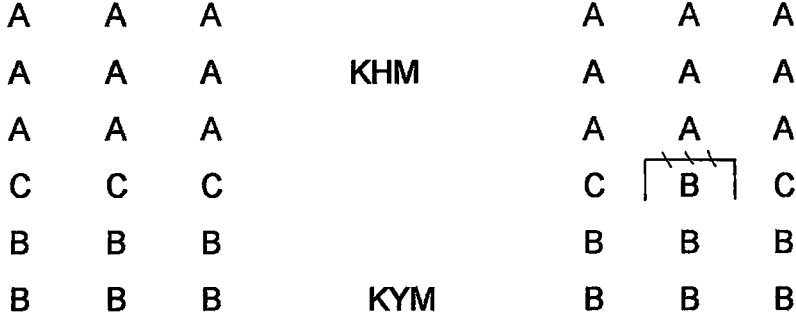
Buna göre Süper plastikliğin meydana gelmesi için gerekli olan şartlar şu şekilde ifade edilebilir:

1. Malzeme, 0.005 mm'den daha küçük bir tane boyutuna sahip olmalıdır.
2. Deformasyon hızı oldukça düşük seçilmelidir. Ayrıca, alaşımı şekillendirmek için seçilen gerilmenin de deformasyon hızına hassas olması gerekir. Eğer, boyun verme başlarsa, yüksek hızda boyun veren bölgelerde deformasyon sertleşmesi başlar ve boyun verme durur. Dolayısıyla, malzeme boyun vermeksizin şekil değiştirmeye devam eder.
3. Alaşımdaki tane sınırları, tanelerin biribiri üzerinden kaymasına ve dönmesine izin veren bir yapıda olmalıdır. Bunun için de uygun sıcaklık ve ince bir tane yapısının mevcut olması gereklidir.

Süper plastiklikte, tane sınırı kayması, ince tane yapısı nedeniyle, yapıda çok sayıda tane bulunması yüzünden en etkili mekanizma olmaktadır. Tane sınırları birkaç atom mertebesindeki kusurlu kafes bölgeleridir. Çok kristalli bir yapıda, Ashby (1970) modeline göre, malzemeye uygulanan gerilme, tane sınırlarındaki boşluklarda tanelerin birbiri üstüne binmelerine yol açar. Bu düzensizlik tane sınırlarında çok sayıda dislokasyonun üretilmesiyle giderilir. süper plastik malzemeler, üretilen bu çok sayıdaki tane sınırı dislokasyonu ve yüksek sıcaklığın dislokasyonların kilitlenmesine mani olmaları nedeniyle, bu aşamada hızla ve yüksek oranlarda deforme olmalarıdır. Tane sınırlarında, deformasyon bantları olduğu için, bu bölgelerde sertlik daha yüksektir. Tane boyutu küçük olduğu için deformasyon bantlarının sertlik etkisi

tane merkezine kadar uzanır. Dolayısıyla malzemede boyun verme sona ererken, deformasyon her yerde üniform olarak devam eder.

b. Tane boyutu,



Şekil 2.8. Süperplastiklik Mekanizması

Tane büyümesinin durdurulması şu şekilde izah edilebilir. Bu tür malzemelerde, iki fazın kristal yapısı genellikle biri birinden farklıdır. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi KYM'li bir fazla KHM'li bir faz yan yana geldiklerinde KHM'li faz ilerlemek ister ve bu fazdan bir atom KYM'li faza sıçrar. Bu durumda C noktasındaki bir atom B konumuna geçmesi gerekir. Şekilden de görüldüğü gibi, bu, o noktadaki enerji seviyesinin artması demektir. Ayrıca, bu nokta etrafında kısmi bir dislokasyon da oluşur. Bu da o noktadaki enerji miktarını yükseltir. Dolayısıyla, sıçrayan söz konusu atom, eski konumuna dönmek zorunda kalır ve faz ya da tane büyüyemez (Porter, 1993).

3. DİFÜZYON KAYNAĞI UYGULANAN MALZEMELER

Günümüzde difüzyon kaynağı çok sayıda ve değişik malzemeye farklı alanlarda ve amaçlarla geniş bir şekilde uygulanmaktadır. Birbirinin aynı ya da farklı birçok malzeme bu kaynak yöntemiyle birleştirilebilmektedir. En başarılı ve yaygın uygulama titanyum alaşımlarından uçak parçaları yapımında görülmektedir (Salehi, 1990). Son zamanlarda Ti-alüminidleri, yüksek mukavemetli Al-alaşımları (Al-li, gibi), Ni-esaslı alaşımları, Metal-matrisli kompozitler difüzyon kaynağıyla birleştirilmiştir (Ostyn, 1987).

Benzer olmayan metal ve alaşımlarda, kaynak sonrası birleşme bölgesinde kırılgan intermetalik faz oluşuyor ya da yeniden ergime ile malzeme gevrekleşiyorsa, ya da dayanım azalıyorsa difüzyon kaynak yöntemi tercih edilmektedir.

Tablo 3.1' de difüzyon kaynak yöntemine uygun metal çiftleri ve ara tabaka malzemeleri, Tablo 3.2' de metal çiftleri için difüzyon kaynağı işlem parametreleri, Tablo 3.3' de ise değişik malzemelerin ara tabakalı ve ara tabakasız olarak difüzyon kaynağına uygunluğu(kaynak kabiliyetleri) verilmiştir (Ceyhun, 1996). Tablo 3.3' deki siyah kısımlar kaynağa uygunluğu göstermektedir.

Tablo 3.1. Difüzyon Kaynak Yöntemine uygun Metal Çiftleri ve Ara Tabaka Malzemeleri.

METAL I	ARA TABAKA	METAL II
Molibden	Titanyum	Molibden
Mo-% 0.5 Ti	Titanyum	Mo-% 0.5 Ti
Tungsten	Niyobyum	Tungsten
Niyobyum	Zirkonyum	Niyobyum
Tantalyum	Zirkonyum	Tantalyum
Yüksek Alaşımlı Çelik	Berilyum	Yüksek Alaşımlı Çelik
Yüksek Alaşımlı Çelik	Niyobyum-Berilyum	Yüksek Alaşımlı Çelik
Titanyum	Molibden	Bakır
Titanyum	Niyobyum	Bakır
Molibden	Nikel	Yüksek Alaşımlı Çelik
Zirkaloy	Bakır	Zirkaloy
Berilyum	Altın	Bakır
Berilyum	Ag-Cu	Bakır
Berilyum	Ag-Cu-In	Bakır
Alüminyum	Bakır	Kovar
*(%53Fe, %29Ni, %17Co)		

Tablo 3.2. Metal çiftleri için difüzyon kaynağı işlem parametreleri

			SICAKLIK	BASINÇ	ZAMAN
Metal 1	Metal 2	Ara tabaka	(°C)	(N/mm ²)	(dak)
Bakır	Molibden	-	900	7.35	10
Bakır	Çelik	-	900	4.9	10
Bakır	Nikel	-	900	14.7	20
Bakır	Bakır	-	800-850	4.9-6.9	15-20
Titanyum	Nikel	-	800	9.8	10
Titanyum	Bakır	Molibden	950	4.9	30
Titanyum	Bakır	Niyobyum	950	4.9	30
Titanyum	Bakır	-	800	4.9	30
Molibden	Molibden	Titanyum	915	6860	20
Molibden	Çelik	-	1200	4.9	10
Tungsten	Tungsten	Niyobyum	925	6860	20
Tantalyum	Tantalyum	Zirkonyum	870	-	-
Niyobyum	Niyobyum	Zirkonyum	870	-	-
Zirkolay-2*	Zirkolay-2*	Bakır	1040	20.6	30-120
Çelik	Alüminyum	Bakır	550	4.9	30
Berilyum	Berilyum	63-Ag-27	800	-	30
Bakır	Bakır	Cu-10-In	-	-	-
Kovar	Kovar	-	1000-1110	24.5-106	20-25
Çelik	D.Demir	-	850-950	14.7	5-7
Çelik	Alüminyum	-	500	7.35	30

*%1.5Sn, %0.15Fe, %0.10Cr, %0.05Ni ve Zr

3.1. Titanyum Alaşımlarının Difüzyon Kaynağı

Diğer malzemelere de uygulanmakla beraber, difüzyon kaynağının en çok uygulandığı metal, titanyumdur. Titanyum alaşımları ara tabakaya ihtiyaç göstermeden kolayca kaynatılabilmektedir.

Titanyumun bu tür kaynakta en elverişli yönü, kendi oksidi de dahil olmak üzere, yüzey artıklarını, yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığı zaman, çözme kabiliyetidir. Ne var ki; titanyumda, katı çözelti içindeki oksijen, sertliği artırıp, kararlı fazı oluşturarak, kaynağı güçleştirmekte ve yüzeyde çatlağa yol açmaktadır. Bu sebeple, titanyumun difüzyon kaynağında koruyucu atmosfere ya da vakuma gerek duyulmaktadır. Koruyucu gaz olarak argon kullanıldığı takdirde, titanyumda çözünmeyen argonun arakesite hapsolarak, boşluk meydana getirmesini önlemek için, argonun kaynak bölgesinde hareketliliğinin sağlanması gerektiği belirtilmiştir (Partridge, 1989; Salehi, 1990).

Titanyumu difüzyon kaynağı açısından cazip kılan diğer bir tesir, yüzeyinin temizlemeye ihtiyaç göstermemesidir. Bununla beraber, ergime kaynağına yatkın olmaması, bu metalin difüzyon yoluyla birleştirmesini zorunlu kılmaktadır. Titanyumun, yüksek bir mukavemet - yoğunluk oranına, uzun bir yorulma ömrüne, iyi bir korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta mukavemet özelliklerine sahip olması, havacılık sanayiinde geniş bir tarzda kullanılmasını sonuç vermiştir. Kaynak esnasında nispeten yüksek sıcaklık uygulanmasının getirdiği maliyet artışı, bu sebeple, göz ardı edilmektedir.

Ti-alaşımları için kaynak parametreleri, birçok araştırmacı tarafından verilmiştir (Fitzpatrick, 1988; Williamson 1981; Stephen, 1986; Salehi'den, 1990). Kaynak, yüksek sürünme sıcaklığı gerektirmektedir. Sürünme hızı, tane boyutu ve mikroyapıya bağlı olup, kaynak kalitesini etkilemektedir. Sürünme hızı tane büyüklüğü arttıkça ya da iğnemsî bir mikroyapı bulunduğu zaman azalmaktadır (Partridge, 1989). Ti-6 Al-4 V, Ti-6Al-2 Sn-4 Zr-2 Mo ve Ti-4 Al-4

Mo-2 Sn-0,55' gibi çift fazlı, süper plastik titanyum alaşımları 880°C ila 940°C sıcaklıklarda, 0,6 ila 2MPa basınç altında, 3 saat içinde, kolayca birleştirilebilmektedir (Wallach, 1987; Salehi'den 1990).

Titanyum'un difüzyon kaynağında, küçük boşlukların, bağlantının çekme, kayma ve yorulma özelliklerini fazla etkilemediği tespit edilmiştir.

