

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Prof. Nurullah Gültekin

Doç. Dr. Hüseyin Sönmez

Prof. Dr. Nispettin Özdemir

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ NOKTA DİRENÇ
KAYNAĞINDA DİRENÇ BİLEŞENLERİ ve NOKTA
BOYUTLARI ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Makina ve Endüstri Müh. Hüseyin SARI

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Nurullah GÜLTEKİN

İSTANBUL, 2002

İÇİNDEKİLER

128528

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTIMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ÖNSÖZ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
2. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI	3
2.1 Nokta Direnç Kaynağının Oluşumu	4
2.1.1 Nokta Direnç Kaynağı Tipleri	6
2.2 Kaynak Çevrimi	8
2.3 Kaynak Değişkenleri	9
2.3.1 Elektrot Baskı Kuvveti	10
2.3.2 Kaynak Akımı	10
2.3.3 Kaynak Süresi	14
2.3.4 Kaynak Değişkenliklerine Bağlı Olarak Çeşitli Uygulamalar.....	14
2.4 Nokta Kaynağı Makinaları	15
2.4.1 Kaynak Makinası Sistemleri	18
2.4.1.1 Elektrik Devresi	19
2.4.1.2 Kontrol Cihazı	20
2.4.2 Elektrot Taşıyıcıları	21
2.5 Elektrotlar	21
2.5.1 Elektrot İmalinde Kullanılan Malzemeler	21
2.5.2 Elektrot Dizaynı	25
2.5.3 Elektrotların Bakımı	27
2.5.3.1 Elektrot Değişiminde Dikkat Edilecek Durumlar	27
2.6 Nokta Direnç Kaynağında Isıyı Etkileyen Faktörler	28
2.6.1 Kaynak Akımı	30
2.6.2 Elektrot Bileşimi ve Şekli	31
2.6.2.1 Farklı Metallerin Kaynağında Elektrot Tipleri.....	32
2.6.3 Elektrot Kuvveti	32
2.6.4 Kaynak Zamanı	32

2.6.5	Kaynak Edilecek Parçaların Yüzey Durumları ve Kaplı Çelikler	33
2.6.5.1	Yüzey durumları.....	33
2.6.5.2	Kaplı Çelikler	34
2.6.6	Yan Devre Etkisi	35
2.6.7	Kaynak Edilecek Parça Bileşenleri	36
2.7	Nokta Kaynaklarının Kontrolü.....	37
2.7.1	Kaynak Kalitesinin Tespitinin Dayandığı Faktörler.....	38
2.7.2	Kaynaklı Birleştirmelerin Muayenesi.....	38
2.7.2.1	Tahribatlı Muayene Yöntemleri	38
2.7.3	Kaynak Hataları.....	40
3.	ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	44
3.1	İşlenmiş Alüminyum Alaşimleri	44
3.1.1	Alüminyum Alaşımının Kısa Gösterimi	45
3.1.2	Metalürjik Şartlar	46
3.1.3	Isıl İşlem Uygulanmayan Alaşımalar	46
3.1.3.1	Pekleşme	46
3.1.3.2	Tavlama.....	47
3.1.3.3	Isıl İşlemlerin Kısa gösterimi	47
3.1.4	Isıl İşlem Uygulanabilen Alaşımalar.....	48
3.1.4.1	Çökeltme Sertleşmesi	48
3.1.4.1.1	Çözme Isıl İşlemi	48
3.1.4.1.2	Su Verme.....	49
3.1.4.1.3	Yapay ve Doğal Yaşlandırma.....	49
3.1.4.2	Isıl İşlemlerin Kısa Gösterimi	49
3.1.5	Yaygın Kullanılan Alüminyum Alaşimleri	50
3.2	Döküm Alüminyum Alaşimleri.....	52
4.	ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI	55
4.1	Kaynak Dayanımı	55
4.2	Ana Metal Özellikler	56
4.2.1	Kaplı Alaşımalar	56
4.2.2	Alüminyum Alaşımının Nokta Direnç Kaynağında Kaynak Kabiliyeti.....	57
4.2.3	Korozyon Direnci.....	60
4.3	Malzeme Özelliklerine Bağlı Olarak Nokta Kaynağına Etki Eden Faktörler ..	60
4.3.1	Elektriksel ve Isıl İletkenlik	60
4.3.2	Sıcaklık Artışı.....	61
4.3.3	Plastik Saha	61
4.3.4	Soğuma Sırasında Kendini Çekme.....	62
4.3.5	Yüzey Oksidi.....	62
4.4	Kaynak Makinaları	63
4.5	Elektrotlar.....	64
4.5.1	Elektrotların Bakımı.....	66
4.6	Yüzey Hazırlama.....	67
4.7	Nokta Kaynağı Karakteristikleri	69
4.7.1	Kaynak Akımı	69
4.7.2	Kaynak Süresi	71
4.7.3	Elektrot Kuvveti	71

4.7.4	Nokta Aralıkları	72
4.8	Kaynağın Muayenesi	73
4.9	Kaynak Hataları Sebepleri ve Çözümleri	73
4.9.1	Elektrot Alaşımlanması	73
4.9.2	Çatlak ve Gözenekler	73
4.9.3	Ergimiş Metal Fıskırması	74
4.9.4	Elektrot İzi ve Sac Ayrılması	74
4.9.5	Düzensiz Kaynak Şekli ve Ergimemiş Kaynak	74
4.9.6	Yüzey Yanması	74
5.	ALÜMİNYUM NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINDA DİRENCİN İNCELENMESİ	75
5.1	Malzeme Direnci	75
5.2	Temas Direnci	78
5.2.1	Temas Direnci ve Elektrot Yükü Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	81
5.2.2	Temas Direnci ve Kayma Gerilmesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	83
5.2.3	Temas Yüzeyi ve Elektrot Çifti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	84
5.2.4	Temas Direnci ve Yüzey Durumu Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	86
5.3	Yan Devre Direnci	88
6.	ALÜMİNYUM NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINDA NOKTA OLUŞUMU ve BOYUTLARININ, DİRENÇ BİLEŞENLERİ ile ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ	90
6.1	Kaynak Noktasının Oluşumu	90
6.2	Nokta Boyutları İle Direnç Bileşenleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	93
6.2.1	Nokta Boyutları İle Malzeme Direnci Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	93
6.2.2	Nokta Boyutları ile İş Parçası-Elektrot Yüzeyi Direnci Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	93
6.2.3	Nokta Boyutları İle Temas Yüzeyindeki Direnç İlişkinin İncelenmesi	93
6.2.4	Nokta Boyutları ve Yan Devre Direnci Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	98
7.	NOKTA BOYUTLARI ve DİĞER KAYNAK PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ	100
7.1	Nokta Boyutları ve Akım Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	100
7.2	Nokta Boyutları ve Kaynak Zamanı Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	103
7.3	Nokta Boyutları ve Elektrot Kuvveti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	104
7.4	Nokta Boyutları ve Elektrot Ucu Şekli Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	105
7.5	Nokta Boyutları ve Elektrot Ucu İle Soğutma Suyu Arasındaki Mesafenin Arasındaki ilişkinin İncelenmesi	107
7.6	Nokta Boyutları ile Sac Kalınlıkları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi	108
8.	ALÜMİNYUM NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINA YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALARIN İRDELENMESİ YOLUYLA ÇIKARILAN BAZI SONUÇLARIN İNCELENMESİ	110
8.1	Yapılan İncelemelerde Takip Edilen Yol ve Amaçlar	110

8.2	Temas Yüzeyi Direnci ve Görünen Temas Alanı Yarıçapı Arasındaki İlişkinin Elektrot Kuvvetinin Bir Fonksiyonu Olarak İncelenmesi.....	111
8.3	Temas Yüzeyi Direnci ve Metalik Temas Noktalarının Toplam Çap Uzunluğu Arasındaki İlişkinin Elektrot Kuvvetinin Bir Fonksiyonu Olarak İncelenmesi	114
8.4	Kaynak Merceğindeki Isıl Verimin İncelenmesi.....	117
9.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA	126
	KAYNAKLAR	128
	ÖZGEÇMİŞ	130



SİMGE LİSTESİ

α	Lineer ısı genleşme katsayısı
β	Holm yarıçapı
φ	Burma açısı
ρ	Malzemenin özgül direnci
ρ_{20}	20 °C'deki malzemenin özgül direnci
ρ_h	h_s °C'deki malzemenin özgül direnci
$2na$	Metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu
a	Metalik temas noktası yarıçapı
A_1 ve A_2	Elektrotların temas düzlemleri
c	Specifik ısı
d	Çekirdek çapı
D	Elektrot iz çapı
d_a	Akım yolunun çapı
d_b	Mercek formundaki kaynak çekirdeğinin büyük çapı
d_k	Mercek formundaki kaynak çekirdeğinin küçük çapı
d_p	Kırılma düzlemi çapı
d_{k1} ve d_{k2}	Elektrot temas düzlemlerinin çapları
$d_{uç}$	Elektrot uç çapı
F	Elektrot kuvveti
F_1	Sabit sayı
h	Çekirdek yüksekliği
h_1 ve h_2	Maksimum kaynak çekirdeği hacimleri
h_s	Herhangi bir zamandaki sıcaklık
I	Akım
I_{maks}	Pik akım
J_1 ve J_2	A_1 ve A_2 deki akım yoğunlukları
L	Ergime gizli ısı
l	İki kaynak çekirdeğinin merkezleri arası uzaklık
m	Kaynak çekirdeği ağırlığı
m_1	Sabit sayı
M_t	Burulma momenti
n	Metalik temas noktaları toplam sayısı
n_i	Kaynak sayısı
Q	Nokta kaynağı sırasında oluşan ısı
Q_1	Isınma ısı
Q_2	Toplam ergime gizli ısı
Q_{lei}	Toplam ergime ısı
r	Çekirdek yarıçapı
R	Direnç
r_o	Görünen temas alanı yarıçapı
R_{20}	20 °C'deki direnç
R_a	Yüzey pürüzlülüğü
r_c	Temas yüzeyindeki fiziksel temasın yarıçapı
r_e	Elektrot ucu yuvarlatma yarıçapı
R_e	Sıvılaşma sıcaklığındaki temas direnci
R_{ip-e}	İş parçası-elektrot arasındaki direnç
R_k	Katılma sıcaklığındaki temas yüzey direnci
R_m	Malzeme Direnci

R_p	Patika direnci
R_s	Yan devre direnci
R_{ty}	Temas yüzeyindeki direnç
r_w	Ergimiş metal havuzu yarıçapı
R_w	Kaynak direnci
s	İş parçası kalınlığı
t	Kaynak zamanı
T	Sıcaklık
T_e	Erime sıcaklığı
T_k	Katılma sıcaklığı
T_o	Oda sıcaklığı
w	Plaka genişliği
y	Malzeme yoğunluğu
ΔT	Sıcaklık aralığı



KISALTMA LİSTESİ

AA	Aluminum Association
Alclad	Alüminyum safiyeti yüksek ince tabaka
ASM	American Society for Metals
IACS	International Annealed Copper Standart
ODTÜ KTM	Ortadoğu Teknik Üniversitesi Kaynak Teknolojisi Merkezi



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Akım uygulanması sırasında oluşan direnç bileşenleri 5
Şekil 2.2	Nokta direnç kaynağındaki sıcaklık değişimi 5
Şekil 2.3	Direk tek nokta kaynağı uygulamaları..... 6
Şekil 2.4	Direk çok nokta kaynağı uygulamaları..... 7
Şekil 2.5	Seri çok nokta kaynağı uygulamaları 8
Şekil 2.6	Kaynak çevrimi 9
Şekil 2.7	Kaynak çevrimi süresince uygulanan çeşitli akım değişkenleri 15
Şekil 2.8	Ayakla çalıştırılan direnç nokta kaynak makinesinin en basit şekli..... 16
Şekil 2.9	Hidrolik basınç silindiri ile donatılmış büyük nokta kaynağı makinesi 17
Şekil 2.10	Transformatörle donatılmış taşınabilir küçük tabanca 17
Şekil 2.11	Seri kaynağın şematik diyagramı 18
Şekil 2.12	Kaynak makinası sistemlerinin şematik gösterimi..... 19
Şekil 2.13	Standart elektrot şekilleri 26
Şekil 2.14	Elektrot uçlarının temizlenmesi 27
Şekil 2.15	Nokta direnç kaynağındaki ısı kayıpları..... 29
Şekil 2.16	Akım yoğunluğu ile temas yüzeyi arasındaki ilişki..... 31
Şekil 2.17	Yan devre 36
Şekil 2.18	Kesme,çekme ve ayırma deneyleri..... 39
Şekil 2.19	Keski deneyi..... 39
Şekil 2.20	Burma deneyi 40
Şekil 3.1	Çökeltme sertleşmesi sıralaması 48
Şekil 4.1	Fark oksit kalınlığı ve kaynak sayısı arasındaki ilişki..... 59
Şekil 4.2	Fark yüzey direnci ve kaynak sayısı arasındaki ilişki 60
Şekil 4.3	Kaynak işlemi sırasındaki sıcaklık dağılımı..... 61
Şekil 4.4	Alüminyum alaşımlarında plastik saha 62
Şekil 4.5	Tek fazlı nokta kaynağı makinalarında akım-kuvvet diyagramı 64
Şekil 4.6	Üç fazlı nokta kaynağı makinalarında akım-kuvvet diyagramı..... 64
Şekil 4.7	İçi boş gövdelerin kaynağında kullanılan kaynak usulüne bir örnek 65
Şekil 4.8	Düz ve ofset tipindeki elektrotların yapısal görünümü 66
Şekil 4.9	Farklı yüzey temizleme işlemlerinin elektrot ömrüne etkisi 67
Şekil 4.10	Temas yüzeyi direncinin yüzey işleme durumu ve bekleme zamanına göre değişimi 68
Şekil 5.1	Nokta direnç kaynağında temas yüzeyleri..... 75
Şekil 5.2	Kaynak zamanı ile elektrot izi çapı arasındaki ilişki..... 76
Şekil 5.3	Kaynak akımı ve elektrot iz çapı arasındaki ilişki 76
Şekil 5.4	Sıcaklığa bağlı olarak özgül direnç değişimi 77
Şekil 5.5	Temas direnci ölçümü 79
Şekil 5.6	Teması şematik gösterimi 80
Şekil 5.7	Yüzeyi kaplı ve zımparalama işlemi yapılmış 2 mm kalınlığında 5754 alüminyum alaşımının iş parçası – elektrot yüzeyi direnci, kuvvet ilişkisi 81
Şekil 5.8	Yüzeyi kaplı ve zımparalama işlemi yapılmış 2 mm kalınlığında 5754 alüminyum alaşımının temas yüzeyi direnci- kuvvet ilişkisi 82

Şekil 5.9	Kayma gerilmesi / basınç ile mercekle yarıçapının merkezinden çevreye doğru olan boyutu arasındaki ilişki	83
Şekil 5.10	1 ⁰ 'lik bağıl aksel dönmenin temas direncine etkisi	84
Şekil 5.11	Kaymanın metal-metal temas noktası oluşumuna etkisinin şematik Gösterimi.....	84
Şekil 5.12	Temas yüzeyindeki dirence elektrot geometrisinin etkisi	85
Şekil 5.13	Kayma gerilmesi / basınç ile kaynak çekirdeği yarıçapının merkezinden çevreye doğru olan boyutu arasındaki ilişkinin farklı elektrot çiftlerine göre değişimi	85
Şekil 5.14	Elektrotun yüzeyinin zımparalanmasının temas direncine etkisi	86
Şekil 5.15	2024 alüminyum alaşımı için iş parçası yüzeyinin zımparalanmasının temas direncine etkisinin akımın fonksiyonu olarak gösterilmesi	87
Şekil 5.16	2024 alüminyum alaşımı için iş parçası yüzeyinin zımparalanmasının temas direncine etkisinin akımın fonksiyonu olarak gösterilmesi.....	88
Şekil 5.17	Patika direnci ile iki kaynak noktası arasındaki ilişkinin sac genişliğine bağlı olarak gösterilmesi.....	89
Şekil 6.1	Kaynak çekirdeğinin iç yapısı.....	9
Şekil 6.2	Kaplı 2024 alüminyum alaşımında görülen kaynak çekirdeği oluşumunun bir başka görünümü.....	91
Şekil 6.3	Farklı kaynak çekirdeği yapıları	92
Şekil 6.4	Kaynak merceği üzerinde temas yüzeyinde oluşan direncin kaynak çevriminin farklı zamanlarındaki etkisi	94
Şekil 6.5	Çalışmada kullanılan akım değişimi	95
Şekil 6.6	A olayındaki kaynak çekirdeği kalınlığının deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarına göre karşılaştırılması.....	96
Şekil 6.7	A olayındaki kaynak çekirdeği çapının deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarına göre karşılaştırılması.....	97
Şekil 6.8	A,G,H olaylarındaki temas yüzeyi direnci değişiminin çekirdek kalınlığına etkisi	98
Şekil 6.9	A,G,H olaylarındaki temas yüzeyi direnci değişiminin çekirdek çapına etkisi.....	98
Şekil 6.10	Yan devre direncinin çekirdek boyutlarına etkisi.....	99
Şekil 6.11	50 $\mu\Omega$ 'luk yan devre direnci varken temas yüzeyindeki direnç değişiminin çekirdek hacmine etkisi.....	99
Şekil 7.1	Akımın çekirdek boyutlarına etkisi	100
Şekil 7.2	Akım değişiminin çekirdek kalınlığına etkisi	101
Şekil 7.3	Akım değişiminin çekirdek çapına etkisi	101
Şekil 7.4	DC ve AC'in çekirdek nufuziyetine etkisi	102
Şekil 7.5	DC ve AC'nin çekirdek simetrikliğine etkisi.....	102
Şekil 7.6	Kaynak zamanına bağlı olarak deney ve bilgisayar simülasyonu ile yapılan çalışmalarda elde edilen çekirdek boyutları	103
Şekil 7.7	Kaynak zamanının bir fonksiyonu olarak elektrot kuvvetinin çekirdek boyutlarına etkisi	104
Şekil 7.8	Elektrot kuvvetinin ergimiş metal fişkırmalarına etkisi	105
Şekil 7.9	Küresel uçlu özdeş elektrotların aynı malzeme ve kalınlık kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli	105
Şekil 7.10	Küresel uçlu özdeş elektrotların farklı malzeme,aynı sac kalınlığı kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli	106
Şekil 7.11	Küresel uçlu özdeş elektrotların aynı malzeme,farklı sac kalınlığı kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli	106

Şekil 7.12	Küresel ve düz uçlu elektrotların aynı malzeme, farklı sac kalınlığı kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli	107
Şekil 7.13	Küresel ve düz uçlu elektrot çiftinde kalın sacın küresel uç tarafında olduğu ve aynı malzeme kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli	107
Şekil 7.14	Soğutma suyunun elektrot ucuna uzaklığının çekirdek boyutlarına etkisi	108
Şekil 7.15	Eşit olmayan üç parçanın kaynağı sonucu oluşan kaynak noktası	108
Şekil 7.16	Üç farklı kalınlığa sahip plakaların kaynağına farklı bir örnek.....	109
Şekil 7.17	Farklı kalınlık ve malzeme kullanıldığında elde edilen kaynak formları.....	109
Şekil 8.1	Temas yüzeyindeki direncin ölçümü.....	112
Şekil 8.2	Yüzey kaplı durumda temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) değişimi	113
Şekil 8.3	Yüzey kaplı durumda değilken ki temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) değişimi	114
Şekil 8.4	Metalik temasın görünen temas alanı içinde şematik olarak gösterilmesi	115
Şekil 8.5	Yüzey kaplı değilken ki temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ($2na$) değişimi.....	116
Şekil 8.6	İlk periyodunun birinci çeyreğindeki direnç değişimi.....	118
Şekil 8.7	Spesifik ısı ve sıcaklık değişimi	119
Şekil 8.8	$350\mu\Omega$, $450\mu\Omega$, $550\mu\Omega$ için ilk periyodunun birinci çeyreğindeki direnç değişimi	121
Şekil 8.9	Kaynak zamanı boyunca direnç değişimi.....	122
Şekil 8.10	Akım değişiminin çekirdek ağırlığı ve ısı verime etkisi	124
Şekil 8.11	Direnç değişiminin kaynak çekirdeği ağırlığı ve ısı verime etkisi.....	125

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	St 1010 çeliklerin Sınıf 2 elektrotları ile tek impulsu nokta kaynağı ile ilgili bazı pratik değerler..... 11
Çizelge 2.2	Orta karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerim, Sınıf 2 elektrotlarıyla, son ısıtma (Postheating) yöntemiyle nokta kaynağına ait pratik değerler 12
Çizelge 2.3	St 1010 çeliklerin, Sınıf 2 elektrotları ile çok impulsu kaynak akımı uygulayarak, nokta kaynağına ait pratik değerler..... 13
Çizelge 2.4	A grubu elektrot malzemelerin özellikleri 24
Çizelge 2.5.	B grubu elektrot malzemelerinin özellikleri..... 25
Çizelge 2.6	Hata çeşitleri ve hatanın olası sebepleri 41
Çizelge 2.7	Bir mm saçlar için gerekli ortalama kaynak değerleri..... 42
Çizelge 2.8	Farklı malzemeler için kullanılacak kaynak parametreleri 43
Çizelge 3.1	Alüminyum alaşım aileleri 45
Çizelge 3.2	İşlenmiş alüminyum alaşımlarının kısa gösterim sistemi..... 45
Çizelge 3.3	Isıl işlemlerin kısa gösterimi 50
Çizelge 3.4	Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve uygulama alanları 54
Çizelge 4.1	Çeşitli alüminyum alaşımlarında her bir nokta için gerekli kesme kuvveti değerleri..... 55
Çizelge 4.2	Alüminyum alaşımlarının erime sahaları ve direnç kaynağı kabiliyetleri..... 56
Çizelge 4.3	Yapılan çalışmada elde edilen veriler 58
Çizelge 4.4	Deneyde kullanılan değerler..... 59
Çizelge 4.5	Alüminyum alaşımı saçların tek fazlı makineler ile nokta kaynağı uygulamaları..... 69
Çizelge 4.6	Alüminyum alaşımı saçların üç fazlı makineler ile nokta kaynağı uygulamaları..... 70
Çizelge 4.7	Alüminyum saçların nokta kaynağı için min. tavsiye edilen bindirme uzunlukları, nokta aralıkları ve nokta sıraları..... 72
Çizelge 5.1	Bazı metalsel malzemelerin, oda sıcaklıklarında özgül direnç ve sıcaklık katsayıları..... 77
Çizelge 6.1	Değişkenlerin deneysel değerleri 94
Çizelge 6.2	Modellemede kullanılan test olayları 95
Çizelge 6.3	Alüminyum nokta direnç kaynağı için kaynak şartları..... 95
Çizelge 6.4	Al ve Cu'ın özellikleri..... 96
Çizelge 7.1	Çalışmada kullanılan değerler 103
Çizelge 8.1	Yüzey kaplı durumda elektrot kuvveti (F), temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) değişimi..... 113
Çizelge 8.2	Yüzey kaplı değilken ki elektrot kuvveti (F), temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) değişimi..... 113
Çizelge 8.3	Yüzey kaplı durumda elektrot kuvveti (F), temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ($2na$) değişimi 116
Çizelge 8.4	Yüzey kaplı durumda değilken ki elektrot kuvveti (F), temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ($2na$) değişimi 116
Çizelge 8.5	Kaynak zamanı boyunca akımın değişimi..... 120
Çizelge 8.6	Sınır bölgelerinde direnç ve zaman değerleri..... 122

Çizelge 8.7	Her bir olay için ısınma ısı (Q ₁) değerleri	122
Çizelge 8.8	Her bir olay için toplam ergime gizli ısı	123
Çizelge 8.9	Her bir olay için toplam ergime ısı	123
Çizelge 8.10	Olaylarda oluşan ısı	123
Çizelge 8.11	Her bir olayda oluşan ısı verim	124
Çizelge 8.12	Akım değişiminin kaynak çekirdek ağırlığı ve ısı verime etkisi	124
Çizelge 8.13	Direnç değişiminin kaynak çekirdek ağırlığı ve ısı verime etkisi	125



ÖNSÖZ

Sac birleştirmelerinde en yaygın kullanılan yöntem, nokta direnç kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Otomobil sanayisinde aracın yapısına bağlı olarak 7000 ile 12000 arası nokta kaynağı bulunur. Otomobil endüstrisinde, yakıt ekonomikliğı ve araç performansında gelişme sağlamak için otomobil yapısı ile malzeme kullanımında değişiklikler olmuştur. Böylece otomobil endüstrisinde alüminyum alaşımlarına olan ilgi artmaktadır. Bununla birlikte yüksek elektriksel ve ısı iletkenliğinden, düşük ergime noktasından dolayı alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağının yapımı çeliğe göre daha fazla hassasiyet gösterir. Alüminyum alaşımlarının daha yüksek kaynak akımı gerektirmesi çeliğe göre başlıca farkıdır. Nokta direnç kaynağı sırasında oluşan çekirdek verimi birbirleri ile etkileşim halinde olan parametrelere dayanır. Bunlar direnç, akım, kaynak zamanı, sac kalınlığı, uygulanan kuvvet, elektrot ucu ile soğutma suyu arasındaki uzaklık, elektrot ucu yapısı gibi parametrelerdir. Bu parametreler içerisinde alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında temas yüzeyindeki direncin çekirdek oluşumu ve boyutları üzerinde önemli bir etkisi vardır.

Tüm bunlara dayanarak ve alüminyum nokta direnç kaynağında direnç bileşenleri ile nokta boyutları arasındaki ilişkinin daha uzun süre gelişmelere açık bir konu olduğunu düşündüğümüz için böyle bir çalışmayı uygun gördük.

Bu tez çalışması boyunca bilgi desteğı ile beni yönlendiren Sayın Danışman Hocam Prof. Nurullah Gültekin'e ve öğrenim hayatım boyunca bana destek olarak hiçbir fedakarlığı esirgemeyen anneme, babama ve aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İstanbul, 2002

Hüseyin SARI

ÖZET

Direnç, alüminyum nokta direnç kaynağında nokta boyutlarına etki eden faktörlerin en önemlilerinden biridir. Direnç bileşenleri temas yüzeyi direnci, iş parçası-elektrot arasındaki direnç ve malzeme direnci olmak üzere üçe ayrılır.

Bu çalışmada 5457 ve 1000 alüminyum alaşımları ile ilgili daha önce yapılmış deney ve simülasyon çalışmalarının incelenmesi yoluna gidilmiştir.

İlk incelemede, temas yüzeyindeki direnç ile görünen temas alanı yarıçapı arasındaki ilişki James vd. (1997) tarafından yapılan deneylerin sonuçları ve Crinon ve Evans (1998) tarafından ortaya konulan ampirik formül yoluyla incelenmiştir.

İkinci incelemede, James vd. (1997) tarafından ortaya konulan, görünen temas alanı yarıçapı ile metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu arasındaki bağıntıyı veren eşitliğin yeniden düzenlenmesi yoluyla metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ve temas direnci arasındaki ilişki incelenmiştir.

Son olarak da Khan vd. (2000a) tarafından yapılan çalışma ile elde edilen akım, temas direnci ve çekirdek boyutları göz önüne alınmıştır. Yaklaşık hesaplama yöntemiyle temas yüzeyi direnci dışındaki direnç bileşenleri ihmal edilerek ve Joule kanunu kullanılarak akım ile direnç değişiminin kaynak çekirdeği ısı verimine etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum alaşımları, direnç nokta kaynağı, direnç bileşenleri, kaynak çekirdeği, temas yüzeyi.

ABSTRACT

The resistance is one of the important component that effects the aluminum resistance spot welding. The resistance components is divided into three parts which are faying surface resistance, sheet-elektrod interface resistance and material resistance.

In this study, the experiment and simulation works, which were performed with 5457 and 1000 alüminum alloys before, were examined.

In the first research, the relation between the resistance at the faying surface and nominal area of contact radius were examined by the results of experiments which were achieved by James et al. (1997) and emprical equation which was achieved by Crinon and Evans (1998).

In the second research, by the way of rearrange the equation, which was achieved by James et al. (1997) and give the relation between the nominal area of contact radius and the total lenght of the line of metal-to-metal contact spots, the relation between faying surface resistance and the total lenght of the line of metal-to-metal contact spots was examined.

In the last research, the current, faying surface resistance and nugget dimensions, which were obtained by Khan et al. (2000a), were taken into account. The effects of the variations of the current and resistance on the thermal efficiency were examined by using Joule law and neglecting the other resistance components except faying surface resistance.

Keywords: Aluminum alloys, resistance spot welding, resistance components, weld nugget, faying surface.

1. GİRİŞ

Direnç nokta kaynağı çelik sacların kuvvet etkisi ile birleştirilmesinde uzun yıllardır güvenilir bir teknik olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda otomobil yapıları ve gövde iskeletlerinde alüminyum alaşımlarının nokta kaynağına bir ilgi oluşmuştur. Yine de alüminyumun çeliğe göre daha yüksek elektriksel ve ısıl iletkenliğe, daha düşük ergime noktasına sahip olmasından dolayı nokta direnç kaynağının kontrolü zordur.

Direnç nokta kaynağında, uygulanan kuvvet, su ile soğutulmuş elektrotlarla birlikte sacları sıkıştırır. Akım, temas yüzeyinde yoğunlaştırılmış ısı oluşturmak için iki elektrot üzerinden saclarla iletilir. Alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında merccek şeklinde bir çekirdek yapısı elde etmek için çeliğe göre 2-4 kat daha fazla bir akıma ihtiyaç duyulur. Temel prensiplerin yalınlığına karşın nokta kaynağı işleminin düzenini etkileyen birçok değişken vardır. İlk nokta kaynağı modelleme çalışmalarında problemi basitleştirmek için işlemin tek boyutlu olduğu varsayılmıştır (Rice ve Funk,1967; Gould, 1987). Fakat tek boyutlu modellemelerle kaynak mukavemetini belirlemede çok önemli olan çekirdek çapını bulmak mümkün olmamıştır. Nokta direnç kaynağı işleminin eş simetrik iki eksenli ısı transferi modeli sonlu fark analizi kullanılarak geliştirilmiştir (Cho ve Cho, 1989; Han vd., 1989; Wei vd, 1991,1996). Khan vd. (2000a) bildirdiğine göre Huh ve Kang sonlu eleman yöntemini kullanarak üç eksenli termoelektriksel model geliştirmiştir. Browne vd. (1995a) alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında temas yüzeyi direnci ve temas yüzeyinin çekirdek oluşumu üzerindeki etkisini göz önüne alabilen bir model geliştirmiştir. Bu çalışmanın devamı niteliğindeki diğer bir çalışmada da yan devre etkisini ve bunun çekirdek oluşumu, boyutları üzerindeki etkisini incelemiştir (Browne vd.,1995b). James vd. (1997) üzeri kaplı ve kaplı olmayan alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında temas direnci ölçümleri ve elektrot kuvveti arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Crinon ve Evans (1998) temas yüzeyindeki metalik temas alanı ve elektrot kuvveti arasında amprik bir bağıntı ortaya koymuştur. Xu ve Khan (1999) alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağı için ısıl-elektriksel-mekanik bağıntılı bir model ileri sürmüştür. Isıl-elektriksel bağıntılı model, alüminyum nokta direnç kaynağının bilgisayar simülasyonu sırasında çekirdek büyümesi, sıcaklık gelişimi ve elektriksel akım yoğunluğunun dağılımını incelemek için kullanılırken, ısıl-mekanik model de temas yüzeyindeki gerilim dağılımını incelemek için kullanılmıştır. Khan vd. (2000a) alüminyum nokta direnç kaynağı için üç boyutlu bir ısıl model geliştirmiştir. Bu model ile temas yüzeyi direnci ve akımın çekirdek oluşumu ve boyutları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında ise daha önce yapılan deney ve simülasyon çalışmalarının (James vd.,1997; Crion ve Evans,1998; Khan vd.,2000a) analizi yoluna gidilerek, yüzeyi kaplı ve kaplı olmayan alüminyum alaşımlarında görünen temas alanı yarıçapı ile temas yüzeyindeki direnç, yüzeyi kaplı ve kaplı olmayan alüminyum alaşımlarında metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ile temas yüzeyi direnci arasındaki ilişki ile akım, direnç artışının çekirdek ağırlığı ve ısı verime etkisi incelenmiştir.



2. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI

Nokta direnç kaynağında, birbiri üzerine bindirilmiş parçalar elektrotlar yardımıyla baskı altındadırlar. Gerekli olan yüksek akım gücü ve düşük gerilim, yüksek şebeke geriliminin çalışma gerilimine (örneğin 5V) dönüştürülmesi ile elde edilir. Transformatörün sekonder devresinden geçen yüksek akım (örneğin 10 000 A) birbiri üzerine bindirilmiş parçaların temas yerlerinde yüksek ısı oluşumuna sebep olur. Bu, malzemenin o bölgede erimesini ve kaynak çekirdeğinin oluşmasını sağlar. Kaynak için gerekli ısı, malzemelerin elektrik akımına olan dirençleri çok düşük, ısı iletiminin de yüksek olması dolayısıyla ısı randımanının yükseltilmesi amacı ile yüksek kaynak akımları kullanılarak elde edilir.

Özellikle alaşımsız ve yüksek alaşımlı çeliklere ve alüminyum malzemelere uygun bir yöntem olmasına rağmen birçok malzeme de özel önlemlerle bu yöntemle kaynatılabilir.

Genellikle kullanıldığı malzeme kalınlıkları 0.5- 3.0 mm arasındadır.

Avantajları

- Ekonomik ve hızlı bir yöntemdir.
- Pek çok malzeme kombinasyonu kaynaklanabilir.
- İş parçası hazırlığı ihtiyacı düşük düzeydedir.

Dezavantajları

- Kaynağın tamiri zor.
- Bindirme kaynağı, alın kaynağına göre ağırlık ve malzeme maliyetini beraberinde getirir.
- Makine maliyeti yüksek
- Yüksek verimli akım beslemesi gereklidir.
- Alüminyum ve CrNi çeliklerin kaynağı için olan makine kumanda sistemi pahalıdır (Kısa sürede yüksek akım üretilmesini sağlayacak güç kaynakları özel ve pahalı).
- Yüksek alaşımlı çeliklerin kaynağı için çok yüksek basma kuvvetleri gereklidir
- Alüminyumun kaynağı için çok yüksek kaynak akımı gereklidir
- Nokta kaynağı ile yapılan birleştirmeler, çekirdeğin etrafındaki çentik etkisi nedeniyle çekme ve yorulmaya karşı düşük dayanımlıdır.
- Tahribatsız muayenesi pek mümkün değildir.

Başlıca uygulama alanları ise ana başlıklar ile aşağıda belirtilmektedir.

- Otomobil, beyaz eşya ve cihaz imalat endüstrisinde kullanılan ince sacların kaynağında,
- Elektronik endüstrisinde lehimlemeye alternatif olarak,
- Mikro kaynak tekniği (ODTÜ KTM,1998).

2.1 Nokta Direnç Kaynağının Oluşumu

Nokta direnç kaynağı; iki elektrot arasına sıkıştırılan parçaların, düşük gerilimde ve yüksek akım şiddetinde geçirilen akımın, Joule kanununa göre ısıya dönüşmesi sonucu meydana gelen bölgesel ergime neticesinde birleştirilmesidir. Isının oluşum hızı çevreye yayılma hızından fazla olmalıdır. Parçalardan geçirilen elektrik akımı, karşılaştığı direnç sonucu yüksek ısıya erişerek parçaları o bölgede eriterek, birleştirir. Ayrıca bir dış ısı kaynağı yoktur. Eriyen bölge her iki sacda da ortaktır. Akım şiddeti, elektrot kuvveti ve zamanlamanın otomatik kontrolü ile, yüksek imalat hızlarında, birbirinin aynı özellikte nokta kaynakları elde edilebilir.

Nokta direnç kaynağı için gerekli alçak gerilim (5-20 Volt) ve yüksek akım şiddetindeki (5000-20000 A) elektrik gücü kaynak transformatörlerinden; basınç ise hidrolik, mekanik ve pnomatik donanımlarla sağlanır. Yaklaşık 3 mm kalınlığına kadar olan saclar üst üste bindirilerek birleştirilebilir. Özel yöntemlerle 6 mm ve daha kalın sacların birleştirilmesinde de kullanılabilir olmasına karşın ekonomik olmaz.

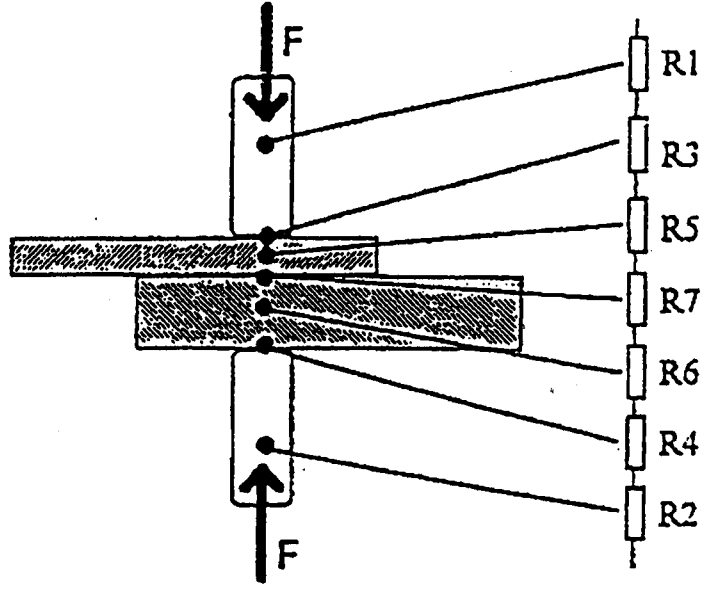
Elektrotlar arasındaki direnç R (Ω) ise, kaynak akımı I (A), t (s) zamanı kadar uygulanmasıyla açığa çıkacak ısı enerjisi aşağıdaki formül ile elde edilir (ASM, 1989).

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (2.1)$$

R direnci elektrotlar arasındaki toplam dirençtir ve bileşenleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

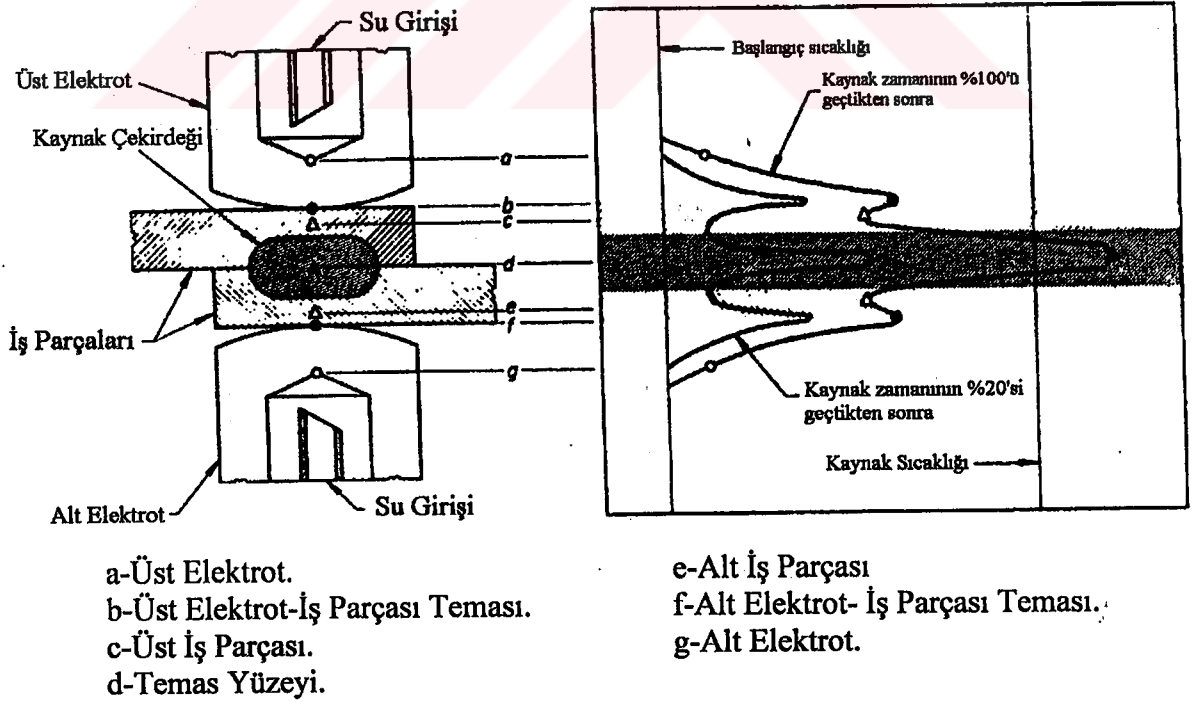
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (2.2)$$

(2.2) eşitliğindeki direnç bileşenleri şunlardır. R_1 : Üst elektrot direnci, R_2 : Alt elektrot direnci, R_3 : İş parçası-Üst elektrot arasındaki direnç, R_4 : İş parçası- Alt elektrot arasındaki direnç, R_5 : Üst parçanın malzeme direnci, R_6 : Alt parçanın malzeme direnci, R_7 : Temas yüzeyi direnci.



Şekil 2.1 Akım uygulanması sırasında oluşan direnç bileşenleri (ODTÜ KTM,1998).

Akımın geçişinden itibaren bütün dirençler ısı kaynağı oluşturur. Birleştirilecek parçaların temas yüzeylerinde oluşan direnç, devredeki diğer temas dirençlerinden fazla olmalıdır. Şekil 2.2'de kaynak süresi boyunca birleşimin tüm noktalarında sıcaklık değişimi gösterilmiştir (ASM,1989).



Şekil 2.2 Nokta direnç kaynağındaki sıcaklık değişimi (ASM,1989).

Nokta direnç kaynağı, ikiden fazla metal sacın, bileşimi ve kalınlıkları farklı metallerin veya başka bir metalle kaplanmış sacların birleştirilmesinde de kullanılır.

Kaynak işlemi boyunca, elektrotların birleştirilen parçalara basınç tatbik etmesi sağlanır. Metaller arasından geçirilen elektrik akımı kesilince eriyen metal hızla soğur ve katılaştır. Bu sırada elektrotlar kaynak edilen parçaları sıkı bir şekilde tutmaya devam eder. Gerekli basınç, kaynak işlemi boyunca sabit tutulabilir veya kaynak kalitesini yükseltmek ve poroziteli katılaşmaya imkan vermemek için kaynaktan sonra atırılabilir. Kaynak işlemi genelde 1 saniyeden daha kısa bir sürede tamamlanır.

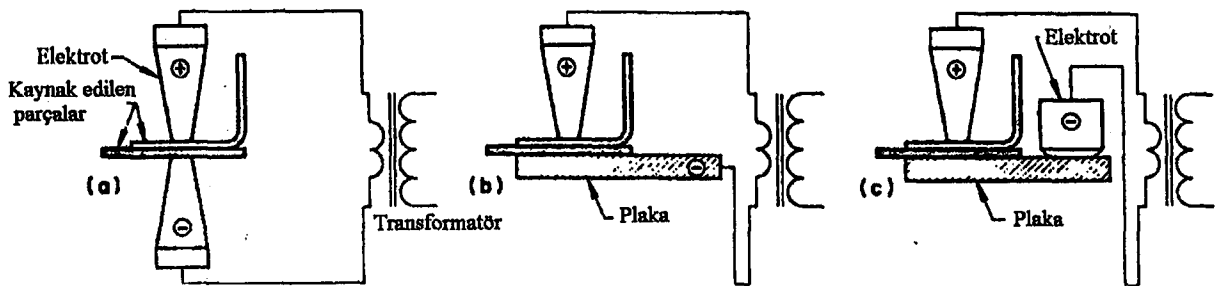
Elde edilen kaynağın şekli ve boyutu, elektrot ucunun boyutu ve çevresiyle belirlenir. Kaynak çekirdeği, iki parçanın temas yüzeylerinde meydana gelir ve dış yüzeylere erişmez. Uygun bir kaynak çekirdeğinin kesiti oval biçimindedir.

Kaynak noktaları, parçaların elektrot kuvveti ile çarpılması sonucu kaynak edilen noktadan eriyik metalin kıvılcım şeklinde sıçramasını önlemek için kenarlardan yeterince uzak olmalıdır. Ayrıca, parça üzerinde kaynak edilen noktanın haricinde paralel akım geçişlerini (Yan devre etkisi) önlemek için ardışık kaynak noktaları arasındaki mesafe yeteri kadar büyük olmalıdır.

2.1.1 Nokta Direnç Kaynağı Usulleri

Nokta direnç kaynağının sekonder devresinde elektrotların ve kaynatılacak parçaların durumu, kaynağın direkt veya seri (endirek) oluşunu tayin eder. Eğer sekonder akım oluşan kaynak çekirdeği üzerinden tümüyle geçiyor ve böylece yan devre oluşmuyorsa buna direkt nokta kaynağı denir. Sekonder akımın bir kısmı kaynak çekirdeğinin yanından geçip yan devre oluşturuyorsa buna da seri nokta kaynağı denir. (ASM,1989).

a) Direkt Tek Nokta Kaynağı: Tek nokta kaynağı, ile ilgili örnekler Şekil 2.3'de verilmektedir.