Ti-alaşımlarının difüzyon kaynağında kullanılan ara tabakalar, saf titanyumdan oluşmaktadır. Titanyum alaşımından mamul fan kanatçıklarının difüzyonla lehimlenmesinde ise Cu ve Ni ara tabakalar kullanılmaktadır. İri taneli titanyum alaşımları için, düşük basınç altında, ince taneli, süper plastik bir Ti- alaşımı ara tabaka olarak kullanıldığı zaman; mukavim bir komşu metal elde edilmektedir (Partridge, 1989).

3.2. Alüminyum Alaşımlarının Difüzyon Kaynağı

Bu alaşımların difüzyon kaynağı, inatçı yüzey oksitleri yüzünden güçleşmektedir. Bununla beraber; birleşme bölgesinde yüksek sıcaklık ve büyük ölçekli deformasyon (mesela haddeleme ile birleştirme) uygulanmasının, inatçı oksit tabakalarını kırdığı ve yüzey kaplama (iyonik kaplama) ya da ara tabaka kullanılması ile daha düşük basınç altında difüzyon kaynağı yapmanın kolaylaştığı tespit edilmiştir (Salehi, 1990; Stephen, 1986; Barta, 1964; Nieman, 1985; Partridge'den). Öte yandan, süperplastik Al-alaşımlarının ve Al-metal matrisli kompozitlerin geliştirilmesi, yüksek mukavemetli difüzyon kaynağı ihtiyacını artırmaktadır (Partridge, 1989).

Alüminyum ile metalurjik olarak uyum göstermeyen bakır arasında da difüzyon kaynağı uygulanmıştır. Calvo v.d. (1988), Al ile Cu' ı difüzyon kaynağı ile 520°C'lik sabit sıcaklık 15 dakikalık süre ve 0,25 ila 1,60 MPa'lık basınçlarla

birleştirerek, en büyük problemin intermatilik bileşik ve ara fazlar olduğunu tespit etmişlerdir.

3.3. Demir Esaslı Malzemelerin Difüzyon Kaynağı

Çelikler ergitme kaynağı yöntemleri ile kolayca kaynak edilebildiklerinden, bu konuda fazla difüzyon kaynağı uygulaması yoktur. alışmalar daha yüksek ekonomik kazançlar ve düşük maliyetli metal çiftleri elde edilmesi üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Ayrıca, 300 ve 400 serisi paslanmaz çeliklerin difüzyon kaynağı entegre devre imalatında kullanılmıştır (Kurşungöz, 1996).

Çelikler genel olarak difüzyon kaynağına elverişlidirler. Bu sebeple, karmaşık şekilli parçaların tasarlanmasında veya büyük kaynak alanları ve hayati performans gerektiren montajlarda ekonomikliğe sahiptirler (Metals Handbook, 1983).

3.4. Kompozit Malzemelerin Difüzyon Kaynağı

Kompozitlerin imalatında difüzyon kaynağı ana işlemlerden birisidir. Titanyum ve alüminyum kompozitlerin matrisleri, difüzyon kaynağı ile üretilmiş BORSİC (Silisyum-karbür-bor kaplı fiberler) ile desteklenir. Halen hem parçacık hem de fiber takviyeli kompozitlerin difüzyon kaynağı üzerindeki çalışmalar sürdürülmektedir.

3.5. Refrakter Malzemelerin Difüzyon Kaynağı

Zirkonyum, Niyobyum, molibden, tungsten, tantal, renyum ve bunların alaşımlarının oluşturduğu refrakter malzemelerin difüzyon kaynağı genel olarak, uzay ve nükleer sanayi için gerekli karmaşık parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

Refrakterlerin difüzyon kaynağında, yeniden kristalleşme sıcaklığına çıkmamak için ara tabaka kullanılmaktadır. Sözgelimi saf molibden ve Niyobyum alaşımlarının difüzyon kaynağında sıklıkla, Ta-8W-8HF ara tabaka olarak kullanılmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda iç yapılarında gevrekleşme meydana gelmeyen refrakter malzemeler için difüzyon kaynağı elverişli bir yöntemdir. Bu malzemelerin difüzyon kaynağında, kaynak sıcaklığı 1000-1100°C, kaynak süresi ise 5-7 saat arasında değişmektedir (Metals Handbook, 1983).

3.6. Diğer Malzemeler

Nikel esaslı alaşımlar, süper plastik malzemelerin titanyumdan sonraki en önemli grubudur. Nikel esaslı alaşımların difüzyon kaynağıyla birleştirilip, süper plastik olarak şekillendirildiği gösterilmiştir.

Ti-alaşımları ile, paslanmaz çelik arasında da yüksek mukavemetli katı hal difüzyon kaynağı gerçekleştirilmiştir. Yalnız TiFe, TiFe₂, TiCr₂, Ti₂Ni gibi bileşiklerle, ana metaller arasında intermetalik yapıların oluşması sebebiyle, bağlantının mukavemeti azalmaktadır (Ranzetta v.d., 1986; Salehi, 1990'den).

Yine kısa veya uzun fiberli, metal matrisli kompozitlerin, seramiğin seramikle ve metallerin seramiklerle difüzyon kaynağında, son yıllarda önemli ilerlemeler sağlanmıştır.

Seramiklerin (Al₂O₃, SiC, Si₃N₄) difüzyon kaynağı, seramiklerin mükemmel korozyon ve aşınma dirençleri sebebiyle, birçok ülkede, geniş bir şekilde çalışılmıştır. Bunların dezavantajları ise, süneklik yetersizliği, kusur hassasiyeti ve çok değişken olmalarıdır. Bunun için seramiklerle metallerin difüzyon kaynağı çıkar yol olarak gözükmektedir. Ayrıca, tokluğu geliştirmek

için de seramik matris seramik fiberli kompozitler üretmek gerekmektedir (Partridge, 1989).

Ti alaşımları, birçok seramiği katı halde redüklemektedirler. Al_2O_3 ile $945^\circ C$ sıcaklıkta ve vakum altında 2 saat bekletildiklerinde, $2\ \mu m$ kalınlıkta bir reaksiyon tabakası oluştuğu tespit edilmiştir. Sıcaklık $1500^\circ C$ 'ye çıkarıldığında, tabaka $70\ \mu m$ 'ye ulaşmaktadır. $1000^\circ C$ gibi yüksek sıcaklıklarda çalışıldığında, termal gerilme problemleri oluşmaktadır. Bu problemler, çok katlı ara tabakalar kullanılarak çözülmektedir.

Seramiklerdeki en heyecan verici gelişmelerden birisi, stabilize edilmiş zirkonyum (Yttria ile) TZP ve TZP+ Al_2O_3 kompozitlerinin süper plastik hale getirilebilmesidir. Bunun, difüzyon kaynağı için doğrudan bazı göstergeleri vardır. Çünkü, superplastik şartlar altında gayet iyi ara yüzey temasına ulaşılmaktadır.

Mutoh v.d. (1989), $BaCO_3$, Y_2O_3 ve CuO ' in uygun oranlarda karıştırılıp havada 12 saat süreyle $930^\circ C$ 'de kalsine edilmesiyle elde edilen $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ seramiğinin difüzyon kaynağını incelemiş ve ara tabaka kullanmadan 900 ila $950^\circ C$ 'de 4 saatten uzun kaynak süresiyle birleştirmeyi başarmışlardır.

Difüzyon kaynağının uygulandığı en önemli alanlardan biri de birbirine benzemeyen metallerin kaynağıdır. Aşağıdaki metallerle hem prototip hem de sonraki çalışmalarda başarılı kaynaklar elde edilmiştir. Ti'un düşük alaşımlı çeliklere, Ti'un Be'a, Ti'un Al_2O_3 'e, Al'un Ni'e, Al'un Ti'a, Al'un çeliğe, Cu'ın çeliğe, Ni alaşımlarının çeliğe, ZrC'ün ZrB_2 ' a, Inconel 718'in çeliğe, Cu_2Be 'un Cu-Ni alaşımına (Kuşungöz, 1996), bronzun çeliğe (Kurt, 1996) kaynağı bunlardan bazılarıdır.

Tablo 3.3. Difüzyon Kaynağı Uygulanabilirlik Tablosu (Kurşungöz,1996)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1																									
2																									
3																									
4																									
5																									
6																									
7																									
8																									
9																									
10																									
11																									
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									
21																									
22																									
23																									
24																									
25																									

1. Alüminyum ve Alaşımları
2. Berilyum ve Alaşımları
3. Krom ve Alaşımları
4. Kobalt ve Alaşımları
5. Bakır ve Alaşımları
6. Alın ve Alaşımları
7. Magnezyum ve Alaşımları
8. Molibden ve Alaşımları
9. Nikel ve Alaşımları
10. Niobyum ve Alaşımları
11. Paladyum ve Alaşımları
12. Platin İridyum ve Alaşımları
13. Gümüş ve Alaşımları
14. Tantal ve Alaşımları
15. Titan Zirkonyum ve Alaşımları
16. Volfram ve Alaşımları
17. Uranyum ve Alaşımları
18. Vanadyum ve Alaşımları
19. Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler
20. Paslanmaz Çelik
21. Dökme demir
22. Karbürler
23. Grafit
24. Seramik
25. Cam

3.7. Literatür Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Difüzyon kaynağı, ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak edilmesi güç olan ya da birleştirilemeyen malzemelerin katı halde birleştirilmesine elverişli, gelişmiş bir kaynak yöntemidir. Bu yöntemle, malzeme temas yüzeylerinin uygun bir şekilde hazırlanması, malzemelerin ara tabaka da kullanarak metalurjik ve kimyasal uygunluklarına dikkat edilmesi şartıyla, hemen hemen tüm malzemelerin birleştirilmesi mümkündür.

Demirli malzemelerin difüzyon kaynağı, bu malzemeler klasik kaynak yöntemleri ile birleştirilebildikleri için fazla incelenmemiştir. Fakat klasik kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi zor ya da problemli olan demirli malzemelerin de bu

yöntemle kolayca kaynak edilmeleri mümkündür. Bu nedenle, bu çalışmada bu tür malzemelerin difüzyon kaynağında karşılaşılabilecek problem ve değişimlere ışık tutabileceği düşünülerek, birisi dubleks paslanmaz çelik, diğeri sade karbonlu iki çelikten oluşan bir malzeme çiftinin difüzyon kaynağı incelenmiştir. Metal çiftlerinden birinin dubleks paslanmaz çelik olarak seçilmesinin sebebi, bu çeliklerin 1000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda süperplastiklik özelliği göstermeleri ve bünyelerinde çok miktarda karbür ve çökelti fazlar bulundurmalarıdır. Bu çelikler süperplastiklik sıcaklığında çok ince taneli bir yapıya sahip olduklarından, içerdikleri çok sayıdaki tane sınırı ile, diğer malzemelere oranla oldukça fazla sayıda yüksek difüzyon kanallarına sahiptirler. Dolayısıyla, difüzyon kaynaklarında, gevrek malzemelerde çatlamayı önlemek ve difüzyonu hızlandırmak amacıyla ara tabaka olarak kullanılmaktadırlar (Orhan,1996). Bu sebeple, bu çalışmada, demirli malzemelerin difüzyon kaynağında, metalurjik dönüşümler, iç yapı, basınç ve sıcaklığın difüzyon kaynağına etkilerinin incelenmesine ve difüzyon kaynağına fenomenel bir tarzda yaklaşılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmanın sözü edilen açılardan difüzyon kaynağının daha iyi anlaşılmasına ve henüz mekanizması tam olarak anlaşılamamış bu birleştirme yönteminin daha iyi kullanılmasına katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

3.8. Dubleks Paslanmaz Çelikler

Dubleks paslanmaz çelikler ferrit-östenit mikroyapısına sahip çelikler olarak bilinmektedir. Pratikte dubleks paslanmaz çelik terimi, içinde ferrit ve östenit fazlarının geniş oranda ve hacimsel olarak yaklaşık aynı değerde olduğu çelikler için kullanılmaktadır(Honeycomb, 1981). Dubleks paslanmaz çelikler % 18 ila 25 krom içerirler. Ergime sıcaklıkları 1900°C' nin altındadır.

Dubleks mikroyapı 1927 yılında Bain ve Griffiths tarafından bulunmuş fakat, 1930 yılına kadar ticari olarak üretilmemiştir. Dubleks paslanmaz

Çeliklerin stenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırılmasında; Dubleks paslanmaz çeliklerin daha yüksek mekanik dayanım, çok daha iyi korozyon direnci ve Ni içeriğinin daha az olması nedeniyle daha ekonomik oldukları görülmektedir. Daha sonraları, gerilmeli korozyon nedeniyle östenitik paslanmaz çeliklerin uygun olmadığı ortamlarda dubleks paslanmaz çeliklerin kullanılabileceğinin farkına varılmıştır. Son zamanlarda, petrokimya ve deniz araçlarında klorürün sebep olduğu korozyona karşı yüksek alaşımlı dubleks paslanmaz çelikler kullanılmaktadır. Diğerk bir gelişme de karbon oranının düşürülüp azot miktarının arttırılmasıyla kaynak kabiliyetinin geliştirilmesidir(Lula,1986; Eroğlu'ndan,1996).

Tüm dubleks paslanmaz çelikler ferritik olarak katılaşırlar. Yalnız % 25 Cr ve% 7 Ni içeren süper dubleks paslanmaz elikler 1000°C ila 1200°C' ler arasında delta ferrit ve gama östenitten oluşurlar. 1000°C' nin altındaki sıcaklıklarda kararlı değillerdir ve ilave fazlar meydana gelmektedir. Bu fazlardan başlıcaları: yaklaşık olarak 900°C' de çökelen σ fazı, 800°C'de çökelen χ fazı, 650°C' de meydana gelen Laves fazı ile 650 ila 700°C civarında meydana gelen M_xC karbrleridir. keltirler, yapıda gevrekleşmeye yol açmaktadırlar. Bu fazların çökelmesini engellemek için , hızlı soğutma yapmak gerekir (Kaplan, 1996; Eroğlu, 1996).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneylerde iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelerden birisi AISI 1010 çeliği, diğeri dubleks bir paslanmaz çelik olup bileşimleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.1. Süper Dubleks Paslanmaz Çeliğin Bileşimi

Alaşım Elemanı	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	V	S	P
% Miktarı	68,04	25,02	4,02	1,02	0,85	0,77	0,16	0,043	0,027	0,027

Tablo 4.2. AISI 1010' un Bileşimi

Alaşım Elemanı	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	V	Fe
% Miktarı	0.13	0.052	0.04	0.07	0.566	0.086	0.026	0.001	Kalanı

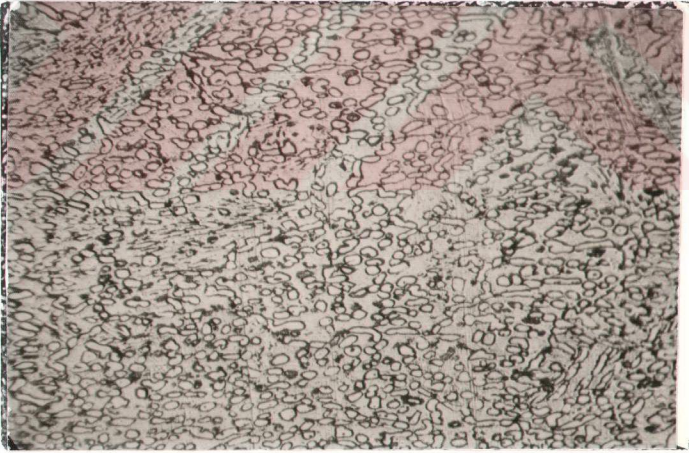
Dubleks paslanmaz çelik kaynaktan önce şahmerdanda dövülerek 10x10 mm. boyutlarında çubuk haline getirilmiştir. AISI 1010 çeliği ise 10x10 mm. boyutlarında çubuk halinde hazır olarak temin edilmiştir. Dubleks paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri önceki bir çalışmada belirlenmiş olup Tablo 4.3' de verilmiştir (Kaplan, 1997).

4.2. Malzemelerin Mikroyapıları

Deney numunelerinin hem kaynak öncesi hem de kaynak sonrası mikroyapılarını belirlemek amacıyla bir dizi metalografik inceleme yapılmıştır. Numuneler 1200 meşlik zımpara ile zımparalandıktan sonra 3 ve 1 μm ' luk

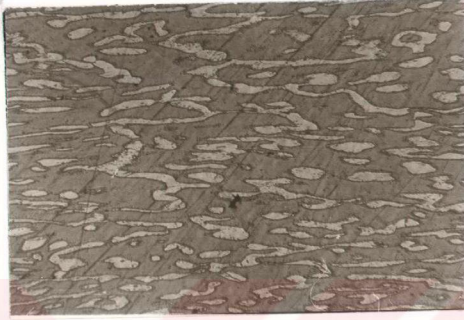
elmas pasta ile parlatılmıştır. Numunelerin AISI 1010 tarafı %4'lük nital ile dağlanırken, paslanmaz çelik tarafı daldırma suretiyle %50 NHO_3 + %50 saf su çözeltisinde 6 voltta, 2 dakika süreyle, (+)kutup ve oda sıcaklığında elektrolitik olarak dağlanıp optik mikroskobiye hazır hale getirilmiştir (Geçkinli,1989).

Paslanmaz çeliğin mikroyapısı Kaplan (1997) tarafından daha önce belirlenmiştir. Malzemenin mikroyapısı ferrit matrisi içerisinde dağılmış austenit ağlarından oluşmaktadır (Şekil 4.2). Bu malzemenin işlem görmemiş haliyle ferrit-austenit tane sınırlarında Laves(Fe_2Mo) fazı, $\text{M}_6\text{C}(\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C})$ ve $\text{M}_{23}\text{C}_6(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ karbürlerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca tane sınırlarında karbür çökeltileriyle birlikte sigma(σ) fazına da rastlanmıştır. Sigma(σ) ve Laves fazlarının 900 ila 927°C arasında çökeldiği malzemenin DTA analizlerinden anlaşılmıştır (Kaplan,1997).



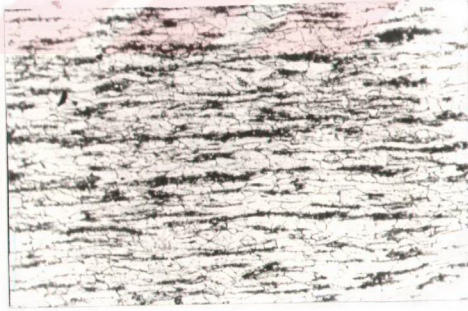
Şekil 4.1. Dökülmüş Paslanmaz Çelik Numunenin Mikroyapısı. Yapı, Ferrit Matrisi İçerisinde Dağılmış Austenit Fazından Oluşmaktadır. x100.

Şekil 4.2.'de deneylerde kullanılan paslanmaz çelik numunenin mikroyapısı görülmektedir. Numuneler 1100°C ' de şahmerdanda dövülerek 10x10 mm. boyutlarında çubuk haline getirilmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerde Kullanılan Dövülmüş Dupleks Paslanmaz Çeliğin Mikroyapısı. x 100

AISI 1010 numunenin deneylerden önceki mikroyapısı Şekil 4.3.'de verilmiştir. Bu numunede haddeleme yönü açıkça görülmektedir.



Şekil 4.3. AISI 1010 Çeliğinin Kaynak Öncesi Mikroyapısı. x 100

AISI 1010 için faz yüzdesi kaldırıcı kolu bağıntısıyla hesaplanmış ve %86 ferrit, %14 perlitten oluştuğu belirlenmiştir. Aynı oran, mikroyapı fotoğrafları üzerinde nokta sayma yöntemi ile de belirlenmiştir.

Nokta sayma yöntemiyle paslanmaz çelik üzerinde yapılan hesaplama ile Dupleks paslanmaz çeliğin kaynak öncesi, %35 austenit, %65 ferritten oluştuğu tespit edilmiştir.

4.3. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

AISI 1010 çeliğinin mekanik özellikleri literatürden alınmıştır (Metals Handbook,1993). Dupleks paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri Kaplan (1997) tarafından tespit edilmiş olup Tablo 4.4.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Dupleks Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özellikleri

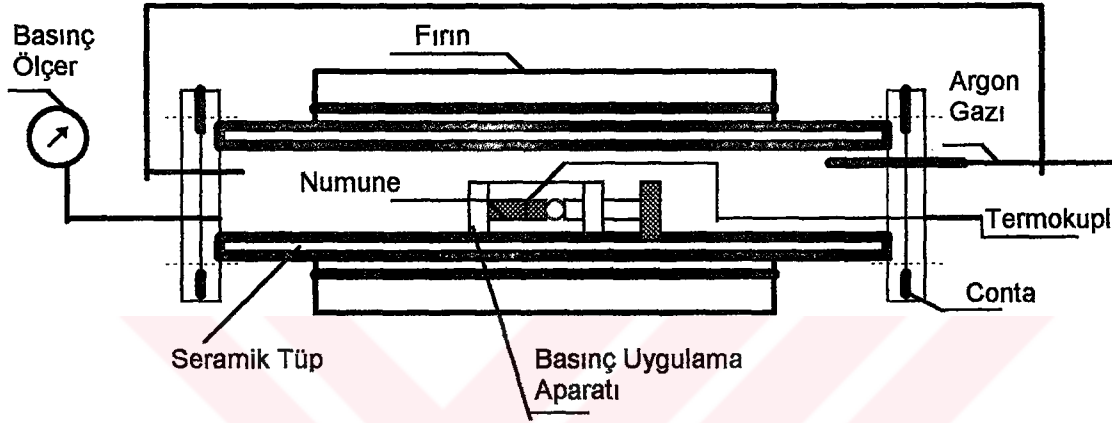
Akma Dayanımı	150 MPa
Çekme Dayanımı	200 MPa
Sertlik	220 HB

Tablo 4.4. AISI 1010 Çeliğinin Soğuk Çekilmiş Halde Mekanik Özellikleri (Branders,1983).