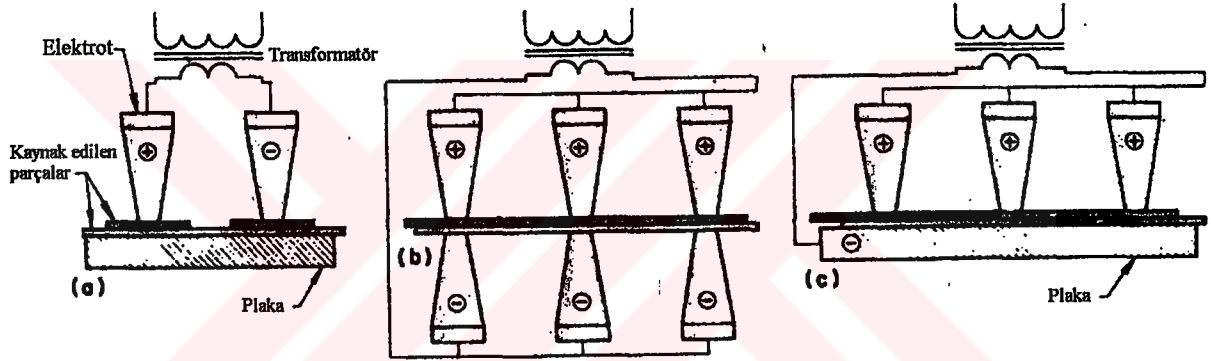
Şekil 2.3 Direkt tek nokta kaynağı uygulamaları (ASM,1989).

Şekil 2.3a'da görülen düzenleme, kaynak edilecek iki parçanın, karşılıklı yerleştirilmiş alt ve üst elektrotların arasında bulunduğu en basit ve en çok kullanılanıdır.

Şekil 2.3b'de alt elektrot olarak büyük temas yüzeyi olan iletken bir plaka kullanılır. Böylece, alt kısımdaki parçanın üzerinde meydana gelen kaynak izinin azaltılması ve kaynağın daha hızlı bir şekilde soğuması sağlanır.

Şekil 2.3c'de ise, alttaki iletken levha, ikinci üst elektrotla birlikte aynı amaç için kullanılır. Bu ikinci üst elektrot kaynak için değil de temas sağlamak için kullanıldığından dolayı aşırı ısınmayı önlemek için büyük boyutlu tutulabilir.

b) Direk Çok Nokta Kaynağı: İki veya daha fazla nokta kaynağının yapılabildiği bir yöntemle ait uygulamalar, Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Direk çok nokta kaynağı uygulamaları (ASM,1989).

Şekil 2.4a'da tek transformatör ile aynı anda iki adet nokta, kaynak edilebilmektedir. Bu tip kaynakta alt plakanın iletken olmasına gerek yoktur.

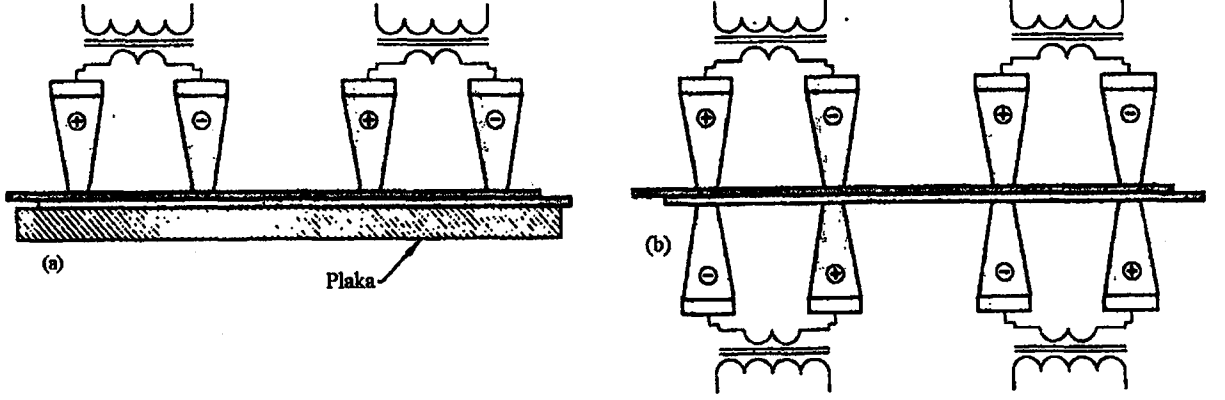
Şekil 2.4b'de tek transformatör kullanılarak iki veya daha fazla sayıda nokta kaynağı eldesinin bir türü görülmektedir. Bu tip kaynak işleminde, her noktanın direnci aynı olmalıdır. Aksi halde üniform bir akım geçişi sağlanamaz. Her elektrotun uç tipi ve yüzey durumu aynı olmalıdır. Ayrıca elektrotlara uygulanan kuvvette her biri için aynı olmalıdır.

Şekil 2.4c'de kullanılan iletken plaka ile daha düzgün kaynak noktası yüzeyleri elde edilebilir.

c) Seri Çok Nokta Kaynağı: Çok noktadan kaynak yapabilme imkanı sunan seri (endirek) çok nokta kaynağı uygulama örnekleri, Şekil 2.5'te verilmektedir.

Şekil 2.5a'da, iki adet sekonder devre ve transformatör kullanılarak aynı anda her bir sekonder devre için iki adet kaynak noktası elde edilebilmektedir.

Şekil 2.5b'de ise dört adet sekonder devre kullanılarak, dört adet nokta kaynağı yapılabilmektedir.



Şekil 2.5 Seri çok nokta kaynağı uygulamaları (ASM,1989).

2.2 Kaynak Çevrimi

Nokta direnç kaynağını beş ana safhaya ayırmak mümkündür. Şekil 2.6'da bu safhalar şematik olarak gösterilmiştir.

- Ön tutma

Elektrotlar yardımıyla iş parçaları üzerine belli bir kuvvet uygulanır ve parçalar birbirine bastırılır,

- Ön ısıtma

Bu sırada sacların pürüzlülük uçlarında plastik şekil değişimi oluşur. Yüzeyleri düzleşir. Geçiş direnci düşer.

- Kaynak

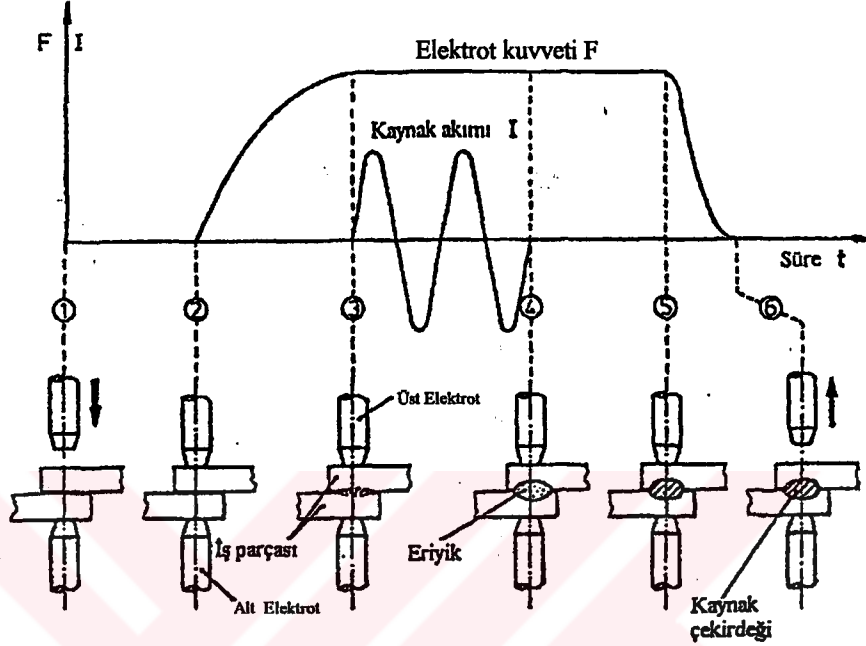
Akım belirli bir süre verilir, bu sırada elektrot kuvveti düşer ve buna bağlı olarak direnç yükselir. Kaynak akımı gerekli yükseklikte oluşur.

- Kaynak sonrası tutma

Akım kesildikten sonra da belirli bir süre elektrotlar iş parçasına basmaya devam eder sonra kaldırılır. Bu şekilde çekirdekte katılaşma kusurlarının oluşması ve sıcakta şekil değiştirmesi engellenerek kaynak noktasının hatasız olması sağlanır.

- Kaynak sonrası tavlama

Kaynağı hassasiyeti olan çeliklerde ($C > \% 0,15$) soğuma hızı azaltılarak olası sertleşme engellenir.



Şekil 2.6 Kaynak çevrimi (ODTÜ KTM,1998).

Bu basamaklardan ön ısıtma ve kaynak sonrası tavlama basamakları malzemeye bağlı olarak uygulanır veya uygulanmaz. Ayrıca bazı malzemeler (ve belirli kalınlıklar) için, kaynak akımının birden fazla verilmesi ve akım-basma kuvveti programlarının uygulanması da gerekebilir.

Mercimek şeklinde oluşan kaynağın çapı, kaynağın dayanıklılığı konusunda bir fikir verir. Nokta çapı arttıkça kaynağın dayanımı artar. Ancak belirli bir nokta çapı değerinden sonra dayanım fazla artmaz.

2.3 Kaynak Değişkenleri

Kaynak işlemi sırasında kuvvet, akım ve akım geçen süre çok önemlidir. En iyi kaynak, bu üç değişken arasında en iyi uyumun sağlanması ile elde edilecektir. Kaynak makinelerinde değişkenlerin kontrolü ve makinenin otomasyonu için elektronik kontrol ünitesi kullanılır. İstenilen kaynak çekirdeği çapı, akım şiddeti ve zamanın uygun bir şekilde ayarlanmasıyla elde edilir. Zaman kısa tutulursa kaynak çapı küçülür; aksine uzun tutulursa eriyen hacim fazlalaşır ve eriyik dışarı çıkar.

Bu parametreler, yavaş ve hızlı kaynak diye iki grup kaynak anlayışını ortaya çıkarmıştır. İlk zamanlarda yüksek güçte elektrik enerjisi olmadığı için uzun süreli düşük akım, düşük kuvvetli kaynaklar yapılmıştır. Bu tür kaynakta düşük kuvvet uygulanmasına rağmen elektrot fazla batar ve kaynak civarındaki renk değişim bölgesi çok geniştir. Nokta başına enerji de daha çoktur. Teknolojinin ilerlemesi ile yüksek kuvvet ve akım uygulanmasıyla kaynak teknikleri gelişmiştir. Puntalar daha sağlam, daha kısa sürede ve daha az enerji ile yapılabilir olmuştur.

2.3.1 Elektrot Baskı Kuvveti

Elektrotlar birbirine yaklaşır ve sıkıştırma sağlandıktan sonra kuvvetin düzenli hale gelmesiyle kaynak işlemi başlatılır. Kaynak için gerekli direnci genellikle kuvvetle ters orantılıdır. Baskı kuvveti artırılınca, temas direnci düşer. Düşme eğilimi malzemeye göre değişir. Bu nedenle direnç çok küçülürse, gerekli ısı oluşmamaktadır. Kaynak türüne göre (hızlı, orta, yavaş) optimum kuvvet değeri uygulanır.

Ergimiş çekirdek tamamen katı metalle çevrili olduğundan, hemen basıncın kalkacağı düşünülürse, o anda kaynakta boşluk ve çatlama tehlikesi oluşur. Bundan dolayı ergimiş malzeme üzerinde elektrotların basıncı soğuma sırasında devam ettirilir veya artırılarak ısının çabuk dağılmasına ve aynı zamanda kısmen ergimiş bölgenin basınç altında soğumasına imkan tanınır.

2.3.2 Kaynak Akımı

Isıyı, kaynak edilecek noktada oluşturan en önemli büyüklüktür. Kaynak akımı az olursa uzun süreli kaynak türü olur ve ısıtılan bölge genişler, yeterli ısıya erişilemez. Kaynak akımı fazla olursa elektrotlardan malzemeye akım geçişindeki zorluktan dolayı ark ve kıvılcıklar oluşabilir ve bu da o bölgenin yanması anlamına gelir.

Çizelge 2.1, 2.2 ve 2.3'te ise düşük ve orta karbonlu, hafif alaşımlı çeliklerin nokta kaynağına ait bazı değerler verilmiştir. Bu değerler, optimum nokta kaynağı ayarlarını bulabilmek için başlama noktası olarak kullanılabilir. İstenilen kaynak kalitesi, bu değerler etrafında pratik uygulamalar yapılarak bulunabilir. Çok özel kaynaklarda ise, geniş bir araştırma ile hangi parametre neyi değiştiriyor, incelenip istenilen şartların nasıl sağlanacağı tespit edilir.

Çizelge 2.1 St 1010 çeliklerin Sınıf 2 elektrotları ile tek impulsu nokta kaynağı ile ilgili bazı pratik değerler (1 periyot= 1/60 s) (ASM,1989).

En ince sac kalınlığı (mm), (a)	Elektrot gövde çapı (mm)	Elektrot uç çapı (mm), (b)	Elektrot kuvveti (daN)	Kaynak zamanı (periyot)	Kaynak akımı (A)	Minimum bindirme buyutu (mm)	Minimum nokta aralığı (mm), (c)	Yaklaşık çekirdek çapı (mm)
0,25	9,53	3,18	90	4	4000	9,53	6,35	2,54
0,53	9,53	4,76	135	6	6500	11,11	9,53	3,30
0,79	9,53	4,76	180	8	8000	11,11	12,70	4,06
1,02	12,70	6,35	225	10	9500	12,70	19,05	4,83
1,27	12,70	6,35	295	12	10500	14,29	22,23	5,59
1,57	12,70	6,35	360	14	12000	15,88	25,40	6,35
1,98	15,88	7,94	500	17	14000	17,46	31,75	7,37
2,39	15,88	7,94	590	20	15500	19,05	38,10	7,87
2,77	15,88	9,53	720	23	17500	20,64	41,28	8,13
3,18	22,23	9,53	810	26	19000	22,23	44,45	8,38

(a) En ince sacın kalınlığı kaynak şartlarını belirler. Bu değerler kalınlıklar arasındaki maksimum oranın 3/1'den fazla olmaması durumundadır.

(b) Sivri uçlu, eksantrik, kesik koni uçlu ve 76,2 mm'lik yuvarlatma yarıçaplı küresel uçlu elektrot içindir.

(c) Yan devreyi önlemek için verilen nokta aralıkları iki parça içindir. Üç parça için bu değerler 30 % artırılmalıdır.

Çizelge 2.2 Orta karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin, Sınıf 2 elektrotlarıyla, son ısıtma yöntemiyle nokta kaynağına ait pratik değerler (1 periyot= 1/60 s). (ASM,1989).

Sac Tipi	Sac kalınlığı (mm) (a)	Elektrot gövde çapı (mm)	Elektrot uç çapı (mm)	Elektrot ucu yuvarlatma yarıçapı (mm)	Elektrot kuvveti (kaynak ve son ısıtma) (daN)	Kaynak süresi (periyot)	Son ısıtma gecikmesi (periyot)	Son ısıtma akımı (periyot)	Son ısıtma akımı (periyot)	Kaynak akımı (A)	Son ısıtma akımının %'si	Min. bindirme boyutu (mm)	Min. nokta aralığı (mm) (b)	Yaklaşık çekirdek çapı (mm)	Minimum kopma kuvveti (Makaslama) (daN)
1020	1,02	15,88	6,35	152,4	665	6	17	6	6	16000	90	12,70	25,40	5,84	615
1035	1,02	15,88	6,35	152,4	665	6	20	6	6	14200	91	12,70	25,40	5,59	705
1045	1,02	15,88	6,35	152,4	665	6	24	6	6	13800	88	12,70	25,40	5,33	900
4130	1,02	15,88	6,35	152,4	665	6	18	6	6	13000	90	12,70	25,40	5,59	955
4340	0,79	9,53	4,77	152,4	410	4	12	4	4	8250	84	11,11	19,05	4,06	490
	1,57	19,05	7,94	152,4	900	10	45	10	10	13900	77	9,53	38,10	6,86	1730
	3,18	25,40	15,88	254,0	2480	45	240	90	90	21800	88	22,23	63,50	13,97	6160
8630	0,79	12,70	4,76	152,4	360	4	12	4	4	8650	88	11,11	19,05	4,06	550
	1,57	15,88	7,94	152,4	810	10	36	10	10	12800	83	15,88	38,10	6,86	1910
	3,18	25,40	15,88	254,0	2030	45	210	90	90	21800	84	22,23	63,50	13,97	5945
8715	0,46	12,70	3,18	152,4	160	3	4	3	3	3900	85	11,11	15,88	2,54	180
	1,57	15,88	7,94	152,4	720	10	28	10	10	12250	85	9,53	38,10	6,86	1490
	3,18	25,40	15,88	254,0	2030	45	180	90	90	22700	85	22,23	63,50	13,97	5745

(a) Eşit kalınlıklarda iki parça için geçerli değerlerdir.

(b) Yan devreyi önlemek için gerekli minimum nokta aralıkları.

Çizelge 2.3 St 1010 çeliklerin, Sınıf 2 elektrotları ile çok impulslu kaynak akımı uygulayarak, nokta kaynağına ait pratik değerler. (ASM, 1989).

Birleştirilecek sac kalınlıkları (mm)	Elektrot gövde çapı (mm)	Elektrot uç çapı (mm)	Elektrot kuvveti (daN)	Tek Nokta kaynak için impuls sayısı (b)	Komşu noktalar arası 25,4-50,8 mm için impuls sayısı (b)	Komşu noktalar arası 50,8-101,6 mm için impuls sayısı (b)	Kaynak akımı (A)	Min. bindirme boyutu (mm)	Çekirdek çapı (mm)	Minimum kopma kuvveti (makaslama) (daN) (c)
3,18-3,18	25,4	11,11	810	3	5	4	18000	22,23	9,53	2250
3,18-4,76	25,4	11,11	810	3	5	4	18000	22,23	9,53	2250
3,18-6,35	25,4	11,11	810	3	5	4	18000	22,23	9,53	2250
4,76-4,76	31,75	12,70	880	6	20	14	19500	28,58	14,29	4500
4,76-6,35	31,75	12,70	880	6	20	14	19500	28,58	14,29	4500
4,76-7,94	31,75	12,70	880	6	20	14	19500	28,58	14,29	4500
6,35-6,35	31,75	14,29	970	12	24	18	21500	34,93	19,05	6750
6,35-7,94	31,75	14,29	970	12	24	18	21500	34,93	19,05	6750
4,76-7,94	38,1	15,89	1080	15	30	23	24000	38,10	22,23	9000

(a) Sivri uçlu, eksentrik, kesik koni uçlu ve 76,2 mm'lik yuvarlatma yarıçaplı küresel uçlu elektrotlar içindir.

(b) Çok impulslu kaynak işleminde; akım geçisi (ısıtma): 20 periyot, soğutma: 5 periyot tur. (60 periyot= 1 s).

(c) Çekme dayanımı 483 MPa'dan küçük çelikler içindir.

2.3.3 Kaynak Süresi

Kaynak süresi çok kısa olursa kaynak tutmayabilir veya kaynak çekirdeğinin çapı çok küçük kalabilir. Kaynak süresi uzun olunca da ergimiş bölge fazla büyüyeceği için baskı altında patlar, aradan malzeme fişkirir ve çok derin izler oluşur.

Kaynak esnasında lokal bir bölgenin eritilmesi söz konusu olduğundan, eriyik civarında malzeme kristal yapısında önemli değişiklikler olur. Kaynak işleminden sonra elektrotlar hemen kaldırılrsa kaynak bölgesindeki ısı alınamadığı için geniş bir halka şeklinde etrafa yayılır ve elektrot temas yüzeyi siyah olabilir. Kaynaktan sonra elektrot bir süre bekletilirse (tutma zamanı), malzemedeki ısı, su ile soğutulan elektrotlar tarafından uzaklaştırılacağı için kaynak izi küçük ve beyaz olur.

2.3.4 Kaynak Değişkenliklerine Bağlı Olarak Çeşitli Uygulamalar

Basit bir kaynak çevriminde, işlem boyunca, sabit bir kaynak akımı ve elektrot kuvveti tatbik edilir (Şekil 2.7a). Kaynak süresince akım ve basınçta değişiklik yapılabilir. Sisteme eğer akım kontrolörü ilave edilirse, kaynak akımının şiddeti değiştirilebilir. Böylece bir kaynak çevriminde kaynağın başında önce akım artırılmakta ve kaynağın sonunda da azaltılabilmektedir (ASM,1989).

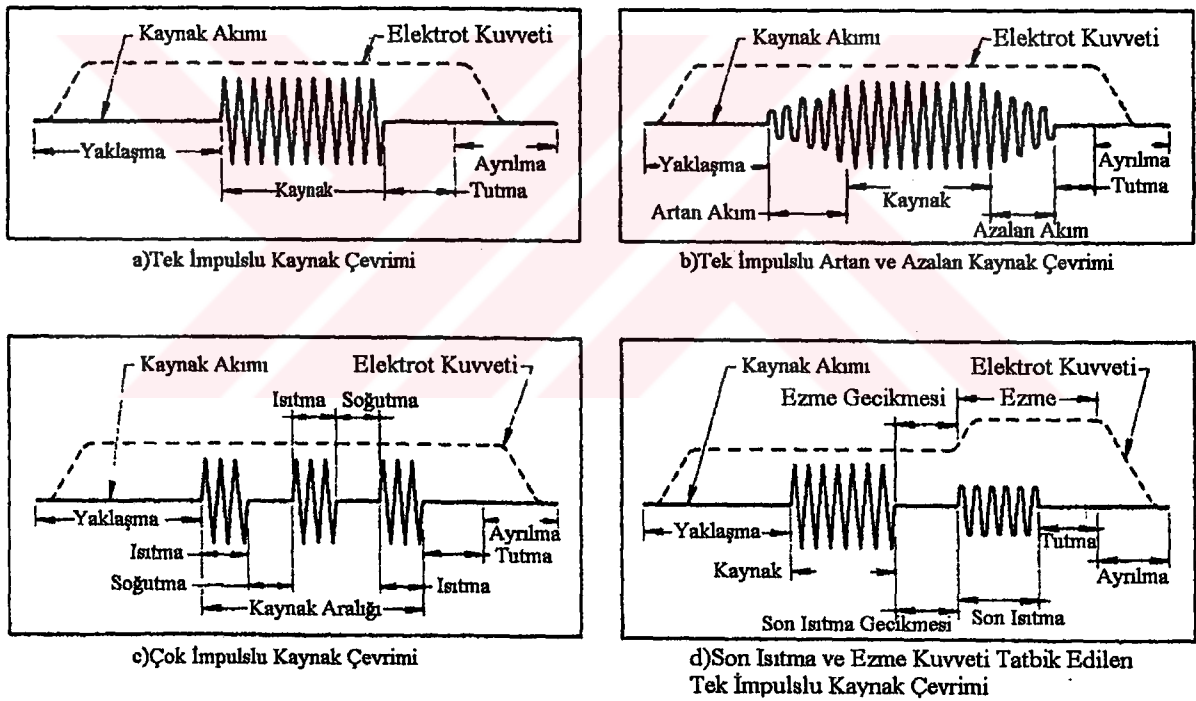
Artan akım kontrolü kaynak akımının ani olarak öngörülen değer yerine, akımın birkaç periyot içinde kademeli artarak kaynak için gerekli değere ulaşmasını sağlar. Düşük başlangıçtaki kaynak akımı, akımın ilk tatbikatında oluşan kıvılcım sıçramalarını azaltır veya tamamen ortadan kaldırır. Artan akım kontrolü, yüksek akım değerlerinde yapılan kaynaklarda (kaplanmış metallerde) kullanılır (Şekil 2.7b).

Azalan akım kontrolü , akımın ani olara kesilmesi yerine, kademeli olarak düşürüldükten sonra kesilmesini sağlar. Böylece soğuma hızı yavaşlatılarak kaynak sonrasında oluşabilecek hatalar en aza indirgenir. Azalan akım kontrolü, özellikle %0,15'den az karbon içeren düşük karbonlu çeliklerin kaynağında nadiren kullanılır. Ancak, kaynak sonrası sertleşebilen çeliklerde olduğu için soğuma hızının kontrol altında tutulması gereken hallerde mutlaka kullanılmalıdır (Şekil 2.7b).

Yüksek akım şiddetine ve uzun kaynak zamanına ihtiyaç olduğu hallerde, örneğin 3 mm'den daha kalın sacların kaynağı durumunda, elektrotlar aşırı ısınabilir ve elektrotların ömürleri kısalmır. Bu durum, kaynak süresince akımın kesikli olarak birkaç defa tatbiki ile ortadan kaldırılabilir. Kesikli akım tatbiki ile, aralıklı olarak soğutma için zaman sağlanmış olur. Isı,

kaynak edilen saclara nazaran elektrotlardan daha büyük bir hızla uzaklaşır ve böylece kaynak edilen saclar fazla soğumadan elektrotlardan uzaklaştırılmış olur. Seri halde akım tatbiki ile elektrotların sıcaklık limitleri aşılmadan, kaynak edilecek saclar için gerekli sıcaklık değerine erişilir (Şekil 2.7c).

Kaynak çevriminde ezme ve son ısıtma yöntemleri de kullanılabilir. Bu yöntemler düşük karbonlu çelikler için kullanılmayıp, sertleşme eğilimli olan karbonlu ve alaşımlı çeliklerde tane ufaltmak için kullanılır. Kaynaktan sonra tavlama akımı tatbik edilmeden önce kaynağın soğuması için kısa bir bekleme veya akım kesme periyodu uygulanır. Son ısıtmanın sağlandığı düşük değerli akımın tatbikini, tutma zamanı takip eder. Son ısıtma sırasında elektrot kuvveti artırılabilir (Ezme kuvveti). Kaynak kuvveti genellikle son ısıtma akımını uygulanıncaya kadar sabit tutulur ve sonra artırılarak tutma zamanının sonuna kadar ezme kuvvetinde tutulur (Şekil 2.7d).



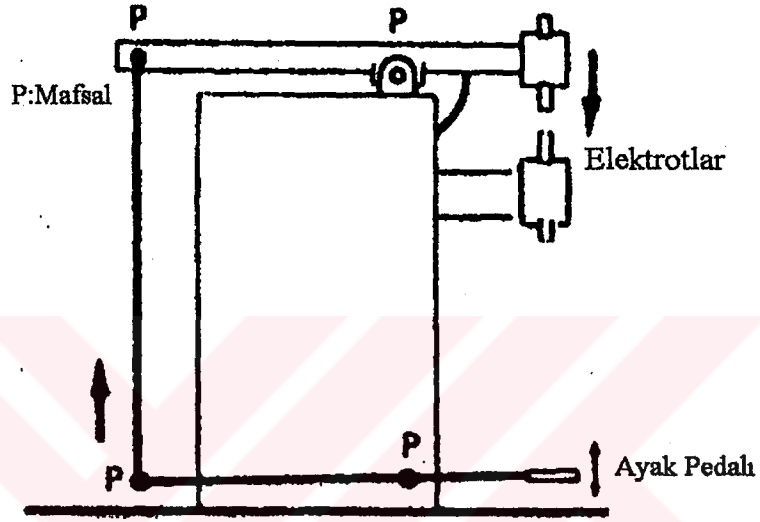
Şekil 2.7 Kaynak çevrimi süresince uygulanan çeşitli akım değişkenleri (ASM,1989).

2.4 Nokta Kaynağı Makinaları

Nokta kaynağı için kullanılan makineler sabit veya taşınabilir olabilir. Sabit kaynak makineleri ince sacların kaynağı için kullanılan küçük ünitelerden, yüksek akım çıkışına sahip büyük makinelere kadar değişir. Bunlar temelde elektrotlara uygulanan kuvvetin uygulama tarzına göre farklılıklar gösterir. Küçük basit makinelere ayakla çalıştırılan bir pedal üst

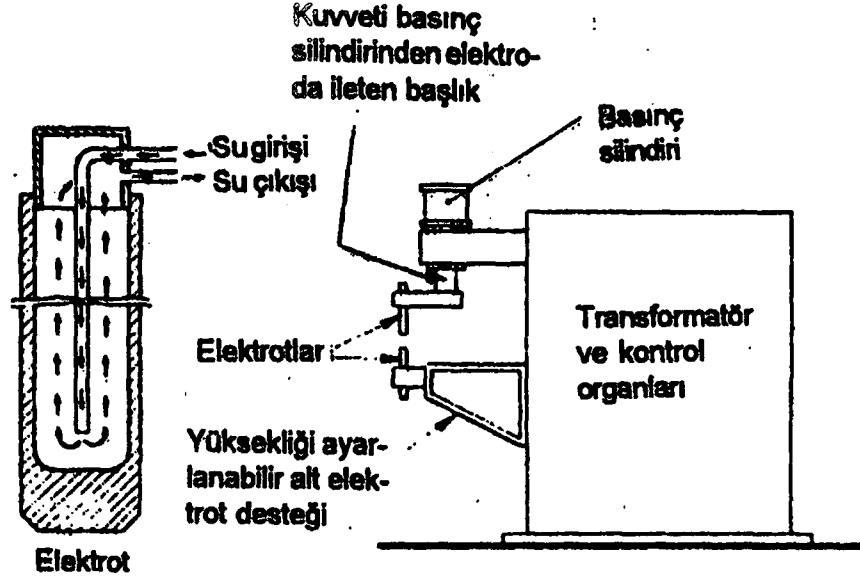
elektrotu tutan, mafsalı bir kola bağlanmıştır (Şekil 2.8). Elektrotlara uygulanan kuvveti arttırmak, operatöre yardımcı olmak için yaylar ve ağırlıklar kullanılır.

Bu üniteler külbitörlü makineler olarak adlandırılır. Bu konstrüksiyonun en önemli sakıncası üst elektrotun bir yay çizerek ilerlemesidir. Bu, elektrotların hassas bir şekilde aynı hizaya getirilmesini zorlaştırır ve elektrotların ucunda sık sık düzgün olmayan bir aşınma meydana gelir; bu da biçimsiz kaynak noktaları oluşturur.



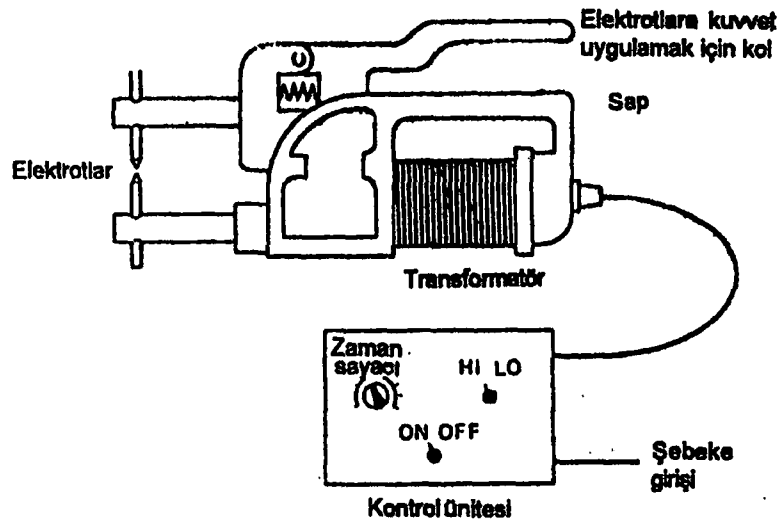
Şekil 2.8 Ayakla çalıştırılan direnç nokta kaynak makinesinin en basit şekli (Gourd,1996).

Daha büyük kuvvetler ve daha hassas hizalamalar, pnömatik veya hidrolik silindirlerle elde edilir (Şekil 2.9). Bunlar külbitörlü makinalara monte edilebilir; ancak elektroda doğrudan bağlanarak daha iyi sonuçlar elde edilir ve büyük kaynak makinelerinin çoğu ara yüzeyde basınç elde etmek için bu yöntemi kullanır.



Şekil 2.9 Hidrolik basınç silindiri ile donatılmış büyük nokta kaynağı makinesi (Gourd,1996).

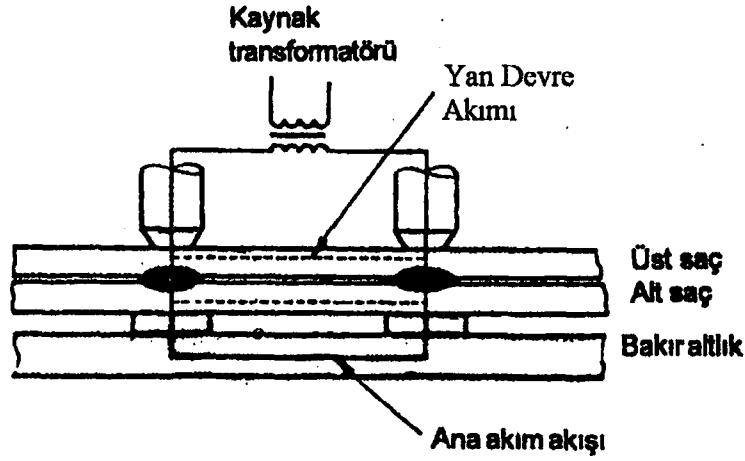
Taşınabilir üniteler otomotiv endüstrisinde geniş ölçüde kullanılmaktadır. Transformatör kaynak tabancasına yerleştirilir veya uzakta bir yere monte edilir. İkinci çözüm tabancayı daha hafif yapmakla birlikte, bu sekonder devredeki kayıplardan kaçınmak için elektrot kollarına gelen kabloların büyük olacağı anlamına gelir. Küçük tabancaların çoğunda elektrotlara kuvvet uygulamak için elle çalışan manivela kolu kullanılır (Şekil 2.10). Daha büyük üniteler ve özellikle tekrarlanan işlerde kullanılanlar daha yüksek basınçların uygulanabilmesi ve operatörün yorulmaması için pnömatik silindirlerle donatılmıştır.



Şekil 2.10 Transformatörle donatılmış taşınabilir küçük tabanca (Gourd,1996).

Birçok kutu tipi üretimde elektrotları bağlantının sadece bir yüzüne temas ettirmek mümkün olur, diğer yüzüne mümkün olmaz. Genelde bu sınırlama geleneksel direnç nokta kaynağının

kullanılmayacağı anlamına gelir. Ancak öbür yüzeye bir bakır çubuğun yerleştirilebileceği durumlarda seri kaynak adı verilen bir teknikle kabul edilebilir kaynakların elde edilmesi mümkündür (Şekil 2.11).

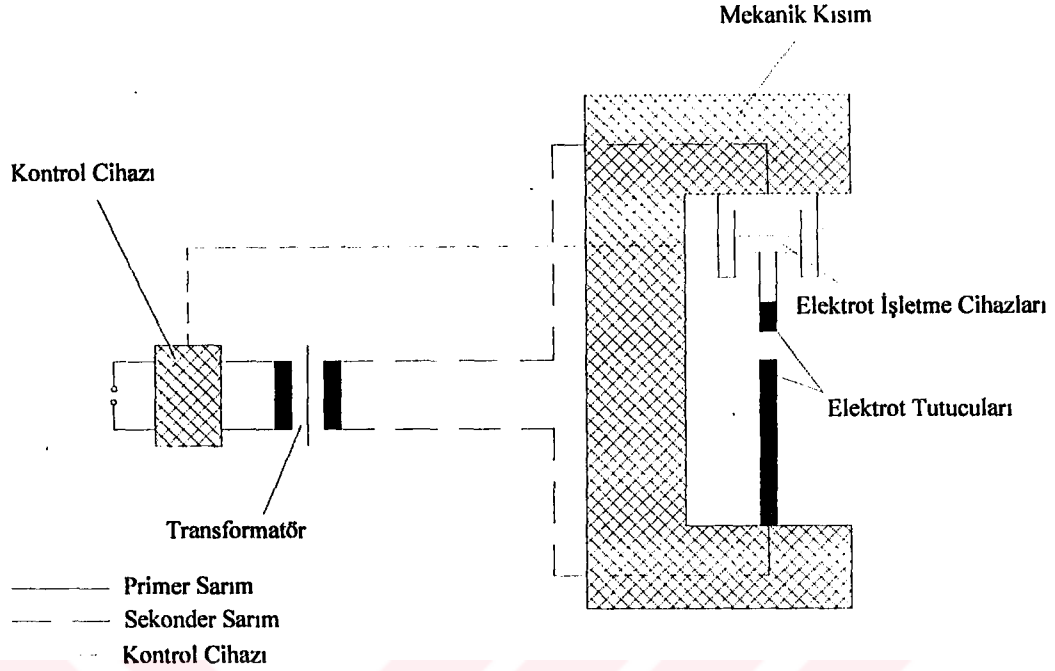


Şekil 2.11 Seri kaynağın şematik diyagramı (Gourd,1996).

Bu yöntemle iki elektrot birbirinden 50 ila 150 mm uzaklıkta yerleştirilir ve sacları bakır altlık çubuğuna bastıran bir kuvvet uygulanır. İdeal olarak akım bir elektrottan saclara geçerek buradan altlık çubuğu boyunca akar ve saclar yoluyla geri dönerek ikinci elektroda ulaşır. Böylece ara yüzeyde ısınmanın meydana geldiği iki nokta vardır ve aynı zamanda iki kaynak noktası gerçekleştirilir. Pratikte, akımın bir kısmı üst sac boyunca akarak ara yüzeyden geçen akım miktarını önemli derecede azaltır. Bunu karşılamak için ilave akım sağlanmalıdır. Bu nedenle seri kaynak için gerekli güç, geleneksel nokta kaynağındakinden fazladır (Gourd,1996).

2.4.1 Kaynak Makinası Sistemleri

Nokta direnç kaynağında kullanılan makineler otomasyon derecesine bağlı olarak basit-ucuz veya kompleks-pahalı olabilir. Kaynak makinası sistemleri üç kısma ayrılabilir. Bunlar; elektrik devresi, kontrol cihazı ve mekanik kısımdır.



Şekil 2.12 Kaynak makinası sistemlerinin şematik gösterimi (ODTÜ KTM,1998).

2.4.1.1 Elektrik Devresi

Nokta direnç kaynağı makinaları mono veya trifazlı şebekeden alınan alternatif akımı, 2-20 V gibi düşük bir gerilime indirirler. Makinanın mono veya trifazlı olarak seçiminde; makinanın kapasitesi, ilk yatırım, işletme ve bakım masrafları göz önüne alınır. Mono fazlı makinalar, trifazlı makinalara göre daha çok kullanılırlar. Daha basit ve ucuzdurlar (ASM,1989).

Monofazlı makinalar, elektrik şebekesinden yüksek güç çekerler. Çalışma esnasında dengesiz olarak çekilen bu güç, şebekedeki diğer cihazları etkileyebilir. Mono fazlı makinalar, daha düşük çalışma faktörüne sahiptirler. Mono fazlı makinalarda bu değer %50 civarında iken, trifazlı makinalarda %85'ler mertebesindedir. Bu nedenle trifazlı makinaların şebekeden çektikleri güç daha azdır. Ayrıca dengesiz güç kullanımı da indirgenmiştir. Ancak trifazlı makinalar, ince sacların kaynağı için uygun değildir.

Kaynak transformatörü, yüksek gerilimdeki şebekeden alınan gücü, düşük gerilimdeki yaklaşık eşdeğer bir güce çevirir. Bir transformatör devresi esas olarak; bir manyetik devre, şebekeye bağlanmış primer sargı ve elektrotlara kaynak için gerekli gücü sağlayan sekonder sargıdan ibarettir. Transformatör, ince silisyumlu saclardan kesilerek üst üste dizilmiş sac

paketidir. Bu kısma çekirdek denir. Çekirdeğin üzerinde bakır ve alüminyum tel sargılar sarılmıştır.

Sekonder devre, yüksek değerdeki kaynak akımını transformatörden elektrotlara dolayısıyla kaynak edilecek saclara iletir. Sekonder devrenin voltajı 5-20 V arasındadır. Yeterli kaynak akımı elde edebilmek için sekonder devre direncinin mümkün olduğunca küçük olması gerekir. Bu nedenle sekonder kabloların açık ve gereğinden fazla olmamasına, ek veya birleşim yerlerinin temiz olmasına özen gösterilmelidir.

Bir kaynak makinası çok değişik kalınlıklardaki sacları kaynak etmek için kullanılır. Bu durum kullanılan kaynak akımının şiddetinin ayarlanabilir olmasını gerektirir. Kaynak akımının ayarlanmasında kullanılan yollardan biri de primer devrenin sargı sayısının değiştirilmesidir. Bunun için primer devre üzerine bir ayar anahtarı yerleştirilir. Bu anahtar çevrilerek, primer devredeki sargı sayısı değiştirilebilir.

2.4.1.2 Kontrol Cihazı

Bu cihaz, kaynak akımının başlatılmasını, işlemlerin sürelerinin belirlenmesini ve bu işlemlerin belirli bir sıra içerisinde gerçekleşmesini sağlar. Ayrıca yukarıda bahsedilen primer sargı sayısını değiştirme anahtarı yerine veya beraberce kaynak akımının şiddetinin ayarlanmasında kullanılabilir. Kontrol cihazları üç ana gruba ayrılabilir:

1- Kaynak Kontakları: Bu kontaklar elektrik güç devresinin açılıp kapanmasını sağlarlar. Genel olarak primer devre üzerindedirler. Kaynak makinalarında; mekanik, manyetik ve elektronik olmak üzere üç tip kontak kullanılabilir.

Mekanik kontaklar daha çok, küçük kapasiteli makinalarda kullanılır. Kontak, ayak pedalı veya motor ile döndürülen bir kam ile kontrol edilir. Manyetik kontaklar ise, bir elektromıknatıs vasıtasıyla elektrik kontağını kaparlar. Elektromıknatısın devresi açılınca kaynak kontağı da bir yay vasıtasıyla açılır. Mekanik ve manyetik kontaklar oldukça büyük boyutludurlar. Ses yapmaları ve kutuplarını çabuk aşınması dezavantajlarıdır. Bu tür kontaklar günümüzde pek kullanılmamaktadır.

Elektronik kontaklarda, Ignitron tüpü, Thyration tüpü gibi elektron lambaları ve tristörler kullanılır.

2- Zaman Ayar Cihazları: Kaynak işlemlerinin birbiri ardına devam etmesini ve bu işlemlerin sürelerinin ayarlanmasını sağlar. Bunlar, senkronize veya non-senkronize olmak üzere iki tiptirler. Bütün kaynak çevrimleri için gerekli olan 4 ana işlem zamanının (yaklaşma, kaynak, tutma, ayrılma zamanları) ayarlanmasında kullanılırlar. Bu işlemler şöyle sıralanabilir:

- Elektrotların kapanması ve kuvvet uygulanması.
- Kaynak akımının başlatılması.
- Kaynak akımının kesilmesi ve elektrot kuvvetinin uygulanmaya devam edilmesi.
- Elektrotların ayrılması.

3- Akım Kontrol ve Ayarlayıcıları: Primer devre üzerindeki sargı sayısı değiştirme anahtarı, kaynak akımının ana ayarı için kullanılır. Ara veya hassas ayarlar için elektronik faz kaydırma cihazları kullanılır. Bu cihazlar, senkronize tip zaman kontrol cihazları kullanıldığı takdirde standart bir ekipman olup non-senkronize sistemlere ise sonradan eklenebilir.

2.4.2 Elektrot Taşıyıcıları

Elektrotlar, kaynak makinalarının kollarına taşıyıcıları vasıtasıyla bağlanırlar. Taşıyıcılar, elektrotların parçalara göre pozisyonlarının ayarlanmasını sağlarlar. Elektrotun takılacağı kısım, kullanılacak elektroda uygun olarak konik yapılmıştır. Taşıyıcılar, elektrik iletkenliği yüksek ve darbelere dayanıklı malzemelerden yapılırlar.

2.5 Elektrotlar

Kaynak edilecek parçaya elektrik akımını aktaran sekonder devrenin en uçtaki elemanlarıdır. Elektrotların gördüğü işlevleri şöyle sıralamak mümkündür:

- Kaynak edilecek metallere elektrik akımını taşımak.
- Kaynağın yapıldığı noktada, kaynak edilen metaller üzerinde gerekli kuvveti tatbik etmek.
- Kaynak edilen levha yüzeylerinden ısının hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamak.

2.5.1 Elektrot İmalinde Kullanılan Malzemeler

Elektrot üretiminde kullanılan malzemelere aşağıdaki özellikleri taşınmalıdır:

- Elektrotun kaynak edilen metal ile alayım oluşturmamalıdır.
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olmalıdır.
- İşlem sıcaklığı ve kuvvetinde deformasyona uğramaması için yeteri kadar dayanıklı olmalıdır.
- Ani sıcaklık değişimlerine uygun dayanımı sağlamalıdır.
- Yeterli sertliğe sahip olmalıdır ve yüksek sıcaklıklarda elektrot sertliğini kaybetmemelidir.

Yapılacak çalışmaya bağlı olarak seçilecek-alaşımlarda son sertlik, genellikle ısıl işlemlerle elde edilir. Elektrot malzemeleri şu şekilde gruplandırılmıştır (ASM,1989).

- A-grubu: Bakır alaşımları.
- B-grubu: Refraktör metal bileşimleri.
- Özel alaşımlar.

A - grubu: Bakır alaşımları

Üç gruba ayrılırlara:

- Sınıf 1: Bileşimi 1% kadmiyum ve %99 bakır olan alaşımların oluşturduğu gruptur. Bu tür elektrotlar yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Bakır-kadmiyum alaşımlarının elektrik iletkenliği, elektrolitik bakıra göre %88-95 arasında değişir. Isıl işlem uygulanmaksızın; sertleştirme ve dayanıklılık, soğuk haddeme işlemi ile elde edilir. Böylece malzemenin yüksek ısı ve elektrik iletkenliği etkilenmemiş olur. Bu alaşım; çubuk veya kütük şeklinde çekilebildiği gibi yassı çubuk veya levha haline de getirilebilir, dövülebilir. Bu sınıf elektrotlar; kalay, çinko, kalay-kurşun alaşımı ile kaplanmış düşük karbonlu çelikler, sıcak haddelenmiş düşük karbonlu çelikler, alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi metallerin kaynağında kullanılırlar.
- Sınıf 2: Bu sınıfı, bileşimi %0,8 krom ve geri kalanı bakır olan alaşımlar meydana getirir. Bu sınıftaki malzemeler; birinci sınıfı göre daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Ancak, ısı ve elektrik iletkenliği daha düşüktür. Optimum mekanik ve fiziksel özellikler, ısıl işlemle veya ısıl işlem ve soğuk haddemenin kombinasyonu ile sağlanır. Bu tür malzemeler, genel amaçlı elektrotların yapımında kullanılır. Bu malzeme; çubuk veya kütük şeklinde çekilebilir, yassı çubuk veya levha haline getirilebilir, dövülebilir ve dökülebilir. Kullanılma yerleri çok geniştir. Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çeliklerin, yüzeyi asit ile temizlenmiş düşük karbonlu çeliklerin, silikon-bronz ve nikel, gümüş gibi bakır alaşımlarının nokta kaynağında kullanılabilir.
- Sınıf 3: Bileşimi %0,5 berilyum, %1 kobalt ve geri kalanı bakır olan alaşımlardan oluşur. Bazen %1 nikel olabilir. Sınıf 1 ve Sınıf 2'ye göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmasına karşın, daha düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Bu tür malzemeler sertleştirilebilir. Yüksek sertliğe, iyi aşınma direncine, yüksek tavlama sıcaklığına sahip olması nedeniyle yüksek mukavemetli metallerin ve elektrot basıncının fazla olduğu kaynak işlemlerinde kullanılmaktadır. Bunlar örnek olarak; yüksek karbonlu

çelikler, paslanmaz çelik, gibi alaşımlar verilebilir. Bu tür malzemeler, çubuk veya kütük şeklinde çekilebilir, yassı çubuk haline getirilebilir, dövülebilir ve dökülebilir.

B-grubu: Refraktör metal bileşimleri

Tungsten, molibden gibi erime noktası yüksek metaller, refraktör metal olarak adlandırılırlar.

B-grubu; 10,11,12,13 ve 14 olmak üzere beşe ayrılmaktadır.

Bu elektrot malzemeleri; yüksek ısı, uzun kaynak zamanı, uygunsuz soğutma veya yüksek elektrot kuvveti gibi sebeplerle bakır esaslı elektrotların kısa zamanda bozunması durumunda kullanılırlar. Elektrot malzemesinin seçimi yapılırken; elektrot dizaynı, kaynak edilecek parçalar, karşı elektrot tipi ve nokta kaynak makinasının tipi ayrı ayrı göz önüne alınmalıdır.

Bakır alaşımları kaynak edilirken; bakır alaşımı ile temas eden elektrot B-grubundan, çelik ile temas eden elektrot ta A-grubunun Sınıf 1 veya Sınıf 2'sinden seçilmelidir.

- Sınıf 10: Bu malzeme yüksek erime noktasına sahip, bakır-tungsten alaşımıdır. Bu türde, bakır alaşımlarının sahip olduğu yüksek elektrik ve ısı iletkenliği özelliği ile refraktör malzemelerin sahip olduğu yüksek sertlik ve dayanıklılık özelliği bir araya getirilmiştir.
- Sınıf 11: %42 bakır ve %58 tungsten içeren refraktör metal olup, yüksek sertliğe sahiptir. Ancak elektrik iletkenliği Sınıf 10'a göre daha düşüktür. Elektrik direnci yüksek demir esaslı malzemelerin, örneğin paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılır.
- Sınıf 12: Bakır-tungsten esaslı metal olup Sınıf 11'e göre daha yüksek sertliğe ve daha düşük elektrik iletkenliğine sahiptir.
- Sınıf 13 ve 14: Sırasıyla alaşımsız tungsten ve molibden'den meydana gelmişlerdir. Bakır alaşımlı parçaların, düşük karbonlu çelikler ile kaynağında kullanılırlar.

Çizelge 2.4 A grubu elektrot malzemelerin özellikleri. (ASM,1989).

Elektrot çapı veya kalınlığı (mm)	Elastik limit (MPa)			Rockwell B sertliği			Elektrik iletkenlik %IACS (b)			Çekme dayanımı (MPa)			Uzama yüzdesi, (c)		
	Sınıf 1 (a)	Sınıf 2 (a)	Sınıf 3 (a)	Sınıf 1 (a)	Sınıf 2 (a)	Sınıf 3 (a)	Sınıf 1 (a)	Sınıf 2 (a)	Sınıf 3 (a)	Sınıf 1 (a)	Sınıf 2 (a)	Sınıf 3 (a)	Sınıf 1 (a)	Sınıf 2 (a)	Sınıf 3 (a)
Yuvarlak çubuk															
<25,4	120	241	345	65	75	90	80	75	45	414	448	690	13	13	9
25,4-50,8	103	207	345	60	70	90	80	75	45	379	407	690	14	13	9
50,8-76,2	103	172	345	55	65	90	80	75	45	345	379	655	15	13	9
Dörtgen veya altıgen çubuk															
<25,4	138	241	345	55	70	90	80	75	45	414	448	690	13	13	9
>25,4	103	172	345	50	65	90	80	75	45	345	379	690	14	13	9
Dövme çubuk															
<25,4	138	152(d)	345	55	65	90	80	75	45	310	379	648	12	13	9
25,4-50,8	103	145(d)	345	50	65	90	80	75	45	276	379	648	13	13	9
>50,8	103	138(d)	345	50	65	90	80	75	45	276	379	648	13	13	9
Döküm çubuk															
Tümü	....	138	310	....	55	90	....	75	45	....	310	586	....	13	5

(a) Normal bileşimleri; Sınıf 1: Bakır esaslı %1 Cd, Sınıf 2: Bakır esaslı %0,8 Cr, Sınıf 3: Bakır esaslı %0,5 Be, %1 Ni ve/veya %1Co .

(b) IACS: International Annealed Copper Standart .

(c) 50,8 mm uzunluğundaki veya çapının dört katı uzunluğundaki deney parçası .

Çizelge 2.5. B grubu elektrot malzemelerinin özellikleri (ASM,1989).

Sınıf (a)	Rockwell Sertliği	Elektrik İletkenliği % IACS, (b)	Basma Dayanımı (Mpa)
10	B 72	35	930
11	B 94	28	1103
12	B 98	27	1172
13	A 69	30	1379
14	B 85	30	....

(a) Sınıf 10,11,12: Bakır-tungsten alaşımları; Sınıf 13: Alaşımsız Tungsten; Sınıf 14: Alaşımsız Molibden.

(b) IACS: International Annealed Copper Standart.

Özel alaşımlar:

Özellikleri, Sınıf 1 ve Sınıf 2 malzemelerine benzer. Bakır-zirkonyum ve bakır-kadmiyum-zirkonyum alaşımlarıdır. Çinko, alüminyum, kalay-kurşun alaşımı ve kadmiyum ile kaplanmış çeliklerin kaynağı için uygun elektrot malzemeleridir.

Sınıf 1'in kullanıldığı, elektrot yüzeyinin yüksek sıcaklığa dayanımının daha fazla olması gereken kaynak işlemlerinde bakır-zirkonyum alaşımları kullanılabilir.

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki; elektrot aşınmasında esas faktör sıcaklığın sertlik üzerindeki tesiridir.

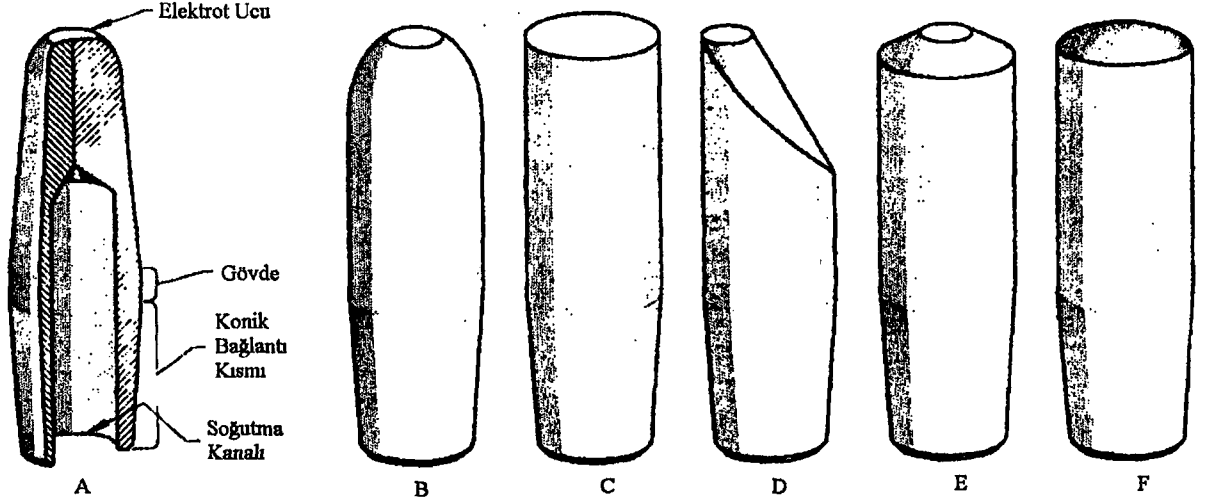
2.5.2 Elektrot Dizayını

Elektrot dizaynında; elektrotun dört yapısal özelliğinden söz etmek gerekir. Bunlar; elektrot ucu, gövdesi, elektrot taşıyıcıya bağlantı şekli ve soğutma sistemi olarak sayılabilir. Elektrotların soğutma delikleri ya dairesel ya da yiv açılmış şekildedir. Yiv açılmış delikler, dairesel deliklere göre daha büyük bir soğutma alanı sağlarlar. Soğutma deliği, elektrotun mukavemetini azaltmayacak şekilde mümkün olduğu kadar elektrot ucuna yakın olmalıdır. Şekil 2.13'de çeşitli elektrot tipleri görülmektedir.

A tipi elektrotlar, tam çaptaki ucun çok büyük olduğu hallerde kullanılırlar. D tipi elektrotlar, köşelerde ve yukarı doğru kıvrılmış kenarlarda kullanılırlar.

F tipi olanlar ise, kaynak edilecek parçalara dik olarak basmanın zor olduğu durumlarda uygundur. Kötü merkezlemeden kaynaklanabilecek hataları gidererek, parçaların birbirine en iyi biçimde temasını sağlarlar. Elektrot uç formunu oluşturan kürenin yarıçapı, kaynak edilecek sacın kalınlığına ve yapısına bağlıdır.

Elektrot uçları, kaynak edilecek metaller ile yüksek sıcaklıklarda temas halindedir. Elektrotlar, kaynak edilecek metallerin erime sıcaklıklarında basınca maruz kalırlar. Bu bakımdan elektrot malzemesinin seçiminde, elektrotun alaşımlanması, kaynak edilen metaller üzerinde çökmesi durumunda maruz kalacağı deformasyonlar göz önüne alınmalıdır.



- A: Sivri uçlu elektrot
 B: Kesik küresel uçlu elektrot
 C: Düz uçlu elektrot.
 D: Eksantrik elektrot.
 E: Kesik koni uçlu elektrot.
 F: Küresel uçlu elektrot.

Şekil 2.13 Standart elektrot şekilleri (ASM,1989).

Elektrot uçlarının boyutları; kaynak çekirdeğinin boyutu, kaynak edilecek metallerinin kalınlığı, şekli ve boyutları ile belirlenir. Elektrot ucunun çapı çok küçük olursa, elde edilen nokta kaynağı zayıf olabilir. Ufak çaplı elektrotlar, aşırı ısı yoğunluğuna ve yüzeylerde izlere neden olabilirler. Büyük çaplı elektrotlar ise; yüksek kaynak akımlarında yetersiz elektrot basıncı nedeniyle boşluklara veya kötü yüzey görünümlerine neden olabilirler.

A,B,D ve E tipi elektrotlar için uç çapları şu formüllerden biriyle hesaplanabilir (ASM,1989):

$$\text{Uç çapı (mm)}, \quad d_{uc} = 2,54 + 2.s \quad (2.3)$$

$$\text{Uç çapı (mm)}, \quad d_{uc} = 2.54 + 1,5.s \quad (2.4)$$

s : Elektrot uçları ile temas eden sacın kalınlığı (mm).

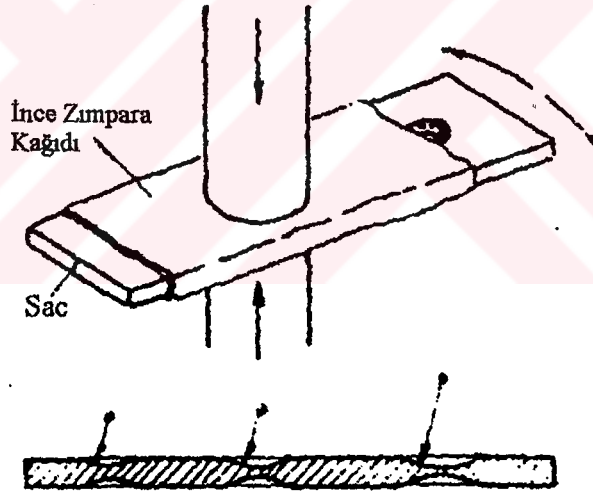
Şekil 2.13'de görülen elektrotlar, her uygulamada kullanılmayabilir. Kare, dikdörtgen, dişli veya erkek uçlu özel elektrotlar da mevcuttur.

2.5.3 Elektrotların Bakımı

Elektrot uçlarının şekli, boyutları ve yüzey şartları kaynak kalitesi açısından çok önemlidir. Elektrot uçları, mekanik aşınmaya ve deformasyonlara maruz kalarak mantar şekli alabilirler. Bozulma hızları; elektrotun malzemesine, şekline, kaynak sıcaklığına, elektrot kuvvetine, ısınma-soğuma hızlarına göre değişir.

Kaynak edilen parçalara ile elektrot malzemesinin alaşımlanması, elektrot ucunun bozulmasını hızlandırır. Örneğin; bakır alaşımlı elektrotlar, kalay, çinko veya alüminyumun kaynağında kullanıldığında kolaylıkla alaşımlanır ve elektrotun aşınması hızlı olur.

Aşınmış çap, ilk çapın 1/3'ü oranında arttığı takdirde elle veya elektrot frezesiyle tekrar elektrot ucu açılmalıdır. Zayıf ve tutmamış, düzgün olmayan ve girintili kaynak noktaları; yanma veya metalin renk değiştirmesi; elektrotun kaynak edilen parçalar üzerine çökmesi gibi hatalara meydan vermemek için elektrot uçlarının sürekli kontrol edilmesi, düzeltilmesi ve gerekirse değiştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.14 Elektrot uçlarının temizlenmesi (Anık,1960).

2.5.3.1 Elektrot Değişiminde Dikkat Edilecek Durumlar

- Elektrot değişikliği yapılacak kaynak makinası (kaynaksız) konumuna alınır.
- Soğutma suyu giriş ve çıkış vanaları kapatılır.
- Değişecek elektrot çapına göre sökme aparatı seçilerek elektroda yerleştirilir, elektrot alt ve üst koldan ayrılır. Bu işlem sırasında elektrotu sökmek için taşıyıcıya çekiç vb malzemelerle vurmak, malzeme yapısını ve şeklini bozar, maliyeti artırır.
- Taşıyıcı içerisindeki spiralın tıkalı, ezik, deforme olup olmadığı ve boyu kontrol edilir.

- Penste göbek boşluğu olup olmadığı kontrol edilir.
- Yeni elektrotlar takılarak, alt ve üst elektrotların birbirini karşılayıp karşılamadığı kontrol edilir. Eğer karşılamıyorsa uçları aşarı tesviye edilmez. Pens kolları ayarlanır. Gerekliyorsa pensin eksen aralığı kontrol edilir.
- Elektrot ve koldaki konikler birbiriyle tam birleşmeden sıkma işlemi yapılmaz.
- Tüm işlemler bittikten sonra soğutma suyu açılır, makine (kaynaklı) konumuna getirilir.

2.6 Nokta Direnç Kaynağında Isıyı Etkileyen Faktörler

Nokta direnç kaynağı makinalarının sekonder devreleri, kaynak edilecek parçalar dahil olmak üzere, bir seri dirençten meydana gelmiştir. Herhangi bir noktada meydana gelen ısı, doğrudan o noktadaki direnç ile ilgilidir. Kaynak edile parçalarda ve elektrotlarda ısının meydana gelişi ve dağılımı Şekil 2.2'de görülmektedir. Bu ısı dağılımı; kaynak edilen metal ile elektrotların ısı iletkenlikleri, elektrot şekli, boyutları ve soğutma hızına bağlı olarak değişmektedir.

İki metalin kaynağında, yedi adet direnç seri halde birbirine bağlanmıştır (Şekil 2.2):

a- Üst elektrot

b- Üst elektrot ile kaynak edilecek üst parça arasındaki temas yüzeyi

c- Üst parça

d- Kaynak edilecek üst parça ile alt parça arasındaki temas yüzeyi

e- Alt parça

f- Alt elektrot ile kaynak edilecek alt parça arasındaki temas yüzeyi

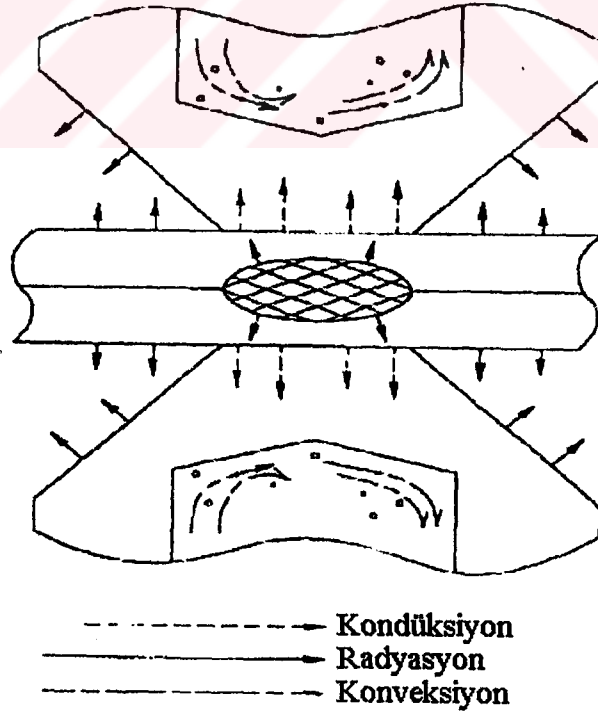
g- Alt elektrot

Bu noktaların her birinde, o noktanın direnci ile orantılı olarak ısı meydana gelir. En fazla ısının kaynak edilecek parçaların temas yüzeylerinde olması gerekmektedir. Diğer noktalarda meydana gelecek ısının azaltılması gerekmektedir. Şekil 2.2'de kaynak işleminin başlangıcında, bütün parçaların sıcaklıkları başlangıç sıcaklığı hattı ile belirtilmiştir. Sıcaklık, direncin en yüksek olduğu kaynak edilen parçaların temas yüzeylerinde (d noktası) hızla artar. Bu noktadan sonra en yüksek dirence sahip olan noktalar b ve f'dir. Bu noktalarda meydana gelen ısı, a ve g noktalarında su ile soğutulan elektrotlar vasıtasıyla uzaklaştırılır. Dolayısıyla b ve f noktalarında sıcaklık artışı, d noktasına göre daha az bir hızla artar.

Şekil 2.2’de görülen içteki eğri, kaynak zamanının %20’sinin sonundaki sıcaklık dağılımını; dıştaki eğri ise kaynak işleminin bitimindeki ısı dağılımını göstermektedir. Kaynak işlemi boyunca, d noktasının çevresindeki noktalar gerekli sıcaklığa eriştiğinde erimiş metal bölgeler oluşur ve bunlar genişleyerek kaynak çekirdeğini meydana getirirler.

Çeliğin ısı iletkenliği, bakırinkinin yaklaşık %12’si kadardır. Dolayısıyla bakır esaslı elektrotlar ile yapılan kaynak işleminde, kaynak edilecek parçaların temas yüzeylerinde meydana gelen ısının o noktadan uzaklaşması, elektrot yüzeylerinde oluşan ısının su ile soğutulan elektrotlara geçişinden daha yavaş olacaktır. Böylece, önce kaynak edilecek parçaların ara yüzeyi erime sıcaklığına erişir ve kaynak bu noktada meydana gelir.

Kaynak akımı, transformatörün sekonder sargısı, sargıyı kollar bağlayan elastik kablolar, elektrotlar ve kaynak edilecek parçalardan geçerek, devrenin her kısmında ısı meydana getirir. Meydana gelen ısının bir kısmı, elektrotlardan ve kaynak edilecek parçalardan radyasyon ve konveksiyon yolu ile taşınır. Nokta direnç kaynağında meydana gelen bu kaybın oranı yaklaşık olarak %80-90 arasındadır (ODTÜ KTM, 1998).



Şekil 2.15 Nokta direnç kaynağındaki ısı kayıpları (1).

2.6.1 Kaynak Akımı

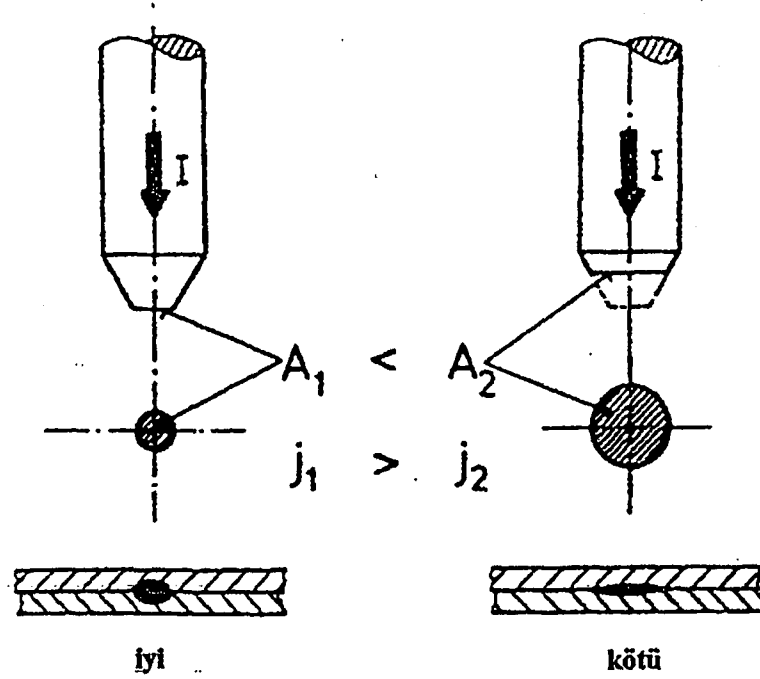
Erimenin olmadığı bir alt akım yoğunluğu sınırı vardır. Bu sınırdaki akım yoğunluğu; kondüksiyon ile elektrotların içine, havaya ve parçada kaynak edilen noktanın dışındaki kısımlara olan ısı kayıplarını karşılayabilecek kadar ısı meydana getirmelidir.

Eğer kaynak akımı çok yüksek ise kaynak bölgesi erime sıcaklığına erişir ve kaynak edilen bölgede plastik saha parça yüzeyine kadar çıkar. Bunun sonucunda elektrotlar, plastik bölgeye kadar ısıtılmış parça yüzeylerine gömülür.

Elektrotların yüzeyleri aşırı ısınabilir ve yanabilir. Elektrot kuvveti ile akım yoğunluğu da birbiriyle yakından alakalıdır. Eğer akım yoğunluğunun üst sınırı aşılsa elektrotlar kaynak edilen metale gömülür, metal yüzeyinden sıcak metal tanecikleri sıçramaya başlar ve dolayısıyla kaynak kalitesi düşer.

Nokta kaynağının maksimum direnci, metal yüzeyinden sıcak metal tanecikleri sıçramasına neden olan, maksimum akım şiddetinin hafifçe altındaki akım yoğunluklarında elde edilir.

Elektrotun temas düzlemi büyüdükçe, akım yoğunluğu ve kaynak ısısı, dolayısıyla da, kaynağın boyutu ve dayancı düşer. Deforme olarak temas alanı genişleyen elektrotlar veya başlıkları kaynak kalitesinde bozulmalara sebep olur. Bu nedenle elektrotlar, kaynak ısısında ve dolayısıyla da kaynak kalitesinde azalmaya sebep olmamaları için, belirli süre kullanıldıktan sonra değiştirilmelidir. Akım yoğunluğu arttıkça nokta çapı ve dayancı artar. Ancak aşırı akım yoğunluğu da fişkırmaya sebep olur, gözenek oluşumu ve dayanç düşmesi gerçekleşir. Şekil 2.16'da akım yoğunluğunun azalışı ile çekirdek çapının artmasına rağmen mercekle formundan uzaklaşmayı ve istenmeyen çekirdek şeklinin eldesi görülmektedir.



- | | |
|----------------------|--|
| I. | = Toplam akım (A) |
| A_1 ve A_2 | = Elektrotların temas düzlemleri (mm^2) |
| J_1 ve J_2 | = A_1 ve A_2 deki akım yoğunlukları (A/mm^2) |
| d_{k1} ve d_{k2} | = Elektrot temas düzlemlerinin çapları (mm) |
| s | = Sac kalınlığı (mm) |

Şekil 2.16 Akım yoğunluğu ile temas yüzeyi arasındaki ilişki (ODTÜ KTM,1998).

2.6.2 Elektrot Bileşimi ve Şekli

Elektrotlar, elektrot ısısını en ufak düzeyde tutabilmek için yüksek elektrik iletkenliğine, düşük temas direncine ve yüksek ısı iletkenliğine sahip olmalıdır. Ayrıca tekrarlı yüksek kaynak kuvvetlerinin neden olduğu deformasyonlara dayanabilecek kadar dirençli olmaları gerekir.

Genelde alaşım sertliği arttıkça ısı ve elektrik iletkenliği azalmaktadır. Dolayısıyla en uygun alaşımın seçiminde; elektriksel, ısıl ve mekanik özelliklerin kombinasyonu dikkate alınmalıdır. Saf bakır, mükemmel bir elektriksel iletkenliğe sahip olmasına karşın tavlama sıcaklığının ve sıkıştırma kuvvetlerine karşı direncinin düşük olması nedeniyle elektrot malzemesi olarak tek başına kullanılamaz.

Kaynak çekirdeğinin çapı, yaklaşık elektrotun temas yüzeyinden biraz küçüktür. Elektrotun ucu aşındıkça veya mantarlaşıma nedeniyle büyüdükçe, kaynak çekirdeğinin çapı artar. Uç çapının büyümesiyle akım yoğunluğu azalacak ve açığa çıkan ısı iyi bir kaynak meydana getirmeye yeterli olamayacağı için kaynak kalitesi etkilenecektir.

2.6.2.1 Farklı Metallerin Kaynağında Elektrot Tipleri

Aynı bileşimde ve aynı kalınlıktaki parçaların nokta kaynağında, karşı elektrotların uç çapları eşit olmalıdır. Eğer kaynak edilecek parçaların kalınlıkları farklı ise kalın parça ile temas edecek elektrotun uç çapının, uygun ısı dengesini sağlayabilmesi amacıyla, diğerine göre daha büyük olması gerekebilir. Farklı metallerin kaynağında, eğer metallerden birinin elektriksel direnci diğerinden büyük ise aynı durum geçerlidir. Bu farklılık, yüksek dirençli parça ile temasta olan elektrotun uç çapının artırılarak veya düşük dirençli parça ile temasta olan elektrot için yüksek dirençli malzeme kullanılarak giderilebilir (ASM,1989).

2.6.3 Elektrot Kuvveti

Kaynak edilecek parçalar, kaynak edilmek istenen noktadan akım geçmesini sağlamak için iyi bir şekilde temas etmelidir. Bununla beraber elektrot kuvveti, kaynak edilecek metallerin temas direncini azaltır. Aşırı elektrot kuvveti, kaynak akımının temas yüzeylerinde meydana getireceği ısıyı azaltacaktır. Elektrot kuvvetinin artması veya azalması, parçalar arasındaki direnç ve dolayısıyla oluşan ısıda değişikliklere neden olacaktır.

Parçalar birbiri ile iyi temas sağlayamıyorsa, elektrot kuvveti yüksek seçilebilir. Bazen, parçaları sıkı temasa getirmek için yaklaşma zamanı normalden daha uzun tutulur.

Parçaların yaylanmasına engel olarak kaynak noktasının katılaşmasını sağlamak için tutma zamanı da uzatılabilir. Yüksek mukavemetli çeliklerde geri yaylanma, normal karbonlu çeliklere göre daha fazla olduğundan dolayı, kaynak metalinin katılaşması için tutma zamanı yeteri kadar uzun olmalıdır.

2.6.4 Kaynak Zamanı

Kaynak edilecek parçaların temas yüzeyleri arasında açığa çıkan ısı zaman ile doğru orantılıdır. Oluşan ısıya bağlı olarak, uygun bir zaman diliminde uygun boyutlarda kaynak çekirdeği meydana gelmektedir. Aksine, kaynak akımın uzun tutulması neticesinde, birleştirilecek parçaların temas yüzeyleri de plastik sahaya geçecek ve uygun olmayan kaynak kalitesi elde edilecektir.

Kaynak akımı, yaklaşma basıncı ve ezme basınçları artırılarak kaynak zamanı bir miktar azaltılabilir. Kaynak akımı arttırıldığı takdirde, kıvılcım sıçramasını önlemek için yaklaşma basıncı arttırılmalıdır. Kaynak katılaşmaya kadar parçaları sıkı bir temasta tutmak için ezme basıncı ve bu basıncın meydana geliş hızını da arttırmak gerekir.

2.6.5 Kaynak Edilecek Parçaların Yüzey Durumları ve Kaplı Çelikler

Kaynak edilecek parçaların yüzey durumlarının da ısı üretimi üzerinde etkisi vardır. Yüzeyin işleme tarzı, oksit, yağ veya pislik tabakası da ısıyı etkiler. Bunun yanında kaplamanın da etkisi göz ardı edilmemelidir.

2.6.5.1 Yüzey durumları

Yüksek kalitede ve tekrarlanabilir nokta kaynakları elde edilebilmesi için elektrotların temas dirençleri düşük tutulmalıdır. Düşük elektrot temas direnci, temiz parçalar kullanılarak ve elektrot kuvveti kontrol edilerek sağlanır.

Gerçekte, metal sacların yüzeyleri muntazam bir şekilde düzgün değildir. Elektrot basıncı uygulandığında, metaller arası gerçek temas yüzeyi, bütün temas eden kısımların ufak bir yüzdesidir. Elektrot kuvveti arttırıldıkça metaller arası gerçek temas alanı artar ve böylece elektrik direnci azalır. Kaynak edilecek parçalar arasındaki temas direnci, elektrot kuvveti ile ters orantılıdır. Direncin düşmesiyle, oluşacak ısı değeri de düşecektir (ASM,1989).

Kaynak edilecek parçaların temas yüzeyleri temizlenmelidir. Böylece elektrotların kullanma ömürleri artar. Bunun yanında, elektrotlarla temasa geçebilecek istenmeyen maddeler, pas ve oksit tabakaları kaynak noktasının yüzey görünümünü bozar. İstenmeyen maddeler veya yağ tabakaları kimyasal banyolarla veya silme ile uzaklaştırılabilir. Oksit filmleri ise mekanik yollarla uzaklaştırılır.

Soğuk haddelenmiş yüzeyler veya asit ile temizlenmiş sıcak haddelenmiş ve yağlanmış yüzeyler üzerindeki ince yağ filminin kaynak kalitesi üzerinde etkisi oldukça küçüktür. Bu konuda yapılan testler, üzerinde ince bir yağ filmi bulunan metaller üzerinde yapılan nokta kaynaklarının dayanımlarının, aynı metallerin yağı alındıktan sonra yapılanlara göre 2-3% daha düşük olduğunu göstermiştir. Genelde parçaların üzeri, depolama ve taşınma esnasında korozyonu önlemek için ince bir yağ tabakası ile kaplıdır. Ancak parça yüzeyleri üzerindeki ince yağ tabakası üzerine yapışan istenmeyen maddeler zayıf kaynakların elde edilmesine neden olur. Nokta kaynağı işleminden sonra saclar korozyondan korunmak amacıyla fosfatlanır ve iki kat boya atılır.

Paslanmış veya ısı etkisiyle oluşmuş oksit filmleri ihtiva eden çelikler, nokta direnç kaynağı ile kaynak edilebilirler. Fakat kaynak kalitesi ve sürekliliği daha düşük olur. Düşük elektrik direncine sahip olan, düzgün ve ince filmlerin kaynak üzerine etkisi azdır. Oldukça kalın ve düzgün olmayan oksit filmleri içeren çelikler, bu tabaka uzaklaştırılmadan seri imalat

şartlarında kaynak edilemezler. Bunlar ancak, düşük bir değerden orta bir değere doğru artan kaynak akımı tatbik edilerek ve oldukça yüksek elektrot kuvveti kullanılarak kaynak edilebilir. Bu tabakaların elektriksel iletkenlikleri, sıcaklık arttıkça iyileşir ve böylece akımın geçişine imkan verirler. Bu şekilde yapılan kaynak sonucu, kaynak bölgesinde boşluklar, kalıntılar ve iç yapı hataları meydana gelir.

2.6.5.2 Kaplı Çelikler

Çinko, galvaniz, alüminyum veya kalay kaplı çelikler, nokta kaynağı ile birleştirilebilir. Genelde kaplı çeliklerin kaynağında, kaynak zamanı ve akımı normal çeliklere göre daha yüksek uygulanır.

Kaplı çeliklerde, kaplama tabakası nedeniyle iki parça arasındaki temas direnci neredeyse sıfıra iner. Isı etkisiyle yumuşayan kaplamanın, parça yüzeyleri arasındaki kaynak noktasından uzaklaştırılması gerekmektedir. Böylece kaynak metalinin kaplama malzemesi ile alaşımlanması önlenmiş olur. Kaynak, kaplamaların birleşmesi şeklinde olursa çok zayıf bir bağlantı oluşacağı için istenmez. Bunları sağlamak için kaynak zamanı ve elektrot kuvveti yüksek tutulur. Bazen ön ısıtma da gerekebilir.

Elektrot uçları ile temas eden parça yüzeylerindeki kaplama tabakasının erimesi, elektrotların parça yüzeylerine yapışmasına ve alaşımına, dolayısıyla elektrot ömrünün kısılmasına neden olur. Bunu önlemek için elektrotların kaynak sonrası tutma zamanı uzun tutularak kaplama tabakasının soğutulması sağlanır. Artan ve azalan akım şiddetleri yöntemi kullanılması ile de istenen kaynak özellikleri sağlanabilir.

Fosfat kaplı çelikler, kaplama tabakaları uzaklaştırılmadan normal bir şekilde kaynak edilemezler. Kaplama kalınlığı ve tipine bağlı olarak yüksek elektrik direncine sahiptirler. Kaynak esnasında elektrot kuvveti yüksek tutulur ve aşırı kıvılcım sıçraması görülür. Elektrotların bozulması daha çabuk olur.

Plastik kaplı çeliklerin kaynağında, kaynak edilecek nokta yüzeyi önce ısıtılarak, yumuşatılır ve kaplama o bölgeden uzaklaştırılır.

2.6.6 Yan Devre Etkisi

Daha önce yapılmış bir nokta kaynağına çok yakın ikinci bir nokta kaynağı yapıldığı takdirde yan devre akım geçişi olur (Şekil 2.17). Kaynak akımının bir kısmı daha önce yapılmış olan kaynak noktasından diğer kısmı ise yapılmakta olan ikinci kaynak noktasından geçer. Bu iki devreden geçen akımların miktarı, bu devrelerin direnci ile ters orantılıdır.

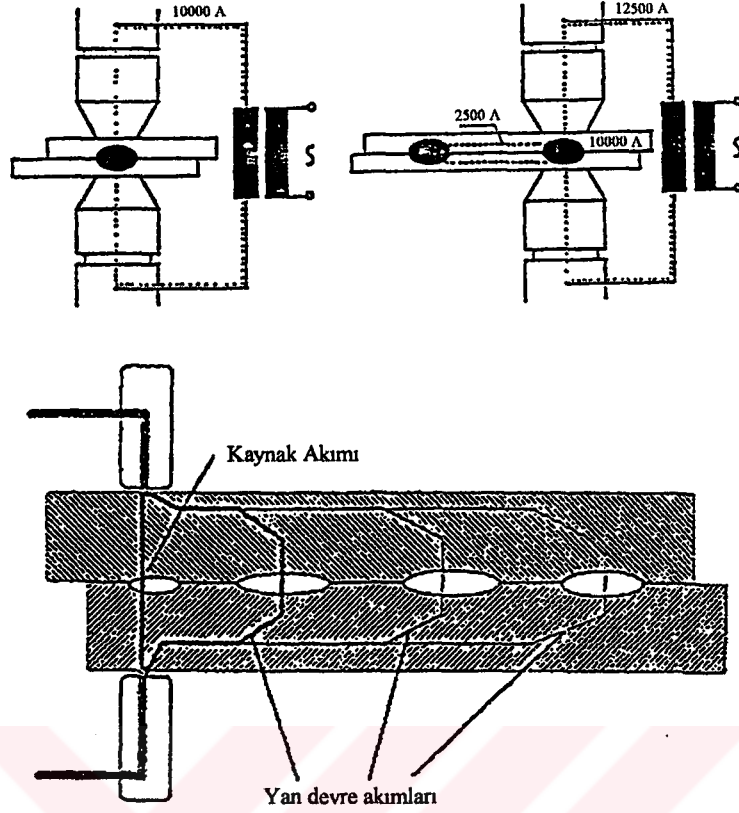
Yapılmakta olan nokta kaynağı, daha önce yapılmış olan nokta kaynaklarından yeteri kadar uzaksa, daha önceki nokta kaynaklarında oluşan devrenin direnci, yapılmakta olan nokta kaynağının direncinden oldukça büyüktür. Bu durumda yan devreler ihmal edilebilir.

Nokta kaynakları arasındaki minimum mesafe, elektrot ucunun ve kaynak çekirdeğinin çapını belirleyen parça kalınlığına bağlıdır. Eğer kaynak edilecek nokta parça kenarına çok yakın olursa, esas metal elektrot basıncına ve kaynak sıcaklığına dayanamaz. Bunun sonucunda da eriyik metal kaynak edilen noktadan dışarı akar.

Kısa mesafe aralıkları ile yapılan kaynak noktaları, bu yan devre etkisi nedeniyle, etkili kaynak akım değerinin (akım yoğunluğunun) azalmasına sebep olur. Bu nedenle noktalar arasındaki mesafenin nokta çapının 4 katından az olmaması istenir. Ayrıca kaynak noktalarının kenara olan mesafeleri de nokta çapının 1,3 katından daha fazla olmalıdır (ASM, 1989).

Elektrik direnci yüksek olan metaller, düşük olanlara göre daha az yan devre olayından etkilenirler.

İki parça arasındaki bindirme alanı yine elektrot ucunun ve kaynak çekirdeğinin çapını belirleyen parça kalınlığına bağlıdır. Minimum tavsiye edilen nokta kaynağı aralıkları ve bindirme uzunlukları Çizelge 2.1, 2.2 ve 2.3'te düşük alaşımlı, orta ve düşük karbonlu çelikler için verilmiştir.



Şekil 2.17 Yan devre (ODTÜ KTM,1998).

2.6.7 Kaynak Edilecek Parça Bileşenleri

Çeliklerin kaynak kabiliyetini etkileyen en önemli bileşen, kaynak bölgesinin sertliğini arttıran karbondur. Yüksek sertlik ise kaynak bölgesinin gevrekleşmesine ve çatlaklara neden olur. Karbon oranı yüksek, sertleşme eğilimli çeliklerin nokta kaynağında son ısıtma yöntemi uygulanmaktadır.

Parça yüzeyleri üzerindeki yağ tabakalarının yeterince temizlenmemesi nedeniyle hidrojen, kaynak bölgesinin çatlama olasılığını artırır.

Nokta kaynağı yapılmış titanyum içeren çeliklerde, çekirdek çapının küçüldüğü ve makaslama, çekme dayanımının azaldığı görülmüştür. Titanyum oranı %0,18'i geçmemelidir. Titanyum içeren çeliklerin nokta kaynağında, daha büyük boyutlu elektrotlar ve daha yüksek elektrot kuvveti gerekebilmektedir.

Azot içeren soğuk haddelenmiş çeliklerde çatlak oluşması ihtimali yüksektir. Bunu önlemek için azot oranı düşürülmeli veya çelikteki azot alüminyum ile etkisiz hale getirilmelidir.

Kaynak noktasındaki oksijen, sıcak çatlaklara ve gevrekleşmeye neden olur. Bunu önlemek için temiz olmayan oksitli yüzeylerin kaynağından kaçınılmalıdır.

Fosfor ve kükürt segregasyonları teşvik ettiğinden %0,025'den düşük oranlarda olmalıdır.

2.7 Nokta Kaynaklarının Kontrolü

Kalite güvencesiyle üretim sırasında hatanın önlenmesine, hatanın sonradan tespit edilmesinden daha fazla konsantre olunması endüstride yaygın bir şekilde ön plana çıkmıştır. Ama bu da üretimle sıkı bir ortak çalışmayı gerektirir. Kaynak noktalarının tahribatsız muayenesi pek mümkün olmadığından, tüm kaynak parametrelerinin kontrolü, oluşan hataların başlangıçta belirlenmesi ve uygun tedbirlerle önlenmesi açısından çok önemlidir.

Nokta kaynağında her şeyden önce kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot basma kuvveti parametreleri kontrol edilir. Optimum ayar değerleri (olması gereken değerler) ön deneylerle belirlenir. Ölçülen değerlerle (gerçek değerlerle) olması gereken değerlerin karşılaştırılması kaynağın kalitesi hakkında bir fikir verir. Oluşan sapmalar daha sonra kaydedilir veya uygun ayar düzeneğiyle doğrudan eşitlenir.

İşlem parametrelerinin kontrolü için özel ölçüm cihazları vardır. Bunlar makine kontrol sistemine entegre edilmiş veya dışarıdan bağlanmış olabilir. Kaynak akımı, kaynak gerilimi ve kaynak süresinin kontrolü için uygun özel kombine ölçüm cihazları tüm bu değerleri aynı zamanda kaydedebilir ve gösterebilirler. Çoğunlukla son derece kısa kaynak sürelerinden dolayı bu tür cihazlarda yüksek ölçüm hızları gereklidir (ODTÜ KTM, 1998).

Kaynak akımının ölçülmesi: Kaynak akımı genellikle "Rogowski-Kuşağı" ile ölçülür.
Elektrot geriliminin ölçülmesi: Kaynak gerilimi miktarı doğrudan iki elektrot üzerinden alınabilir. Tutucu çeneler arasındaki mesafe mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. İndüksiyon etkisinin oluşturduğu parazit gerilimlerin azaltılması için izole edilmiş ölçüm kabloları kullanılmalıdır.

Kaynak süresinin ölçümü: Kaynak süresi modern cihazlarla periyodik hassasiyette ölçülebilir. Özellikle faz kesit kontrollü makinalarda süreye bağlı akım ilerlemesinin hassas kaydı akım ilerleme açılarının belirlenmesi ve bununla efektif akım şiddetlerinin belirlenmesi gereklidir (ODTÜ KTM, 1998).

2.7.1 Kaynak Kalitesinin Tespitinin Dayandığı Faktörler

- Yüzey görünüşü.
- Kaynak boyutu.
- Nüfuziyet.
- Dayanç ve süneklik.
- İç süreksizlikler (hatalar).
- Fıskırma.

2.7.2 Kaynaklı Birleştirmelerin Muayenesi

Kaynak noktalarının muayenesi için tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemleri vardır.