Özellik	Değer (MPa)
Akma Dayanımı	350
Çekme Dayanımı	500
% Uzama	12

4.4. Difüzyon Kaynağının Yapılışı

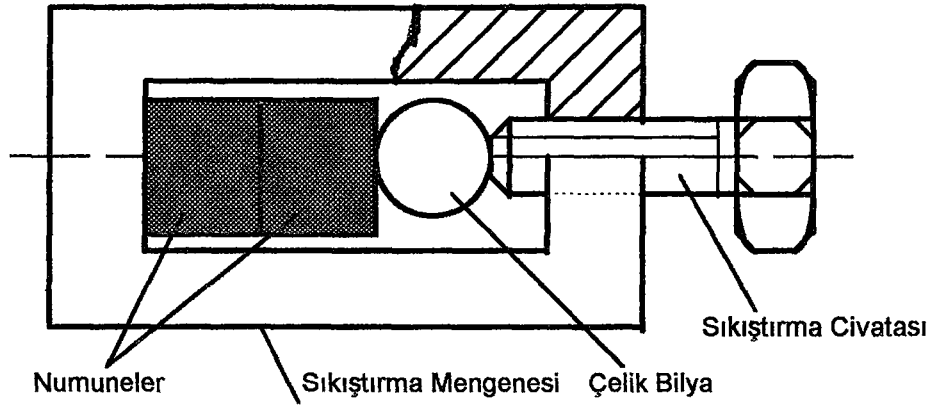
Deneyleri yapmak için tarafımızdan dizayn edilen bir difüzyon kaynağı aparatı kullanıldı. Aparat, yatay bir tavlama fırınından atmosfer kontrollü bir tüp kullanılarak imal edilmiş olup, Şekil 4.4'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Difüzyon Kaynağı Aparatı

Kaynakta, aşağıdaki işlem sırası uygulanmıştır:

- Kaynak yapılacak numunelerin yüzeyleri 240-1200 meşlik zımpara ile parlatılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo Sufset 211 profilometresi ile ölçülmüştür.
- Parlatılan yüzeyler aseton banyosunda ultrasonik olarak temizlenip artık maddelerden arındırılmıştır.



Bütün malzemeler paslanmaz çelikten imal edilmiştir.

Şekil 4.5. Basınç Uygulama Aparatı

- c. Numuneler Şekil 4.5'de gösterilen mengenede sıkıştırılmış ve tork anahtarıyla kaynak basıncı uygulanmıştır. Uygulanan basıncın eşit olarak dağılması için numuneler ile civata arasına çelik bir bilye konulmuştur. Bu şekilde, basıncın uygulanması esnasında numunelerin dönmesi de engellenmiştir.
- d. Basınç uygulanmış numuneler mengeneyle birlikte yatay tüp içerisine yerleştirilmiş ve tüp atmosferi azot gazıyla kontrol altında tutulmuştur.
- e. Kaynak şartları Tablo 4.5'de toplu olarak verilmiştir. Kaynak süresi olarak parçanın belirlenen sıcaklığa ulaştığı süreyle numunenin fırından alınma süresi arasındaki fark dikkate alınmıştır.

Tablo 4.5. Kaynak Şartları Tablosu

Numune No	Kaynak Sıcaklığı (°C)	Kaynak Basıncı (MPa)	Koruyucu Gaz	Yüzey Pürüzlülüğü Rz(µm)	Kaynak Süresi (Dakika)
1	1000	3	Argon	0,5	15
2	1100	3	Argon	0,5	15
3	900	1,7	Argon	0,5	15
4	1100	1,7	Argon	0,5	15
5	900	3	Argon	0,5	15
6	1000	1,7	Argon	0,5	15

f. Kaynağı gerçekleştirilen numuneler, mikrosertlik ve metalografi için hazırlanmıştır. Bu maksatla numune yüzeyleri mekanik olarak parlatılmış; AISI 1010 tarafı %4'lük nital, paslanmaz çelik tarafı ise %50 su + %50 HNO₃ çözeltisinde 6 volta, 2 dakika süreyle elektrolitik olarak dağlanmıştır.

g. Birleştirilmiş numuneler, optik mikroskopta incelendikten sonra, HV sertlik skalası ile arakesitin her iki tarafında sertlik ölçümleri yapılmıştır.

h. Arakesitin hemen yanında AISI 1010 tarafında, Lineal intercept yöntemi ile tane boyutu ölçülmüştür.

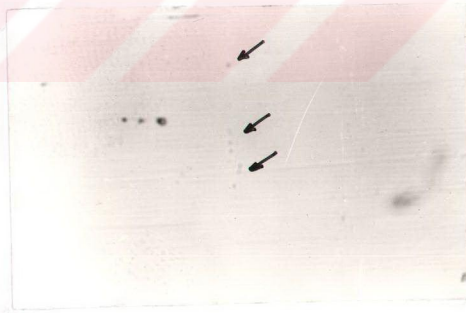
i. Arakesitin AISI 1010 tarafında, kromun difüzyonu dikkate alınarak ferritleşme mesafesi ölçülmüş ve bulunan değerler teorik olarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır.

5. DENEY SONUÇLARI

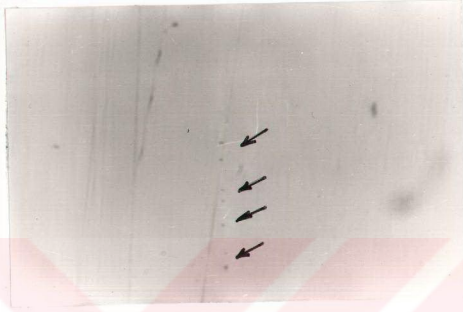
Birleştirilmiş numunelere ait arakesitler, mikroyapılar, arakesitin her iki tarafındaki sertlik dağılımı, arakesitte kusurlar ve mikroyapıda boyut analizi kantitatif metalografi yöntemleriyle belirlenmiş ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.1. Arakesitte Kusurlar

Bu kusurlar, genel olarak küresel şekilli mikro boşluklar olup, arakesit üzerinde ya da arakesit yanında görülmektedir. 900° C'de 3MPa ve 15 dakika süre ile kaynak edilen numunede boşluk tespit edilememiştir. Şekil 5.1. ve 5.2'de sırasıyla 1100° C'de ve 1000° C'de 3 MPa 15 dakika süre ile birleştirilen numunelerdeki arakesit boşlukları görülmektedir.



Şekil 5.1. 1100° C'de 3 MPa Basınçta 15 Dakika Süre ile Birleştirilen Numunenin Arakesitindeki Boşluklar. x 1000



Şekil 5.2. 1000°C'de 3 MPa Basınçta 15 Dakika Süre ile Birleştirilen Numunenin Arakesitindeki Boşluklar. x 1000

5.2. Metalografik Muayene ve Sertlik Ölçüm Sonuçları

Mikroyapı fotoğraflarında AISI 1010 tarafında Cr difüzyonu nedeniyle ferritleşme meydana geldiği görülmektedir. Ferritleşme mesafesi optik mikroskopla ölçülmüş ve Tablo 5.1.'de verilmiştir. Numunelerde ferritleşmeye Cr difüzyonunun sebep olduğu düşünüldüğünden, Cr'un östenit fazındaki difüzyonundan hareketle bu düşüncenin geçerliliği teorik olarak gösterilmeye çalışılmıştır. Bu maksatla Cr'un östenit fazındaki difüzyon katsayısı hesaplanmış ve daha sonra ortalama difüzyon mesafesini östenit fazı için veren gelişigüzel yürüme formülünden Cr'un östenit içindeki difüzyon mesafesi belirlenmiştir (Porter ve Easterling, 1993). Bulunan bu değer birleştirme sıcaklıklarındaki ferritleşme mesafeleriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre Cr'un difüzyon katsayısı:

$$D = A e^{(-Q/RT)}$$

5.1

formülünde, $T = 900^{\circ}\text{C} = 1173^{\circ}\text{K}$ için, $A = 0.12$; $Q = 237006 \text{ Joule mol}^{-1}$ (Brandes, 1983) ve $R = 8.314 \text{ Joule mol}^{-1}$ yazılarak,

$$D_{Cr} = 3.35 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

olarak bulunmuştur. $\gamma\text{-Fe}$ 'de difüzyon mesafesini veren gelişigüzel yürüme:

$$r = 2.4 (D.t)^{1/2}$$

5.2

formülünde, $t = 15 \text{ dakika} = 900 \text{ saniye}$ yazarak,

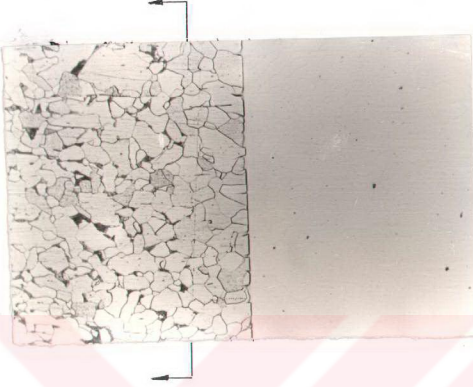
$$r = 1.317 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0.1317 \text{ mm. bulunmuştur.}$$

Kromun 1000°C ve 1100°C 'deki difüzyon mesafeleri de aynı yöntemle hesap edilmiş ve bu değerler de Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

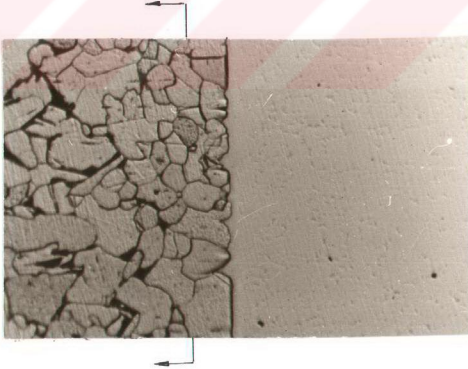
Tablo 5.1. Ferritleşme Mesafesi

Numune No	Birleşme Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Birleşme Basıncı (MPa)	Birleşme Süresi (Dakika)	Ferritleşme Mesafesi (mm)	Teorik Difüzyon Mesafesi (mm)
1	1000	3	15	0.096	0.34
2	1100	1.7	15	0.016	2.26
3	900	1.7	15	0.096	0.131
4	1100	3	15	0.068	2.26
5	900	3	15	0.13	0.131
6	1000	1.7	15	0.06	0.34

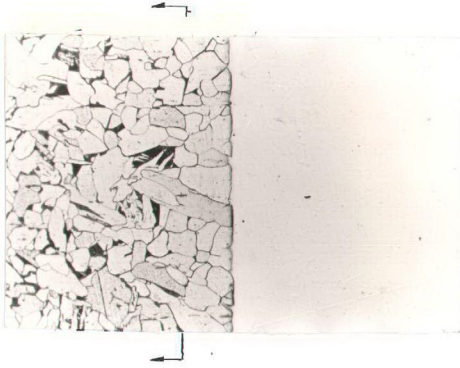
Bu durum Şekil 5.3 ila Şekil 5.8'de görülmektedir.