Tahribatlı muayene olarak aşağıdakiler uygulanabilir:

- Kıvrırma deneyi
- Ayırma deneyi
- Keski deneyi
- Burma deneyi
- Kesme deneyi

Tahribatsız muayene yöntemleri olarak aşağıdakiler bulunmaktadır:

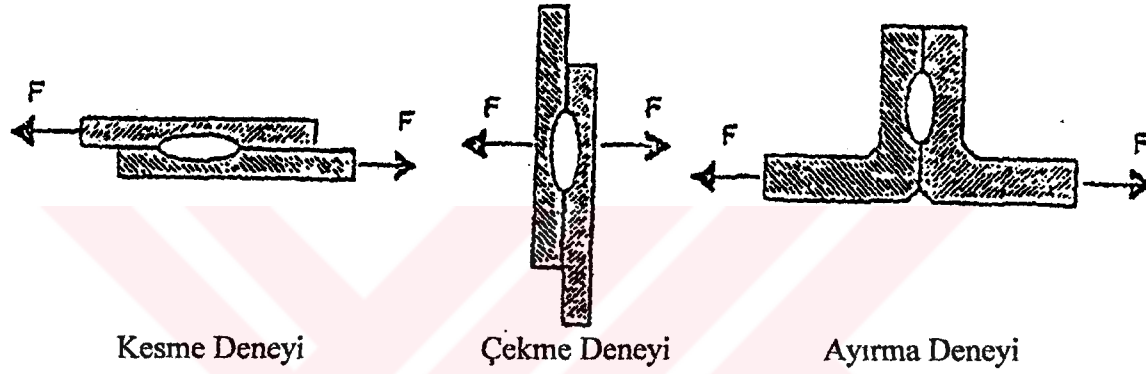
- Röntgen muayenesi
- Ultrasonik muayene

Yüzeyde oluşabilecek çatlakların kontrolü için Sıvı penetrant ve manyetik muayene yöntemleri kullanılabilir.

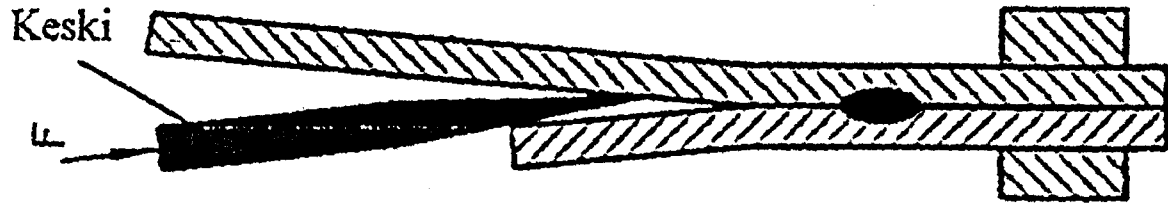
2.7.2.1 Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Ayırma, kıvrırma ve keski deneyleri, nokta kaynak birleştirmelerini özelliklerinin değerlendirilmesi için en basit atölye muayene yöntemleridir. Burada genellikle tek veya seri nokta kaynaklarının, basit muayene düzeneklerinde veya doğrudan obje üzerinde ölçüm değerlerinin kaydedilmesiyle kırılmaya kadar yüklenmesidir. Kırılmanın çeşidi (kaynak noktasının kopması veya kesilmesi) ve kaynak noktasının bıraktığı deliğin büyüklüğü veya

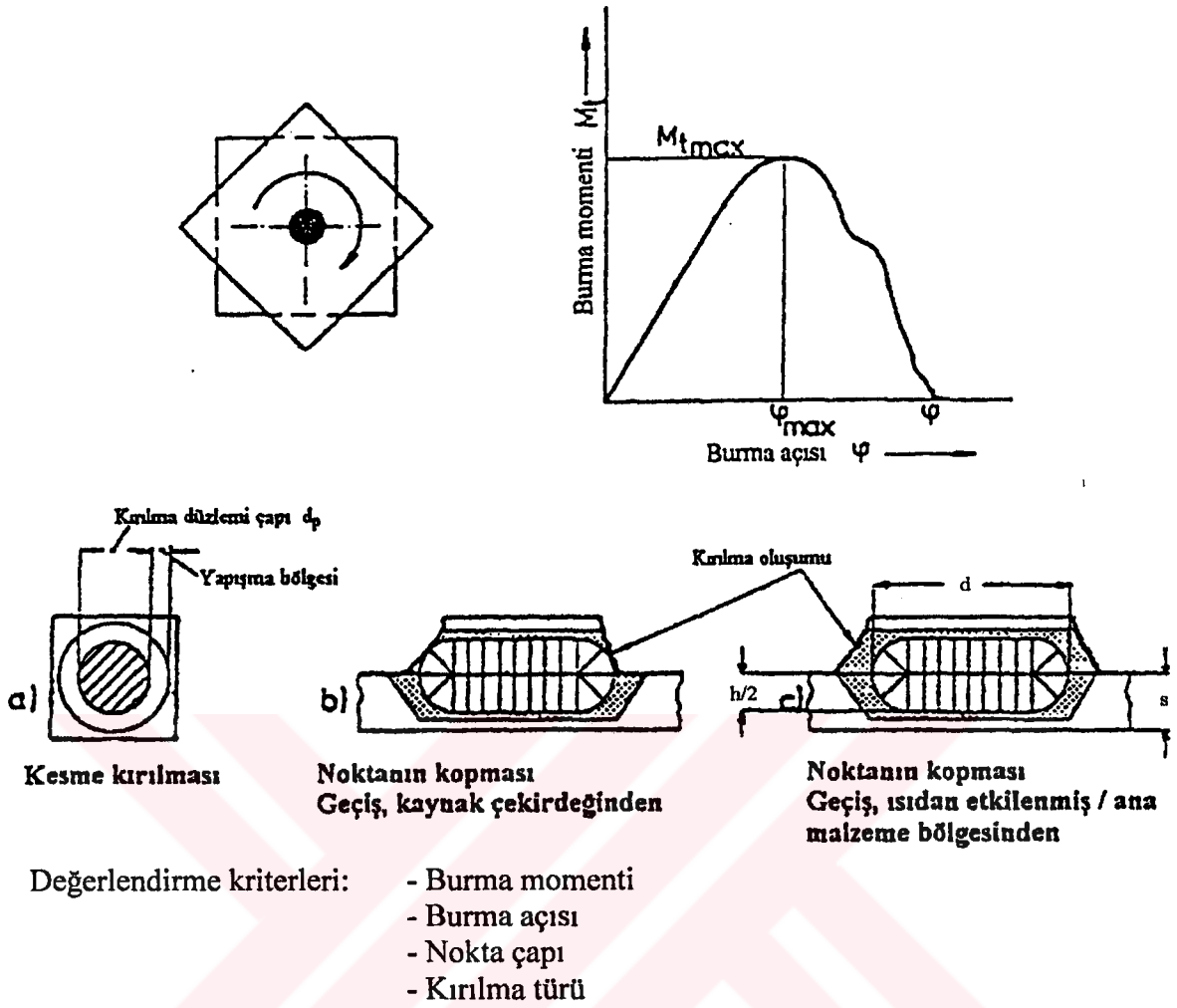
kaynak noktasının kesilme yüzeyi, birleştirmenin taşıma kapasitesi hakkında değerlendirme kriterleridir. Kesme deneyi, nokta kaynak birleştirmeleri numunelerindeki kesme kuvvetinin bulunmasını sağlar. Pratiğe yakın yüklenme çeşidi olması ve muayene sonuçlarının düşük dağılımı nedeniyle, serbest kesme deneyi, bir nokta kaynağı birleştirmesinin statik taşıma davranışının uygun muayenesi olarak kabul edilir. Serbest kesme deneyinin anlamı, kırılma çeşidi değerlendirilmesiyle artırılır. Şekil 2.18’de kesme, çekme ve ayırma deneyleri şematize edilmiştir (ODTÜ KTM,1998). Keski deneyinde ise iki punta arası hizasına yerleştirilen keskiye çekiç ile vurulur. Eğer saclar puntadan ayrılmıyorsa kaynak sağlam demektir. Şekil 2.19’da keski deneyi gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Kesme, çekme ve ayırma deneyleri (ODTÜ KTM,1998).



Şekil 2.19 Keski deneyi (ODTÜ KTM,1998).



Şekil 2.20 Burma deneyi (ODTÜ KTM,1998).

2.7.3 Kaynak Hataları

Nokta kaynağında oluşabilecek hata çeşitleri ve bunların olası sebepleri aşağıda belirtilmiştir. Her şeyden önce, böyle tabloların genelleme yapmak için kullanılamayacağı bilinmelidir. Bunlar belirli sınır koşullarında geçerlidirler ve farklı makine tiplerinde veya yapı elemanı geometrilerinde değişik sonuçlar elde edilebilir.

Çizelge 2.6 Hata çeşitleri ve hatanın olası sebepleri (ODTÜ KTM,1998).

Hata çeşidi	Hatanın olası sebebi						
	Kaynak akımı	Kaynak süresi	Elektrot kuvveti	Elektrot temas düzlemi çapı veya küresellik çapı	Elektrot	Sac yüzeyi veya uyumu	Diğer
Yetersiz dayanım	Çok düşük	Çok kısa	Çok yüksek (1)	Çok büyük	Kötü yüzey	Kötü	-
Nokta içinde boşluk veya fişkırama	Çok yüksek, uygun olmayan program	Çok uzun	Çok düşük, uygun olmayan program	Çok büyük	Akım altında açılma veya kapanma, yavaş hareket, kötü soğutma	Kötü	Yetersiz ön tutma süresi
Yanma lekesi, yüzeyde gözenek veya dağılma, nokta kenarlarında çatlak (2)	Çok yüksek	Çok uzun	Çok düşük	Çok düşük	Kötü yüzey, uygun olmayan malzeme	Kötü	Yetersiz ön ısıtma süresi, çok kısa veya yanlış yapılan kaynak sonrası tavlama, uygun olmayan malzeme
Elektrotun, malzemeden alaşımınma nedeniyle Kirlenmesi veya tersi	Çok Yüksek	Çok Uzun	Çok düşük	Çok düşük	Uygun Olmayan Malzeme, Kötü soğutma	Kötü	Yetersiz ön tutma süresi
Elektrot izindeki (genellikle yuvarlak) belirgin farklılık	-	-	Çok düşük	-	Kötü yüzey, kötü yerleştirilme, yuvarlak olmama	Kötü	Sacların tam hassas yerleştirilmemesi
Elektrot izinin çok büyük çapta olması	Çok yüksek	Çok uzun	Çok düşük veya çok yüksek	Çok büyük	-	-	-
Elektrot izinin çok derin veya çok koyu olması, noktanın renginin çok yayılması	Çok yüksek	Çok uzun	Çok düşük veya çok yüksek	Çok düşük	-	-	-

(1) Kuvvet oluşumu daha yavaş gerçekleşmeli (ön tutma süresi artırılmalı).

(2) Noktanın ortalarında olan çatlaklar dayancı çok önemsiz ölçüde etkiler.Ama bunlar yüzeye kadar ilerlemişse korozyon ortaya çıkabilir.

Kaynak noktasının merkezindeki hatalardan ve gözeneklerden çok, kaynak noktasının çevresindeki hatalar, özellikle de çatlaklar kritiktir. Kaynaklı bağlantılar yük altında çalışırken noktaların kenarlarında yüksek yoğunlukta gerilimler oluşur. Buna karşın merkezdeki gerilimler ihmal edilebilir ölçülerde küçüktür. Nokta kenarları çentik etkisi yarattığından dinamik yüklere dikkat etmek gerekir.

Nokta kaynağı ile yapılan birleştirmeler özellikle kesme yüklemelerine karşı dayanıklıdır. Sac düzlemine dik şekilde etkiyen kuvvetlerin olduğu çekme veya ayırma yüklemelerinden ise olabildiğince kaçınmak gerekir. Nokta kaynaklarının bazı uygulamalarında (örneğin elektroteknikte) noktaların dayancı ikinci derecede önemlidir.

Düşük kuvvet, yüksek kaynak akımı, parçaların kötü teması, çok kısa veya çok uzun kaynak süreleri, elektrotların parçaların üzerinden çabuk kaldırılması gibi sebeplerden dolayı kaynak noktasının iç kısmında hatalar oluşabilir.

Kaynak süresinin çok uzun olması, temasın iyi olmaması, basma kuvvetinin çok az veya çok fazla olması, kaynak akımının çok fazla olması, yüzeyin veya elektrotların kirli olması gibi sebepler fişkırtma olmasına sebep olur.

Çizelge 2.7 Bir mm saclar için gerekli ortalama kaynak değerleri (ODTÜ KTM,1998).

	Elektrot Kuvveti (daN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Süresi (Periyot)
Alaşımsız Çelik	200	8	13
Paslanmaz Çelik	300	5,2	8
Galvanizli Çelik	280	11	8
Alüminyum	140	22,5	5

Çizelge 2.8 Farklı malzemeler için kullanılacak kaynak parametreleri (ODTÜ KTM,1998).

	CrNi	Al	Galv.Çelik	Pirinç	Çinko
Nokta Çapı (mm)	$5\sqrt{s}$	$11\sqrt{s}$	$5.5\sqrt{s}$	$7\sqrt{s}$	$7\sqrt{s}$
Elektrot kuvveti (N)	4000.s	1500.s	2500.s	1200.s	1200.s
Kaynak Süresi (Periyot)	5.s	7.s	13.s	10.s	20.s
Kaynak Akımı (kN)	$6.5\sqrt{s}$	$30\sqrt{s}$	$12.5\sqrt{s}$	$15\sqrt{s}$	$8\sqrt{s}$
Her bir noktanın Kesme-çekme kuvveti (N)	6500.s	1200.s	6000.s	3500.s	2500.s
s: Sac kalınlığı (mm)					

3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyumun sahip olduğu özelliklerin bileşimi onu son derece faydalı bir malzeme haline getirir. Alüminyum düşük yoğunluğu ($2,70 \text{ g/cm}^3$) nedeniyle özellikle taşıt parçaları yapımında tercih edilir. Yüzeyinde meydana gelen sağlam oksit filmi nedeniyle, korozyona karşı iyi bir direnç gösterir. Saf haldeki alüminyumun düşük dayanımına karşın, alaşımlanarak dayanımı 690 MPa'ya dek çıkarılabilir. Alüminyum zehirli olmadığından yiyecek kutularında ve paketlenmede yaygın olarak kullanılır. Alüminyumun iyi elektrik özellikleri ona elektrik sanayiinde de birçok uygulama alanı yaratmıştır. Alüminyumun nispeten düşük fiyatı (1989'da 2 \$/kg) ve birçok faydalı özellikleri onu sanayi için önemli bir metal haline getirmiştir (Smith, 2001).

Alüminyum alaşımları işlenmiş ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana kısımda incelenebilir (ed.Davis,1993).

3.1 İşlenmiş Alüminyum Alaşımları

İşlenmiş alüminyum alaşımları haddeleme veya ekstrüzyon gibi işlemlerden geçer. Ticari araçların ve aksesuarlarının imalatında kullanılan işlenmiş alüminyum alaşımları belirli kriterlere göre seçilir. Bu kriterler:

- Fiziksel özellikler,
- Şekillendirme yetenekleri,
- Kaynak edilebilirlik,
- Korozyona karşı direnç, şeklindedir (ed.Davis,1993).

Alüminyum alaşımların çoğu şu üç seriye aittir:

- Haddelenmiş yarı mamuller - 3000,
- Haddelenmiş ve dövülmüş yarı mamuller – 5000,
- Ekstrüzyon ile üretilmiş ve dövülmüş yarı mamuller – 6000.

3.1.1 Alüminyum Alaşımların Kısa Gösterimi

Alüminyum alaşımları, Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Alüminyum Cemiyetinin uluslar arası kısa gösterim sistemine göre dört rakam ile ifade edilebilir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.1 Alüminyum alaşım aileleri (Kissell ve Ferry,1995).

ALAŞIM ELEMENTİ	SERİ
Hiçbiri	1000
Bakır	2000
Mangan	3000
Silisyum	4000
Magnezyum	5000
Magnezyum ve silisyum	6000
Çinko ve magnezyum	7000

Çizelge 3.2 İşlenmiş alüminyum alaşımlarının kısa gösterim sistemi (Kissell ve Ferry,1995)

SAYILARIN AÇIKLANMASI	
BİRİNCİ SAYI	
Alaşımın ait olduğu seriyi gösterir:	
* 1 % 99 oranında minimum saflık ve yüksek alaşımı gösterir.	
* 2 'den 8'e seriyi gösterir ve alaşımda kullanılan ana alaşım elementi teşhis eder.	
SERİ	ALAŞIM
2	alüminyum – bakır
3	alüminyum – mangan
4	alüminyum – silisyum
5	alüminyum – magnezyum
6	alüminyum – magnezyum – silisyum
7	alüminyum – çinko – magnezyum (bakır ile veya bakırsız)
8	diğer alüminyum alaşımları
0 ve 9	kullanılmaz.
İKİNCİ SAYI	
* 1000 serilerinde, belirli kirliliğin kontrolü yüzdelerine karşı gelen alüminyumun derecesini tanımlar.	
* 2000'den 8000'e serilerinde alaşımı tanımlamak için kullanılır.	
SON İKİ SAYI	
* 1000 serilerinde % 99 üzerindeki alüminyum yüzdelerini gösterir.	
* 2000'den 8000'e serilerinde alaşımı tanımlamak için kullanılır.	
HARFLERİN OKUNMASI	
X Ön eki bir deneysel alaşımı tahsis etmek için kullanılır.	
A Son eki alaşımın bir ulusal varyasyonunu gösterir.	
Örnek: 6005A	

3.1.2 Metalürjik Şartlar

Temel metalürjik şartların kısa gösterimi aşağıdaki gibidir:

- F : İmal edilmiş: Bu şart herhangi bir ısıtma veya şekil değiştirme ile yumuşatma veya sertleştirme hızının özel bir kontrolü olmadan plastik şekil değiştirme ile yapılan ürünleri gösterir.
- O: Tavlanmış: Bu şart en sünek olandır ve ardından pekleşme gelmeyen tavlama prosesi tarafından elde edilir.
- H: İşlerken sertleşmiş ve mümkün olduğunca kısmen yumuşatılmış: Ardından metalin kısmen yumuşatılmasına neden olacak yeterlilikte bir sıcaklıkta tutmayla uygulanan veya uygulanmayan işlerken sertleşmiş ürünlerle ilgilidir.
- T: Isıtılmış: Isıtma işlemi, sonradan uygulanan işlemlerden bazısını veya tamamını birleştirebilir: çözme ısıtma işlemi, su verme, çöktürme sertleşmesi, yapay yaşlandırma ve mümkün olan plastik şekil değiştirme (Cohen ve Apte,1997).

Alüminyum alaşımlar iki kategoriye ayrılır:

Isıtma işlemi uygulanmayan alaşımlar: Onların fiziksel özellikleri, ara tavlama (ve eğer varsa son tavlama) haddeleme veya ekstrüzyon prosesi ile belirlenir. Onların sertliği H harfi ile kısaca gösterilir; 1000,3000 ve 5000 serilerine aittir.

Isıtma işlemi uygulanabilen alaşımlar: Bu alaşımların fiziksel özellikleri, uğradıkları ısıtma işlemi (çözme ısıtma işlemi, su verme, yaşlandırma) ile belirlenir ve 2000, 6000 ve 7000 serilerine aittir.

3.1.3 Isıtma İşlemi Uygulanmayan Alaşımlar

Isıtma işlemi uygulanmayan alaşımlar çökelmeyle sertleştirilemez, dayanımlarının artırılabilmesi sadece soğuk işlemeyle mümkündür. Isıtma işlemi uygulanmayan alüminyum alaşımlarının 1000,3000 ve 5000 serileri olmak üzere üç ana grubu vardır.

3.1.3.1 Pekleşme

Sertleştirme, metalin sertliğini ve fiziksel özelliklerini iyileştiren ve pekleşme olarak bilinen-soğuk şekil değiştirme ile yapılır. Sertleştirme, metalin şekil değiştirme kapasitesini ve sünekliğini de azaltır. Daha büyük şekil değiştirme veya daha yüksek pekleşme hızı, daha belirgin etki yapar. Bu da malzemenin kimyasal bileşimi tarafından kontrol edilir.

Örneğin % 4 ve % 4.9 arasında magnezyum içeren 5083 alaşımında daha büyük sertlik elde edilir fakat şekil değiştirme kapasitesi % 2.6 ve % 3.6 arasında magnezyum içeren 5754 alaşımından daha azdır. Pekleşme, haddeme, derin çekme, kıvrırma, çekiçleme, katlama, presleme gibi kullanılan her şekil değiştirme işleminde yer alan genel bir olaydır. Atelyede imalat esnasında da pekleşme meydana gelir.

3.1.3.2 Tavlama

Tavlama ile pekleşmiş metalin sünekliğini geri kazanmak mümkündür. 300⁰C'nin üstünde sıcaklıklarda yer alan bu proseste, metalin sertliği ve mekanik karakteristikleri yavaş yavaş düşmeye başlar

Tavlama esnasında taneler, boyut olarak büyüyebilir. Bu büyüme, sonradan yapılan dövme gibi bir işlem esnasında, metalin yüzeyindeki pürüzlü "portakal kabuğu" etkisi şeklinde açığa çıkar. 100 mikronun üzerindeki tane büyümesi, pekleşebilen alüminyum alaşımlarının şekil değiştirme kapasitesini azaltır.

5754,5454,5086,5083 gibi 5000 serisindeki alaşımlar için tavlama, genellikle 345⁰C ve 380⁰C arasında 30 ile 120 dakika süre ile yapılır.

3.1.3.3 Isıl İşlemlerin Kısa Gösterimi

Tavllanmış durum kısaca O harfi ile gösterilir. Pekleşmiş durum H, daima kısacak iki sayı ile gösterilir:

H genellikle 2 veya 3 basamak tarafından takip edilir. Birinci basamak elde edilen sertleşme için kullanılan özel metodu gösterir.

- H1 : sadece gerilim sertleşmesi uygulanmış
- H2: gerilim sertleşmesinden sonra, kısmi tavlama uygulanmış.
- H3: gerilim sertleşmesinden sonra stabilize yapılmış.

İkinci basamağın ifadesi ise şöyledir:

2 : 1 / 4 sert

4 : 1 / 2 sert

6 : 3 / 4 sert

8 : tamamen sert

9 : ekstra sert (2).

3.1.4 Isıl İşlem Uygulanabilen Alaşımalar

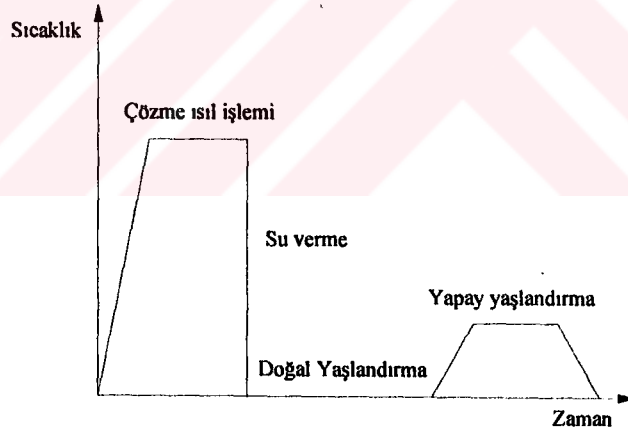
Isıl işlem uygulanabilen alaşımlar 2000, 6000 ve 7000 serilerinde yer almaktadır. Bunlara çökelme sertleşmesi uygulanır.

3.1.4.1 Çökelme Sertleşmesi

Çökelme sertleşmesinin amacı, ısıl işlem gören bir metalin biçim değiştirebilir ana fazı içinde, yoğun ve ince çökelmiş parçacıklar dağılımı elde etmektir. Çökelen parçacıklar aykırı yerleşim hareketine engel oluşturarak ısıl işlem görmüş alaşımın dayanımını artırır (Smith, 2001).

Çökelme sertleşmesi aşağıdaki ardışık ısıl işlemler tarafından gerçekleştirilir (Şekil 3.1):

- Çözme ısıl işlemi,
- Su verme,
- Yapay veya doğal yaşlandırma



Şekil 3.1 Çökelme sertleşmesi sıralaması (Gürdaş, 1999).

3.1.4.1.1 Çözme Isıl İşlemi

6000 serisi alaşımlar için 530°C civarında yüksek bir sıcaklıkta yapılır. Alaşımda magnezyum ve silisyum gibi daha çok alaşım elemanı, daha yüksek sıcaklık demektir. Tutma süresi ürünlerin kalınlığına bağlıdır.

Yüksek sıcaklıkta uzun tutma süreleri sırasında 6000 serisi için $AlMg_2Si$ gibi, veya 2000 serisi için Al_2Cu gibi iç metalik bileşimler yeniden erir ve alaşım homojen katı bir eriyik biçimini alır.

3.1.4.1.2 Su Verme

Bu proses, metalin çok hızlı soğuduğu, kalıptan çıkış sırasında, ocağın veya ekstrüzyon presinin çıkartma ucunda genellikle suya daldırma ile yapılır.

Su verme hızı, bir alaşımın çekme dayanımı, tokluk, korozyon direnci gibi belirli özelliklerini saptayan çok önemli bir kriterdir. Her alaşım için, su verme hızının aşağısına düşmemesi gereken bir alt sınır, “kritik su verme hızı” vardır. Maksimum tokluk için, su verme hızı kritik su verme hızının hemen hemen üç katı olmalıdır.

Su verme, özellikle karmaşık şekilli veya kalın bölümlü parçalarda sık sık artık iç gerilmelere neden olabilir. Bu gerilmeler, kontrol edilmiş plastik şekil değiştirme tarafından giderilebilir.

3.1.4.1.3 Yapay ve Doğal Yaşlandırma

Su verme sonrası, aşırı doymuş katı eriyik kararlı değildir ve kararlı hale geri dönüş, şu iki yoldan birisiyle olabilir:

- Ortam sıcaklığında doğal yaşlandırma ile çökelme sertleşmesinin tamamlanacağı noktadan sonra sertlik ve mekanik özelliklerindeki artış birkaç saat (esas zaman alaşımına bağlıdır) sonra duracaktır. Bu T4 ısıl işlemidir;
- Yapay yaşlandırma (6000 serisi için $160^{\circ}C$ ve $180^{\circ}C$ arasında) birkaç saat ısıtmayı gerektirir. Yapay yaşlandırma, çökelme prosesini hızlandırır ve genellikle su verme sonrası doğrudan yapılır. Bu T6 ısıl işlemidir. Yapay yaşlandırma şartları alaşımlara bağlıdır.

3.1.4.2 Isıl İşlemlerin Kısa Gösterimi

Isıl işlemler, bir veya daha çok sayı tarafından takip edilen T harfi ile kısaca gösterilir. Daha yaygın ısıl işlemler Çizelge 3.3’de tanımlanmıştır.

Çizelge 3.3 Isıl işlemlerin kısa gösterimi (Smith, 2001).

ISIL İŞLEM	TANIMLAMA
T1	Doğal yaşlandırılmış. Ürün yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden itibaren soğutulmuş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T3	Çözme ısıl işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T4	Çözme ısıl işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış.
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış.
T6	Çözme ısıl işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış.
T8	Çözme ısıl işlemi görmüş, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış.

3.1.5 Yaygın Kullanılan Alüminyum Alaşımları

1100 : Bu alüminyum alaşımı ticari olarak saf alüminyumdur. Bu alüminyum çeşidine şekil verilebilir ve mükemmel derecede işlenebilme özelliği vardır. Diğer alaşımlara göre daha yavaş sertleştiği için girift şekillendirme uygulamalarına yönelik uygulamalar için idealdir. En çok kaynaklanabilme özelliğine sahip alüminyum alaşımıdır. Isıl işlem uygulanmayan bir alaşımdır. Korozyona dayancı çok iyidir ve kimyasal, besin işleme endüstrilerinde geniş bir kullanım sahası vardır. Dekoratif bitirmelerde kullanılan parçalar için de iyi sonuçlar vermektedir.

2011 : Bu en kolay işlenir alüminyum alaşımıdır. Mükemmel seviyede mekanik özellikleri vardır. Bu nedenle yaygın işleme gerektiren otomatik vida torna tezgahı ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2014 ve 2017 : 2017 alaşımı, yüksek dayanım ve işlenebilirliği bünyesinde barındırdığı için otomatik vida torna makinası işlerinde çokça kullanılan bir alaşım olmuştur. 2017 dayanıklı ve şekil verilebilir olduğu için ağır görev üstlenen yapısal kısımlarda kullanılabilir. Dayanımı 2014'ten önemli derecede daha azdır.

2024: En çok bilinen yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlardandır. Yüksek dayanımı ile beraber çok iyi bir yorulma dayanımı olduğundan, iyi dayanım-ağırlık oranı istendiği yapılar ve kısımlarında kullanılması iyi bir avantajdır. Tavlanmış durumda kolayca şekillendirilebilir ve daha sonra ısıl işlem görebilir. Ark ve gaz altı kaynak yöntemleri tavsiye edilmez ama nokta, dikiş, yakma alın kaynak yöntemleri tavsiye edilir. Korozyon direnci nispi olarak düşük olduğu için, 2024 alaşımı yüksek oranda saflıkta ince alüminyum tabakası ile

kaplanarak kullanılır. Uygulama alanları; uçak yapısal bileşenleri, uçak donanımları, kamyon tekerlekleri ve ulaşım endüstrisinin çeşitli kısımlarıdır.

3003 : Bu en çok kullanılan alüminyum alaşımıdır. Bu alaşım, 1100'e göre % 20 daha dayanıklı , mangan katkılı alüminyum alaşımıdır. Bu nedenle 1100'ün özelliklerini yüksek dayanımla birlikte gösterir. Korozyon direnci yüksektir. İşlenebilme özelliği iyidir ve derin çekme, kaynak, lehim işlemleri yapılabilir. Isıl işlem uygulanmaz. Uygulamaları, mutfak gereçleri, dekoratif saclar, tenteler, depolama tankları ve kimyasal ekipmanlardır.

5005 : Bu alaşım, 3003 alüminyum alaşımının geliştirilmiş versiyonudur. 3003 alaşımı ile benzer mekanik özellikler gösterir. Kolay işlenebilir. Derin çekme, kaynak ve lehim işlemi yapılabilir. İyi korozyon direnci vardır. Isıl işlem uygulanmamıştır. Rengin açılması ve damarlı görölüm eğilimi azdır. Uygulamaları 3003 ile aynıdır.

5052 : Isıl işlem uygulanmayan alaşımların en yüksek dayanıma sahip olanıdır. Yorulma dayanımı birçok alüminyum alaşımından iyidir. Buna ek olarak, bu alaşımın deniz atmosferi ve tuzlu su korozyonuna karşı iyi direnci vardır. İyi işlenir. Girift parçaların üretimi yapılabilir ve 1100, 3003 alaşımlarındaki yırtılmayı minimize etmek için tavlama durumunda daha yüksek dayanıma sahip olurlar. Uygulamaları, uçak sanayisinde geniş bir sahada, marina ve ulaştırma endüstrisidir.

5083 ve 5086 : Uzun yıllar boyunca yüksek dayanımlı kaynaklı uygulamalar için 5052 ve 6061 gibi alaşımlardan daha üst seviyede belirli sayıda yararlar sağlayan alüminyum saclara ihtiyaç duyulmuştur. Bu yararlarından bazıları dizayn verimliliği, daha iyi kaynak özellikleri, iyi şekillendirme özellikleri, mükemmel korozyon direnci ve diğer ısıl işlem görmemiş alaşımlarla aynı ekonomiktir. Metalürjik çalışmalar, alaşımları geliştirmiştir. 5086 alaşımında magnezyum oranı daha yüksek olmasından dolayı mekanik özelliği 5083'e göre biraz daha iyidir. Bunun dışında ikisinin özellikleri kısmen aynıdır. Uygulamaları; füze muhafazası, basınç kazanları, gibi ürünlerdir.

6061 : Bu alaşım, en ucuz ve çok yönlü ısıl işlem gören alüminyum alaşımıdır. İyi mekanik özellikleri ve korozyon dayancı vardır. Bir çok kullanım alanı vardır. Tavlama durumunda işleme özelliği iyidir. T4 durumunda bir çok şekil verme işlemi yapılabilir. Yapay yaşlandırma ile T6'ın tüm özelliği elde edilir. Tüm kaynak metotları uygulanabilir. Görünüş ve korozyon direncini arttırmak için yüzeyini alüminyum safiyeti yüksek olan ince tabaka ile kaplanmaya uygundur (Alclad). Uygulamaları, kamyon karoseri, vida torna makinası kafesi ve yapısal parçalardır. 6061, iyi dayanım gerektiren, iyi görünüm veren ve daha iyi korozyon direnci istenen yerlerde kullanılır.

6063 : Bu, genellikle mimari alaşım olarak bilinir. Daha yüksek çekme mukavemeti öngörülerek ekstrüzyon alaşımı olarak geliştirilmiştir. Yüksek derecede korozyon direncine ve bitirme özelliklerine sahiptir. Bu alaşım genellikle pencereler, kapılar gibi iç ve dış mimari uygulamalarda kullanılır.

7075 : Bu alaşım, dayanım ve ağırlık oranı ideale yakın olan yüksek dayanımlı alüminyum alaşımıdır ve genellikle yüksek dayanım istenen kısımlarda kullanılır. Genellikle tavlama işlemi yapılır ve daha sonra ısıl işleme tabi tutulur. Nokta ve alın yakma kaynağında kullanılabilirken argon ve gaz altı kaynağı tavsiye edilmez. Korozyon direncini arttırmak için yüzey kaplamaya (Alclad) uygundur. Yüksek dayanım gerektiren yerlerde kullanılır (2).

3.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları üç ana yöntemle dökülür: Bunlar kum kalıba döküm, metal kalıba döküm, basınçlı döküm yöntemleridir (Smith, 2001).

Döküm alüminyum alaşımlarının başlıca özellikleri şunlardır:

- Düşük iç gerilmelerle çok farklı uygulamalar için uygun mekanik özellikler.
- Kullanılan döküm işlemine (kum kalıba döküm, metal kalıba döküm, basınçlı döküm) bağlı olarak bir tek parçadan çok geniş dökümlere üretim imkanları.
- Bir veya fazla fonksiyonu birleştirerek kompleks şekillere ulaşma yeteneği, bu yüzden gereken montaj sayısının azalması.
- Birkaç gramdan bir tonun üzerindeki parçalar için kullanılabilme imkanı (ed.Zalensas,1986).

Akışkanlık ve beslenme yeteneği gibi döküm özellikleri ve dayanım, süneklik gibi diğer özelliklere sahip alüminyum döküm alaşımları geliştirilmiştir. Dolayısıyla bu alaşımların kimyasal bileşimleri işlenmiş alminyumlardan farklıdır. Çizelge 3.4'te, bazı alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri, mekanik özellikleri ve uygulama alanları verilmektedir.

Döküm alaşımlarında da dört rakam vardır. Yalnız çnc rakamdan sonra bir nokta konulmuştur. İlk rakam alaşım grubunu belirler.

1xx.x	%99 min. Alüminyum.
2xx.x	Cu ana alaşım elementi.
3xx.x	Si, Cu ilaveli ve/veya Mg.
4xx.x	Si ana alaşım elementi.
5xx.x	Mg ana alaşım elementi.
7xx.x	Zn ana alaşım elementi.
8xx.x	Sn ana alaşım elementi.
9xx.x	Diğer elementler.
6xx.x	Yaygın kullanılmayan alaşımlar.

Döküm alaşımlardan sonraki iki rakam minimum alüminyum oranını veya alüminyum alaşımını tanımlar. Noktadan sonraki rakam ise döküm parçasını veya döküm hanede kullanılacak ingodu ifade eder.

0 : Döküm.

1 : İngot

Çizelge 3.4 Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve uygulama alanları (Smith, 2001)

Alaşım Sayısı (1)	Kimyasal bileşim Ağırlık, % (2)	Durum (3)	Çekme dayanımı, MPa	Akma dayanımı, MPa	Uzama, %	Uygulama alanlarına örnekler
İşlenmiş Alüminyum Alaşımları						
1100	En az 99,0Al,0,12 Cu	Tavllanmış (O) Yarı sert (H14)	Ortalama 89 Ortalama 124	Ortalama 24 Ortalama 97	25 4	Sac metal işleri
3003	>1,2 Mn	Tavllanmış (O) Yarı sert (H14)	Ortalama 117	Ortalama 34	23 17	Basınçlı kaplar, kimyasal cihazlar, sac metal işleri
5052	2,5 Mg, 0,25 Cu	Tavllanmış (O) Yarı sert (H34)	Ortalama 193 Ortalama 262	Ortalama 65 Ortalama 179	18 4	Otobüs, kamyon, deniz taşıtları parçaları, hidrolik tüpleri
2024	4,4 Cu, 1,5 Mg, 0,6 Mn	Tavllanmış (O) Isıl işlemlili (T6)	<220 >442	<97 >345	12 5	Uçak yapı elemanları
6061	1,0 Mg, 0,6 Si, 0,27 Cu, 0,2 Cr	Tavllanmış (O) Isıl işlemlili (T6)	<152 >290	<82 >241	16 10	Kamyon ve denizcilik yapı elemanları, borular ve raylar
7075	5,6 Zn, 2,5 Mg, 1,6 Cu, 0,23 Cr	Tavllanmış (O) Isıl işlemlili (T6)	<276 >504	<145 >428	10 8	Uçak ve diğer yapı elemanları
Döküm Alüminyum Alaşımları						
355.0	5 Si, 1,2 Cu, 0,5 Mg	Kum kalıp (T6) Metal kalıp (T6)	>220 >285	>138	2,0 1,5	Pompa gövdeleri, uçak boru bağlantıları, krank kutuları
356.0	7 Si, 0,3 Mg	Kum kalıp (T6) Metal kalıp (T6)	>207 >229	>138 >152	3 3	Dişli kutuları, kamyon şaft kutuları ve tenekeleri
332.0	9,5 Si, 2 Cu, 1,0 Mg	Metal kalıp (T5)	>214			Motor pistonları
413.0	12 Si, 2 Fe	Basınçlı döküm	297	>145	2,5	Büyük ve karmaşık şekilli döküm parçaları

(1) Alüminyum Derneği (AA) sayısı,

(2) Kalanı alüminyum,

(3) O= Tavllanmış ve yeniden kristallenmiş; H14= Gerilme sertleşmesi ve kararlaştırma; T5= Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme sıcaklığından soğutulmuş ve sonra yapay yaşlandırılmış; T6= Çözme ısıl işlemi ve sonra yapay yaşlandırma.

4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ NOKTA DİRENÇ KAYNAĞI

Isıl işlem gören ve görmeyen, işlenmiş ve döküm alüminyum alaşımlarının hepsi nokta direnç kaynağı işlemine tabi tutulabilir. Bunların içindeki bazı alaşımlar diğerlerine göre nokta direnç kaynağına daha da elverişlidir. Alüminyum alaşımları, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, dar plastik saha (ortalama olarak 90°C), soğuma sırasında önemli ölçüdeki kendini çekme, yüzey oksidi ve bakır elektrot malzemesine olan ilgisi gibi işlemi zorlaştıran özelliklere sahiptir.

Alüminyum alaşımları ile yapılan nokta direnç kaynağıyla, mutfak eşyaları, tanklar, köprü döşemeliği, otomotiv ve uçak sanayiinde üretilen bazı parçalar imal edilir. Uçak sanayiinde kullanılan alüminyum nokta direnç kaynağında, diğer ticari uygulamalara göre daha yüksek kaynak kalitesi elde etmek amacıyla yüzey hazırlama, kaynak, kalite kontrolü daha hassas yapılır (Kanat kaplama bölümü, kaplama bölümleri, bağlantı ve motor kapağı).

4.1 Kaynak Dayanımı

Alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağındaki kaynak dayanımı alaşım bileşimi ve kalınlığa göre değişir. Kaynak noktalarında çekme mukavemeti, kesme mukavemetinin yaklaşık % 25'i kadardır. Çizelge 4.1'de çeşitli alüminyum alaşımlarının direnç noktaları için gerekli minimum kesme dayanımları gösterilmiştir. Burada kaynak çekirdekleri çapı iki sac kalınlığının toplamından yaklaşık olarak 1,5 mm daha büyüktür.

Çizelge 4.1 Çeşitli alüminyum alaşımlarında her bir nokta için gerekli kesme kuvveti değerleri (ASM,1989).

Minimum Kesme Dayanımları (N/mm ²) (Her bir kaynak çekirdeği için)				
Sac Kalınlığı (mm)	1100-H14 1100-H18	3003-H12 3003-H18 5052-O	2036-T4	2024-T3, Kaplı 2024-T3, 7075-T6, Kaplı 7075-T6
			6009-T4 6010-T4 5182-T4 5052-H38 6061-T4 6061-T6 5050-H34	
0,4	7,0	12,2	17,2	18,9
0,51	9,6	17,5	23,1	24,5
0,64	12,2	25,4	30,6	32,4
0,81	19,3	36,8	41,2	45,6
1,02	26,3	52,6	54,3	60,4
1,3	35,9	71,8	77,4	84,1
1,63	49,1	99,0	109,5	120,9
2,06	73,6	135,7	151,6	183,9
2,6	91,1	166,4	210,2	268,8
3,17	103,3	175,2	284,7	371,3

4.2 Ana Metal Özellikleri

Her ne kadar alüminyum alaşımlarının hepsi nokta direnç kaynağına yatkınsa da bazıları daha iyi özelliklere sahiptir. Çizelge 4.2’de bazı döküm ve işlenmiş alüminyum alaşımlarının erime aralıkları, elektriksel ve ısı iletkenlikleri, kaynaklanabilirlikleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 Alüminyum alaşımlarının erime sahaları ve direnç kaynağı kabiliyetleri .
(ASM,1989).

Alaşım grubu	Erime aralığı (°C)	Direnç kaynağı yapılabilirliği	Alaşım grubu	Erime aralığı (°C)	Direnç kaynağı yapılabilirliği
1350-H19	646-657	ÖT	2219-T37	543-643	ÖT
1060-H18	646-657	ÖT	6009-T4	560-649	KU
1100-H18	643-657	KU	6010-T4	585-649	KU
3003-H18	643-654	KU	6061-T6	593-649	KU
3004-H38	629-652	KU	6063-T6	616-654	KU
5005-H38	632-652	KU	6101-T6	616-652	KU
5050-H38	593-649	KU	7075-T6	477-638	ÖT
5052-H38	574-638	KU	413.O-F	574-582	SK
5083-H321	584-640	KU	443.O-F	574-632	KU
5086-H34	593-643	KU	308.O-F	521-613	ÖT
5154-H38	574-641	KU	238.O-F	507-599	KK
5182-O	602-646	KU	513.O-F	579-638	ÖT
5454-H34	571-638	KU	520.O-T4	449-604	TE
5456-H321	510-638	KU	333.O-T6	516-585	ÖT
2014-T6	502-638	ÖT	355.O-T61	546-621	ÖT
2024-T316	502-638	ÖT	356.O-T6	557-613	ÖT

KU (Kaynağa uygun): Kaynağa uygun, ÖT (Özel teknikler): Kaynağa uygun ancak bazı durumlarda özel teknikler gerektirebilir, SK (Sınırlı kaynak): Kaynağı sınırlıdır ve genellikle özel tekniklerle yapılır, TE (Tavsiye edilmez): Kaynak tavsiye edilmez.

4.2.1 Kaplı Alaşımlar

Üzeri alüminyum kaplı alaşımlarda, bu tabaka çekirdek alaşım için anot vazifesi görür ve böylece çekirdek alaşım için elektro mekanik bir koruma sağlamaktadır. 2219, 3003, 3004, 6061 ve 7075 üzeri kaplı alüminyum alaşımları üzerinde, %1 Zn içeren 7072 alaşımından oluşan ince kaplama vardır. 2014 üzeri kaplı alüminyum alaşımının üstü ise her ikisi de %1.2 Mg içeren 6003 veya 6053 alüminyum alaşımı ile kaplanır. 2024 alüminyum alaşımının üstü ise %99.3 Al içeren 1230 alüminyum alaşımı ile kaplanır.

4.2.2 Alüminyum Alaşımlarının Nokta Direnç Kaynağında Kaynak Kabiliyeti

2024 ve 7075 gibi yüksek dayanımlı alaşımların nokta direnç kaynağı daha kolay olmaktadır. Fakat bu alaşımlar yavaş bir yükleme gerektirdikleri için bunların çatlama ve porozite oluşma eğilimi düşük mukavemetli alaşımlara göre daha yüksektir. Yüksek dayanımlı alaşımlarda sac ayrılması düşük ve kaynak mukavemeti uygundur.

1100 ve 3003 gibi düşük dayanımlı alaşımlarla yapılan kaynakların dayanımı değişken olsa da bu alaşımların nokta direnç kaynağının bir çok uygulama için yapılması kolaydır. Bu alaşımların düşük elektrik direncini dengelemek için yüksek kaynak akımı ve düşük elektrot kuvveti gerekir.

Büzülme çatlama, 2024 ve 7075 gibi bakır, çinko alaşımlı kaynak metalinde görülmektedir. 5052, 6053 gibi yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında kaynak metalinin içinde porozite oluşumu görülebilir.

Farklı alüminyum alaşımlarının kaynağı ise, malzemelerin ayrı elektriksel iletkenliği ve erime sıcaklıkları olduğu için daha zordur.

Metal kalıba döküm, kum kalıba döküm ve basınçlı döküm ile imalatta kullanılan döküm alüminyum alaşımları nokta direnç kaynağında sıkça kullanılmaz. Metal kalıba döküm ile daha üniform bir kalınlık elde edildiği için bu döküm yöntemleri içinde nokta direnç kaynaklanabilirliği en iyi olanıdır. Basınçlı döküm parçaları boyutsal hassasiyete sahiptirler fakat kaynak için yüzeyin özel işlemlerle hazırlanması gerekir (ASM,1989).

Leone ve Altshuller'e (1984) göre kaynak kabiliyetini arttırmanın metodu sac yüzeyleri arasında farklı yüzey direnci oluşturmaya dayanmaktadır. Yüzey direncinde farklılık oluşturma anodize etme tekniği ile oluşturulur. Yaptıkları çalışmada, elektrot ömrü, farklı yüzey direnci ve farklı oksit kalınlığı arasındaki ilişki oluşturulmuştur. Belirtilen şartlar altında optimum elektrot ömrü $330 \cdot 10^{-7}$ mm farklı oksit kalınlığında elde edilmiştir. Bu yüzey direncinde yaklaşık olarak $50 \cdot 10^3 \mu\Omega$ 'luk bir fark oluşturmuştur. Yüzey hazırlığı aynı zamanda kaynak kabiliyetinde de bir gelişme sağlar. Her ne kadar bu metot uzun zamandır test edilmiyor ve şu an laboratuvar ölçeğinde yapılıyor olsa da bunun ticari işlemlerde kullanılması çok da uzak görülmemektedir.

Alüminyum nokta direnç kaynağında en önemli faktör olan yüzey direnci oksit tabakasının mevcudiyetine dayanmaktadır. Yüzey direnci bu işlemin başarısı ve eksikliği ile doğrudan

bağlantılıdır. Kaynak, temas yüzeyinde oluşan ısının kaynak çekirdeğini meydana getirmesi ile oluşur. Bununla beraber elektrot-iş parçası arasındaki direnç ise elektrot ömrünü sınırlar.

Temas direncinin bu çift yönlü rolünden dolayı nokta oluşumu için ideal şartların yerine getirilmesi gerekir. Üretimden kaynaklanan oksit tabakası sayesinde yüzeyde yüksek ve değişken direnç oluşur. Elektrot-iş parçası ve temas yüzeyinde oluşan bu direnç elektrot ucu bozulması ve kararsız kaynak kalitesi oluşturur. Diğer taraftan yüzey hazırlama ile elde edilen düşük temas direncinin, herhangi bir hazırlama işlemine tabi tutulmamış yüzeyde elde edilene göre, kararlı bir yapıda olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte yüksek kaynak akımı, iş parçası-elektrot yüzeyinde elektrotların bozulması ile sonuçlanan aşırı ısı oluşumunu sağlar.

Alüminyum nokta direnç kaynağında, ideal koşulları sağlamak için yüzey dirençleri arasında kontrollü bir fark oluşturulmalıdır. İş parçası-elektrot yüzeyindeki temas direnci, temas yüzeyindeki dirençten daha düşük olmalı ve temas yüzeyindeki dirençte nispeten daha yüksek ve belli bir aralık seviyesinde olmalıdır .

Leone ve Altshuller (1984) yaptıkları deneyde temas direncinin çift yönlü etkisinden dolayı iki yüzey arasında yüzey direnci farkı oluşturmuşlardır. Bu deney sacın bir yüzünü çok kısa bir süre için anodize ederek yüzeyler arasında farklı oksit kalınlığı elde ederek yapılmıştır.

Çizelge 4.3 Yapılan çalışmada elde edilen veriler (Leone ve Altshuller, 1984).

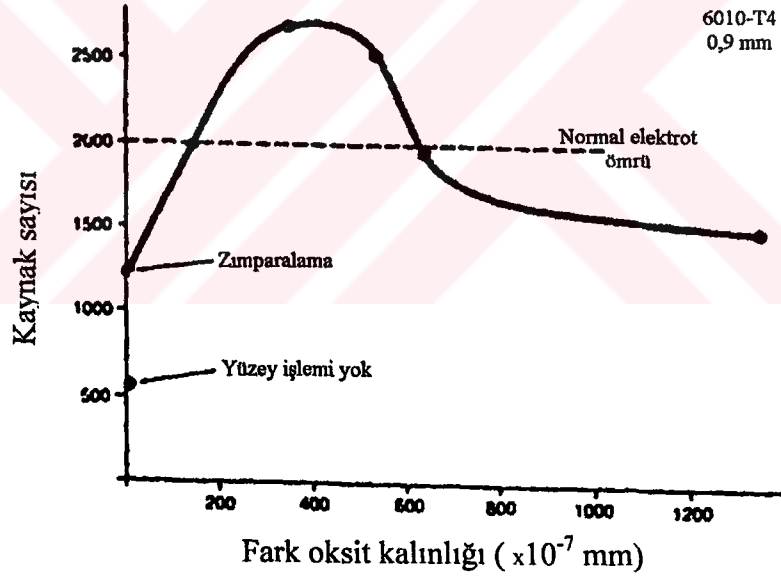
Oksit Tabakası Kalınlığı ($\times 10^{-7}$ mm)		Direnç		Fark Değerleri		Temas Yüzeyi Durumu	İş Parçası-Elektrot Yüzeyi Durumu
Cu/Al	Al/Al	Cu/Al ($\mu\Omega$)	Al/Al ($10^3\mu\Omega$)	Oksit Kalınlığı ($\times 10^{-7}$ mm)	Direnç ($10^3\mu\Omega$)		
-	-	1600	20	0	19,84	İşlem yok	İşlem yok
20	20	40	0,6	0	0,56	Zımparalama	Zımparalama
20	165	40	29	145	28,96	Anodize İşlemi	Zımparalama
20	352	40	49	332	48,96	Anodize İşlemi	Zımparalama
20	557	40	149	537	148,96	Anodize İşlemi	Zımparalama
20	656	40	171	636	170,96	Anodize İşlemi	Zımparalama
20	1300	40	336	1280	335,96	Anodize İşlemi	Zımparalama

Yapılan deney şartları ise Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

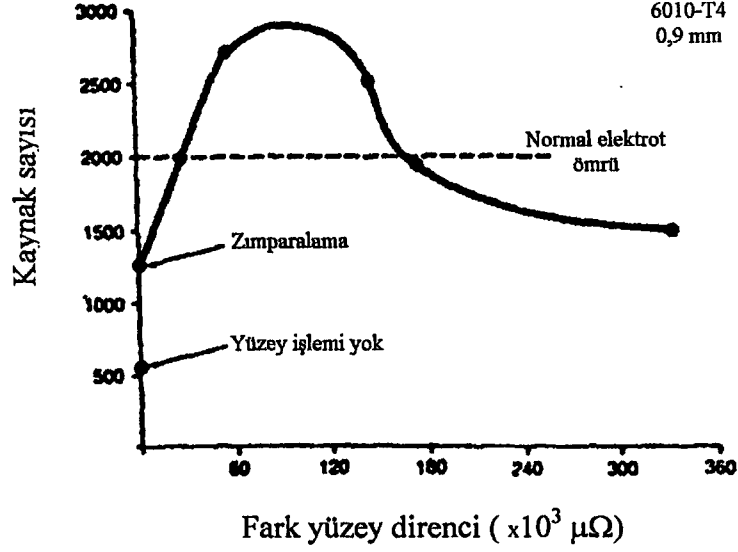
Çizelge 4.4 Deneyde kullanılan değerler (Leone ve Altshuller, 1984).

Deneyde kullanılan değerler	
Malzeme	6010-T4
Kalınlık (mm)	0,9
Kaynak Zamanı (Periyot)	4
Sıkıştırma Zamanı (Periyot)	91
Tutma Zamanı (Periyot)	60
Elektrot Kuvveti (N)	3114
Pik Akım (kA)	22-25
Elektrot Uç Yuvarlatma Yarıçapı (mm)	76
Ortalama Çekirdek Çapı (mm)	4,32

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi maksimum sayıdaki kaynak $330 \cdot 10^{-7}$ mm'lik fark oksit kalınlığında oluşmaktadır. Şekil 4.2'de bunun $50 \cdot 10^3 \mu\Omega$ 'luk ortalama fark yüzey direncine karşılık geldiği görülmektedir.



Şekil 4.1 Fark oksit kalınlığı ve kaynak sayısı arasındaki ilişki (Leone ve Altshuller, 1984).



Şekil 4.2 Fark yüzey direnci ve kaynak sayısı arasındaki ilişki (Leone ve Altshuller, 1984).

4.2.3 Korozyon Direnci

1100, 3003 ve 5052 gibi ısıtılmamış alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında seçici korozyon görülmez. Bunlar kaynak olmayan metalin sahip olduğu korozyon direncine sahiptir. 6061 ve 6063 gibi Mg, Si içeren ısıtılmış sacların kaynaklarında iyi korozyon direnci vardır.

4.3 Malzeme Özelliklerine Bağlı Olarak Nokta Kaynağına Etki Eden Faktörler

Alüminyum alaşımlarının sahip olduğu tabii özelliklerinden dolayı nokta direnç kaynağında takip edilen yöntemler çeliğe göre farklıdır. Bu özellikler, elektriksel ve ısıtılabilirlikler, düşük erime sıcaklığı sahası ve yükselen sıcaklıkla birlikte düşük dayanım, dar plastik saha, katılma esnasındaki yüksek kendini çekme ve doğal oksit tabakasıdır.

4.3.1 Elektriksel ve Isıl İletkenlik

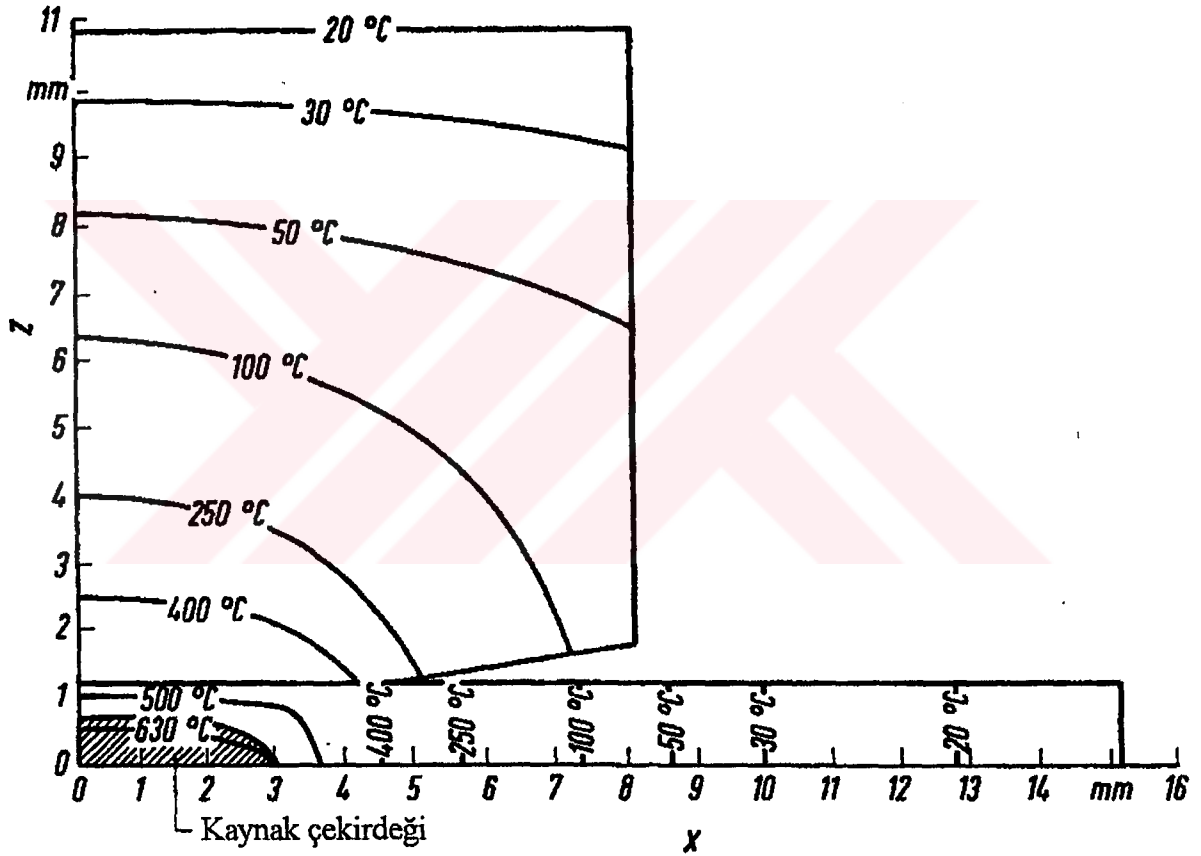
Alüminyum alaşımları, nokta direnç kaynağında kullanılan çoğu metale göre daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir. Örneğin, 2024 alaşımının (Alüminyum alaşımları içinde en düşük iletkenliğe sahip olanlardan biridir.) elektriksel iletkenliği, düşük karbonlu çeliğin iki mislidir.

Bu yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek kaynak akımı sağlayabilen yüksek kapasitede kaynak makinası gerektirir. Böylece kaynak noktası oluşumu için gereken akım yoğunluğu sağlanır. Elektriksel yan devreyi önleme için, çeliklere göre daha büyük boyutta nokta aralıkları gereklidir. Alüminyum alaşımlarının yüksek ısıtılabilirlikleri nedeniyle iş parçalarında

dirençten kaynaklanan enerji kaybını önlemek için kaynak süreleri çok kısadır. Genel olarak, alüminyum alaşımları, çeliklere göre üç kat daha fazla akım gerektirirler.

4.3.2 Sıcaklık Artışı

Alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında sıcaklık artışı nedeniyle çelikte kıyaslandığında ergime daha hızlı ve düşük sıcaklıklarda olmaktadır. Elektrot tutucuları, kaynak kuvveti ve iş parçası temasını sürdürüebilmek için elektrotların hızlı şekilde hareketine imkan vermelidir. Bu hareketler çok küçük olsa da 2 ile 5 ms'lik çok kısa sürelerde meydana gelir.

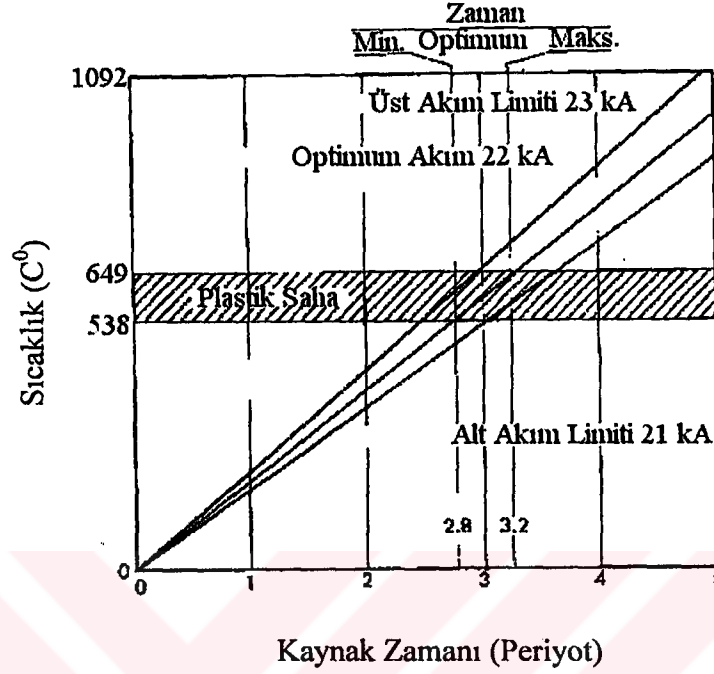


Şekil 4.3 Kaynak işlemi sırasında sıcaklık dağılımı: Malzeme 5056, kaynak zamanı 6 periyot, sac kalınlığı 1,15 mm, kaynak akımı 28 kA, elektrot kuvveti 4kN (Hehl vd., 1984).

4.3.3 Plastik Saha

Alüminyum alaşımları için kaynak noktasının oluştuğu plastik saha çok dardır. Şekil 4.4'te farklı kaynak akımları kullanıldığında plastik bölgeye bağlı olarak kullanılması gereken kaynak zamanları görülmektedir. Burada görüldüğü gibi optimum akım olan 22000 A kullanıldığında 111°C'lik bir plastik sahada 2,8 ila 3,2 periyotluk bir zaman aralığında

kaynak yapılabilir. Çeliklerde bu saha 540°C'ye dek çıkabilir. Bu yüzden alüminyum alaşımlarında, çeliklere göre kaynak zamanı daha kısadır.



Şekil 4.4 Alüminyum alaşımlarında plastik saha (1).

4.3.4 Soğuma Sırasında Kendini Çekme

Alüminyum alaşımlarında, sıvılaştırma sıcaklığından katılaştırma sıcaklığına doğru soğuma esnasında önemli seviyede kendini çekme görülür. Bu özellik 2024, 7075 gibi yüksek dayanımlı ısıtılmış işlem görmüş alaşımlarda daha belirgin görülür. Böylece çatlak oluşabilir. Isıtılmış işlem görmemiş ve 6xxx serisi alaşımlarda ise kaynak çekirdeğinin kendini çekmesi sırasında çatlak oluşma ihtimali daha azdır. Katılaştırma tamamlanıncaya kadar kaynak çekirdeği üzerindeki basınç uygulaması sürdürüldüğünde, kendini çekme sırasında porozite ve çatlama oluşmaz.

4.3.5 Yüzey Oksidi

Alüminyum, atmosferdeki oksijen ile çok kısa bir sürede birleşerek yüzeyinde alüminyum oksit tabakası oluşturur. Bu tabakanın yüksek ve az çok düzensiz elektriksel direnci kaynak esnasında metalde ısı oluşumuna neden olur. Bu yüzden uçak endüstrisinde, bu oksit filmi kaynaktan önce üniform elektriksel direnç vermesi için kaldırılır veya uygun hale getirilir.

Uçak sanayi dışındaki ticari amaçlı alüminyum nokta direnç kaynağında, kaynak işlemi temizleme ve oksit giderimi olmadan yapılır. Fakat bu yolla elektrot ömrü azalır, kaynak

noktaları kalite bakımından çeşitlilik gösterir ve yapıları düzensiz olur. Yüzey hazırlama işleminin derecesi kaynak edilecek üründen istenilen dayanıma ve kaliteye bağlıdır.

4.4 Kaynak Makinaları

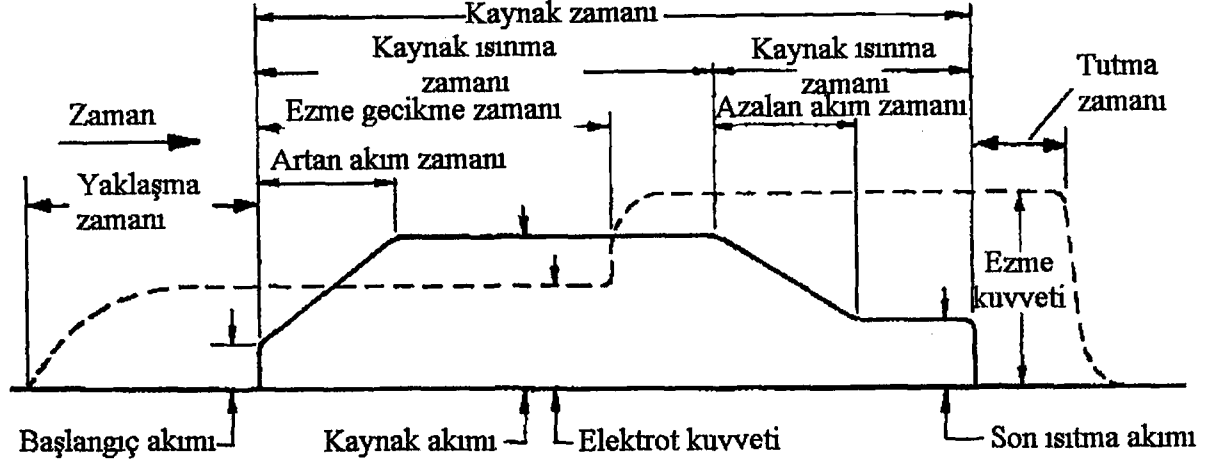
Alüminyum nokta direnç kaynağında tek fazlı enerji, üç fazlı enerji ve elektrostatik enerji depolayan kaynak makinaları kullanılmaktadır. En iyi sonuçları elde etmek için alüminyum nokta direnç kaynağında kullanılan makinalar şu özelliklere sahip olmalıdır.

- Kısa kaynak zamanında yüksek kaynak akımı sağlamalıdır.
- Kaynak akımı ve süresi için senkronize elektronik kontrol olmalıdır.
- Elektrot kuvvetindeki değişimleri hızlı uygulayabilecek kaynak makinesi kolları.
- Artan-azalan akım kontrolü (Slope Control).
- Kaynak akımı süresince akımın kademeli artırılıp, azaltılabilmesi istenir. Böylece kaynak edilecek parçanın aşırı ısınması önlenerek kaynak kalitesi ve elektrot ömrü artırılmaktadır. Kaynak işlemi sonunda akımın kademeli olarak azaltılması ile soğuma kontrolü olarak yapıldığından çatlak ve gözenek oluşumu önlenir.
- Kademeli elektrot kuvveti sağlayabilmelidir. Kaynağın başında elektrotlar iş parçasını sıkıştırırlar ve iyi bir elektriksel temas sağlarlar. Daha sonra temas direncinin artırılıp kaynak yapılabilmesi için elektrot kuvveti azaltılır. İki levha arasında çekirdek oluştuğunda basınç tekrar artırılır.
- Yüksek sıcaklıklarda elektrot ucunun kaynak edilen malzemeye kaynamasını önlemek için elektrotların soğutulmasını sağlayacak donanıma sahip olmalıdır.

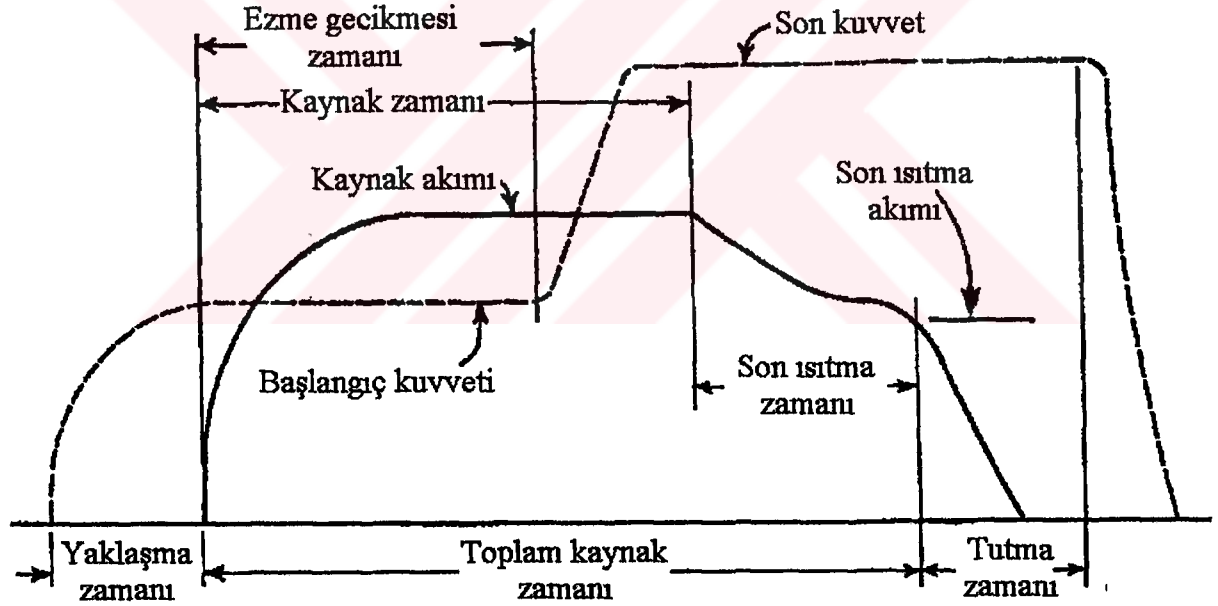
Tek fazlı enerji makinalarının en büyük avantajı ucuz olmalarıdır. Tek fazlı enerji makinaları artan-azalan akım kontrolü (slope kontrol) sağlayabilmelidir. Tek fazlı enerji makinalarda görülen yüksek ve dengesiz güç çekimi, üç fazlı doğru enerji makinalarda indirgenmiştir. Üç fazlı enerji makinaları da alüminyum kaynağı için oldukça uygundur. Bunun nedeni, üç fazlı enerji makinalarının çalışması sırasında akımın kademeli olarak artışının, tek fazlı makinalarda uygulanan artan-azalan akım kontrol yöntemine benzemesidir.

Alüminyum nokta kaynağında tek ve üç fazlı enerji makinalarının haricinde, elektrostatik enerji depolayan kaynak makinaları da kullanılmaktadır. Bu makinalar şekil, büyüklük ve zaman olarak limitli tek impulsu kaynak akımı sağlar. Belli bir kaynak sayısından sonra

tekrar şarj süresi gerektirdiğinden dakikadaki üretim oranı sınırlıdır. Üç fazlı direk enerji makinaları elektrostatik enerji depolayan makinaların yerini almaktadır.



Şekil 4.5 Tek fazlı nokta kaynağı makinalarında akım- kuvvet diyagramı (1).



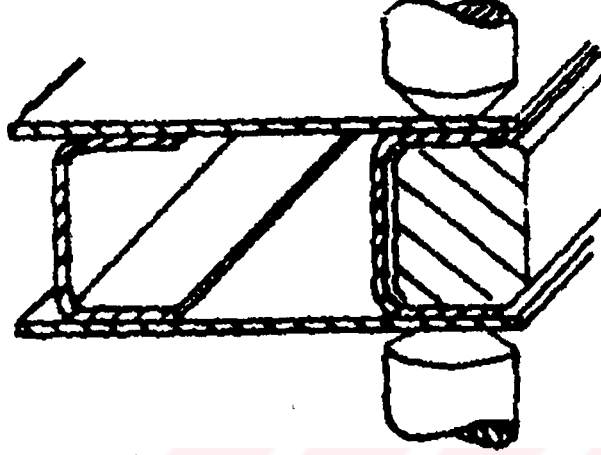
Şekil 4.6 Üç fazlı nokta kaynağı makinalarında akım- kuvvet diyagramı (1).

4.5 Elektrotlar

Uygun bir kaynak kalitesi elde etmek için elektrot malzemesinin seçimi, sertliği, uç şekli, elektrotun bakımı ve soğutulması çok önemlidir. Alüminyum sacların nokta kaynağında, bakır alaşım Sınıf 1,2 ve 3 tipi elektrotlar kullanılmaktadır. Bakır alaşım elektrotlar, yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Bakırın yüksek sıcaklıklarda alüminyum ile alaşım meydana

getirmesi nedeniyle, elektrot ucunun alaşımlanması önlemek için uygun soğutma sağlanmalıdır.

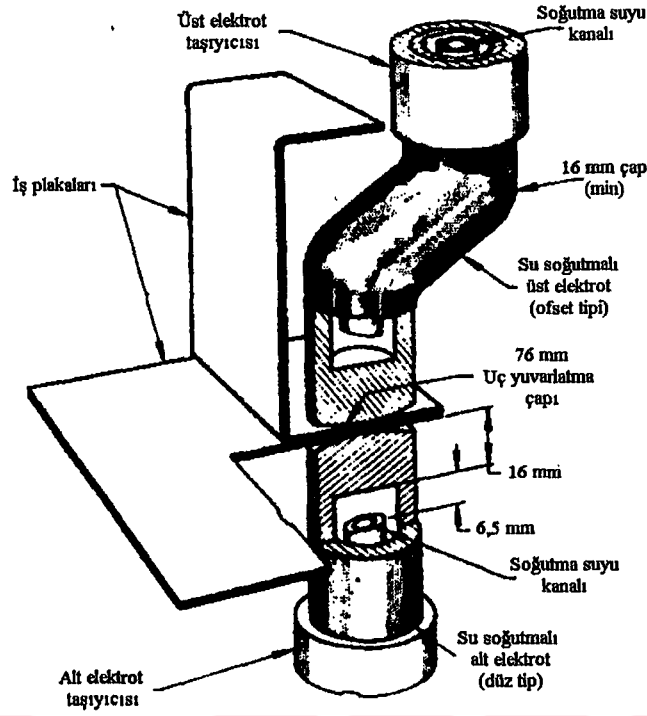
İçi boş gövdelerin veya parçaların kaynağında, arada bulunan uygun şekilde bir bakır çubuktan yararlanır. Bakır parça, iki elektrot arasındaki devreyi tamamlar.



Şekil 4.7 İçi boş gövdelerin kaynağında kullanılan kaynak usulüne bir örnek (Anık,1960).

Alüminyumun nokta kaynağında kullanılan elektrotlar düz veya ofset biçiminde olabilir. Şekil 4.8'de düz ve ofset tip elektrot biçimleri görülmektedir (ASM,1989). Kayma ve sapmayı önlemek için mümkün olduğunca düz elektrotlar tercih edilmelidir. Ancak parçaya yaklaşılabilişliğin önem kazandığı durumlarda ofset tipi elektrotlar kullanılmalıdır.

Genel olarak kaynak noktasında akımın yoğunlaştırılması için, elektrot uçları şekillendirilir. Küresel elektrot uçları, elektrot çapından daha büyük çaplarda küresel olarak yuvarlatılmıştır. Nokta kaynağında kullanılan elektrot uçlarından biri düz, diğeri ise küresel olarak yuvarlatılmış olabilir. Yuvarlatılmış olan elektrot uçlarında akım yoğunluğu daha iyi sağlanır, parçanın merkezlenmesi daha kolay olur, elektrotun bakımı ve temizlenmesi kolaylaşır. Küresel ve düz uçlu elektrotların kullanılması durumunda, düz uçlu taraftaki parçada elektrot baskı izleri minimuma indirilmiştir. En yüksek birleşme dayanımı ise eşit şekilde yuvarlatılmış elektrot uçları ile eşit kalınlıktaki parçaların kaynağında sağlanmaktadır.



Şekil 4.8 Düz ve ofset tipindeki elektrotların yapısal görünümü (ASM,1989).

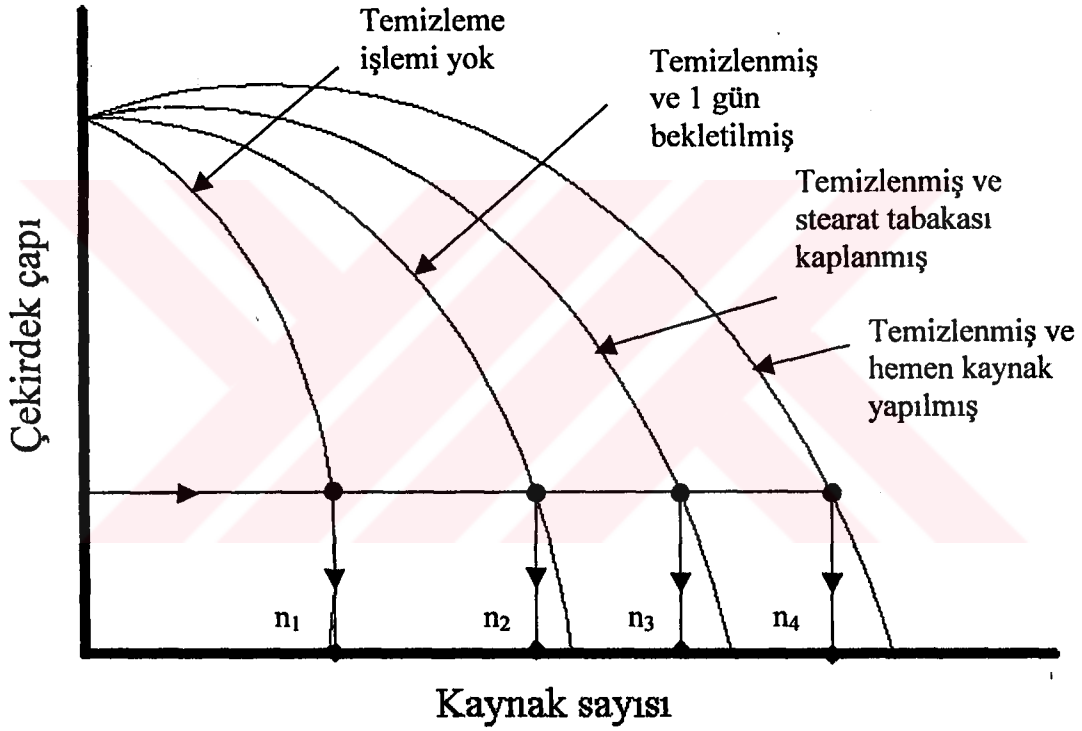
4.5.1 Elektrotların Bakımı

Alüminyum sacların nokta kaynağında kalite, kaynatılacak sacların yüzey durumlarına, elektrotların temizliği ve bakımına kuvvetle bağlıdır. Alüminyum nokta kaynağında elektrot ömrünü azaltan faktör çelik sacların kaynağında olduğu gibi deformasyon (mantarlaşma) değil, elektrotun alüminyum toplayıp alaşımlanmasıdır. Alaşımlanan elektrot ucunun elektrik iletkenliği düşer ve temas direnci artar. Bunun sonucunda elektrot iş parçasına yapışır ve parça yüzeyi erir. Bu nedenle elektrot ucunun temizlenmesi ve bakımı daha önem taşımaktadır. Alaşımlanan elektrot ucu periyodik olarak temizlenmeli veya değiştirilmelidir. Bu mahzurlu durumu ortadan kaldırma için uygun elektrot kuvveti kullanılmalı, kaynak akımı yüksek olmamalı ve alüminyum parça yüzeyleri (oksit tabakası) uygun biçimde temizlenmelidir.

Elektrotların temizlenmesinde uygun eleman ve donanımlar kullanılmalıdır. Temizleme sırasında Şekil 2.14'de görülen ve üzerinde elektrotun ucuna göre yuvalar açılan bir çelik sacdan istifade edilebilir. Çelik sacın üzerine zımpara kağıda sarılarak elektrotun uçları arasına konur ve sağa sola hareket ettirilmek suretiyle temizleme yapılır. Temizleme sonrasında elektrot uç şeklinin aynı olmasına dikkat edilmelidir.

4.6 Yüzey Hazırlama

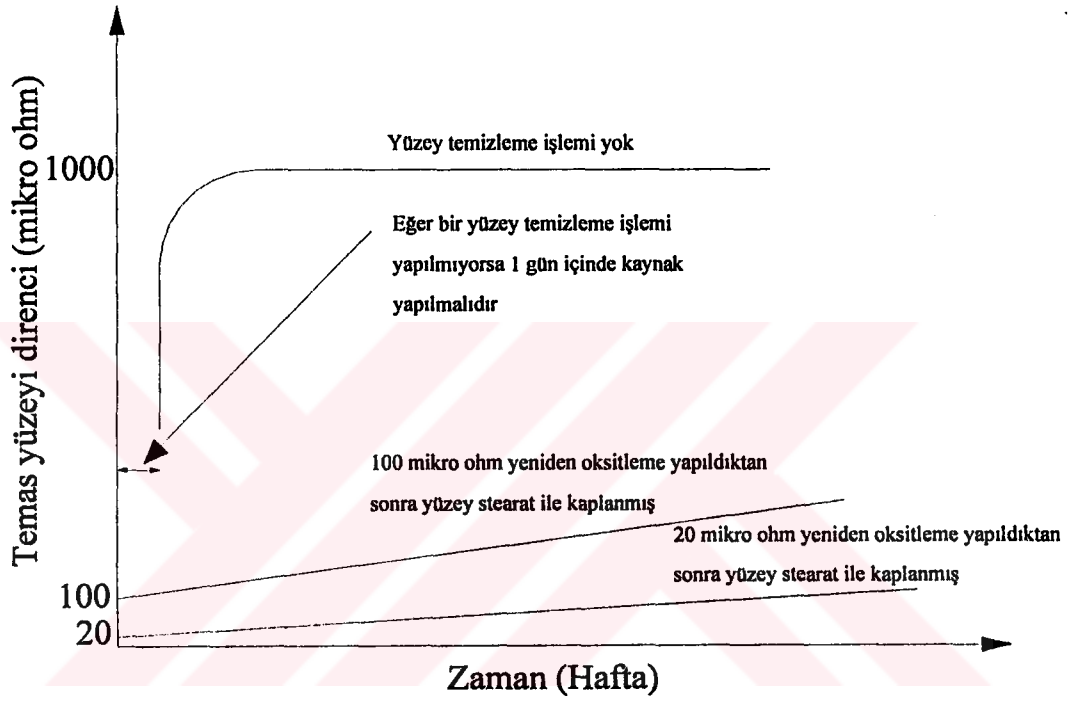
Kaynak yapılacak yüzeylerin hazırlanması, elektrot ile parça arasındaki temas direnci bakımından önemlidir. Buna rağmen alüminyum ve alaşımlarının yüzeylerini hazırlamadan da nokta kaynağı yapmak mümkündür. Fakat parçanın yüzeyindeki oksit ve yağ tabakası bağlantının mukavemetini düşürdüğü gibi elektrot ömrünü de kısaltır. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi çekirdek çapı sabit alındığında temizleme işlemi yapılmamış saclarda n_1 adet kaynak yapılabilmektedir. Temizleme işlemine ve bekleme zamanının kısalığına bağlı olarak elektrotun ömrü artmakta ve kaynak sayısı n_4 'e kadar artmaktadır.



Şekil 4.9 Farklı yüzey temizleme işlemlerinin elektrot ömrüne etkileri (1).

Alüminyum alaşımların nokta kaynağında çatlak ve gözenek oluşumundan kaçınmak, uygun ve üniform bir kaynak dayanımı elde etmek ve elektrotun ömrünü uzatmak için oksit tabakasının temizlenmesi gerekir. Oksit tabakası mekanik veya kimyasal yollarla temizlenebilir. Alüminyumun oksijene karşı aşırı ilgisinden dolayı, temizlenen parçaların hemen kaynak edilmesi gerekir. Aksi takdirde oksit tabakası yeniden oluşur. Oksit tabakasının temizlenmesinden sonra kaynak etme süresi, temizleme yöntemine ve depolama şartlarına bağlı olarak 24 saat ile birkaç gün arasında değişir. Oksit tabakası çıkarılan yüzeylere ince gres yağı veya stearat tabakası sürülürse bu süre biraz daha uzar.

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi en üstteki eğride alüminyum iş parçasının yüzeyine herhangi bir işlem yapılmamıştır. Diğer iki eğride ise kullanım amacına uygun olarak istenilen temas yüzeyi direncini elde etmek için yüzey zımparalama işleminden sonra oksitleme işlemi yapılır ve sonra yüzey stearat ile kaplanır. Bu stearat tabakası oksit tabakasının büyümesini yavaşlatır.



Şekil 4.10 Temas yüzeyi direncinin yüzey işleme durumu ve bekleme zamanına göre değişimi (1).

Parça yüzeyleri üzerinde bulunan yağ ve diğer istenmeyen maddeler önce boya tineri, alkol veya uygun çözücülerle temizlenir. Bu temizleme işlemi miktar ve parça büyüklüğüne bağlı olarak silme, daldırma, spreyleme veya buhar tatbiki şeklinde olabilir. Buhar tatbiki, çok sayıda parça için uygundur. Daha sonra oksit tabakası da mekanik veya kimyasal yollarla çıkartılır.

Oksit tabakasının mekanik olarak temizlenmesinin etkinliği, operatörün becerisine bağlıdır. Eğer kaynak ufak bir bölgede yapılacaksa, parça adedi az ise ve oksit tabakası ince ise bu yöntem hızlı bir çözüm sağlar. Çok büyük parçaların kimyasal banyoları zor olacağından dolayı, mekanik metotların kullanılması daha uygun olmaktadır. Bazen mekanik yollarla temizlenmiş parçaların temas dirençleri, kimyasal yollarla temizlenmiş olanlara göre daha

düşük olabilmektedir. Temizleme işlemi paslanmaz çelik fırçalar, çelik ve alüminyum yünler kullanılarak yapılabilir.

Oksit tabakasının kimyasal metotla çıkartılması, kütle halindeki imalatta veya büyük yüzeylerin temizlenmesinde kullanılır. Kimyasal olarak temizleme yönteminde tipik bir çözelti 12% Nitrik asit ve 0,4% hidroflorik asit içerir. Parçalara 2-6 dakika arasında kimyasal banyo uygulandıktan sonra temiz su ile durulanır. (ASM,1989).

4.7 Nokta Kaynağı Karakteristikleri

Ekstrüzyon, dövme işlemi ve döküm yoluyla imal edilen alüminyum alaşımları normal teçhizatlarla 12.7 ile 19.05 mm kalınlık oluşturacak şekilde nokta kaynağı edilebilir. Nokta kaynağı karakteristikleri kaynak akımı, kaynak zamanı, elektrot kuvveti ve nokta aralıkları olarak sayılabilir.

4.7.1 Kaynak Akımı

Alüminyumun ısı ve elektriksel iletkenlikleri, düşük karbonlu çeliğe göre iki ile dört kat daha fazla olduğu için aynı kalınlıktaki kaynaklarda daha yüksek akıma ihtiyaç vardır. Çizelge 4.5 ve 4.6'da çeşitli alüminyum alaşımları ile ilgili pratik değerler verilmiştir. Verilen bu değerler alüminyum alaşımlarının nokta kaynağı değişkenlerinin belirlenmesinde başlangıç noktası olarak kullanılabilir.

Çizelge 4.5 Alüminyum alaşımı saçların tek fazlı makinalar ile nokta kaynağı uygulamaları (60 Periyot= 1s) (ASM,1989).

Sac kalınlığı (mm)	Elektrot çapı (mm)	Üst elektrot ucu yuvarlatma yarıçapı (mm)	Alt elektrot ucu yuvarlatma yarıçapı (mm)	Elektrot kuvveti (daN)	Kaynak zamanı (periyot)	Kaynak akımı (A)	Çekirdek çapı (mm)
0,41	15,88	25,4	Düz	145	4	15000	2,80
0,51	15,88	25,4	Düz	155	5	18000	3,18
0,64	15,88	50,8	Düz	180	6	21800	3,56
0,82	15,88	50,8	Düz	227	6	26000	4,06
1,02	15,88	76,2	Düz	272	8	30700	4,57
1,30	15,88	76,2	Düz	300	8	33000	5,33
1,63	15,88	76,2	Düz	340	10	35900	6,35
1,83	15,88	101,6	101,6	363	10	38000	6,99
2,06	22,23	101,6	101,6	390	10	41800	7,62
2,31	22,23	152,4	152,4	431	12	46000	8,38
2,59	22,23	152,4	152,4	477	15	56000	9,14
3,18	22,23	152,4	152,4	590	15	76000	10,80

Yüksek akım uygulanması ile kaynak çekirdeği hızlı oluşacaktır. Akım süresinin uzun tutulmasıyla çekirdeğin ana metale doğru olan nüfuziyeti artar. Akım düşük tutulursa kaynak çekirdeği yavaş oluşacak ve bu sırada oluşan ısının çevreye daha fazla yayılmasıyla çarpılmalar görülecektir. Eğer akım yüksek tutulursa gaz kabarcıkları ve metalin dışarı fıskırması oluşur, bu da sac ayrılmasına ve zayıf çekirdek oluşumuna yol açar.

Çizelge 4.6 Alüminyum alaşımı sacların üç fazlı makinalar ile nokta kaynağı uygulamaları (60 Periyot= 1 s) (ASM,1989)

Sac Kalınlığı (mm)	Elektrot çapı (mm)	Elektrot ucu yuvarlatma yarıçapı (mm)	Kaynak süresince elektrot kuvveti (daN)	Çekirdek oluşumu sonrası elektrot kuvveti (daN)	Kay. süresi (per.)	Son ısıtma süresi (per.)	Kaynak akımı (A)	Son ısıtma akımı (A)	Çekir. çapı (mm)
0,41	15,9	76,2	200	454	1	Yok	19000	Yok	2,8
0,51	15,9	76,2	236	522	1	Yok	22000	Yok	3,2
0,81	15,9	76,2	304	700	2	Yok	28000	Yok	4,1
1,02	15,9	76,2	331	817	3	Yok	32000	Yok	4,6
1,30	15,9	203,2	409	1022	4	4	37000	30000	5,3
1,63	15,9	203,2	500	1317	5	5	43000	36000	6,4
1,83	15,9	203,2	540	1471	6	7	48000	38000	7,0
2,06	22,2	203,2	663	1725	7	9	52000	42000	7,6
2,31	22,2	203,2	772	1952	8	11	56000	45000	8,4
2,60	22,2	203,2	863	2270	9	14	61000	49000	9,1
3,18	22,2	203,2	1135	2951	10	22	69000	54000	10,8
0,51	15,9	76,2	227	Yok	0,5	Yok	26000	Yok	3,2
0,64	15,9	76,2	227	681	1	3	34000	8500	3,6
0,81	15,9	101,6	318	817	1	4	36000	9000	4,1
1,02	15,9	101,6	363	908	1	4	42000	12600	4,6
1,30	15,9	101,6	409	1044	1	5	46000	13800	5,3
1,63	15,9	152,4	590	1362	2	5	54000	18900	6,4
1,83	15,9	152,4	726	1634	2	6	61000	21350	7,0
2,06	22,2	152,4	908	1952	3	6	65000	22750	7,6
2,31	22,2	152,4	1090	2406	3	8	75000	30000	8,4
2,60	22,2	203,2	1271	3087	3	8	85000	34000	9,1
3,18	22,2	203,2	1816	4086	4	10	100000	45000	10,8

4.7.2 Kaynak Süresi

Alüminyum alaşımlarında uygulanan kaynak süresi ısı randımanının artırılması amacıyla, çeliğe göre daha kısadır. Alüminyumun erime sıcaklığının düşük olmasına bağlı olarak, oldukça dar bir kaynak aralığı vardır. Parça kalınlığı arttıkça kaynak zamanı da artar. Kaynak noktasının büyüklüğü ve mukavemeti de zamana tesir eder. Çizelge 4.5 ve 4.6'da çeşitli uygulama örnekleri görülebilir.