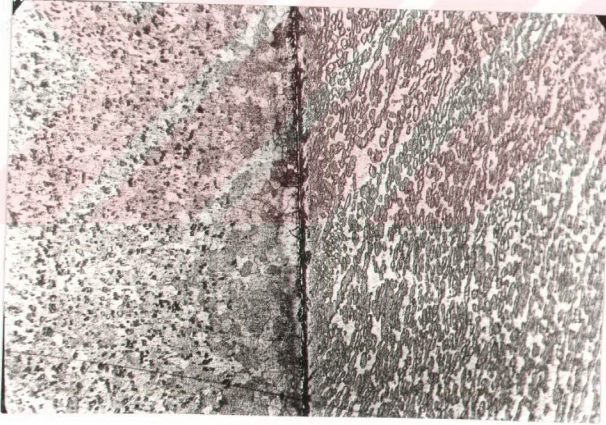
Şekil 5.3. 1100°C, 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme,x100



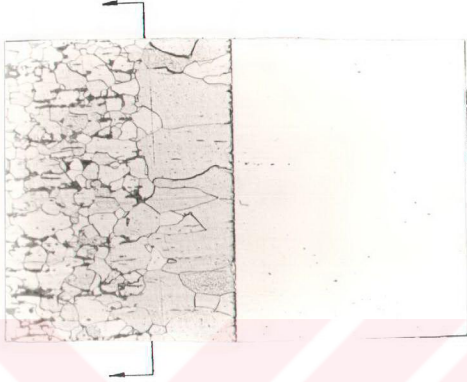
Şekil 5.4. 1100°C, 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme.x100



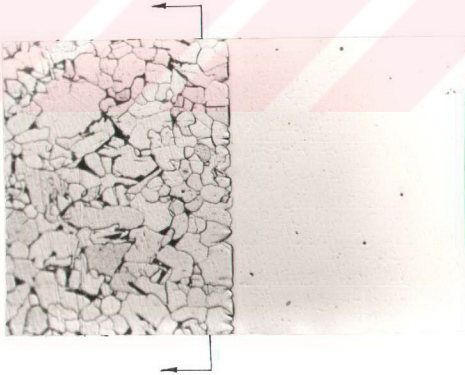
Şekil 5.5. 1000°C, 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme. X100



Şekil 5.6. 1000°C 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme. X100



Şekil 5.7. 900° 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme. X100



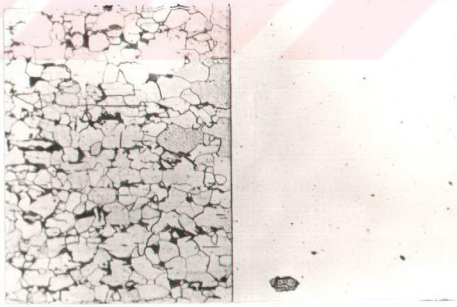
Şekil 5.8. 900°C 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunede AISI 1010 Tarafında Ferritleşme. X100

Şekillerden ve Tablo 5.1'den görüldüğü gibi 900°C'de ferritleşme mesafesi diğer sıcaklıklardakinden belirgin bir şekilde fazladır. 900°C'de kaynak edilen numuneler arasında 3 MPa basınçta kaynak yapılan numunede ferritleşme mesafesinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ferritleşme mesafesi açısından bir diğer ilginç sonuç da sıcaklık arttıkça her iki basınç değerinde de ferritleşme mesafesinin azalmasıdır.

Ferritleşme mesafesi fazla olan numunelerde, arakesitin hemen yanında tanelerin de aşırı derecede irileştiği görülmektedir.

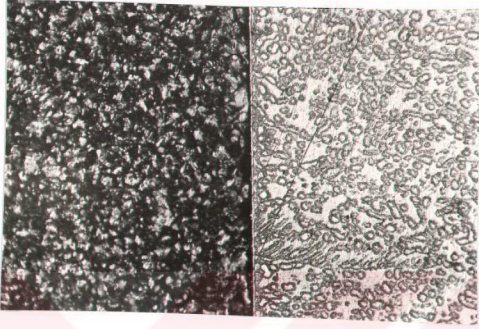
900°C ve 3 MPa basınçta kaynak edilen numunede (Şekil 5.5), difüzyonun hızlanmasının AISI 1010 tarafında paslanmaz çeliğe benzer bir yapının oluşmasına yol açtığı düşünülmektedir.

Yüzey temasının yeterli olmadığı kısımlarda ferritleşmenin de gerçekleşmediği 900°C 3 MPa basınçta kaynak edilen numunenin teması yetersiz olan uç kısımlarının incelenmesinden anlaşılmaktadır (Şekil 5.9).

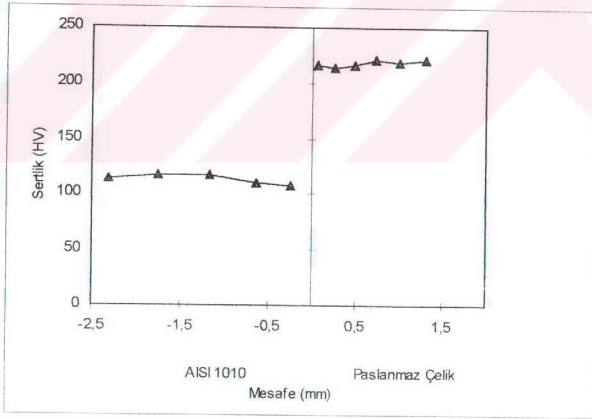


Şekil 5.9. Temas Yetersizliğinden Dolayı 900°C ve 3 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Ferritleşmeyen Bölge. X100

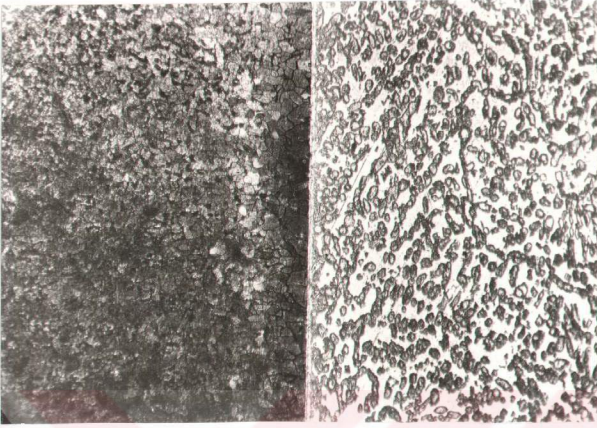
Arakesitin her iki taraftaki yapılara ait iç yapı fotoğrafları ve sertlik dağılımı Şekil 5.10 ila 5.21 'de verilmiştir.



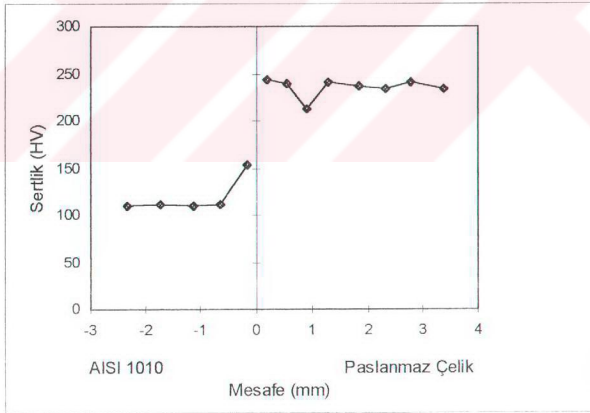
Şekil 5.10. 1100°C ve 3 MPa Basıncıta Kaynak Edilen Numunenin Arakesit Mikroyapısı. x 100



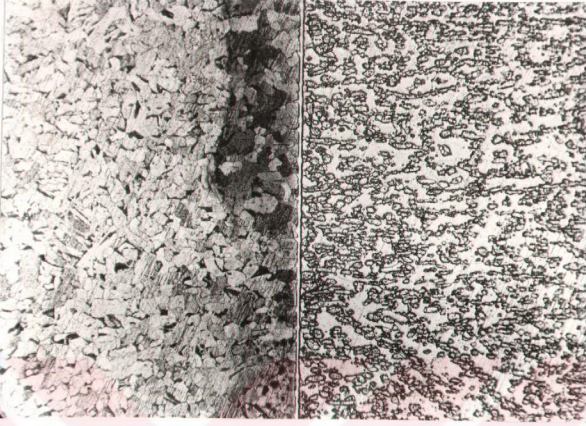
Şekil 5.11. 1100°C ve 3 MPa Basıncıta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı.



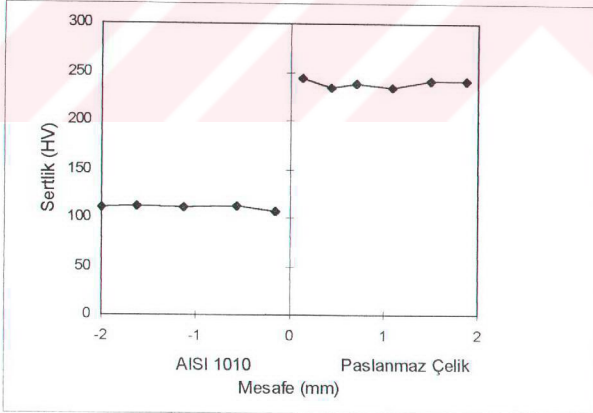
Şekil 5.12. 1100⁰, 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı. x 100



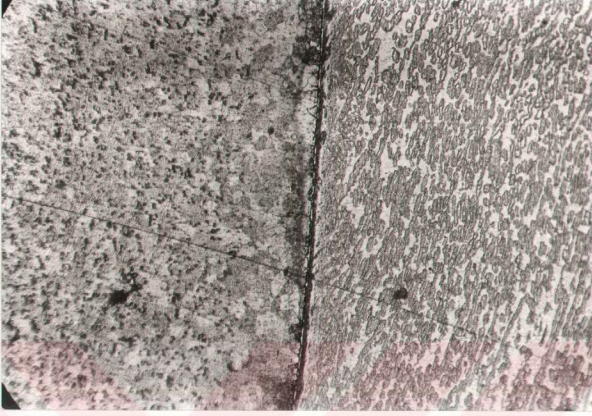
Şekil 5.13. 1100⁰C ve 1.7 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı.