4.7.3 Elektrot Kuvveti

Elektrot basıncı, esas itibariyle birleştirilecek parçanın mukavemetiyle alakalıdır. Akım şiddeti ve elektrot basıncı, kaynak yapılan noktada ergimiş metalin sac yüzeyine çıkmayacak şekilde ayarlanır.

Alüminyum nokta kaynağında, düşük dayanımlı alüminyum alaşımları, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlara göre daha az elektrot kuvveti gerektirir.

Yetersiz elektrot kuvveti uygulanması neticesinde yüzey yanmaları, aşırı elektrot ucu alaşımlanması ve kaynak metalinin dışarı akması gibi mahzurlu durumlar görülebilir. Aşırı elektrot kuvveti uygulanması ise yüzey bozukluklarına, çarpımalara ve simetrik olmayan kaynak noktasına neden olur.

Ergimiş çekirdek tamamen katı metalle çevrili olduğundan, hemen basıncın kalkacağı düşünülürse, o anda kaynakta boşluk ve çatlama tehlikesi oluşur. Bundan dolayı ergimiş malzeme üzerinde elektrotların basıncı soğuma sırasında devam ettirilir veya arttırılarak ısının çabuk dağılmasına ve aynı zamanda kaynağın basınç altında katılaşması ve soğumasına imkan tanınır.

İç hataları azaltmak ve kaynak kalitesini yükseltmek amacıyla, kademeli olarak uygulanan elektrot kuvveti, kaynak çevrimi süresince arttırılıp azaltılır. Parçalardan akımın geçtiği süre içinde elektrot kuvveti düşük tutularak, temas direnci arttırılır. Kaynak çekirdeğinin katılaşması yani tutma süresince elektrot kuvveti arttırılır. Akım geçtikten sonra oluşan kaynak çekirdeğinin soğuması sırasında uygulanan elektrot kuvvetinin ayarlanması çok önemlidir. Eğer elektrot kuvveti kaynak süresi bitmeden arttırılırsa, temas direnci düşer ve kaynak düzgün olmaz. Aksine çok geç arttırılırsa, kaynak çekirdeği soğuyacağından dolayı etkisi olmaz.

4.7.4 Nokta Aralıkları

Nokta aralıkları uygun tutulmadığı takdirde, kaynak akımının bir kısmı daha önce yapılmış olan kaynak noktası üzerine sapacaktır. Yan devre olayının etkinliği, nokta aralığının, parça kalınlığının ve elektrik direncinin azalmasıyla gelişir.

Noktalar arası mesafe pratik olarak, parça kalınlığının 8 katından az olmamalıdır. Eğer bu mesafeden daha az bırakılmak zorunda kalırsa, akım değeri ilk nokta kaynağını takiben artırılmalıdır. İki'den fazla sıralı nokta kaynağı yapılması durumunda ilk olarak merkezdeki sıranın yapılmasına önem verilmelidir (ASM,1989).

Nokta kaynağının parça kenarına çok yakın yapılması durumunda nokta ile kenar arasındaki bölge deforme olur ve eriyik metal birleşme yerinde akar. Çizelge 4.7'de alüminyum alaşımı sacların nokta kaynağında tavsiye edilen en az bindirme miktarları, nokta aralıkları ve nokta sıraları aralıkları verilmektedir.

Sızdırmazlık amaçlı birleştirmelerde, verilen aralıkların altında kalınması durumlarında, özel kaynak sıraları düzenlenmesi, atlama kaynak uygulamasına geçilmesi veya simetrik yan devre oluşturacak şekilde nokta çapı saptanmasına geçilebilir.

Çizelge 4.7 Alüminyum sacların nokta kaynağı için minimum tavsiye edilen bindirme uzunlukları, nokta aralıkları ve nokta sıraları (ASM,1989).

En ince sac kalınlığı (mm)	Minimum bindirme miktarı (mm) (a)	Minimum.nokta aralığı (mm) (b)	Min.Nokta sıraları Aralığı (mm)
0,41	7,94	9,53	6,35
0,51	9,53	9,53	6,35
0,64	9,53	9,53	7,94
0,81	12,70	12,70	7,94
1,02	14,29	12,70	9,53
1,30	15,88	15,88	9,53
1,63	19,05	15,88	9,53
1,83	20,64	19,05	11,11
2,06	22,23	19,05	12,7
2,31	23,81	22,23	12,7
2,59	25,4	25,4	12,7
3,18	28,58	31,75	15,88

(a) Noktanın parça kenarına olan en düşük mesafesi, bindirme miktarının yarısı kadar olmalıdır.

(b) Merkezden merkeze uzaklıktır.

4.8 Kaynağın Muayenesi

Çekme, ayırma, burma ve keski testleri, alüminyum nokta kaynağının kalitesini belirlemede kullanılan en yaygın yöntemlerdendir. Uygun kaliteyi sağlayabilmek için pratik olarak çekirdek çapının en az şu formülle hesaplanan değerde olması gerekir (ASM,1989).

$$\text{Çekirdek çapı} \geq 2.s + 1,524 \text{ (mm)} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.5 ve 4.6'da verilen çekirdek çapı değerleri de karşılaştırma olarak kullanılabilir. Görsel incelemeler ile elektrot alaşımlanması, yüzey yanmaları, çatlaklar, yüzey deformasyonları, eriyik metal akmaları tespit edilebilir. Kaynak noktaları, oluşan çekirdek çapı, penetrasyon ve mikroyapı özelliklerini metalografik olarak incelemek için kesilebilir. Ultrasonik ve röntgen muayeneler vasıtasıyla iç hatalar, çatlaklar, gözenekler, çekirdek büyüklüğü ve şekli incelenebilir.

4.9 Kaynak Hataları Sebepleri ve Çözümleri

Sıkça görülen kaynak hataları, elektrot alaşımlanması, çatlak ve gözenekler, ergimiş metalin fişkırması, elektrot izi ve sac ayrılması, düzensiz kaynak şekli ve ergimemiş kaynaklardır.

4.9.1 Elektrot Alaşımlanması

Bu durum genellikle elektrot ile iş parçası birleşme yüzeyinde aşırı ısınma oluşumu sonucu ortaya çıkar. Bir çok olayda, esas erime ve yanma iş parçası yüzeyinde oluşmaktadır.

Elektrot alaşımılması kaynak sırasında uygun elektrot kuvveti kullanarak veya aşırı kaynak akımı ve zamanından kaçınarak minimize edilir. Elektrot alaşımlanması, elektrotun ve iş parçasının usulsüz temizlenmesi ile oluşabilir. Bunun yanında uygun olmayan elektrot malzemesi, boyutu veya ucu, elektrotların yetersiz soğutulması da buna sebebiyet verebilir. Elektrot alaşımılması tüm kaynak teçhizatları ile oluşabilir ama kaynağın monofaze alternatif akım makinası ile yapıldığı durumlarda daha çok görülmektedir.

4.9.2 Çatlak ve Gözenekler

Kaynak metalindeki çatlak ve gözenekler, kaynak metalinin çok hızlı soğuması, aşırı yüksek soğuma oranı, kaynak esnasındaki yetersiz ve yanlış elektrot kuvveti uygulanması sonucu meydana gelir. 2024 ve 7075 gibi bazı yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarında eğer kaynak akımı çok yüksek veya kaynak sırasındaki elektrot kuvveti çok düşükse, çatlaklar

oluşabilir. Kaynak akımı kesildikten sonra kaynak merceğindeki hızlı soğuma çatlaklarla sonuçlanabilir. Azalan akım ve son ısıtma uygulamaları bu çatlakları önleyebilir

4.9.3 Ergimiş Metal Fıskırması

Daha iyi bir yüzey temizliği yapılmalı ve kaynak akımı düşürülmelidir. Ayrıca başlangıçta düşük tutulan elektrot kuvvetini daha sonra aşırı şekilde artırılması neticesinde de görülmektedir.

Kaynak edilecek sacın aşırı ısınması ve uygun olmayan elektrot kuvvetinin kullanılması, kaynak metalinin fıskırmasına neden olur. Ayrıca kaynak noktasının parça kenarına olan mesafesi çok yakın olmamalıdır.

4.9.4 Elektrot İzi ve Sac Ayrılması

Elektrot izi ve sac ayrılması genellikle birlikte oluşur. Bu olayın oluşmasının ana nedeni iş parçasının yumuşak olmasıdır. Genellikle, elektrot izi ve sac ayrılması elektrot kuvvetinin azaltılması, elektrot uç yarıçapının artırılması veya kaynak akımı zamanının azaltılması ile minimize edilebilir. Sac ayrılması kaynak edilen sacların düz olmaması nedeniyle de oluşabilir.

4.9.5 Düzensiz Kaynak Şekli ve Ergimemiş Kaynak

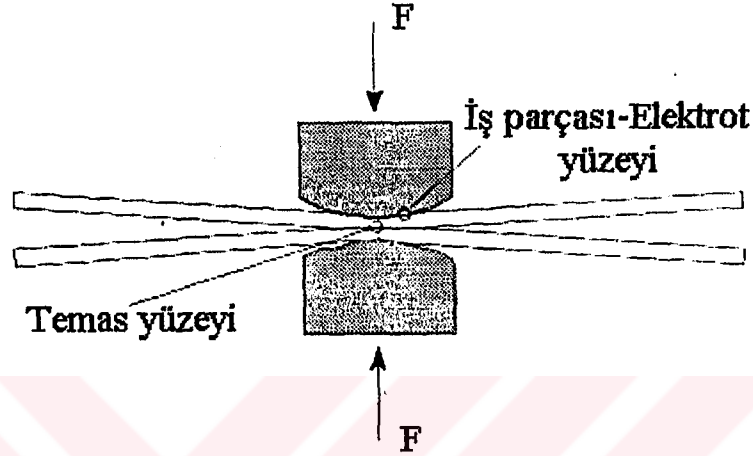
Bu hata iş parçalarının birbirine uymaması, doğru olmayan elektrot ayarlaması, elektrotların kayması, yetersiz yüzey hazırlama veya elektrot ucunun uygun şekle sahip olmaması dolayısıyla oluşur. Seyrekte olsa kaplanmış saclarda kaynak çekirdeğinde kaplama metali ergimemiş olarak bulunabilir. Bu hata kaynak akımını uygun seviyeye getirerek giderilebilir.

4.9.6 Yüzey Yanması

Yetersiz elektrot kuvveti, yüksek kaynak akımı ve yüzeyde bulunan yabancı cisimler nedeniyle meydana gelir. Kaynak makinasının akım ve elektrot kuvveti zaman ayarları kontrol edilmelidir.

5. ALÜMİNYUM NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINDA DİRENCİN İNCELENMESİ

Nokta direnç kaynağında, akım iki sac boyunca işlem süresince sıkıştırılan iki su soğutmalı elektrotu geçer (Şekil 5.1). Akım yolu üzerinde 3 tane direnç bileşeni vardır. Bunlar, malzeme direnci, iş parçası-elektrot yüzeyindeki temas direnci ve temas yüzeyindeki dirençtir. Daha önce yapılan komşu kaynaklar boyunca da alternatif akım yolu oluşabilir (James vd., 1997).



Şekil 5.1 Nokta direnç kaynağında temas yüzeyleri (James vd., 1997).

Alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında temas yüzeyindeki direnç çok önemlidir (Browne vd., 1995a; 1995b). Eğer temas direnci çok düşükse, alüminyumun yüksek elektriksel ve ısı iletkenliğinden dolayı kaynak çekirdeği oluşumu için yeterli ısı oluşmaz. Diğer yandan temas direnci çok yüksekse fazla miktarda akım komşu kaynak noktalarına yönelir ve sonuçta kaynakta metal püskürmesi oluşabilir. Nokta kaynağındaki temas direnci, malzemenin istenen performansı göstermesine göre ayarlanır.

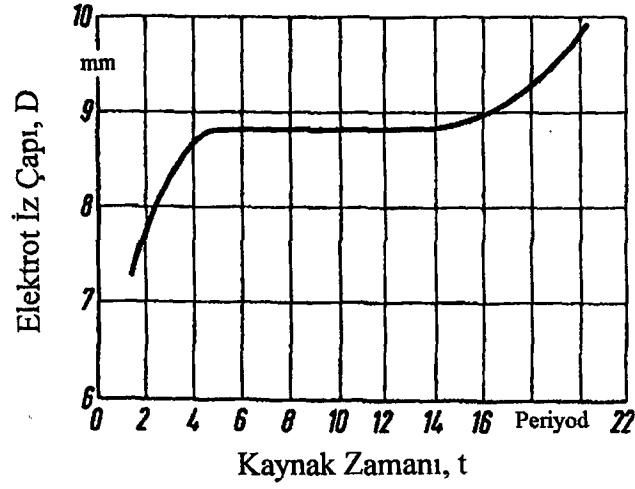
5.1 Malzeme Direnci

Bu direnç, kaynak yapılacak malzemenin özelliklerine, akım yolunun büyüklüğüne, akım yolundaki sıcaklığa bağlıdır. Silindirik bir akım yolu için malzeme direnci aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir (Eryürek, 1976; Hehl vd., 1984).

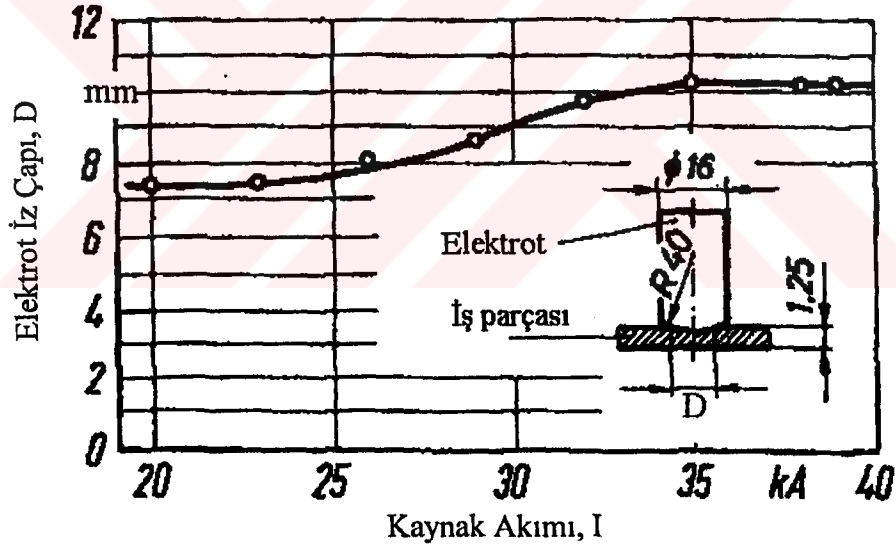
$$R_m = \frac{2 \cdot s \cdot \rho}{\pi \cdot d_a^2 \cdot 250} \quad (5.1)$$

(5.1) eşitliğinde, s sacın mm cinsinden kalınlığını, d_a akım yolunun mm cinsinden çapını, ρ ise $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$ cinsinden malzemenin özgül direncini ifade eder. Eğer ısının sadece kaynak bölgesinde oluştuğunu kabul edersek akım yolu çapı d_a , yaklaşık olarak elektrot izi çapı ile

aynı alınabilir. Şekil 5.2 ve 5.3'te elektrot iz çapı D'nin,kaynak zamanı t ve akımı I ile ilişkisi sırasıyla gösterilmiştir (Hehl vd.,1984).



Şekil 5.2 Kaynak zamanı ile elektrot iz çapı arasındaki ilişki; Malzeme 5056, malzeme kalınlığı 1,25 mm, elektrot çapı 16 mm, elektrot uç yuvarlatma çapı 40 mm, elektrot kuvveti 4 kN, kaynak akımı 27 kA (Hehl vd.,1984).



Şekil 5.3 Kaynak akımı ve elektrot iz çapı arasındaki ilişki; malzeme 5056, kaynak zamanı 6 periyot, elektrot kuvveti 4 kN (Hehl vd.,1984).

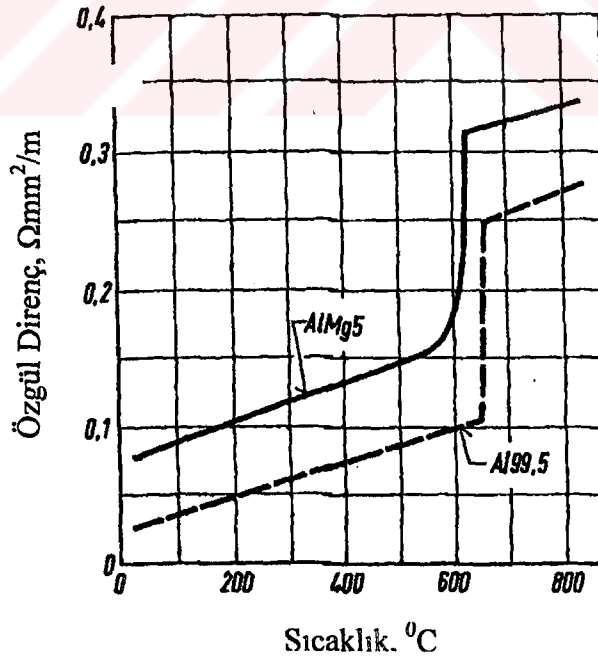
Çeşitli malzemeler için 20°C sıcaklıktaki özgül direnç değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Malzemenin özgül direnci,sıcaklığın ve sıcaklık katsayısının bir fonksiyonu olarak şöyle ifade edilebilir.

$$\rho_{hs} = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (h_s - 20)] \quad (5.2)$$

Çizelge 5.1 Bazı metelsel malzemelerin, oda sıcaklıklarında özgül direnç ve sıcaklık katsayıları (Gültekin, 1991).

Malzeme	Özgül Direnç ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	Linear Isıl Genleşme Katsayısı, α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) $\times 10^{-3}$
Al 99,5	0,0278	4,0
AlMg ₅	0,059	2,1
Fe	0,10	5,6
Cu	0,0178	3,9
Ni	0,069	6,9
Ag	0,0159	4,0
Çelik (%0.1 C, %0.5 Mn)	0,13-0,15	4,0-5,0
Çelik (%0.25 C, %0.3 Si)	0,18	4,0-5,0

(5.2) eşitliğinde ρ_{hs} ve ρ_{20} belirtilen sıraya göre h_s ve 20°C 'deki özgül direnç değerleridir. Ergime noktasına yakın sıcaklıklarda çok sayıda kafes yapısı hatası oluştuğu için sıcaklıkla olan lineer ilişki daha fazla sürmez ve ergime noktasında dirençte ilave bir artış olur. Bu durum Şekil 5.4'te gösterilmiştir (Hehl vd.,1984). Bununla beraber Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi alüminyumun özgül direnci çeliğe göre yaklaşık olarak 1/2,1/3 seviyelerinde olduğu için malzeme direncinden kaynaklanan ısı çelikte olduğu kadar önemli değildir (Browne vd.,1995b).



Şekil 5.4 Sıcaklığa bağlı olarak özgül direnç değişimi (Hehl vd.,1984).

5.2 Temas Direnci

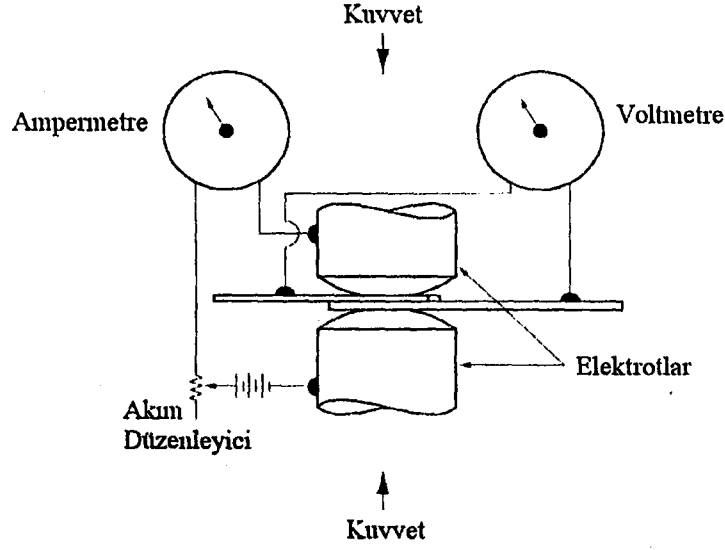
Temas direnci, düşük dirençli metalik temasın ve yüksek dirençli filmin toplamıdır. Yüzey filmi, oksidin yanında bileşiklerden oluşabilir ve filmin kalınlığına bağlı olarak iletken, yarı iletken ve yalıtkan olabilir. Yükleme ve sınır şartlarına bağlı olarak temas direncinin büyüklüğü geniş bir değer aralığında değişebilir. Alüminyum alaşımlarının yüzeyinin yapıştırma bağlantı özelliklerini iyileştirmek için kullanılan dönüşüm tabakaları ve kıvrırma işlemlerini kolaylaştırmak amacıyla uygulanan yağlayıcılar gibi yüzey işlemleri standartlarda belirtilen maksimum temas direncinden daha büyük değerlerde temas direnci gösteren yüzeyler geliştirir.

Genel olarak temas direnci basıncın artması ile birlikte düşer. Alüminyum alaşımlarında yükün artması ile birlikte temas direnci anormal bir tarzda değişim gösterebilir (Thornton vd., 1996).

Temas direnci, alüminyum nokta direnç kaynağında önemli bir değişkendir. Alüminyum sacların gösterdiği temas direnci, malzemenin içeriği kadar önemli olan işlem ve depolama şartlarına dayalı olarak geniş bir sahada değişim gösterebilir. Örneğin Alman standartlarında (Thornton vd.,1997), temas direncinin $200 \mu\Omega$ 'u geçmemesi şart koşular ve tercih edilen temas direncinin 20 ile $50 \mu\Omega$ arasında olması istenir. Bu sonuçları elde etmek için alüminyum yüzeyi dağlama ve kazıma işlemleriyle temizlenmeli ve kirlenmeden uzak tutulmalı daha sonra bu hazırlıktan sonra nokta kaynağı kısa bir süre içinde yapılmalıdır (Thornton vd., 1997).

Bu teknik özelliklerin çoğu uçak teknolojisinin gereksinimleri sonucu ortaya çıkmıştır. Otomobil imalatında ise bu tip standartların alüminyum saclar uygulanması pratik değildir. Üstelik olası kirlenmeye yol açan kıvrırma işlemi sırasında bu saclar genellikle yağlayıcılar ile kaplanır. Otomotivde kullanılan alüminyum saclar yüzeyin yapışma bağlantı özelliklerini sağlamlaştırmak amacıyla çevrimli örtü işlemine maruz bırakılabilir. Yağlayıcı ile birlikte bu özellik kaynak standartlarında şart koşulan düşük değerdeki temas direncini çokça aşan bir temas direnci oluşturabilir ve yine de bu malzemeler tatmin edici bir biçimde nokta kaynağı edilebilir (Thornton vd., 1997).

Nokta kaynağı işlemleri için temas direncinin tespit edilmesinde kullanılan tekniklere nokta kaynağının işleminin kendisine dayanır. Örneğin benzer elektrot ucu düzeneği ayarlanır. Şekil 5.5'te temas direnci ölçümü gösterilmektedir (1).



Şekil 5.5 Temas direnci ölçümü (1).

Çeşitli standartlara göre temas direncini belirlemede kullanılan akım birkaç miliamper ile 100 A gibi geniş bir değerler sahası içinde olmaktadır. ASTM standartlarına göre geçersiz sonuçlara neden olabilecek oksit filmi yitimi gibi yüzey değişikliklerinin önüne geçmek için uygulanan gerilim ve akımın 20 mV ve 100 mA'yi geçmemesi gerekir. Yüksek akımlar incelenen yüzeyde değişikliklere neden olabilir ve bu direnç değerleri geçersiz olur (Thornton vd., 1997).

Alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında yüzey durumları dikkate alınmaksızın görülmüştür ki yüksek temas direnci, 1 mΩ veya üstü, ilk periyodun birinci çeyreğinde hızlıca düşer ve 20 μΩ'luk bir değere ulaşır (Thornton vd., 1996). Nokta direnç kaynağında kalıntı olarak temas direnci yaklaşık olarak 5 μΩ'a düşer. Direnç değişiminin büyük bir bölümü kaynak akımının ilk periyodunun birinci çeyreğinde olduğu için direnç değişiminin alüminyum alaşımlarının kaynak çekirdeği büyümesinin devamı yönünde az bir önemi vardır (Thornton vd., 1996).

Gould (1994) aşağıda verilen eşitlikle temas yüzeyindeki direnç ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi formülize etmiştir.

$$R_{ty} = \frac{T_c - T}{T_c - T_o} \cdot R_{20} \quad (5.3)$$

Burada T, T_c, T_o, R_{ty}, R₂₀ sırasıyla sıcaklık, erime sıcaklığı, oda sıcaklığı, temas yüzeyindeki direnç ve oda sıcaklığındaki temas yüzeyi direncidir.

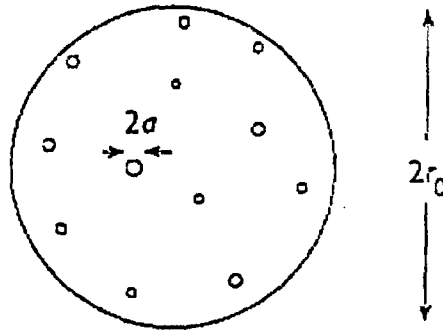
Saf metallerde faz değişimleri sabit bir sıcaklıkta olurken, alaşımlarda faz değişimi sıcaklık aralığı içinde olur (Sıvılaşıma ve katılaşıma sıcaklıkları arası). Genel kabul ve Gould'un çalışmaları sonucu alaşımlardaki faz değişimlerini de hesaplamaya katabilen, temas yüzeyi direnci ile sıcaklık arasındaki ilişki (5.4) eşitliğinde gösterilmiştir (Xu ve Khan, 1999).

$$R_{ly} = \begin{cases} \left(\frac{T_k - T}{T_k - T_o} \right) (R_{2o} - R_k) + R_k \Rightarrow T_o \leq T \leq T_k \\ \left(\frac{T_e - T}{T_e - T_k} \right) (R_k - R_e) + R_e \Rightarrow T_e \geq T \geq T_k \\ R_e \Rightarrow T \geq T_e \end{cases} \quad (5.4)$$

Burada T_k , T_e , R_k ve R_e sırasıyla katılaşıma sıcaklığı, sıvılaşıma sıcaklığı, katılaşıma sıcaklığındaki temas yüzey direnci, sıvılaşıma sıcaklığındaki temas direncini göstermektedir.

Temas direncinin klasik modeli Greenwood ve Holm tarafından geliştirilmiştir (James vd.,1997). Görünen temas alanı, gerçek temas alanı toplamından büyüktür. Şekil 5.6'da temasın şematik görünümü görülmektedir. Burada, r_0 yarıçapındaki metalik temasın görünen alanının, ortalama yarıçapı a olan temas noktalarınınca kaplandığı göz önüne alınmıştır. n adet temas noktasıyla temas yüzeyindeki direnç şöyle elde edilebilir (James vd.,1997).

$$R_{ly} = \rho \left[\frac{1}{2.n.a} + \frac{1}{2.\beta} \right] \quad (5.5)$$



Şekil 5.6 Teması şematik gösterimi (James vd.,1997).

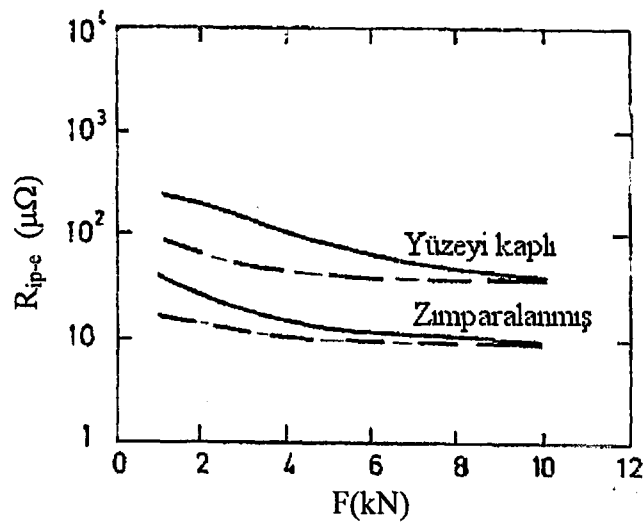
Burada β Holm yarıçapı olarak tariflenir. Eğer görünen temas alanı izole temas noktalarınınca tam olarak doldurulmuşsa β yaklaşık olarak r_0 'a eşit olabilir.

İnce yüzey filmlerinin direnç etkisi göz önüne alınarak (5.5) eşitliğinin değişik türetilmeleri yapılabilir. Örneğin G birim alanındaki filmin özgül direnci olmak üzere, $G / n \cdot \pi \cdot a^2$ eşitliğine sağına ilave edilebilir. Bu yolla daralma ve film direncinin etkilerini ayırmak mümkün olabilir. Doğal olarak önemli ölçüde iletim yüzey kaplı ise metal olmayan film boyunca olur. Crinon ve Evans'ın çalışmasında (1998), yüzey kaplaması kalındır ve kırılmamış bölgelerde filmin yalıtıcı olarak davrandığını kabul edilmiştir. Temas alanındaki belirli sayıdaki metal-metal temaslı noktalar boyunca akan akımın daralma etkisinden dolayı temas yüzeyi direncinin oluştuğu kabul edilir. Bu olayda temas noktaları yalıtıcı film bölgeleri tarafından ayrılmıştır ve metal-metal temas noktalarının yük altında kırılan yalıtıcı film bölgelerinde oluştuğu düşünülmektedir.

5.2.1 Temas Direnci ve Elektrot Yükü Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Temas direnci özellikle kaplı numunelerde daha büyük olmak üzere temas yüzeyinde, iş parçası-elektrot yüzeyine göre daha büyüktür. Elektrot iş parçası yüzeyindeki deformasyonların etkisiyle buradaki temas direnci, temas yüzeyine göre daha kolay düşer. Sonuç olarak temas direnci-kuvvet özellikleri farklıdır.

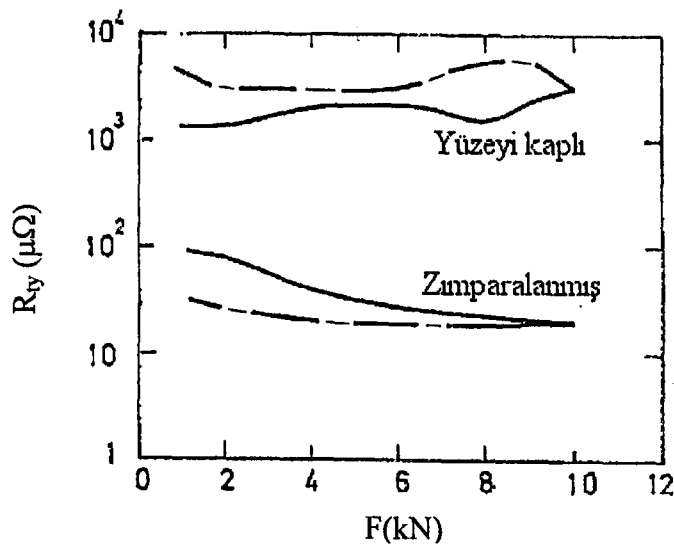
Crinon ve Evans'a (1998) göre, iş parçası-elektrot arasındaki temas direnci ve elektrot kuvveti ilişkisi Şekil 5.7'de gösterilmiştir. İş parçası-elektrot yüzeyindeki temas direnci artan kuvvet ile birlikte, yüzey pürüzlülüklerindeki deformasyonların ve temasın gerçek metalik alanının artmasından dolayı düşer.



Şekil 5.7 Yüzeyi kaplı ve zımparalama işlemi yapılmış 2 mm kalınlığında 5754 alüminyum alaşımının iş parçası – elektrot yüzeyi direnci, kuvvet ilişkisi; sürekli eğri yükleme durumu, kesikli ise yükleme kaldırılma süresince oluşan direnci gösterir (James vd.,1997).

Elektrotun sac üzerinde oluşturduğu plastik iz yükleme sırasında oluşurken, yükleme yokken oluşan toparlanma büyük ölçüde elastiktir. Bu nedenle direnç-kuvvet eğrileri her iki durumda da aynı davranışı göstermektedir. Yüzey kaplamasının kaldırılması ile temas direnci azaltılır. Bunun nedeni kaplı malzemelerde toplam alandaki gerçek metal-metal temasın, üzeri kaplı olmayan malzemelere göre daha az olmasıdır. Şekil 5.7’de bunun sonuçları görülmektedir. Büyüklük dışında yüzey kaplı ve kaplı olmayan malzemelerin direnç-kuvvet eğrileri aynı karakterdedir (James vd., 1997).

Kaplı malzemelerin temas yüzeyindeki direnç davranışı, iş parçası-elektrot yüzeyi temas direncinde gözlenene göre önemli ölçüde farklıdır. Öncelikle temas yüzeyindeki direnç büyüklük olarak yüksektir ve direnç kuvvet ilişkisi düzensizdir. Düzensizlikle sözü edilen temas direncinin yükün fonksiyonu olarak beklenmedik bir şekilde yüksek olması ve çok defa yükün artması ile birlikte artmasıdır (Şekil 5.8). Sonuçta beklenenin aksine yükleme yokken ki temas direnci çevrimin yükleme esnasındaki temas direncinden büyük olabilmektedir. Bu düzensiz davranışı klasik modellerle açıklamak zordur. James vd.,(1997) tarafından bildirildiğine göre kaplı malzemelerdeki temas direncini açıklayan model Crinon tarafından ortaya konmuştur. Burada mekanik titreşimlerde temas direncinin büyük aralıklarda kararsız olduğu gösterilmiş ve yüzeyi kaplı malzemelerde kararlı yük-direnç eğrilerinin,numune üzerine yükü düzgün olarak yükleyip, titreşimleri ortadan kaldıran düzenek kullanılarak elde edilebileceği gösterilmiştir.Yüzeydeki kaplamayı kaldırmakla çok farklı bir davranış elde edilir. Temas direnci büyüklük olarak düşer ve direnç-kuvvet ilişkisi düzenli hale gelir.

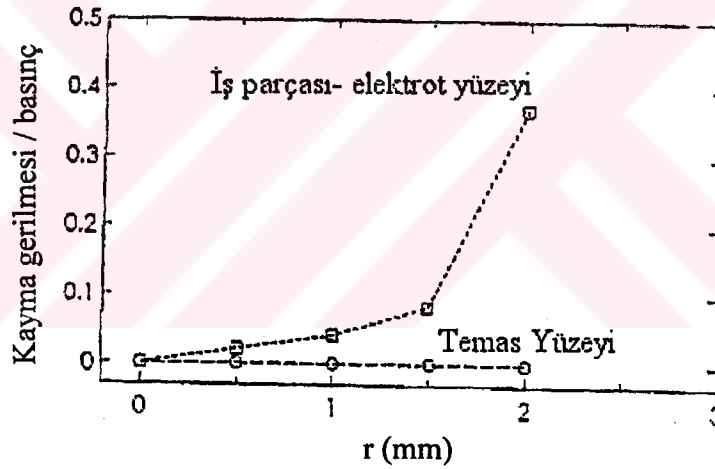


Şekil 5.8 Yüzeyi kaplı ve zımparalama işlemi yapılmış 2 mm kalınlığında 5754 alüminyum alaşımının temas yüzeyi direnci- kuvvet ilişkisi; sürekli eğri yükleme durumu,kesikli ise yükleme kaldırılma süresince oluşan direnci gösterir (James vd.,1997).

Sonuçlar gösteriyor ki yalıtıcı film artan yük ile birlikte kırılrsa bile temas yüzeyinde esas metallerin çoğu alanda birleşmesine engel teşkil etmektedir. Buna karşılık çoğu alanda aynı film iş parçası-elektrot yüzeyinde yeterli seviyede yaygın metal-metal teması sağlayacak şekilde parçalanır. Temelde bu etki mekaniktir. Şekil 5.1'deki düzenlemenin simetrik deformasyonundan dolayı bu farkın tahminen iş parçası-elektrot yüzeyinde oluşan fakat temas yüzeyinde görülmeyen kaymadan meydana geldiği öne sürülmektedir (James vd., 1997).

5.2.2 Temas Direnci ve Kayma Gerilmesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

James vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada, elektrotun merkez ekseninden r uzaklığının fonksiyonu olarak temas yüzeylerindeki kayma gerilmesinin normal basınca oranı Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Simetriden dolayı temas yüzeyindeki direncin 0 olması beklenir ki bu elde edilmiştir. İş parçası-elektrot yüzeyindeki kayma gerilmesi, elektrot-iş parçası temasının merkezinde 0 olmakta ve r 'nin artışı ile birlikte temasın çevresinde maksimuma ulaşmaktadır.

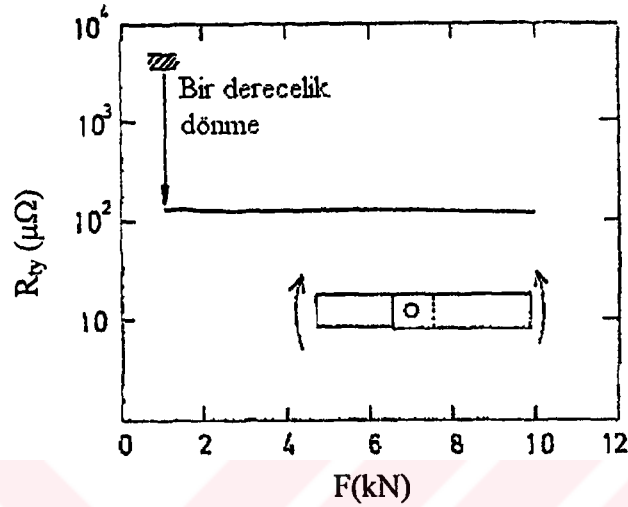


Şekil 5.9 Kayma gerilmesi / basınç ile çekirdek yarıçapının merkezinden çevreye doğru olan boyutu arasındaki ilişki (James vd., 1997).

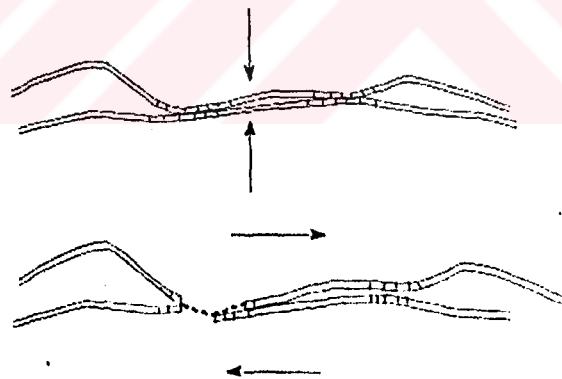
Temas yüzeyinde kayma oluşmadığı için yüzey kaplı olduğunda yüzeydeki direnç yüksektir. Kaymanın eksikliği düzensiz direnç-yük ilişkisine bağlanabilir. Esasen temas yüzeyindeki kaymanın ortadan kaldırılması Şekil 5.1'de gösterildiği gibi simetrik düzenekten kaynaklanır.

Kayma tatbik edilerek temas direnci azaltılabilir. James vd. (1997) tarafında yapılan çalışmada kaplı alüminyum plakalar, 1 kN'luk kuvvet etkisi ile küresel-küresel elektrot çifti ile yüklenmiş, bu aşamada çok yüksek temas direnci olduğu gözlenmiştir. Yükleme yapılırken; sac çiftine bağlı aksenal dönme verilmesi ile (Şekil 5.10). 1 kN kuvvet ve 1° lik bağlı aksenal dönme, temas direncinde 7000'den $110 \mu\Omega$ 'a kadar etkin bir azalma olduğu, daha sonraki

kuvvet artışlarında dirençte herhangi bir değişme olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 5.10). Kaymanın metal-metal temas noktası oluşumuna etkisi şematik olarak Şekil 5.11'de gösterilmiştir (James vd., 1997; Crinon ve Evans, 1998).



Şekil 5.10 10^2 'lik bağıl eksenel dönmenin temas direncine etkisi (James vd., 1997).

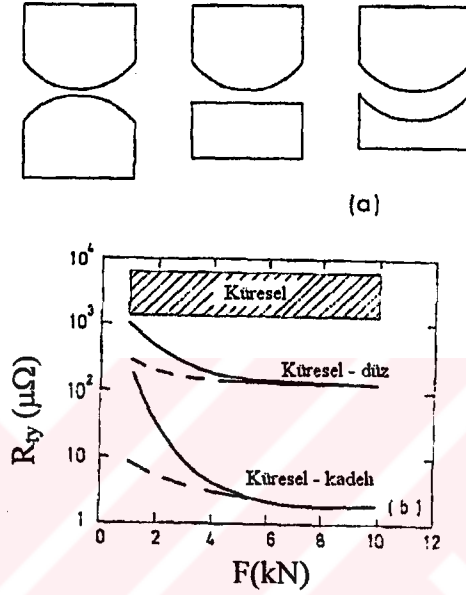


Şekil 5.11 Kaymanın metal-metal temas noktası oluşumuna etkisinin şematik gösterimi (Crinon ve Evans, 1998).

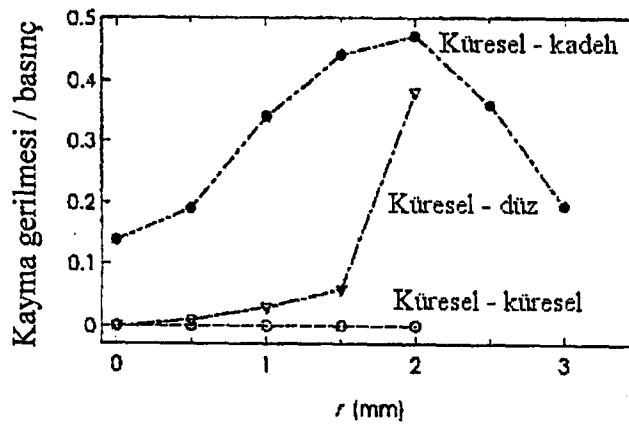
5.2.3 Temas Yüzeyi ve Elektrot Çifti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Simetrik olmayan elektrot çiftleri kullanılarak kaplı sacların temas yüzeyindeki temas dirençleri ölçülmesi sonuçları Şekil 5.12'de görülmektedir. Küresel-düz uçlu düzenekte yapılan ölçümlerde elde edilen temas direnci simetrik küresel-küresel çiftine göre büyüklük olarak daha azdır (James vd., 1997).

Simetrik olmayan elektrotlar, temas yüzeyindeki direncin azalmasında etkin bir rol oynarlar. Simetrik olmayan elektrotların bir etkisi de Şekil 5.13'de gösterildiği gibi kayma gerilmesindeki değişimdir. Küresel-düz elektrot çifti temas yüzeyindeki kayma gerilmesi, Şekil 5.9'daki iş parçası - elektrot yüzeyindeki kayma gerilmesine benzer hale gelmiştir. Küresel-kadeh formu ise daha yüksek kayma gerilmesi oluşturur ve metalik temas alanını artırır (James vd., 1997).



Şekil 5.12 Temas yüzeyindeki dirence elektrot geometrisinin etkisi. a) Kubbe,kubbe – düz,kubbe – kadeh elektrot çiftleri. b) Farklı elektrot çiftlerinin yüklemenin fonksiyonu olarak temas yüzeyindeki dirence etkisi, sürekli eğri yüklenme durumu,kesikli ise yüklenme kaldırılma süresince oluşan direnci gösterir (James vd., 1997).

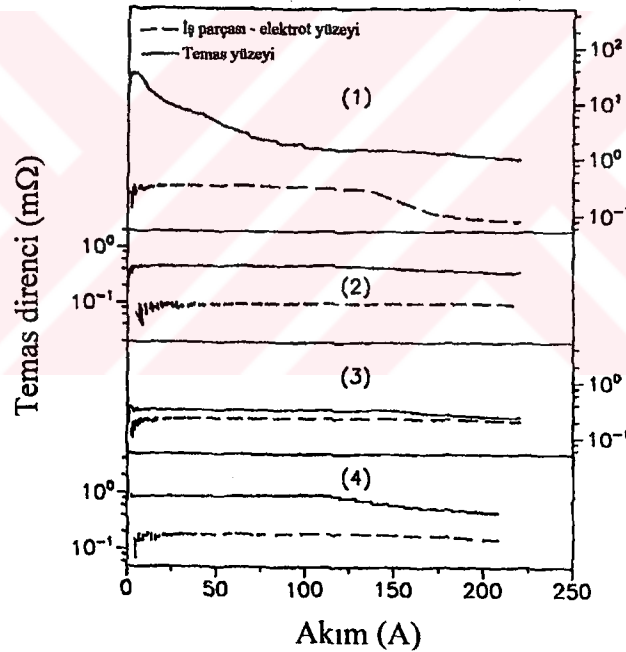


Şekil 5.13 Kayma gerilmesi / basınç ile kaynak merceği yarıçapının merkezinden çevreye doğru olan boyutu arasındaki ilişkinin farklı elektrot çiftlerine göre değişimi (James vd., 1997).

5.2.4 Temas Direnci ve Yüzey Durumu Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

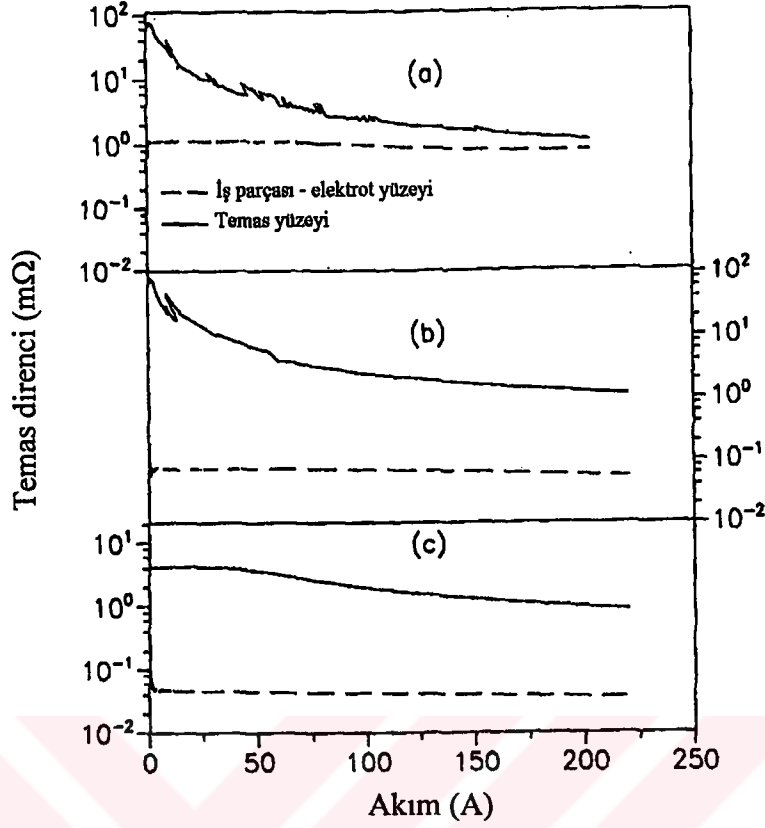
İş parçası-elektrot yüzeyindeki temas direnci ve temas yüzeyindeki direnç değerleri farklı yüzey bitirme işlemleri tatbik edilmiş değişik alüminyum alaşımları için ayrı bir deneysel çalışma ile ortaya çıkarılmıştır (Thornton vd., 1997).

Şekil 5.14'te, Z255 yağlayıcısı ile kaplı 6111-T4 alüminyum alaşımları kullanılarak yapılan deneyler dizisi elektrotun yüzey pürüzlülüğünün temas direnci üzerindeki etkilerini belirtmek için yapılmıştır. Deneyde elektrot-iş parçası tertibatı 600'lük zımpara kağıdı ile her bir ölçümden önce zımparalanmıştır. 1, 2, 3, 4 olayları göz önüne alındığında düşük akım değerlerinde, başlangıç temas yüzeyi direncinin $0,5 \text{ m}\Omega$ ila $50 \text{ m}\Omega$ arasında olduğu görülmektedir. Akım yaklaşık olarak 140 A olduğunda iş parçası-elektrot arasındaki temas direnci $0,3 \text{ m}\Omega$ olmaktadır.



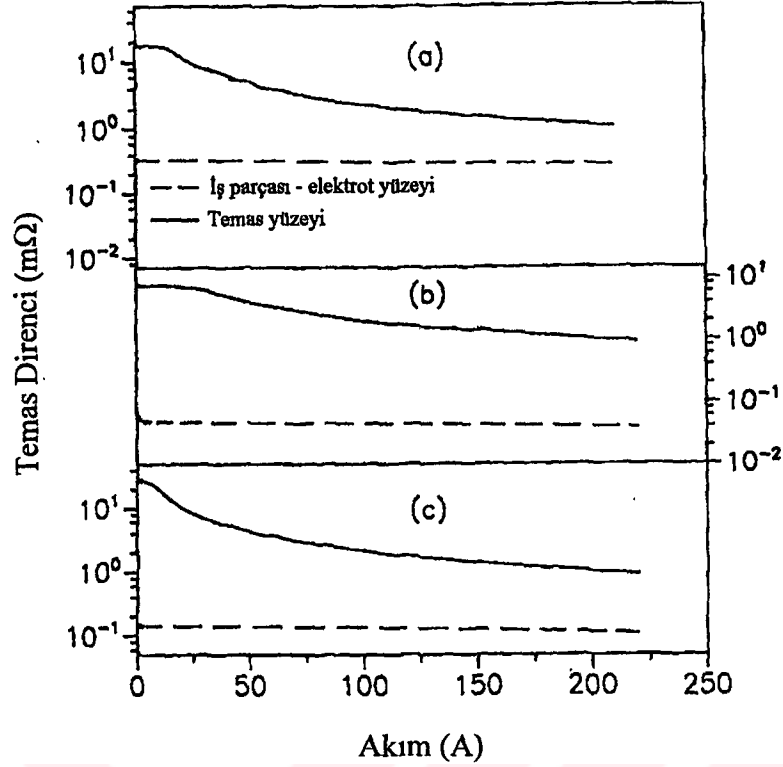
Şekil 5.14 Elektrotun yüzeyinin zımparalanmasının temas direncine etkisi; 6110 alüminyum alaşımı ve 600'lük zımpara kağıdı kullanılmıştır (Thornton vd., 1997).

Sacın yüzey pürüzlülüğünün temas direncine etkisi Şekil 5.15'de gösterilmiştir. Burada birinci ölçümden 2024 alüminyum alaşımının yüzeyi herhangi bir işlem görmeden sahip olduğu temas direnci görülmektedir. İkinci ve üçüncü ölçümden ise sırayla yüzeyler 180 ve 600'lük zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Dikkati çeken hususu ikinci ve üçüncü ölçümlerde iş parçası-elektrot yüzeyindeki temas direncinin düşümüdür. Hiçbir testte temas yüzeyi zımparalanmıştır.



Şekil 5.15 2024 alüminyum alaşımı için iş parçası yüzeyinin zımparalanmasının temas direncine etkisinin akımın fonksiyonu olarak gösterilmesi a) İşlem yok b) 600'lük zımpara kağıdı ile zımparalama c) 180'lik zımpara kağıdı ile zımparalama (Thornton vd.,1997).

Şekil 5.16'da ise tavlamanın etkisi görülmektedir. Şekil 5.16a'da 400°C'de 3 saat tavllanmış 2024 alüminyum alaşımının temas direnci görülmektedir. Burada görüldüğü gibi Şekil 5.16a'da elde edilen iş parçası-elektrot yüzeyindeki temas direnci işlem görmemiş alüminyum saclarda (Şekil 5.15a) elde edilenlerle benzer sonuçlar vermektedir. Burada tavlama sonucu oluşan oksit filminin temas direnci özelliklerini değiştirmedeği sonucuna varılabilir. Şekil 5.16b ve c'de sırasıyla saclar 600,180'lik zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve 1 saat süreyle 150°C'de tavlannmıştır (Thornton vd., 1997).



Şekil 5.16 2024 alüminyum alaşımı için iş parçası yüzeyinin zımparalanmasının temas direncine etkisinin akımın fonksiyonu olarak gösterilmesi a) 400 °C’de 3 saat tavllanmış ve yavaş soğutulmuş b) 600’lük zımpara kağıdı ile zımparalanmış ve 1 saat süreyle 150°C’de tavllanmış c) 180’lik zımpara kağıdı ile zımparalanmış ve 1 saat süreyle 150°C’de tavllanmış (Thornton vd.,1997).

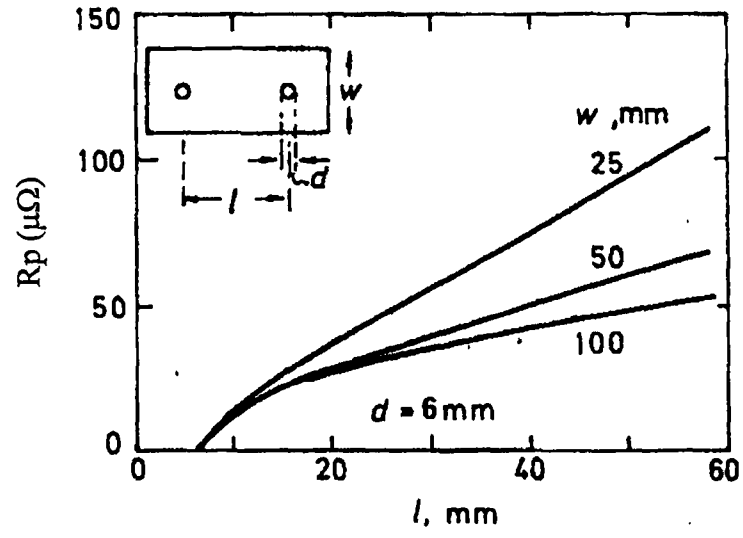
5.3 Yan Devre Direnci

Yan devre direnci, temas direncinin çok yüksek olması ve komşu kaynak noktasının yakın olması sonucu oluşur.

Browne vd (1995b) modelinde w genişliğine, s kalınlığına ve ρ özgül direncine sahip, orta eksenli doğrultusunda kaynak edilmiş iki sac ele alınmıştır. Elektrottan l kadar uzaklıktaki kaynak noktasında oluşan yan devre direnci, kaynak noktası içindeki boşluklardan dolayı kaynaklanan kaynak direnci R_w ve elektrotla, komşu kaynak arasındaki patikadan kaynaklanan patika direncinden R_p oluşur.

$$R_s = R_w + 2R_p \quad (5.5)$$

R_p ve l arasındaki ilişki w 'ye bağlı olarak Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Bu çalışmada kaynak çekirdeği çapı, $d = 6$ mm ve sac kalınlığı $s = 2$ mm’dir. R_w , R_p ile kıyaslandığında oldukça küçüktür ($< 1 \mu\Omega$). Bu nedenle hesaplamalarda R_s , $2R_p$ 'ye eşitlenebilir. Bu değer de 20 ila 100 $\mu\Omega$ arasında değişebilir (Browne vd., 1995b).



Şekil 5.17 Patika direnci ile iki kaynak noktası arasındaki ilişkinin sac genişliğine bağlı olarak gösterilmesi (Browne vd.,1995b).

6. ALÜMİNYUM NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINDA NOKTA OLUŞUMU ve BOYUTLARININ, DİRENÇ BİLEŞENLERİ ile ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

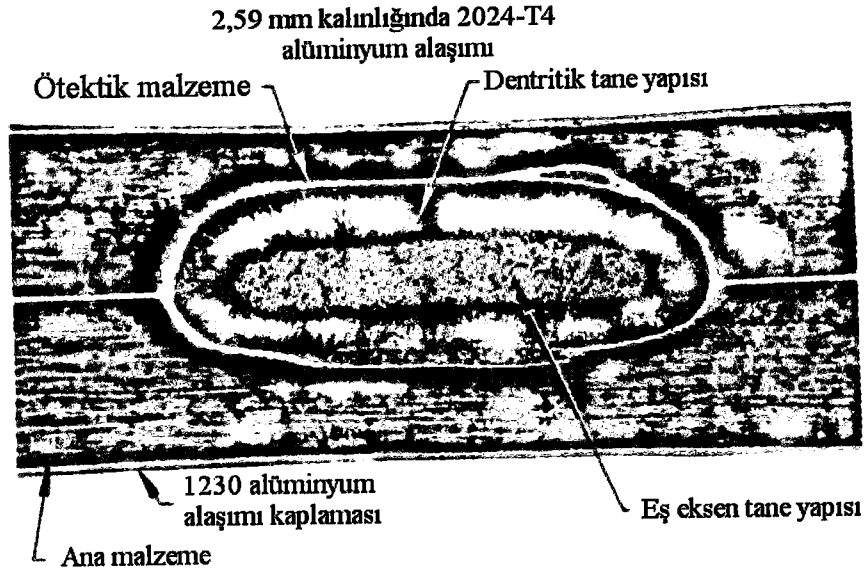
Kaynak akımının ve zamanın bir fonksiyonu olarak nokta oluşumu dört kısımda tanımlanabilir. Bunlar; kuluçka dönemi, hızlı büyüme, kararlı düşen büyüme oranı ve fişkırmadır (Gould, 1987). Kaynak noktasının oluşumu birbirleri ile etkileşim halinde olan temas direnci, elektrik akımı, soğutma suyu ile elektrot ucu arasındaki uzaklık, sac kalınlığı, uygulanan kuvvet gibi bir çok parametreye dayanır.

Direnç, akım ve zaman ile birlikte nokta oluşumu için gerekli olan ısının oluşmasında ana bileşendir. Kaynak direncini, temas yüzeyindeki direnç, iş parçası-elektrot yüzeyindeki direnç, malzeme direnci ve yan devre direnci olarak bileşenlerine ayırırsak bunlar içinde nokta oluşumu için en önemlisi temas yüzeyindeki dirençtir (Browne vd., 1995b).

6.1 Kaynak Noktasının Oluşumu

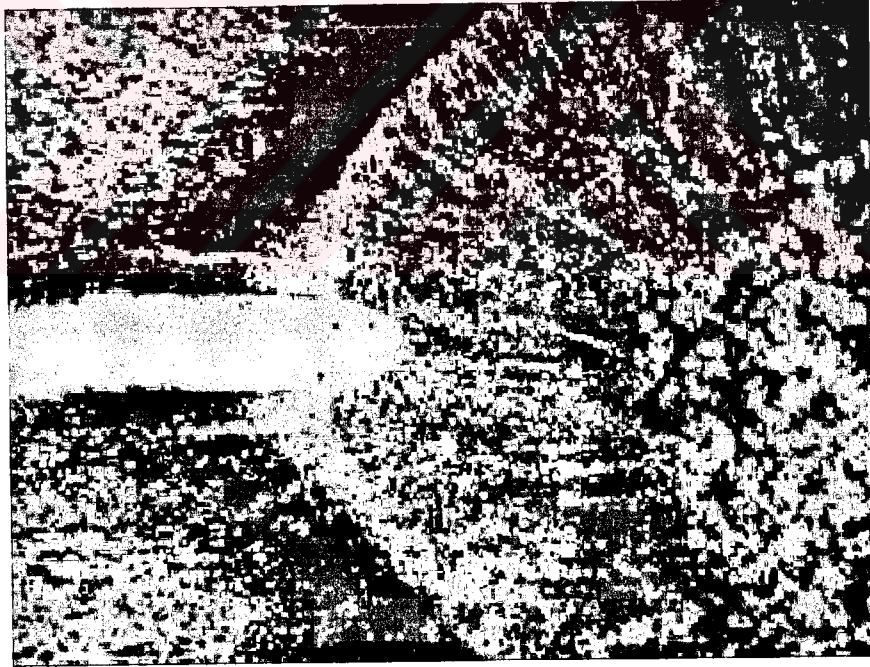
İşlenmiş ve döküm yoluyla elde edilen alüminyum alaşımları normal kaynak donanımları ile 12.7 ile 19.5 mm kalınlık oluşturacak şekilde nokta kaynağı yapılabilir. Şekil 5.1'de 2,59 mm kalınlığında iki 2024-T4 (1230 alüminyum alaşımı kaplı, % 99.3 Al içerir.) alüminyum alaşımlı sacın arasında oluşan kaynak çekirdeği görülmektedir. Görüldüğü üzere, çekirdeğin merkezi eş eksen tane yapılı oval bir bölgedir. Merkez bölgenin çevresi dentritik tane yapısından oluşan bir sahadır. Bu iki bölge nokta kaynağı çekirdeğini oluşturmaktadır. Aslında her biri döküm yapısıdır. Dentritik alanın büyük boyutta olması tane büyümesini sağlayan son ısıtma işlemine olanak veren kaynak tekniği sonucudur.

Şekil 6.1'deki dentritik alanın çevresindeki açık renkli bant erime sıcaklığına yakın dereceye dek ısıtılmış metal içermektedir. Sıcaklık bu kısmın eriyik içinde eriyebilir faz haline gelmesi için yeterlidir. Açık renkli bant çevresindeki koyu halka, açık bölgeye göre daha düşük sıcaklığı ulaşır fakat bu çökelti oluşumu için yeterli bir seviyedir. Temas yüzeyindeki kaplama çekirdek tarafından ana metalle birlikte tamamen içine alınmıştır. Elektrot izi kayda değer değildir ve elektrotlar ile temas halinde olan iş parçasının dış kısımlarında ısınmanın etkisi görülmemektedir (ASM,1989).

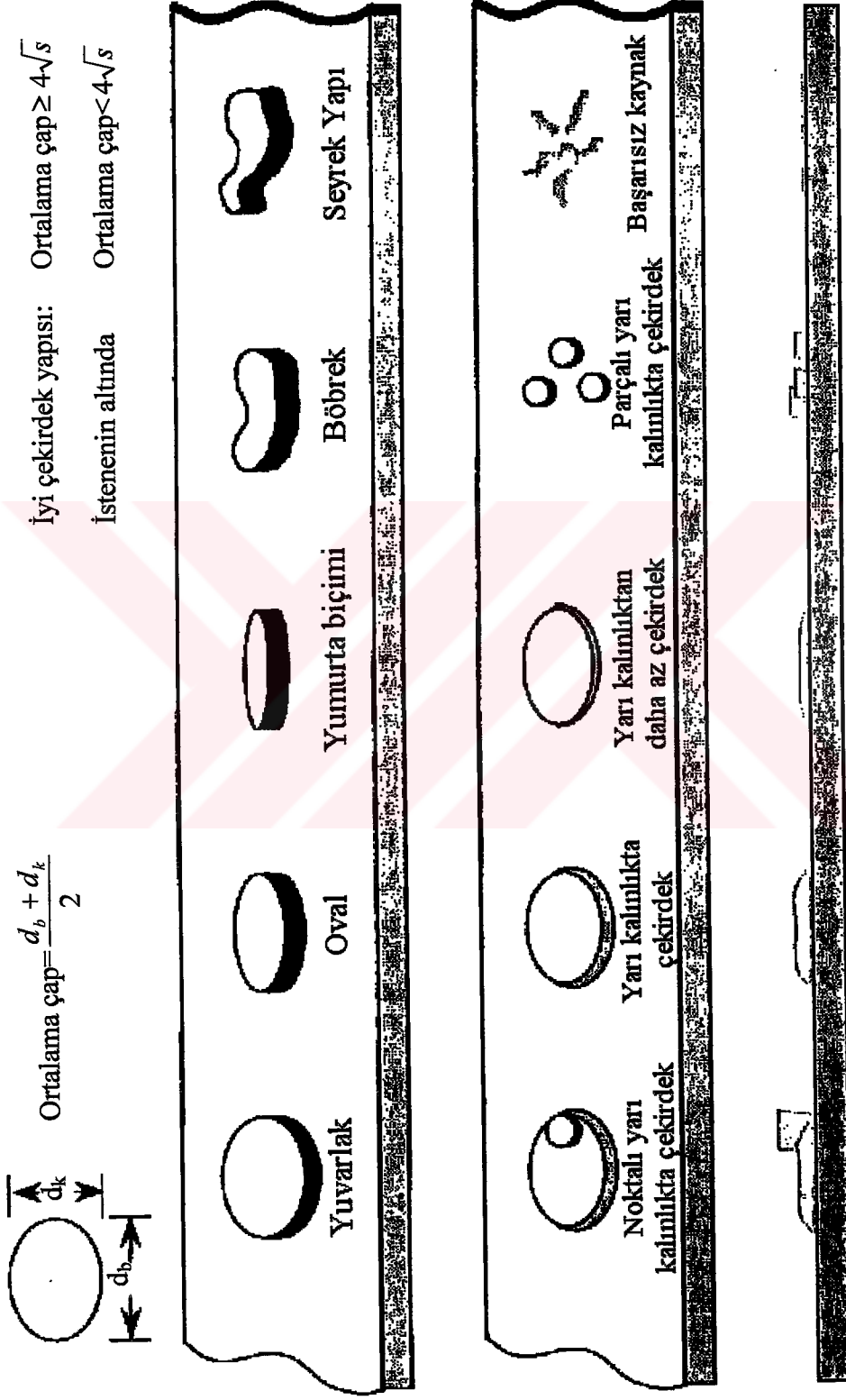


Şekil 6.1 Kaynak çekirdeğinin iç yapısı (ASM,1989).

Şekil 6.2’de ise yine kaplı 2024 alüminyum alaşımında görülen kaynak çekirdeği yapısının bir başka şekli görünmektedir.



Şekil 6.2 Kaplı 2024 alüminyum alaşımında görülen kaynak çekirdeğinin oluşumunun bir başka görünümü (1).



Şekil 6.3 Farklı kaynak çekirdeği yapıları (1).

6.2 Nokta Boyuları ile Direnç Bileşenleri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Kaynak direncini, temas yüzeyindeki direnç, iş parçası elektrot yüzeyindeki direnç, malzeme direnci ve yan devre direnci olarak bileşenlerine ayırırsak bunlar içinde nokta boyutları için en önemlisi temas yüzeyindeki dirençtir.

6.2.1 Nokta Boyutları İle Malzeme Direnci Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Çelikle kıyaslandığında, alüminyum alaşımlarının özgül direnci düşük olduğu için malzeme direncinden kaynaklanan ısı önemli değildir (Browne vd., 1995b). Bu yüzden malzeme direncinin nokta oluşumu ve boyutları üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek derecede önemli olduğu sonucuna varılabilir.

6.2.2 Nokta Boyutları ile İş Parçası-Elektrot Yüzeyi Direnci Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

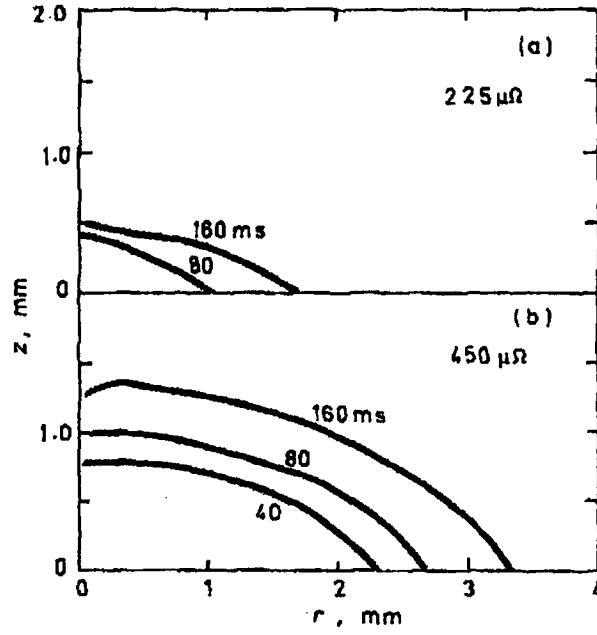
Alüminyum nokta direnç kaynağıyla alakalı yapılan çoğu modelleme çalışmalarında, iş parçası-elektrot yüzeyindeki direnç ihmal edilmiştir (Wei ve Ho, 1990; Wei ve Yeh, 1991; Browne vd., 1995a; 1995b; Wei vd., 1996; Hao vd., 1996). Browne vd'ne (1995a) göre deneysel ölçümler göstermiştir ki iş parçası-elektrot yüzeyindeki direnç, temas yüzeyindeki direnç ile karşılaştırıldığında çok düşüktür ve modelleme çalışmaları sonuçlarına göre elektrotun yüzeyinde oluşan ısının, nokta oluşumuna etkisi çok az olmaktadır.

Xu ve Khan'a (1999) göre ısının sacdan elektrotta geçmesine karışı koyan iş parçası-elektrot yüzeyindeki dirençten kaynaklanan ısı üretimi de çekirdek oluşumu için kritik bir faktördür.

6.2.3 Nokta Boyutları İle Temas Yüzeyindeki Direnç İlişkisinin İncelenmesi

Temas yüzeyinde, direnç nedeniyle oluşan ısı çekirdek oluşumunu yönlendirmektedir. Yüzeydeki oksit filmi ve kaplamaya bağlı olarak geniş bir aralıkta değişen temas yüzeyindeki direncin çekirdek oluşumunu sağlayabilmesi için çok hassas bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Browne vd'nin (1995a) yaptığı modelleme çalışmasında temas yüzeyindeki direnç deneysel gözlemlere dayanılarak seçilmiştir. Şekil 6.4'te kaynak zamanı ile birlikte farklı temas yüzeyi dirençlerinin çekirdek oluşumuna etkileri görülmektedir. Temas direncinin değerindeki azalma temas yüzeyindeki yerel ısınmayı azaltıcı etki yapar. Bu da kaynak çekirdeği büyümesini ortadan kaldırmaktadır.

Bu modellemede kullanılan değerler Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

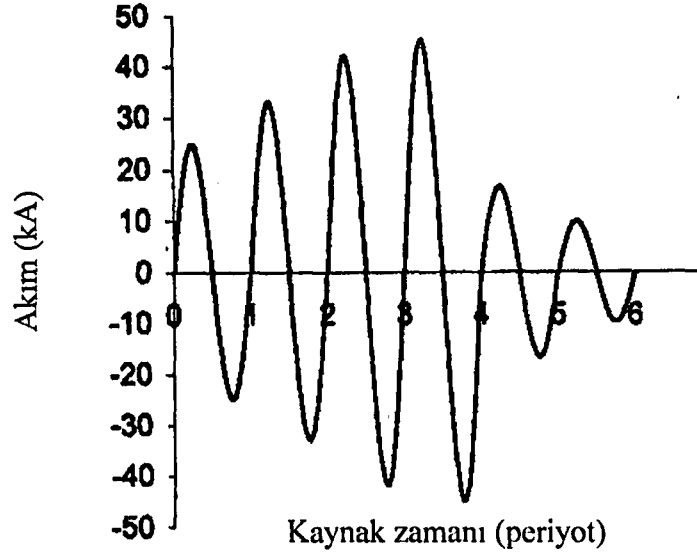


Şekil 6.4 Kaynak çekirdeği üzerinde temas yüzeyinde oluşan direncin kaynak çevriminin farklı zamanlarındaki etkisi a) $225 \mu\Omega$ b) $450 \mu\Omega$ (Browne vd., 1995a).

Çizelge 6.1 Değişkenlerin deneysel değerleri (Browne vd., 1995a).

Değişken	Deneysel Değer
Pik Akım (50 Hz sinüs dalgası)	20 kA
Temas Direnci	$450 \mu\Omega$
Soğutma suyunun elektrot ucuna olan mesafesi	3 mm
Uygulanan Kuvvet	5 kN
Plaka Kalınlığı	2 mm
Elektrot uç yarıçapı	50,8 mm
Malzeme: 5759 Alüminyum alaşımı	

Khan vd. (2000a) temas yüzeyindeki direncin kaynak çekirdeği boyutlarına olan etkisini deneysel ve modelleme çalışmaları yaparak araştırmıştır. Deneylerde 1,04 mm kalınlığında ve nokta direnç kaynağı modeli ile paralellik sağlamak için 1000 serisi alüminyum saclar kullanılmıştır. Kaynakta pik akımı 45 kA uygulanmıştır (Şekil 6.5). 180 koniklik açısı ve 9.9 mm uç çapı olan elektrotlar kullanılması sonucu elde edilen değerler Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Çalışmada kullanılan akım değişimi (Khan vd., 2000a).

Çizelge 6.2 Modellemede kullanılan test olayları (Khan vd., 2000a).

Test Olayı	Temas yüzeyi Direnci ($\mu\Omega$)	İş parçası-elektrot İletkenliği ($\text{kW/m}^2 \text{ K}$)	Pik Akım (kA)	Maksimum Kaynak Çekirdeği	
				Kalınlık (mm)	Çap (mm)
A	450	20	45	0,426	2,245
B	450	15	45	0,989	3,905
C	450	10	45	1,593	5,278
D	450	20	47	0,776	3,787
E	450	20	49	1,035	4,416
F	450	20	51	1,326	4,951
G	350	20	45	0,162	1,165
H	550	20	45	0,437	2,553

Çizelge 6.2'ye dikkat edilirse A,G ve H olaylarının temas yüzeyindeki direncin çekirdek boyutlarına olan etkisi için yapıldığını görülmektedir. Çizelge 6.3 ve 6.4'te ise iş parçaları ve elektrotların özellikleri verilmektedir.

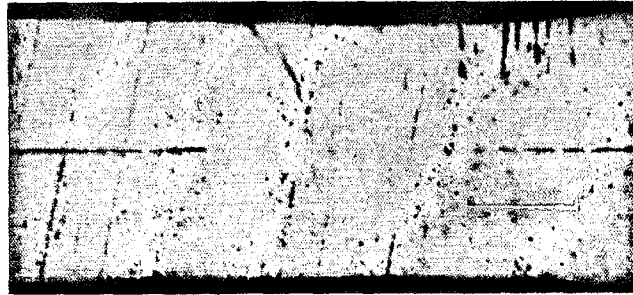
Çizelge 6.3 Alüminyum nokta direnç kaynağı için kaynak şartları (Khan vd., 2000a).

Özellik	Değer
İş parçası malzemesi	Al 1000
Elektrot malzemesi	Cu
Oda sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$	30
İş parçaları arasındaki boşluk, m	5.10^{-5}
İş parçası sınırlarında ısı transferi katsayısı, $\text{Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$	15

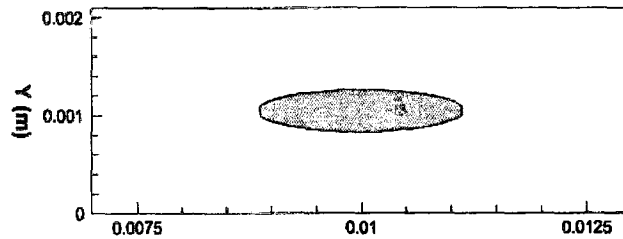
Çizelge 6.4 Al ve Cu'nun özellikleri (Khan vd., 2000a).

Özellik	Al	Cu
Yoğunluk, kg.m^{-3}	2365,72	9000
Sıvının hacimsel ısı katsayısı	$69,3 \cdot 10^{-6}$	-
Isıl iletkenlik, $\text{w.m}^{-1}, \text{K}^{-1}$	211,43	400
Erime sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$	660,3	1357
Ergime gizli ısısı, J.kg^{-1}	397000	-
Özgül ısı kapasite, J.kg^{-1}	1334,78	390
Dinamik viskozite, $\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-1}$	$1,286 \cdot 10^{-6}$	-

A olayındaki deneysel ve nümerik sonuçlar Şekil 6.6 ve 6.7'de gösterilmiştir. Şekil 6.6'da görülen 0,652 mm uzunluğundaki ölçü mikro sertlik çentiğini göstermektedir. Bu deneysel kaynak çekirdeği kalınlığını ve çapını ölçmek için kullanılmıştır. Deneysel merceğin kanlılığı ve çapı 0,532 ve 2,466 mm bulunurken bunlar nümerik simülasyonda 0,426 ve 2,245 mm bulunmuştur (Khan vd., 2000a). Deneysel merceğin tam olarak yuvarlak olmadığından ortalama çap alınmıştır. Nümerik simülasyonda deneysel çalışmalara göre merceğin kalınlığında % 18, çap da % 9 oranında daha az bir değer elde edilmiştir. Bu sapma genellikle elektrot geometrisinin tahminindeki yanlışlıklarla birlikte artışı gözlenmiştir. Deneysel kesik konik elektrot kullanılırken modellemede düz elektrot kullanılmıştır. Bu yüzden deneyde modellemeden daha yüksek bir akım yoğunluğu oluşur. Elektrotun bu yapısal özelliğinden dolayı sonuçlar uygundur.



a) Deneysel sonuç

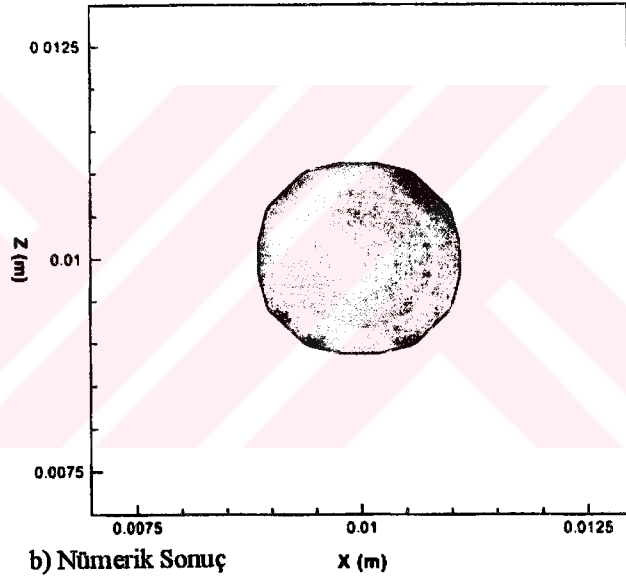


b) Nümerik sonuç

Şekil 6.6 A olayındaki kaynak çekirdeği kalınlığının deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarına göre karşılaştırılması (Khan vd., 2000a).



b) Deneysel sonuç

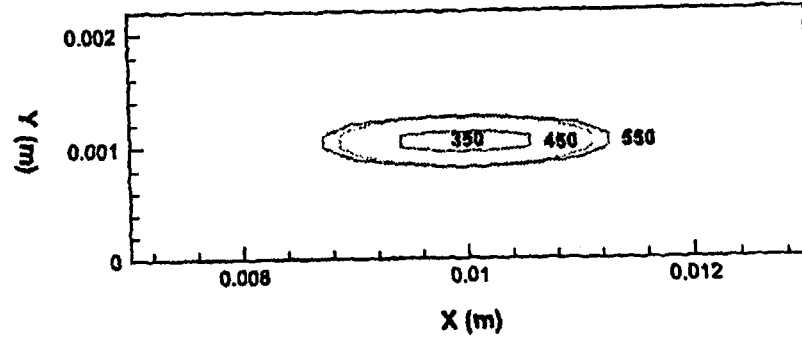


b) Nümerik Sonuç

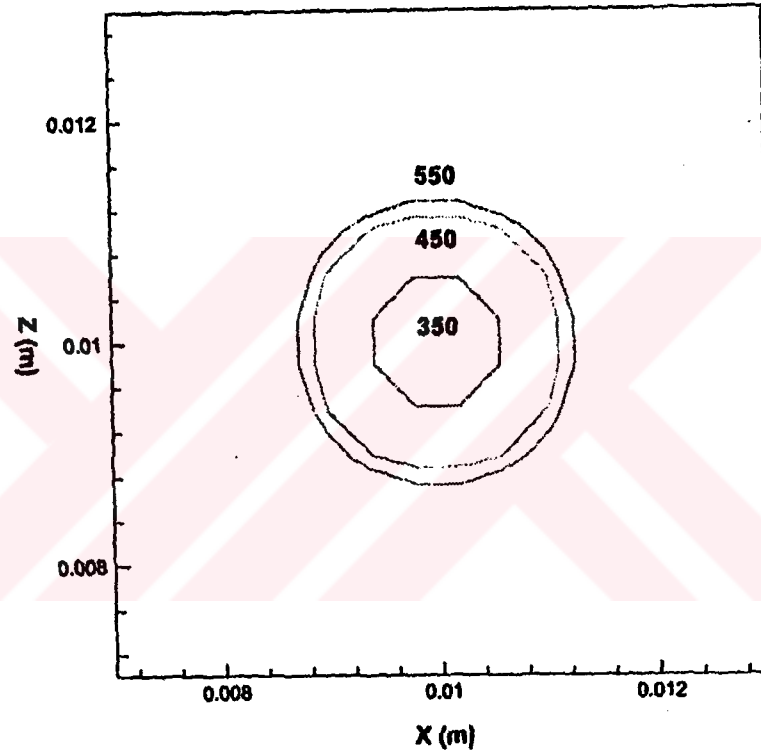
Şekil 6.7 A olayındaki kaynak çekirdeği çapının deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarına göre karşılaştırılması (Khan vd., 2000a).

Şekil 6.7'de, A,G,H olaylarındaki temas yüzeyi direncinin kaynak çekirdeği boyutlarına etkisi görülmektedir. G olayında $350 \mu\Omega$ 'luk temas yüzeyi direncinde 0,16 mm kalınlığında kaynak çekirdeği oluşmaktadır. 450 ve $550 \mu\Omega$ 'lik temas dirençlerinde kaynak çekirdekleri farklı şekillerde oluşsa da 0,43 mm'lik kaynak çekirdeği kalınlıkları elde edilmektedir.

Şekil 6.8'da ise yatay düzlemde temas direncinin etkili ile oluşan kaynak çekirdeği şekli ve çapı görülmektedir $550, 450, 350 \mu\Omega$ temas yüzeyi dirençleri için çaplar sırasıyla 1,16, 2,25 ve 2,55 mm olmuştur.



Şekil 6.8 A,G,H olaylarındaki temas yüzeyi direnci değişiminin kaynak çekirdeği kalınlığına etkisi (Khan vd., 2000a).

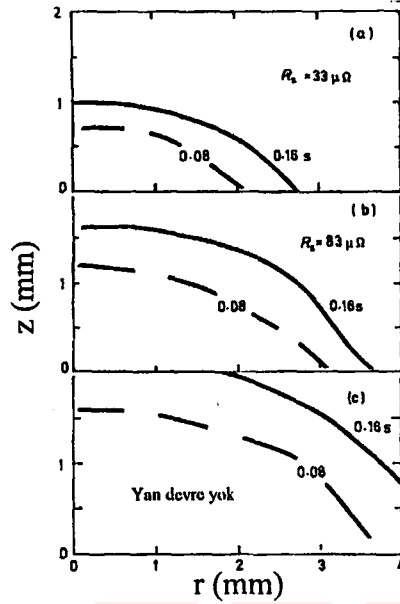


Şekil 6.9 A,G,H olaylarındaki temas yüzeyi direnci değişiminin kaynak çekirdeği çapına etkisi (Khan vd., 2000a).

6.2.4 Nokta Boyutları ve Yan Devre Direnci Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

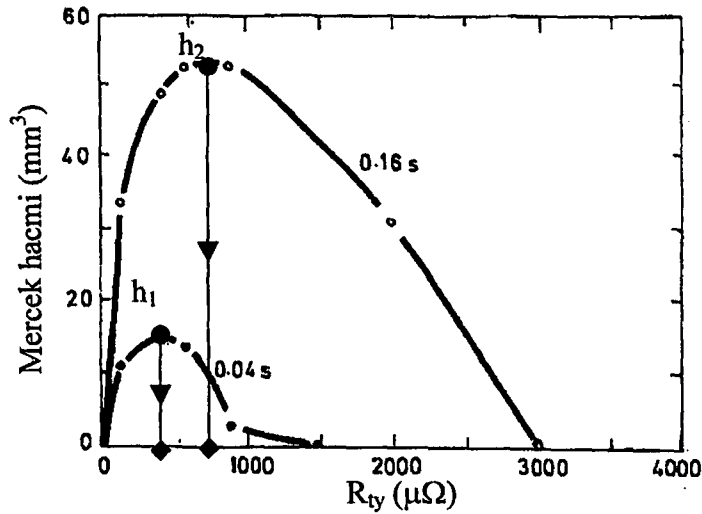
Yan devre direnci, eğer yapılan kaynak noktasına yakın komşu bir kaynak noktası varsa oluşabilmektedir. Şekil 6.10'da yan devre direncinin çekirdek oluşumu üzerindeki etkisi görülmektedir (Browne vd., 1995). Görüldüğü gibi 33 ve 83 $\mu\Omega$ 'luk yan devre dirençlerinde tatmin edici kaynak çekirdeği büyüklükleri elde edilmiştir. Yan devrenin olmadığı kaynakta ise çekirdek oluşumunun kontrolü zordur ve 0,16 s'den sonra geniş bir erime olur. Bu sonuçlar nokta kaynağının pratik tecrübeleri iyi bir uyuşma göstermektedir. Seri nokta

kaynağında, ilk kaynak noktasında iyi bir çekirdek formu elde edilememektedir.(Browne vd., 1995b).



Şekil 6.10 Yan devre direncinin merceğ boyutlarına etkisi (Browne vd., 1995b).

Şekil 6.10'da görüldüğü gibi yan devre direncine bağlı olarak temas direncindeki düşüş kaynağa daha fazla akım yönlendirerek yararlı bir etki de bulunabilir. Şekil 6.11'da merceğ hacmi temas direncinin fonksiyonu olarak verilmiştir. Burada görüldüğü gibi kaynağa başladıktan belirli bir zaman sonra maksimum merceğ hacmi (h_1, h_2) elde edilmesi için bir optimum temas yüzeyi direnci vardır (Browne vd., 1995).



Şekil 6.11 50 $\mu\Omega$ 'luk yan devre direnci varken temas yüzeyindeki direnç değişiminin çekirdek hacmine etkisi (Browne vd., 1995b).

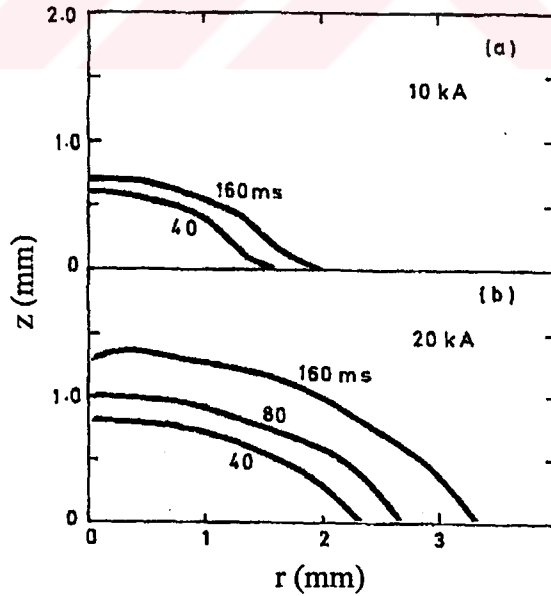
7. NOKTA BOYUTLARI ve DİĞER KAYNAK PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Direnç nokta oluşumu için çok önemli parametrelerden biridir. Dirençten başka diğer önemli parametreler kaynak akımı, zaman, elektrot kuvveti, elektrot ucu yapısı, elektrot ucu ile soğutma suyu arasındaki mesafe, sac kalınlıkları olarak sınırlanabilir. Bu parametrelerin hepsi birbirleri ile bağlantılı ve gözütılması gereken parametreleridir.

7.1 Nokta Boyutları ve Akım Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Alüminyumun ısıl ve elektriksel iletkenlikleri, düşük karbonlu çeliklere göre iki ila dört kat daha fazla olmasından dolayı aynı kalınlıktaki kaynaklarda daha yüksek akıma ihtiyaç vardır (ASM, 1989). Çeliğin nokta kaynağında iyi bir kaynak çekirdeği yapısı elde etmek için 8 ila 14 kA'lık akım gerekirken alüminyum alaşımlarında bu değer 20 ila 30 kA'e çıkmaktadır (Browne vd., 1995a).

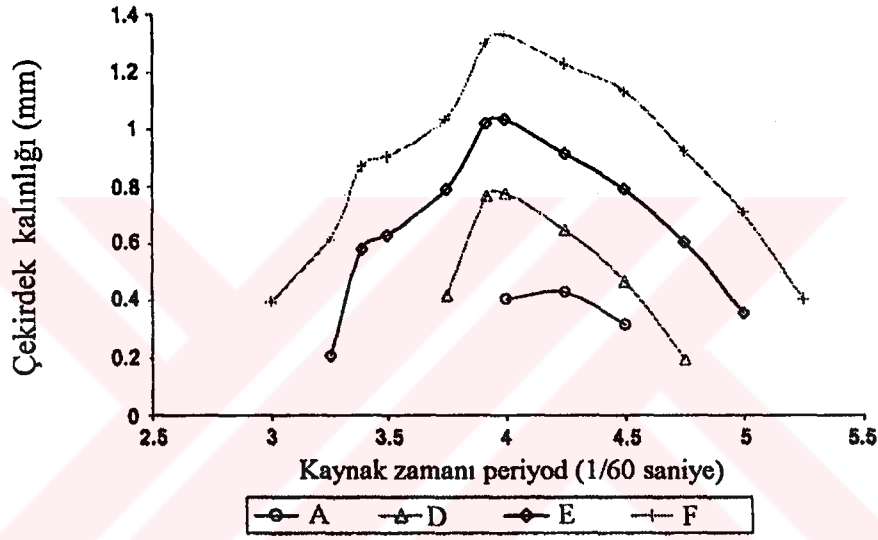
Şekil 7.1'de pik akımın kaynak çekirdeği oluşumundaki etkisi görülmektedir (Browne vd., 1995a). Burada görüldüğü gibi alüminyum nokta direnç kaynağında 10 kA'lık pik akım iyi bir kaynak çekirdeği formu oluşturmada yetersizken 20 kA'lık akım iyi bir form verir. Bu çalışmada kullanılan değerler Çizelge 6.1'de verilmiştir.