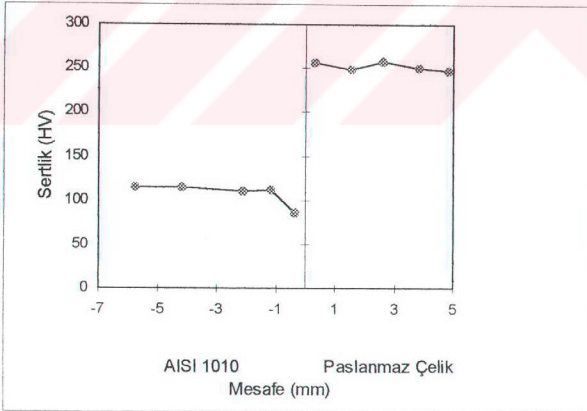
Şekil 5.14. 1000°C ve 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı. x 100



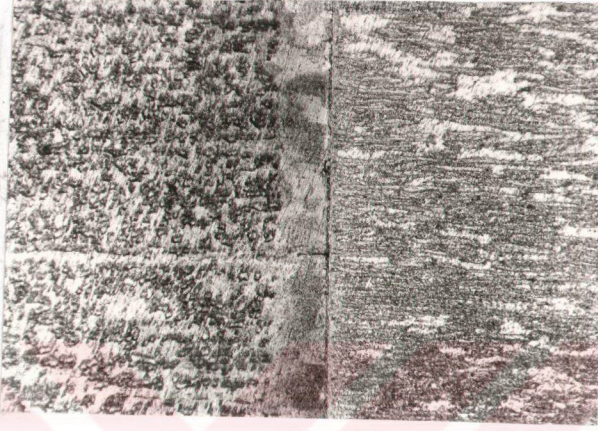
Şekil 5.15. 1000°C ve 3 MPa Basıncıta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı.



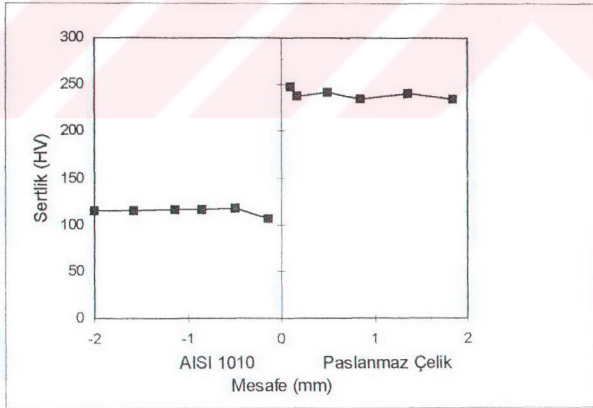
Şekil 5.16. 1000°C, 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı. x 100



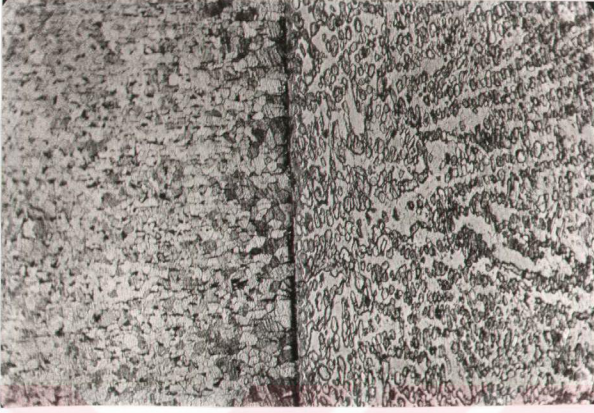
Şekil 5.17. 1000°C ve 1.7 MPa Basıncıta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı.



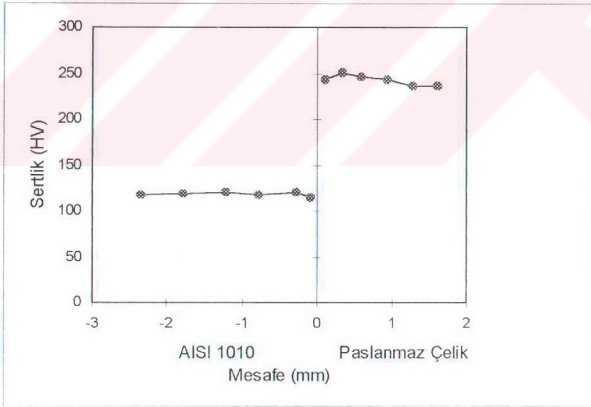
Şekil 5.18. 900°C, 3 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı. x 100



Şekil 5.19. 900°C ve 3 MPa Basınçta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı



Şekil 5.20. 900°C, 1.7 MPa ve 15 Dakika Süreyle Kaynak Edilen Numunenin Mikroyapısı. x 100



Şekil 5.21. 900°C 1.7 MPa Basıncıta Kaynak Edilen Numunede Sertlik Dağılımı

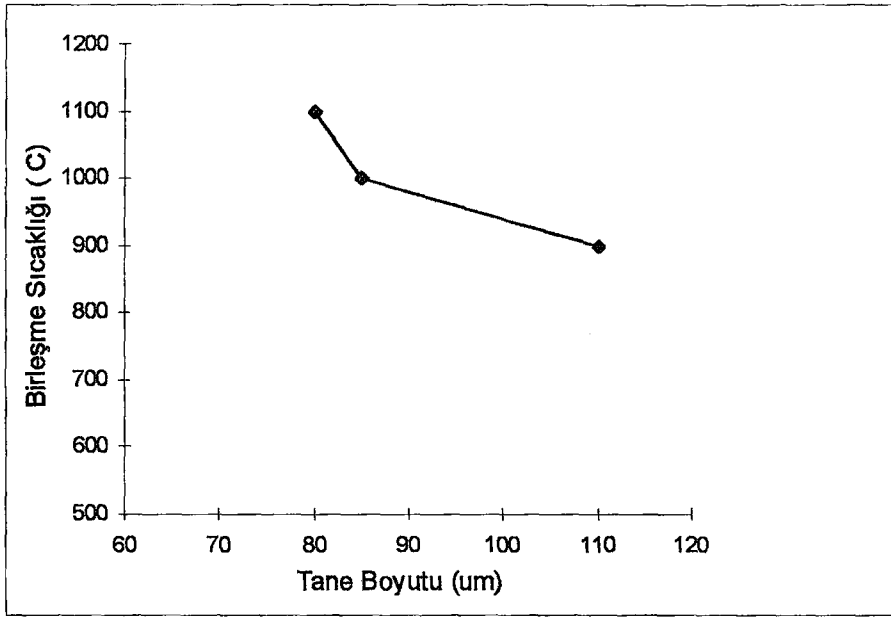
Mikroyapı fotoğraflarında en belirgin farklılık 900°C sıcaklık ve 3 MPa'lık basınç ile kaynak edilen numunede görülmektedir. Bu numunede, paslanmaz çelik numunede austenit tanelerinin arakesite doğru yönlendiği görülmektedir.

5.3. Tane Boyutu Ölçüm Sonuçları

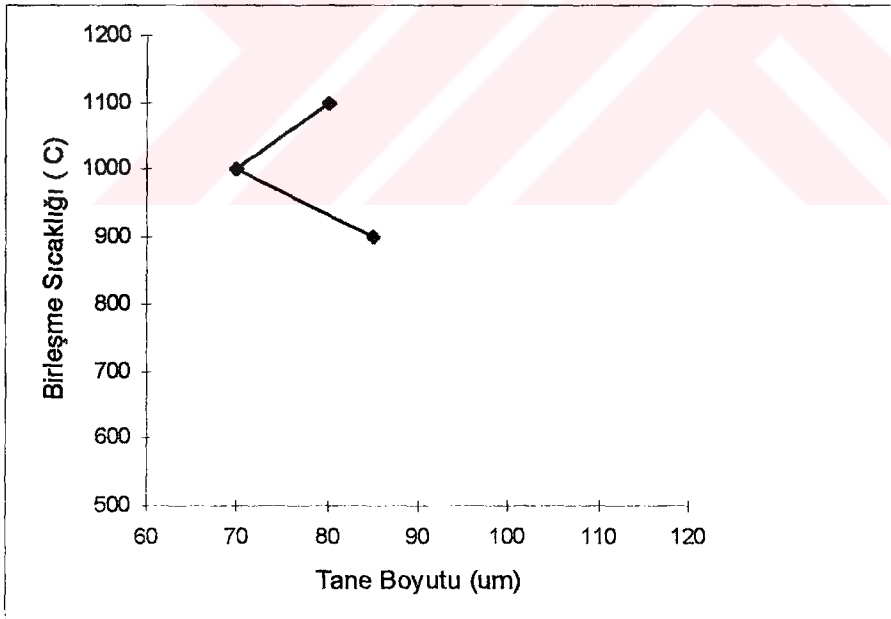
Birleştirilmiş numunelerde, özellikle AISI 1010 tarafında arakesitin hemen yanında oldukça yüksek bir tane irileşmesi görülmektedir. Tane irileşmesinin şiddetini belirlemek amacıyla, hemen arakesitin yanında, düz bir hat boyunca Lineal Intercept (Doğrusal Kesişim) (McCall,1984) yöntemi ile tane boyutları ölçülmüştür. Ölçülen tane boyutları ve ASTM Tane Boyut Numaraları Tablo 5.2'de verilmiştir. Sonuçlar, grafik olarak da Şekil 5.22 ve 5.23' de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Arakesitte AISI 1010 Tarafında Tane Boyutu Değerleri.

Numune No	Birleşme Sıcaklığı (°C)	Birleşme Basıncı (MPa)	ASTM Tane Boyut Numarası	Nominal Tane Çapı (µm)
Orijinal			5.9	45
1	1000	3	4.53	80
2	1100	1.7	4.53	80
3	900	1.7	4.357	85
4	1100	3	4.333	85
5	900	3	3.339	110
6	1000	1.7	4.698	70



Şekil 5.22. 3 MPa Basıncıta Kaynak Edilen Numunelerde Tane Boyutu Değişimi.



Şekil 5.23. 1.7 MPa Basıncıta Kaynak Edilen Numunelerde Tane Boyutu Değişimi.

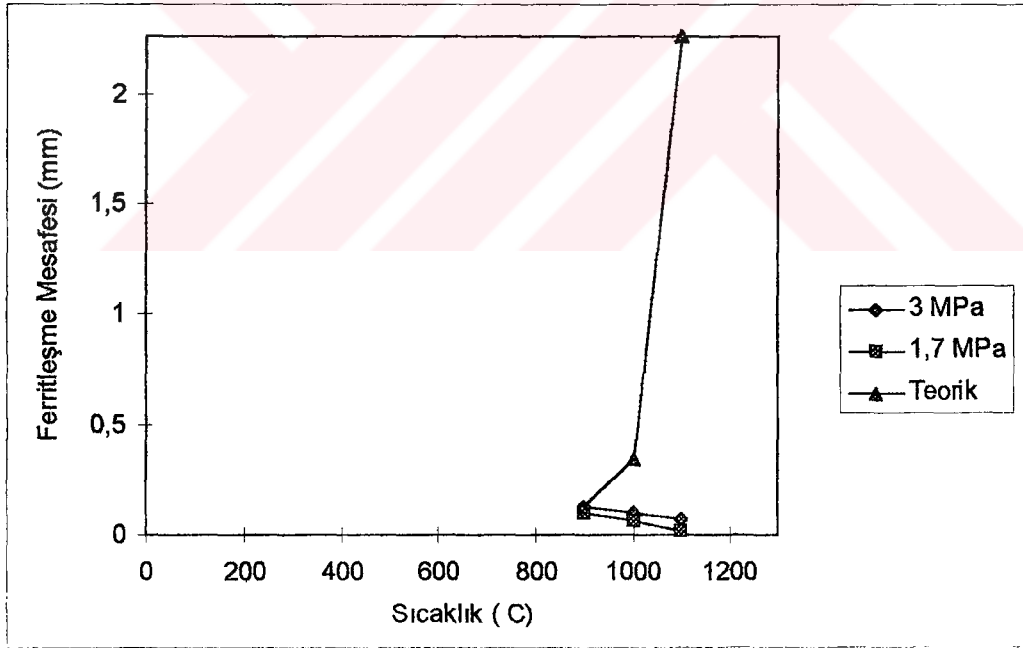
Arakesite komşu AISI 1010 tarafında, en iri tanelerin 900°C' de meydana geldiği görülmektedir. Bunu 1000°C ve 1100°C'lerde yapılan birleştirmelerin izlemektir. Burada, tanelerin daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla irileşmesi beklentisinin tersi bir durum mevcut olup, kaynak basıncının artması ile bu durumun daha da belirgin hale geldiği görülmektedir (Şekil 5.22 ve 5.23).



6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

6.1. Alaşım Elementleri ve Mikro Yapının Difüzyon Kaynağı Üzerindeki Etkisi

Bu malzeme çiftinde, krom difüzyonu AISI 1010 tarafında ferritleşmeye yol açmıştır. Teorik ferritleşme mesafesi dikkate alındığında, Cr' un teorik olarak hesaplanan mesafe kadar difüze olduğu söylenebilir. Fakat arakesit boşlukları öncelikle doldurulması gereken yerler olduklarından, atomlar öncelikle buralara yönelirler. Tam bir difüzyona, yeterli ilk teması sağlayacak ve bir gerilme gradiyenti meydana getirecek bir basınçla ulaşılacağından, 3 MPa basınç ile daha uzun olmuştur. Kaynak basıncının artması ile, ferritleşme mesafesinin Cr'un teorik difüzyon mesafesine yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 6. 1. Ferritleşme Mesafesi İle Kaynak Sıcaklığı Arasındaki İlişki

Paslanmaz çelik tarafında, arakesitte, karbürlerin yığılmış olması, difüzyonun esas itibarıyla bu malzemedan AISI 1010 tarafına doğru yönlendiği sonucunu

doğurmaktadır. Bir başka deyişle, paslanmaz çeliğin bütün birleştirme sıcaklıklarındaki serbest enerjisinin AISI 1010'unkinden daha yüksek olduğu söylenebilir. Özellikle, 900 °C ve 3 MPa basınçta kaynak edilen numunede, paslanmaz çelik tarafındaki tanelerin arakesite doğru yönlendikleri görülmektedir. Bunun yapıdaki çökeltme ya da çözülme olayının meydana getirdiği kusur ve dolayısı ile serbest enerji artışından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.1.1. Tane Boyutu Değişimi

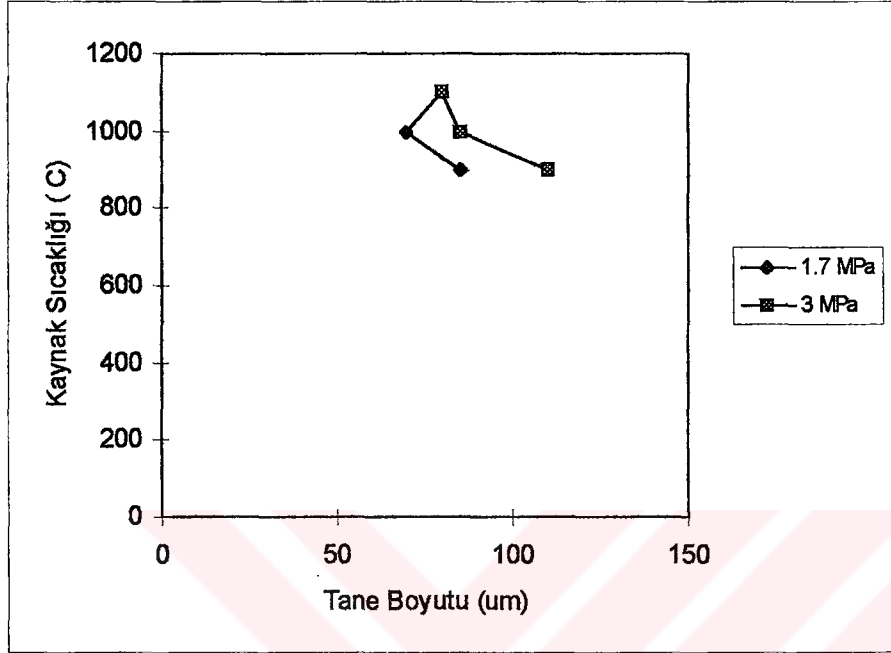
Kaynaktan sonra, AISI 1010 tarafında görülen bir diğer belirgin değişiklik, arakesitin hemen yanında tane irileşmesidir. (Şekil 6.3) Tane irileşmesi, difüzyon esaslı bir süreçtir. Dolayısı ile difüzyon hızının en yüksek olduğu durumda en iri tanelerin oluşacağı tabiidir.

Bu çalışmada 900°C ve 3 MPa basınçta kaynak edilen numunelerin tanelerini diğer numunelerden daha fazla irileştirdiği görülmektedir.

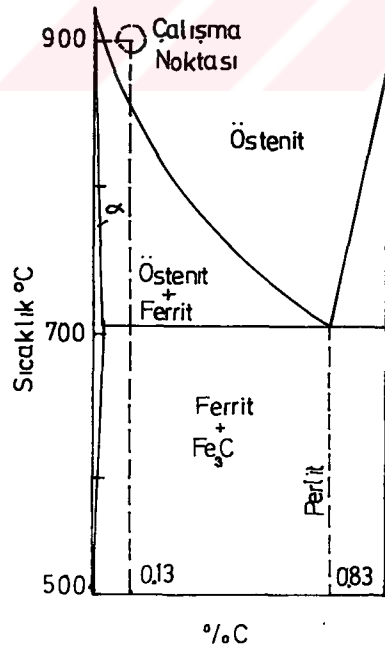
Tane irileşmesi, bağlantının mekanik özelliklerini zayıflatıp, darbe mukavemetini azalttığı için istenmeyen bir durumdur.

900°C'de tane irileşmesi ve ferritleşmesinden sebeplerinden birisinin de, AISI 1010 tarafında $\alpha+\gamma$ bölgesine giriliyor olması gösterilebilir. Fe_3C metastabil denge diyagramından da görülebileceği gibi (Şekil 6.3) çalışma sıcaklığı tamamen γ bölgesindedir. Fırın sıcaklığındaki sapmalar $\alpha+\gamma$ bölgesine girmeye sebep olacak kadar büyük değildir. $\alpha+\gamma$ bölgesine girilmesi halinde, difüzyon katsayısı daha yüksek olan α ferritin difüzyonu hızlandıracağı düşünülebilir. Fakat öte yandan γ östenitin varlığı tane büyümesine engel teşkil edecektir. Dolayısıyla, difüzyonun bu sıcaklıkta hızlanma sebebi, esas itibarıyla, paslanmaz çelikte serbest enerjiyi artıran σ ve laves fazlarının çökelmelerinde aranmalıdır. Çökelti fazlarının çökeltmesi veya çözünmesi, yapıda çok fazla kusur meydana getireceği ve bu da sistemin serbest enerjisini artırıp hızlı difüzyon yolları oluşturacağı için, paslanmaz çelik tarafından AISI 1010 tarafına doğru yönelmiş bir difüzyona yol açmaktadır. Bu çeliklerde

süper plastikliğe ancak 1000°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ulaşıldığı için (Dieter,1986), 900°C ' de difüzyon hızındaki artışa süperplastikliğin sebep olduğu düşünülmemektedir.

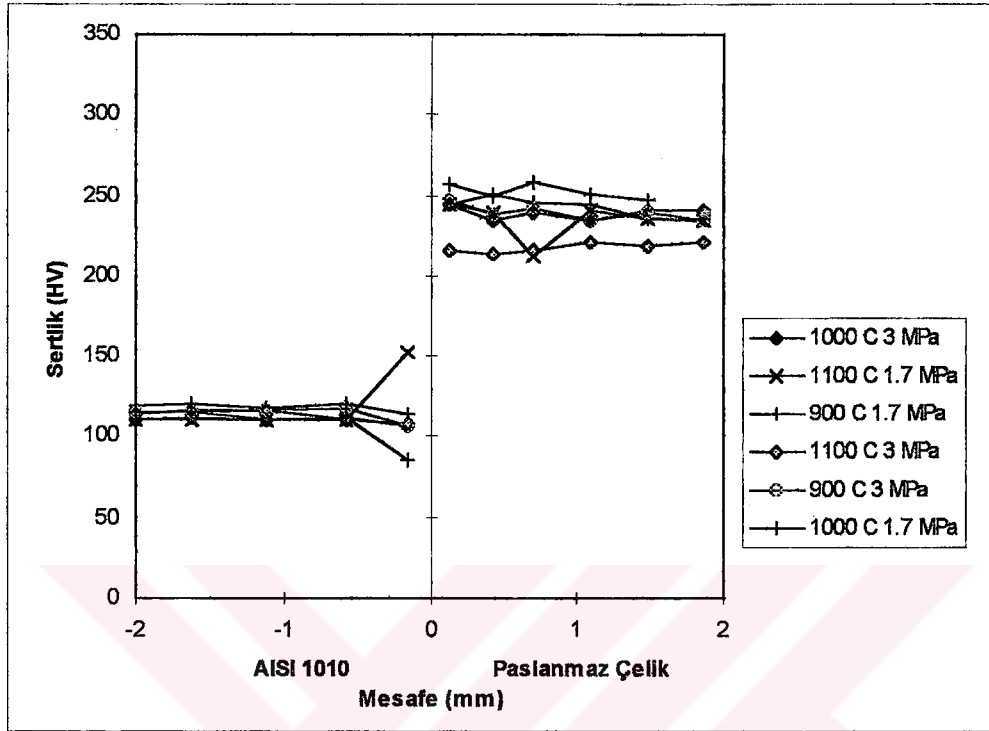


Şekil 6.2. Tane Boyutu Değişimi



Şekil 6.3. Demir-Sementit Denge Diyagramı (Ötektoidik Bölge).

6.2. Sertlik Dağılımının Değerlendirilmesi



Şekil 6.4. Sertlik Dağılımı Grafiği

Sertlik dağılımları incelendiğinde, AISI 1010 tarafındaki tek farklılığın 1100°C ve 1.7 MPa basınçta kaynak edilen numunede arakesitte diğer numunelere oranla daha yüksek ölçülen sertlik değeri olduğu görülmektedir. (Şekil 6.2) Numuneler kaynak sonrası, havada soğutuldukları için, paslanmaz çelik tarafında σ , X, R, Laves fazı gibi sert fazlarla, $M_{23}C_6$ tipi karbürlerin çökelmiş olması kaçınılmaz hale gelmiştir. Mikro yapı fotoğraflarından, arakesitte karbürlerin yoğunlaştıkları görülmektedir. Sertlik değerleri mikro sertlik skalasında ölçülemedikleri için bu yoğunlaşmanın meydana getirdiği sertlik farkını belirlemek mümkün olmamıştır. Kaynak sıcaklığı ve kaynak basıncındaki farklar, sertlikte büyük bir farklılıklar meydana getirmemiştir.

6.3. Basıncın Difüzyon kaynağı Üzerindeki Etkisi

Difüzyon kaynağında, uygulanan basınç etkisini, pürüzlerin ilk plastik deformasyonu, sürünme ve arakesit difüzyonu aşamasında ana tahrik kuvveti olarak göstermektedir. Burada, 900°C' de kaynak edilen iki numunede ferritleşme mesafesinin uygulanan basınç ile orantılı olarak arttığı görülmektedir. Basıncın, ferritleşme üzerindeki etkisi, numunelerin tam birleşmeyen kenar kısımlarında perlit bulunmasından da anlaşılmaktadır.

Disardan uygulanan basınca ilaveten, özellikle paslanmaz çelik tarafında karbür ve çökelti fazların bulunması iç yapıda gerilme yoğunlaşmasına maruz bölgeler oluşturmaktadır. Bu bölgeler difüzyonu uyaran yüksek enerjili bölgelerdir. Dolayısıyla daha düşük sıcaklıklarda karbürler çözünmediği için iç gerilmelerin daha yüksek ve difüzyonun daha fazla uyarılmış olacağı düşünülebilir. Nitekim 900°C ve 3 MPa'da kaynak yapılan numunede difüzyonun daha hızlı gerçekleşmesi bu düşünceyi destekler mahiyettedir.

6.4. Sıcaklığın Difüzyon Kaynağı Üzerindeki Etkisi

Sıcaklık atom hareketliliği ve dolayısı ile serbest enerjiyi artırdığı için, difüzyon kaynağının ana parametrelerinden birisidir. Sürünme hızı da doğrudan doğruya, uygulanan basınç ile sıcaklığa bağlıdır.

Bu çalışmada, sıcaklık arttıkça, her iki basınç değerinde de genel olarak, tane boyutunun ve ferritleşme mesafesinin azaldığı görülmektedir. Aslında bu, beklenmeyen bir durumdur. Söz konusu duruma, metalurjik dönüşümlerin ve çökelmelerin difüzyon hızında meydana getirdikleri hızlandırma etkisinin sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bilhassa 1100°C' de verilen enerji ve dolayısı ile, iç enerjinin büyük bir kısmının karbürlerin çözünme ve yeniden oluşması

için harcandığı da düşünülebilir. Bu sıcaklıkta, paslanmaz çeliğin süper plastiklik özelliği kazanması difüzyon hızına olumlu etki yapmaktadır.

Deneylerin değerlendirilmesinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. AISI 1010 ile bileşimi Tablo 4.2'de verilen süper plastik paslanmaz çelik, difüzyon kaynağı ile , argon korumalı atmosfer altında, 1200 meşlik zımpara ile parlatılan yüzeyleri temasa getirilerek, 1.7 ve 3 MPa basınçta 900, 1000 ve 1100°C sıcaklıkta 15 dakikada başarıyla birleştirilebilir.
2. En iyi bağlantıya 900°C sıcaklıkta 3 MPa'lık kaynak basıncı uygulanan numunede ulaşılmıştır.
3. Difüzyon kaynağı esnasında, süper plastikliğin yanında, çökelti fazlarının çökeltme sıcaklıkları ve metalurjik dönüşüm sıcaklıkları kaynak sıcaklığı olarak seçilerek, difüzyon hızlandırılabileceği ve kaynak süresinin kısaltılabileceğini düşündürmektedir.

6.5. Öneriler

Elde edilen sonuçlara göre bundan sonra, bu konuda:

1. Metalurjik dönüşüm noktaları ve çökelmelerin difüzyon kaynağı üzerindeki etkileri, süper plastiklikle birlikte ya da tek başına incelenebilir.
2. Bu etki mevcut difüzyon kaynağı modellerine yansıtılabilir.
3. Difüzyon kaynağı mekanizmalarının daha iyi anlaşılması açısından, difüzyon kaynağı dubleks, süper dubleks, ve çökeltme dönüşümü veren malzeme gruplarına aynı anda ve birlikte uygulanarak, sonuçları topluca incelenebilir.

KAYNAKLAR

ANDRJEZEWSKI, H., BADAWI, K.F., ROLAND, B., (1993). The Roughness in Diffusion Welding of Ti-6Al-4V Alloy. **Welding Journal**. 435-s.

ASKELAND, D.R., (1989). **The Science and Engineering of Materials**. Van Nostrand. Reinhold Co. Ltd. İkinci Metrik Baskı. Hong Kong.

BRANDES, E.A., (1983). **Metals Reference Book**. Altıncı Basım. Butterworths. İngiltere.

CALVO, F.A., (1988). Special Features of the Formation of the Diffusion Bonded Joints between Copper and Aluminum. **Journal of Material Science**. 28:2273-2280.

CEYHUN, V., UZKUT, M., ŞAHİN, S., (1996). Difüzyon Kaynağı ve Uygulamaları. **Uluslararası Kaynak Teknolojisi 96 Sempozyumu**. Gedik Eğitim Vakfı Yayını. 178-186.

DERBY, B., WALLACH, E.R., (1982). Diffusion Bonding. **Metal Science**. 16:49.

DIETER, M., (1986). **Mechanical Metallurgy**. Üçüncü Basım. McGraw-Hill Yayınları. ABD.

DUBROVSKY, R., (1986). Solid State Bonding of Copper-Iron Alloys Under Deformation. **Advances in Welding Sci. And Tech. TWR 86**. Proceed. Of an Int. Conf. On Trends in Welding Research.

EGAN, P.W., (1980). Diffusion Bonding of Mild Steel. **Yüksek Lisans Tezi**. University of Belfast. Belfast.

ENJO, I., IKEGUCHI, M., (1987). Diffusion Bonding of Al-Mg-Si Series 6063 Alloy Reinforced with Alumina Short Fibers. **Trans. of Japanese Welding Research Inst.** 16:2:57-64.

EROĞLU, M., (1996). Duplex Paslanmaz Çelikler. **Doktora Semineri.** F.Ü., Elazığ.

FITZPATRICK, G.A., BROUGHTON., T., (1988). Diffusion Bonding Aeroengine Components. **Defence Science Journal.** 38:477-485.

GEÇKINLI, E., (1986). **Metalografi.** İkinci Basım. İ.T.Ü. Yayınları. İstanbul.

Guo, Z.X., (1985). Diffusion Bonding of Superplastic Materials. **Yüksek Lisans Tezi.** UMIST. Manchester.

GUO, Z.X., RIDLEY, N., (1987). Modelling of Diffusion Bonding of Metals. **Materials Science and Technology.** 3:11:945-953.

HAUFLER, G., MAYER, H., (1986). Diffusion Bonding of Cast Iron and EB Welding. **Proceed. Of A Conf. High Temp. Alloys for Gas Turbines and Other Applications.** 801-810.

KAMAT, G.R., (1988). Solid State Diffusion Welding of Nickel to Stainless Steel. **Welding Journal.** 67:6:44-46.

KAPLAN, M., (1997). Yüksek Cr-Ni alaşımlı Çelik Dökümlerde Yaşlandırmanın Süneklik Davranışına Etkisi. **Doktora Tezi.** Fırat Üniversitesi. Elazığ.

KURŞUNGÖZ, N., KURŞUNGÖZ, H., (1996). Difüzyon Kaynağı. **Uluslararası Kaynak Teknolojisi 96 Sempozyumu.** Gedik Eğitim VakfıYayını.203-211

KURT, A., (1996). **Doktora Tezi.** Fırat Üniversitesi. Elazığ.

KLAPHAAK, D.J., (1987). Coated Tools for Machining Aerospace Materials. **Carbide and Tool Journal.** 19:5:14-16.

LANCASTER, J.F., (1987). **Metallurgy of Welding.** Allen and Unwin Ltd. London.

MCCALL, J.L., STEELE, J.H., (1984). **Practical Applications of Quantitative Metallography.** ASTM Yayınları. Ann Arbor. ABD.

MEADA, R., HIDEO, Y., (1988). Effect of Atmosphere, Load and Temperature on the Bonding of Pure Copper and Aluminum Alloy in a Ultrahigh Vacuum. **Kitai Gijutsu Kenkyusho Shoho/Journal of Mech. Eng. Lab. Tokyo.** 42:2:75-81.

MEAHARA, Y., KOMIZO, Y., LANGDON, T.G. (1986). Principles of Superplastic Diffusion Bonding. **Materials Science and Technology.** 4:669-674.

METALS HANDBOOK, (1983). AWS. Cilt 7. ABD

MUTOH, Y., EBIHARA, T., AIZAWA, T., (1989). **Japanese Journal of Applied Physics.** 28(2)-6:959-961.

NICHTING, R.A., EDWARDS, G.R., OLSON, D.L., RATH, B.B., (1986). Theories of Low Temperature Solid State Bonding. **Advances in Welding Science and Tech. Proceed. Of an International Conf. On Trends in Welding Research.** 733-738.

ORHAN, N., (1996). Difüzyon Kaynağı İçin Yeni Bir Model ve Duplex Alaşımlara Uygulanması. **Doktora Tezi.** Fırat Üniversitesi. Elazığ.

OSTYN, K.M., (1987). Diffusion Bonding. Proceed. Of International Conference. SIS. 183. Cranfield.

PARTRIDGE, P.G., (1989). Diffusion Bonding of Metals. Agard 168. NATO Yayını. Essex.

Porter, D.A., Easterling, K.E., (1993). Phase Transformations in Metals and Alloys. İkinci Baskı. Chapman and Hall Co. London.

RICHES, S.T., (1989). Microjoining for Electronics. Production Engineer. 46.

SALEHI, M.T., (1990). Isostatic Diffusion of Some Superplastic Alloys. Doktora Tezi. UMIST. Manchester.

SPANSWICK, O.S., (1989). Diffusion Bonding-Engineering Application. Production Engineer. 68.

SUNWOO, A., (1994). Diffusion Bonding of Al Alloy 8090. Scripta Metallurgica et Materialia. 31:4:407-412.

WALLACH, E.R., HILL, A., (1989). Modeling Solid State Diffusion Bonding. Acta Metallurgica Mater. 37:9.

WALSH, D.W., BALAGUER, J.P., (1986). Diffusion Bonding of Ti-6Al-4V. Advances in Welding Science and Technology. TWR 86. Proceed. Of an Int. Conf. On Trans. in Reasarch. Gattinburg-Tennessee.

WILLAMSON, J.R. (1986). Superplastic Forming Diffusion Bonding of Titanium. Proceed. The First Int. Conf. Materials in Aerospace. 2. Konf. No.10817:373-394.

ZHANG, Y.C., NAKAGAWA, H., (1987). Proposal of New Bonding Technique-Instantaneous Liquid Phase Bonding. *Trans. of J.W.R.* 1. 16(1):17-29.