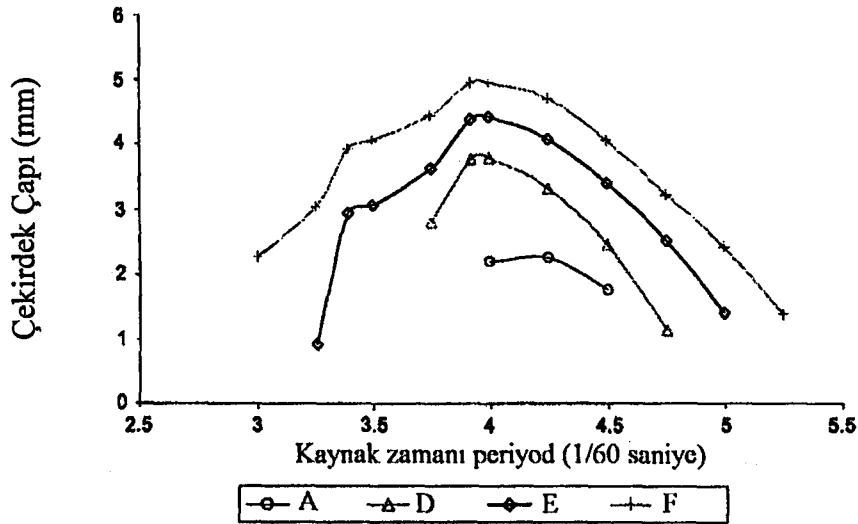
Şekil 7.1 Akımın çekirdek boyutlarına etkisi a) 10 kA b) 20 kA (Browne vd., 1995a).

Khan vd (2000a) akımın, nokta boyutlarına etkisini inceleyen çalışma ile ilgili veriler Çizelge 6.2, 6.3 ve 6.4'de gösterilmiştir. Şekil 7.2 ve 7.3'de farklı pik akımlara sahip A,D,E ve F olaylarındaki çekirdek kalınlığı ve çap değişimleri görülmektedir. Erime başlangıç zamanı

akımın fonksiyonu olarak değişmektedir. F olayı için 51 kA'de erime 2,75-3,00 periyotları arasında başlamaktadır. E olayında ise 49 kA'de erime 3,00-3,25 periyotları arasında başlarken, D olayında, 47 kA akımda erime 3,5-3,75 periyotları arasında olmaktadır. Katılma ise kaynak banyosu kalınlığının 4. periyotta maksimuma çıkmasında sonra başlamıştır. Kaynak banyosu katılması 47,49 ve 51 kA akımlarında, 4,75-5,00, 5,00-5,25, 5,25-5,50 periyotları arasında gerçekleşmektedir. 51,49,47 kA akımlarda kaynak banyosu sırasıyla 1,33,1,04 ve 0.78 mm'ye ulaşmaktadır. Kaynak banyosunu ergimiş halde bulunma süresi akımın artması ile artar. Akım arttıkça kaynak banyosu hacmi lineer olmayan bir şekilde artmaktadır (Khan vd, 2000a).

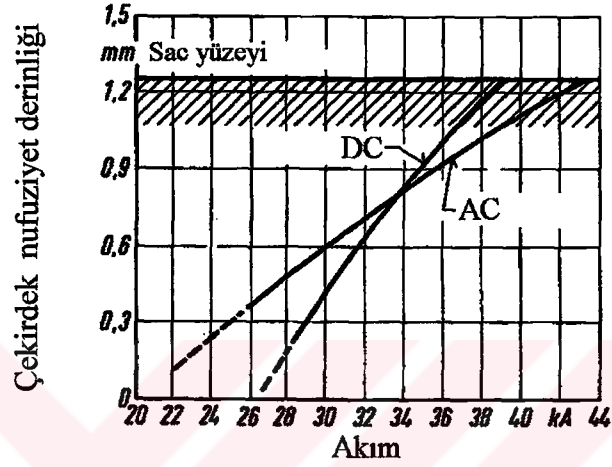


Şekil 7.2 Akım değişiminin çekirdek kalınlığına etkisi (Khan vd., 2000a).



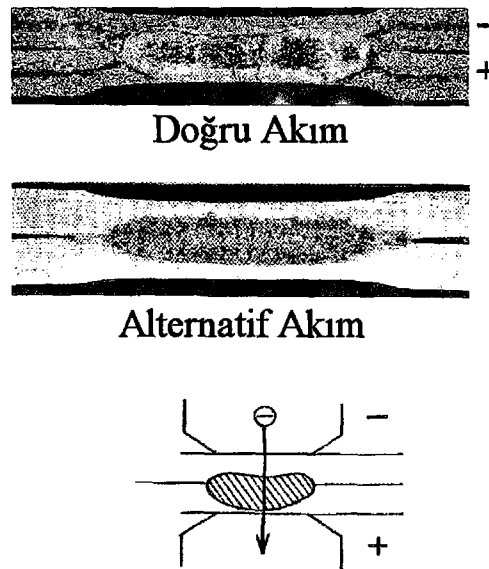
Şekil 7.3 Akım değişiminin çekirdek çapına etkisi (Khan vd., 2000a).

Akımın doğru ve alternatif akım olması da nokta yapısını etkilemektedir. Şekil 7.4’de, 1,25 mm kalınlığındaki 5056 alüminyum sacların, 6 kaynak periyodu, 4 kN elektrot kuvveti ve 16 mm elektrot uç çapı kullanımında doğru akım ve alternatif akımın kaynak çekirdeği kalınlığına etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi belli parametre aralığında verilen kaynak çekirdeği kalınlığını elde etmek için doğru akımda gerekli akım büyüklüğü miktarı, alternatif akımdakinden daha fazladır (Hehl vd., 1984).



Şekil 7.4 DC ve AC'nin kaynak çekirdeği nüfuziyetine etkisi (Hehl vd., 1984).

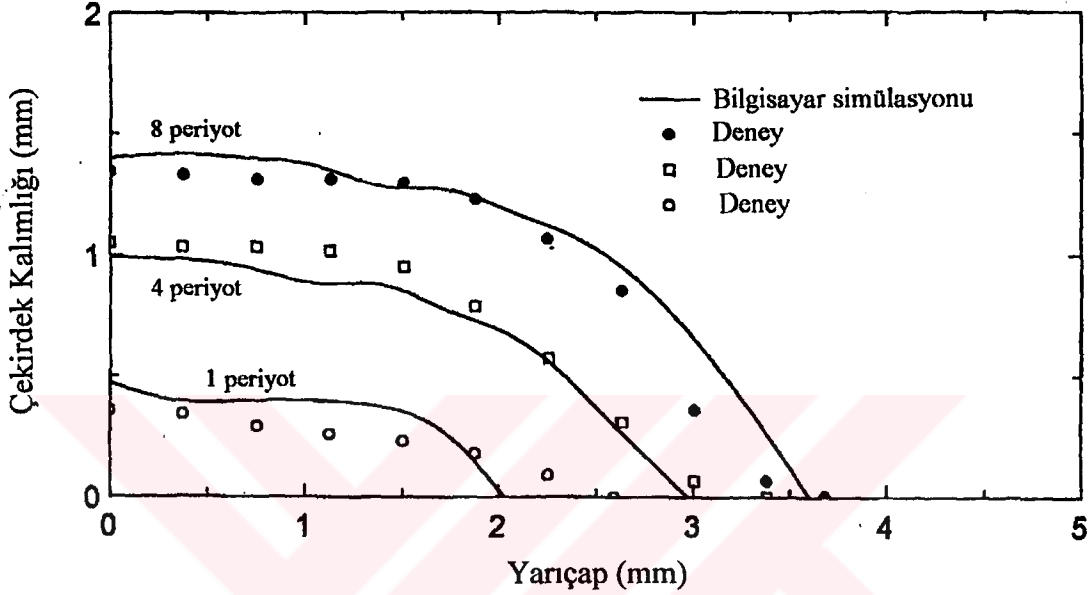
Doğru akım kullanıldığında kaynak çekirdeği temas yüzeyinde simetrik olarak oluşmaz (Şekil 7.5) (1).



Şekil 7.5 DC ve AC'nin çekirdek simetrikliğine etkisi (1).

7.2 Nokta Boyutları ve Kaynak Zamanı Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Kaynak zamanı, akımın iş parçaları boyunca aktığı esas zamandır ve kaynak bölgesinde aşırı ısınma oluşturmaksızın kaynak formunu oluşturacak yeterlikte olmalıdır. Şekil 7.6'da 1,4 ve 8 kaynak periyotlarındaki kaynak çekirdeği boyutları görülmektedir (Browne vd., 1995b). Bu çalışmada kullanılan diğer değerler Çizelge 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.6 Kaynak zamanına bağlı olarak deney ve bilgisayar simülasyonu ile yapılan çalışmalarda elde edilen çekirdek boyutları (Browne vd., 1995b).

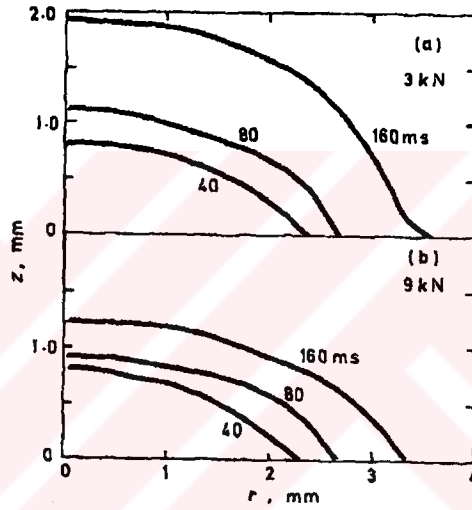
Çizelge 7.1 Çalışmada kullanılan değerler (Browne vd., 1995b).

Değişken	Değer
Pik akım (50 Hz sinüzoidal)	28 kA
Uygulanan kuvvet	5 kN
Soğutma suyunun uca uzaklığı	3 mm
Temas direnci	450 $\mu\Omega$
Yan devre direnci	50 $\mu\Omega$
Elektrot uç çapı	50,8 mm
Sac kalınlığı	2 mm
Malzeme 5754 alüminyum alaşımı	

Şekil 7.6'da görüldüğü gibi simülasyon çalışmaları ile deney sonuçları genelde iyi bir uyum göstermektedir. 4 ve 8'lik zaman periyotlarında deneysel çalışmalarla bilgisayar modeli çok yakın değerler vermektedir.

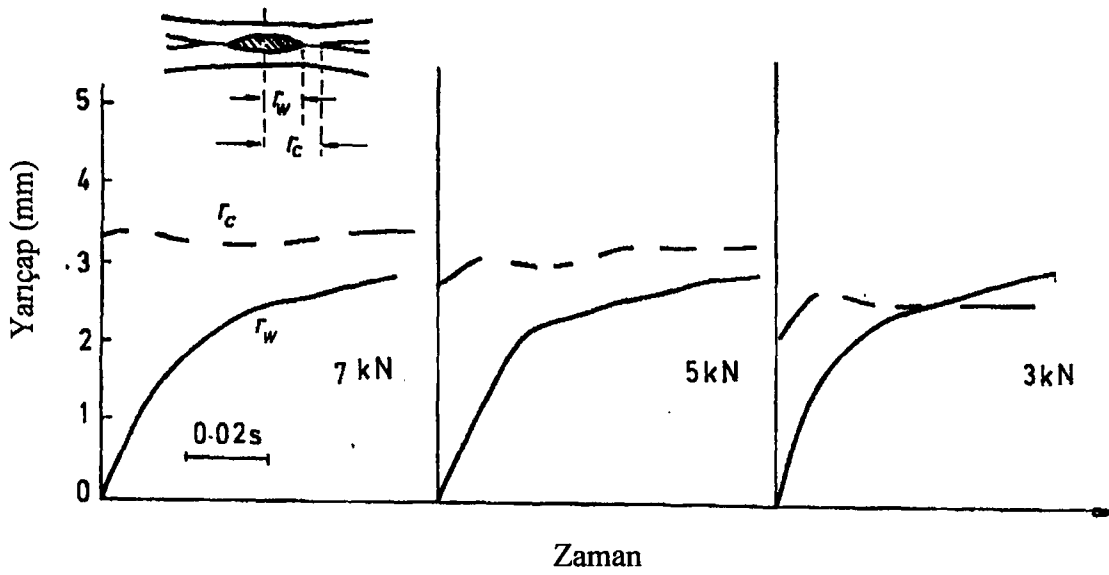
7.3 Nokta Boyutları ve Elektrot Kuvveti Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Uygulanan kuvvetin ana etkisi, kuvvetteki artış ile temas alanının artması ve akım yoğunluğunun azalmasıdır. Sonuç olarak kaynak çekirdeği oluşumunun temas yüzeyindeki dirence duyarlılığından dolayı, uygulanan kuvvet tarafından belirlenen temas yüzeyindeki kontak alanının, kaynak çekirdeği oluşumu üzerinde etkili olması gerekmektedir. Şekil 7.7’de görüldüğü gibi uygulanan düşük kuvvette (3 kN) büyük, küre biçiminde kaynak çekirdeği oluşmaktadır. Kaynak merkezinde daha düşük akım yoğunluğun sonucu olarak 9 kN’luk bir kuvvetle daha düz bir merceç formu elde edilmektedir (Browne vd., 1995a). Bu çalışmanın diğer değerleri Çizelge 6.1’de görülmektedir.



Şekil 7.7 Kaynak zamanının bir fonksiyonu olarak elektrot kuvvetinin çekirdek boyutlarına etkisi (Browne vd., 1995a).

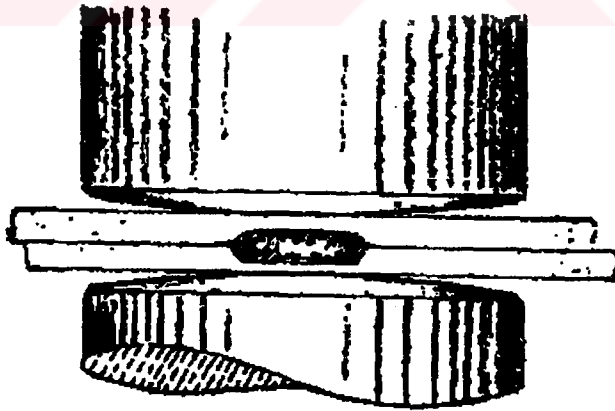
Şekil 7.7’de görüldüğü gibi düşük elektrot kuvveti, küçük temas alanında yüksek akım yoğunluğu oluşturduğu için büyük çekirdek oluşumuna yol açmaktadır. Diğer yandan ergimiş metalin temas yüzeyinden fişkıma olasılığında dolayı düşük elektrot kuvvetinin bir sınırı olmalıdır. Şekil 7.8.’de ergimiş metal havuzu yarıçapı, r_w ve temas yüzeyindeki fiziksel temasın yarıçapı r_c ’ye zamana bağlı olarak elektrot kuvvetinin etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi 3 kN’luk bir elektrot yükünde, $r_w > r_c$ olmakta ve bunun sonucu olarak fişkıma almaktadır. Bu çalışmaya ait diğer veriler Çizelge 7.1’de gösterilmektedir (Browne vd., 1995b).



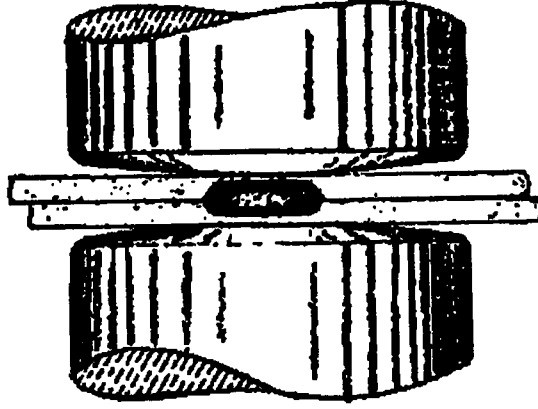
Şekil 7.8 Elektrot kuvvetinin ergimiş metal fişkırmasına etkisi (Browne vd., 1995b).

7.4 Nokta Boyutları ve Elektrot Ucu Şekli Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Genel olarak eşit kalınlıkta, aynı malzeme ve özdeş elektrot uçları kullanıldığında eşit nufuziyete sahip geniş kaynak çekirdeği formu oluşabilmektedir (Şekil 7.9). Farklı malzeme kullanıldığında ise, aynı kalınlık ve elektrot ucu şekillerinde farklı nufuziyete sahip kaynak çekirdeği formu elde edilmektedir (Şekil 7.10).

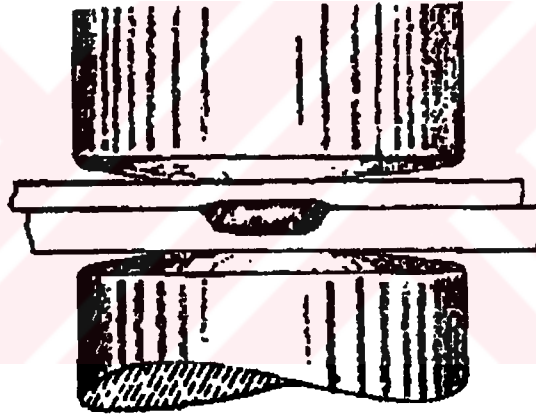


Şekil 7.9 Küresel uçlu özdeş elektrotların aynı malzeme ve kalınlık kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli (1).



Şekil 7.10 Küresel uçlu özdeş elektrotların farklı malzeme, aynı sac kalınlığı kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli (1).

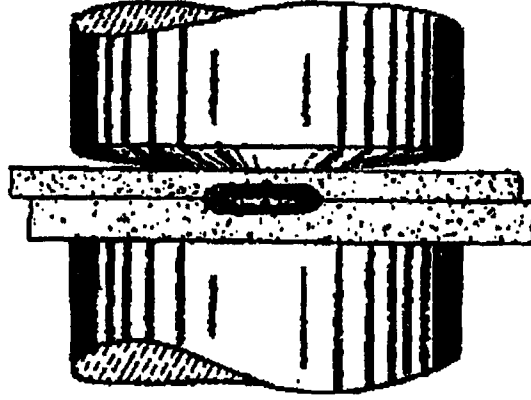
Şekil 7.10'dan farklı olarak eşit olmayan saclar ve aynı malzeme kullanıldığında ise, kalın saca doğru nüfuziyetin arttığı görülmektedir (Şekil 7.11).



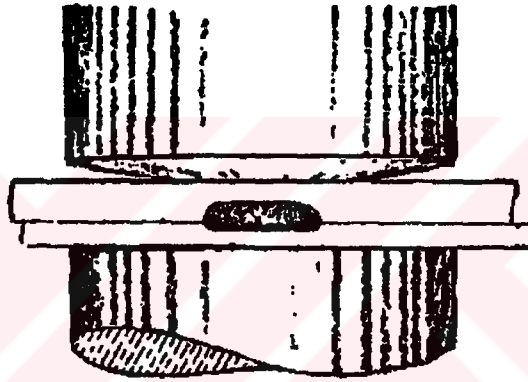
Şekil 7.11 Küresel uçlu özdeş elektrotların aynı malzeme, farklı sac kalınlığı kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli (1).

Şekil 7.12'de görüldüğü gibi farklı kalınlıkta saclar, aynı olmayan elektrot uçları ve aynı malzemeler kullanıldığında, aynı nüfuziyete sahip kaynak çekirdeği formu oluşmaktadır (1).

Şekil 7.13'e bakıldığında 7.11'den farklı olarak sacların yerlerinin değişmesi ve özdeş olmayan elektrot uçlarının kullanıldığı görülmektedir. Fakat sonuç yaklaşık olarak benzerdir. Her ikisinde de kalın saca doğru olan nüfuziyet daha fazla olmaktadır.



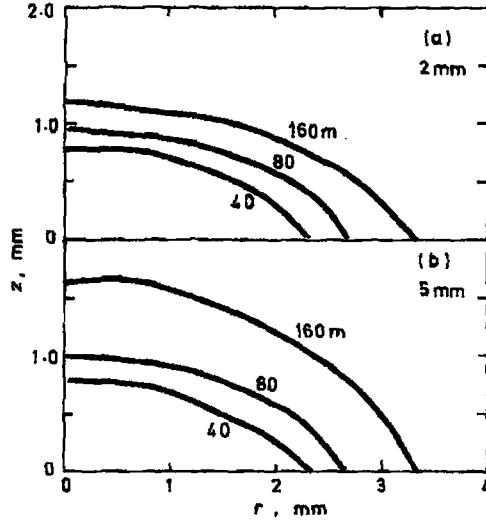
Şekil 7.12 Küresel ve düz uçlu elektrotların aynı malzeme, farklı sac kalınlığı kullanıldığında meydana getirdikleri çekirdek şekli (1).



Şekil 7.13 Küresel ve düz uçlu elektrot çiftinde kalın sacın küresel uç tarafında olduğu ve aynı malzeme kullanıldığında meydana getirdikleri kaynakçekirdeği şekli (1).

7.5 Nokta Boyutları ve Elektrot Ucu İle Soğutma Suyu Arasındaki Mesafenin Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Alüminyumun yüksek ısı iletkenliğinden dolayı elektrot soğutma suyu ve ucu arasındaki uzaklığın nokta kaynağı üzerinde etkisi vardır. Şekil 7.14'te görüldüğü gibi uzaklık küçük olduğunda kaynak bölgesinde iyi bir kaynak çekirdeği formu oluşturmak için daha fazla ısı emilebilir. Uzaklık arttığında ise daha büyük merceğe oluşmasına rağmen iş parçası-elektrot yüzeyinde elektrot ucunun ömrünü azaltan istenmeyen ısı oluşumu meydana gelmektedir (Browne vd., 1995a).



Şekil 7.14 Soğutma suyunun elektrot ucuna uzaklığının çekirdek boyutlarına etkisi a) 2 mm b) 5 mm (Browne vd., 1995a).

7.6 Nokta Boyutları ile Sac Kalınlıkları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

Genelleme yapılırsa sac kalınlığı arttıkça istenilen kaynak çekirdeği formunun elde edilmesi için direncin, akımını ve zamanın artması gerekir. Aynı kalınlıkta saclar kullanıldığında istenilen kaynak çekirdeği formunun elde edilmesi daha kolaydır. Ancak farklı kalınlıkta saclar kullanılırsa Şekil 7.12’de görüldüğü gibi kalın sacın temas halinde olduğu elektrot ucu düz olmalıdır. Eğer ince sacın olduğu kısımda düz elektrot kullanılırsa nufuziyet çok az hatta hiç oluşmayabilir (Şekil 7.13).

Şekil 7.15’te eşit olmayan üç parçanın kaynağı görmektedir. Burada kullanılan malzeme 5052 alüminyum alaşımı ve kalınlıkları sırasıyla 1,57, 3,17, 1,57 mm’dir. Görüldüğü gibi iki kaynak bölgesi ve ortada ısı tarafından etkilenmeyen bir bölge oluşmuştur. (1).



Şekil 7.15 Eşit olmayan üç parçanın kaynağı sonucu oluşan kaynak noktası (1).

Şekil 7.16'da ise 2024 alüminyum alaşımı ve kalınlıkları 0,81, 1,63, 0.81 mm olan üç parça kaynak edilmiştir. Burada Şekil 7.15'in aksine tek bir kaynak bölgesi oluşmuştur .



Şekil 7.16 Üç farklı kalınlığa sahip plakaların kaynağına farklı bir örnek (1).

Farklı malzeme ve kalınlık kullanıldığında elde edilen durum ise Şekil 7.17'de gösterilmiştir. İlk malzeme 1,016 mm kalınlığında 5052, ikincisi ise 1,63 mm kalınlığındaki 2024 alüminyum alaşımıdır. Görüldüğü gibi mantar formunda bir kaynak noktası formu elde edilmiştir .



Şekil 7.17 Farklı kalınlık ve malzeme kullanıldığında elde edilen kaynak formları (1).

8. ALÜMİNYUM NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINA YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALARIN İRDELENMESİ YOLUYLA ÇIKARILAN BAZI SONUÇLARIN İNCELENMESİ

Bu bölümde daha önce çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmış olan çalışmalar ele alınıp, bunların irdelenmesi yoluna gidilmiş ve bazı sonuçlara ulaşılmıştır (James vd.,1997; Crion ve Evans,1998; Khan vd.,2000a). Ele alınan konular:

- Temas yüzeyi direnci (T_{iy}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) arasındaki ilişkinin elektrot kuvvetinin (F) bir fonksiyonu olarak incelenmesi.
- Temas yüzeyi direnci (T_{iy}) ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ($2na$) arasındaki ilişkinin elektrot kuvvetinin (F) bir fonksiyonu olarak incelenmesi.
- Kaynak merceğindeki ısı veriminin (η) incelenmesi.

8.1 Yapılan İncelemelerde Takip Edilen Yol ve Amaçlar

Yapılan ilk incelemede, daha önce James vd (1997) tarafından yapılan çalışma ele alındı. Bu çalışmada elde edilmiş olan, yüzeyi kaplı ve kaplı olmayan (zımparalanmış) alüminyum saclardaki, temas yüzeyi direnci ve elektrot kuvvet ilişkisi (Şekil 5.8) göz önüne alınarak , temas yüzeyi direnci ve görünen temas alanı yarıçapı arasındaki ilişki kaplı ve kaplı olmayan alüminyum saclar için bulunmuştur. Bu hesaplama yapılırken de Crion ve Evans (1998) tarafından ortaya konulan (8.1) eşitliğinden yararlanılmıştır. Formül yükleme durumu için geçerli olduğu için, Şekil 5.8'deki sürekli eğri üzerindeki elektrot kuvvetleri 1'den başlayarak 1kN aralıklarla 10'a dek (8.1) eşitliğine yerleştirilmiş ve her bir temas yüzeyi direncine karşılık, görünen temas alanı yarıçapı elektrot kuvvetinin bir fonksiyonu olarak bulunmuştur.

İkinci incelemede ise, James vd. (1997) tarafından ortaya konulmuş olan, metalik temas alanı ve görünen temas yüzeyi arasındaki ilişkiyi veren (5.5) eşitliği ve Şekil 5.8'deki eğriden hareketle ilk incelemede elde edilen temas yüzeyi direnç değerleri kullanılarak, yüzeyi kaplı ve kaplı olmayan (zımparalanmış) alüminyum saclarda, temas yüzeyi direnci ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu arasındaki ilişki elektrot kuvvetinin bir fonksiyonu olarak bulunmuştur.

Son incelemede ise, Khan vd. (2000a) tarafından yapılan çalışma ele alındı. Bu çalışmada her bir olay için elde edilmiş olan temas yüzeyi direnç, pik akım ve kaynak noktasının boyut değerleri kullanılarak ve temas yüzeyinde oluşan direnç dışındaki direnç değerlerinin ihmal edilmesi sonucu , zamana bağlı direnç değişiminin Şekil 8.6'daki (işlem görmemiş sac) gibi

bir davranış gösterdiği kabul edilerek, sekiz farklı nokta boyutuna sahip kaynak çekirdeği için ısı verim hesabı yapılmıştır.

Hesaplama yapılırken açığa çıkan ısı (2.1) eşitliği ile elde edildi. Pik akım dönüşümü ise (8.4) eşitliği ile yapıldı. Khan vd. (2000a) yaptığı çalışmada $350\mu\Omega$, $450\mu\Omega$, $550\mu\Omega$ olmak üzere üç farklı temas direnci olduğu için Şekil 8.6'daki eğri dikkate alınarak her üçü için zaman-direnç eğrileri çizildi (Şekil 8.8). Burada görülmüştür ki eğri 0,001, 0,004 ve 0,1 saniyelerinde farklı karakteristik göstermiştir. Bu yüzden (2.1) eşitliğindeki R.t çarpanının hesabı bu üç bölgede farklı temas yüzeyi direnç değerleri ile yapıldı ve ısı oluşumu hesaplanırken bu bölgelerdeki farklı akım değerleri kullanıldı. Eğri altındaki alan (R.t) kendisine en çok benzeyen geometrik şekiller kullanılarak hesaplandı. Bu bölgelerdeki R.t çarpanını bulmak için ilk bölge üçgene, diğer ikisi de yamuğa benzetildi.

Verim hesabı için gerekli olan toplam ergime ısı her bir olay için ayrı ayrı hesaplandı. Sonuçta toplam ergime ısı ve nokta direnç kaynağı sırasında oluşan ısı oranlanarak sekiz ayrı kaynak noktası için verim hesaplandı.

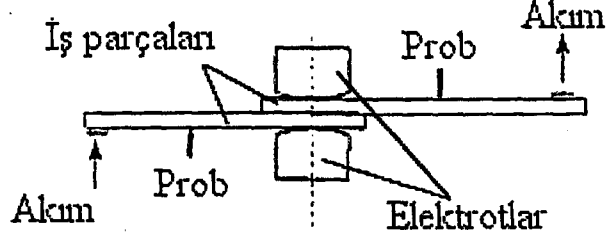
8.2 Temas Yüzeyi Direnci ve Görünen Temas Alanı Yarıçapı Arasındaki İlişkinin Elektrot Kuvvetinin Bir Fonksiyonu Olarak İncelenmesi

James vd., (1997) yaptığı çalışmada 2 mm kalınlığında 5754 alüminyum alaşımlı saclar ile temas direnci ölçümleri yapılmıştır. Hadde işleminden gelen plakalar dağlama işlemine tabii tutulduktan sonra yaklaşık 70.10^{-9} m kalınlığında üzeri silika içeren kaplama yüzeyi oluşturulmuştur. Kaplamanın başlıca amacı, kaynak bağlantılı yapılarda uzun süreli dayanıklılık sağlamak ve korozyon direncini arttırmaktır.

Deneyde 50×350 mm boyutlarında numuneler kullanılmış ve çoğu üzeri kaplı şekilde test edilmiştir. Üzerindeki kaplama yalıtkan olduğundan yüksek temas direnci oluşmuştur. Karşılaştırma yapmak için bazı numunelerin üzerindeki kaplama kazınarak test edilmiştir. Numune yüzeylerinin pürüzlülüğünün profil metre ölçümleri ile aritmetik ortalamalar elde edilmiş ve bu değerlerin yüzeyi kaplı numuneler için $R_a=0,36\mu\Omega$, zımparalanmış numuneler için ise $R_a=0,76\mu\Omega$ olduğu bulunmuştur (James vd.,1997).

Temas direnci ölçümleri 50,8 mm elektrot ucu yuvarlatma yarıçaplı küresel bakır iki elektroda uygulanan F kuvvetinin bir fonksiyonu olarak yapılmıştır. Donanım makas tipi nokta kaynağı pensesinin sıkma işlemine benzetilmiş ve direnç ölçümleri Şekil 8.1'de gösterildiği gibi dört nokta metodu kullanılarak yapılmıştır. Temas yüzeyindeki direnç akımın iki numune içinden

sonlara monte edilen terminallere doğru akışında ölçülmüştür. Şekil 8.1’de de görüldüğü gibi potansiyel düşümü yaylı iki çelik prob arasında ölçülerek bulunmuştur. (James vd.,1997).



Şekil 8.1 Temas yüzeyindeki direncin ölçümü (James vd.,1997).

Bu deneyde temas direnci ölçümleri elektrot kuvvetinin fonksiyonu olarak 1-10 kN’luk yükler arasında yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 5.8’de görülmektedir. Buradan da görüldüğü gibi temas yüzeyindeki direnç kaplı plakalarda yüksek olmasına karşın düzensizdir.

Crinon ve Evans (1998) metalik temas alanı yarıçapı ve elektrot yükü arasındaki ilişkiyi şu formülle göstermiştir. Bu formül yükleme durumu için geçerli olan amprik bir eşitliktir.

$$r_o = r_e \cdot (F / F_1)^m \quad (8.1)$$

r_o = Görünen temas alanı yarıçapı (mm)

r_e = Elektrot ucu yuvarlatma yarıçapı (mm)

F = Elektrot kuvveti (kN)

F_1 = Sabit sayı ($7,37 \cdot 10^6$ kN)

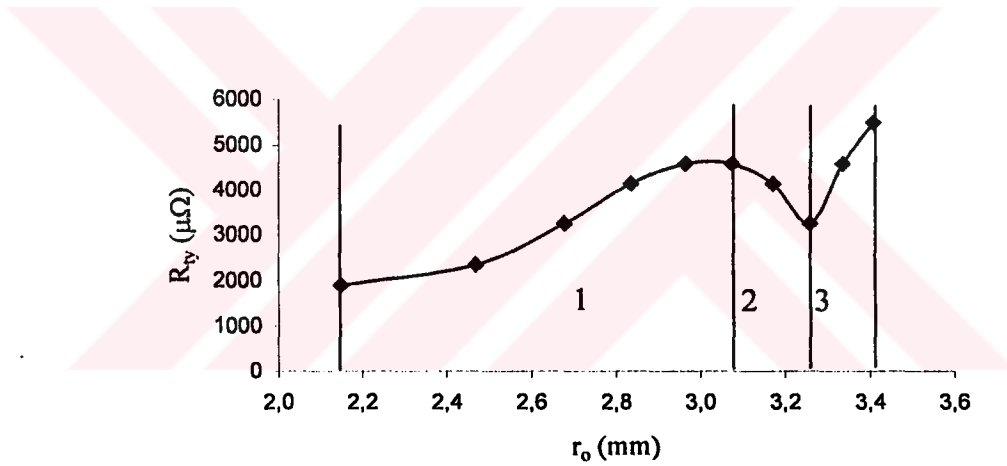
m = Sabit sayı (0,2)

Eğer Şekil 5.8 ve (8.1) denklemini kullanılırsa temas yüzeyi direnci ve görünen metalik temas alanı arasındaki ilişkinin elektrot kuvvetinin bir fonksiyonu olarak ifadesi elde edilebilir.

Çizelge 8.1 Yüzey kaplı durumda elektrot kuvveti (F), temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) değişimi

F (kN)	R_{ty} ($\mu\Omega$)	r_o (mm)
1	1900	2,150
2	2350	2,469
3	3250	2,678
4	4150	2,836
5	4600	2,966
6	4600	3,076
7	4150	3,172
8	3250	3,258
9	4600	3,336
10	5500	3,407

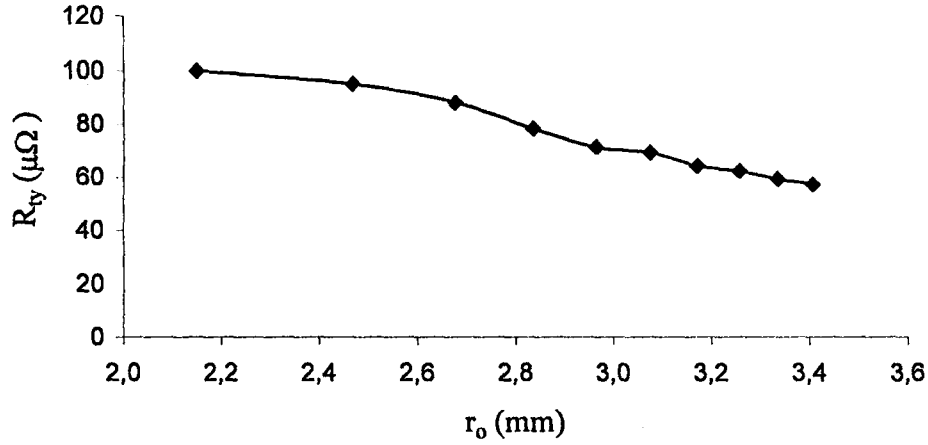
Çizelge 8.1'deki temas yüzeyi direnci ve görünen temas alanı yarıçapı değerleri kullanılarak Şekil 8.2 elde edilebilir.



Şekil 8.2 Yüzey kaplı durumda temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) değişimi.

Çizelge 8.2 Yüzey kaplı değilken ki elektrot kuvveti (F), temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) değişimi

F (kN)	R_{ty} ($\mu\Omega$)	r_o (mm)
1	100	2,150
2	95	2,469
3	88	2,678
4	78	2,836
5	71	2,966
6	69	3,076
7	64	3,172
8	62	3,258
9	59	3,336
10	57	3,407



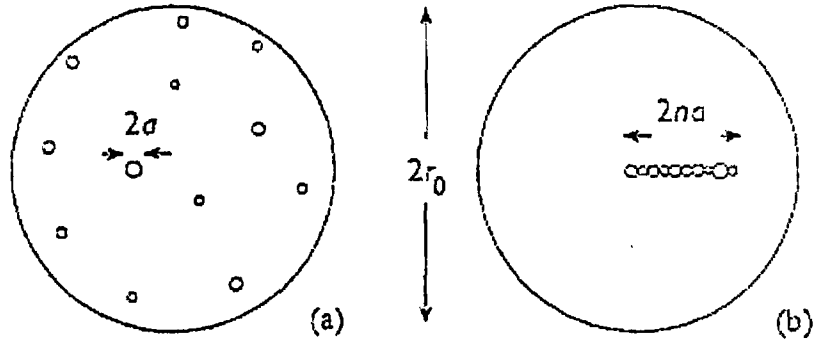
Şekil 8.3 Yüzey kaplı durumda değilken ki temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve görünen temas alanı yarıçapı (r_o) değişimi.

Şekil 8.2'de görüldüğü gibi yükleme durumunda ve iş parçası yüzeyi kaplı ise görünen temas alanı yarıçapı artmakta iken temas yüzeyindeki direnç, düzensiz bir seyir göstermektedir. 1. ve 3. bölgelerde artış gözlenirken 2. bölgede bir azalma gözlenmiştir.

Şekil 8.3'te ise iş parçası yüzeyi kaplı değilken ki durum görülmektedir. Burada dikkati çeken direncin, kaplı duruma göre düşük olması ve görünen temas alanı yarıçapı arttıkça düzenli bir şekilde düşme eğilimi göstermesidir.

8.3 Temas Yüzeyi Direnci ve Metalik Temas Noktalarının Toplam Çap Uzunluğu Arasındaki İlişkinin Elektrot Kuvvetinin Bir Fonksiyonu Olarak İncelenmesi

Metalik temas noktaları alanı görünen temas yüzeyi alanına göre oldukça azdır. James vd (1997), metalik temas alanı ile görünen temas yüzeyi alanı arasındaki oranı şu şekilde bulmuştur. Şekil 8.4 a'da gösterilen bütün metalik temas noktaları bir doğru boyunca birbirine degecek şekilde dizilmiş, (Şekil 8.4 b) noktaların toplam çizgi uzunluğu $2na$ olmuştur. Bu uzunluk, görünen temas alanı çapı ile şu şekilde karşılaştırılmıştır. Eğer $2na \ll 2.r_o$ ise, Holm yarıçapı β , r_o 'a eşit alınmış ve (5.5) eşitliğinin yeniden düzenlenmesi ile (8.2) eşitliği elde edilmiştir.



Şekil 8.4 Metalik temasın görünün temas alanı içinde şematik olarak gösterilmesi (James vd.,1997).

$$\frac{2.r_o}{2na} = \frac{2.R_{iy}.r_o}{\rho} - 1 \quad (8.2)$$

r_o = Görünen temas alanı yarıçapı (mm)

$2na$ = Metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu (mm)

ρ^* = Malzemenin özgül direnci ($\mu\Omega\text{mm}$)

R_{iy} = Temas yüzeyi direnci ($\mu\Omega$)

(8.2) eşitliği tekrar düzenlenirse (8.3) halini alır.

$$2na \cong \left(\frac{\rho}{2.r_o.R_{iy} - \rho} \right).2.r_o \quad (8.3)$$

Şekil 5.8 ve (8.3) denklemini göz önüne alınırsa temas yüzeyi direnci ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ($2na$) arasındaki ilişkinin elektrot kuvvetinin bir fonksiyonu olarak ifadesi elde edilebilir.

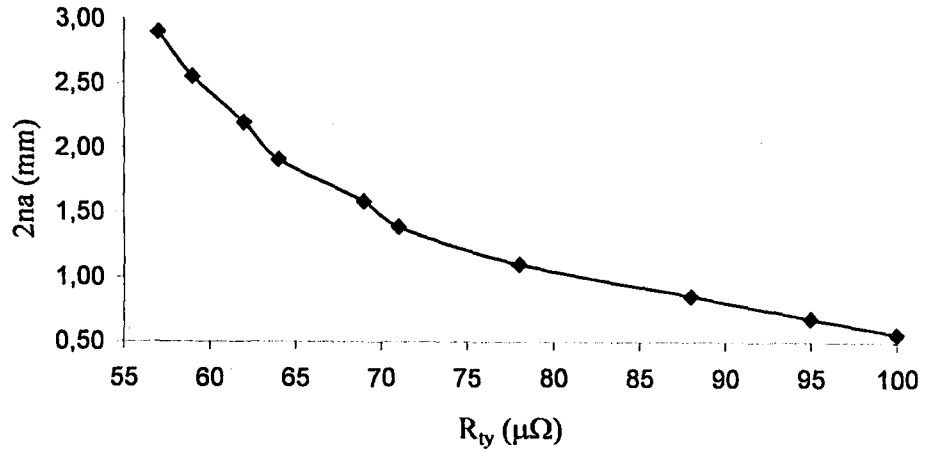
* Malzemenin (5754) oda sıcaklığındaki özgül direnci $50\mu\Omega\text{mm}$ 'dir. Hesaplamalarda Şekil 5.4 deki alüminyum-magnezyum alaşımının özgül direnç eğrisi dikkate alınmıştır.

Çizelge 8.3 Yüzey kaplı durumda elektrot kuvveti (F), temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ($2na$) değişimi.

F (kN)	R_{ty} ($\mu\Omega$)	r_o (mm)	$2na$ (mm)	$2na$ (μm)
1	1900	2,150	0,026478	26,478
2	2350	2,469	0,024375	24,375
3	3250	2,678	0,020075	20,075
4	4150	2,836	0,017403	17,403
5	4600	2,966	0,017442	17,442
6	4600	3,076	0,018971	18,971
7	4150	3,172	0,022732	22,732
8	3250	3,258	0,031536	31,536
9	4600	3,336	0,023780	23,78
10	5500	3,407	0,021156	21,156

Çizelge 8.4 Yüzey kaplı durumda değilken ki elektrot kuvveti (F), temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ($2na$) değişimi.

F (kN)	R_{ty} ($\mu\Omega$)	r_o (mm)	$2na$ (mm)
1	100	2,150	0,57
2	95	2,469	0,68
3	88	2,678	0,86
4	78	2,836	1,10
5	71	2,966	1,39
6	69	3,076	1,59
7	64	3,172	1,91
8	62	3,258	2,20
9	59	3,336	2,55
10	57	3,407	2,90



Şekil 8.5 Yüzey kaplı değilken ki temas yüzeyi direnci (R_{ty}) ve metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ($2na$) değişimi.

Çizelge 8.3'e bakılırsa yüzeyi kaplı alüminyum alaşımlarında metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ile temas yüzeyi direnci arasındaki ilişki görülebilir. Bu ilişkiyi üç kısımda inceleyebiliriz. İlk kısımda 1-5 kN'luk yük altında metalik temas noktalarının çap uzunluğunun azalması ile temas direncinde bir artma olmaktadır. İkinci kısımda, 5-8 kN yük altında, metalik temas noktalarının çap uzunluğunun artışı ile temas direncinde bir azalma son bölümde ise, 8-10 kN yük altında, ilk bölümün tekrarı görülmektedir. Buradan da yüzeyi kaplı alüminyum alaşımlarında metalik temas noktalarının çap uzunluğundaki artışın temas direncini azalttığı, aynı şekilde metalik temas noktalarının çap uzunluğundaki azalmanın da temas direncini arttırdığı sonucuna varabilir.

Şekil 8.5'da yüzeyi kaplı olmayan alüminyum alaşımlarında metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ile temas yüzeyi direnci arasındaki ilişki görülmektedir. Görüldüğü üzere metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğundaki artış temas yüzeyi direncinde lineere benzer bir düşüş oluşturmaktadır.

8.4 Kaynak Çekirdeğindeki Isıl Verimin İncelenmesi

Elektrik nokta direnç kaynağında ısı oluşumu (2.1) eşitliği yardımı ile bulunabilir. Burada sinüs formundaki dalgalı akım (8.4) eşitliği ile formül için kullanılır hale getirilebilir (Gültekin,1991).

$$I = \frac{I_{maks}}{\sqrt{2}} \quad (8.4)$$

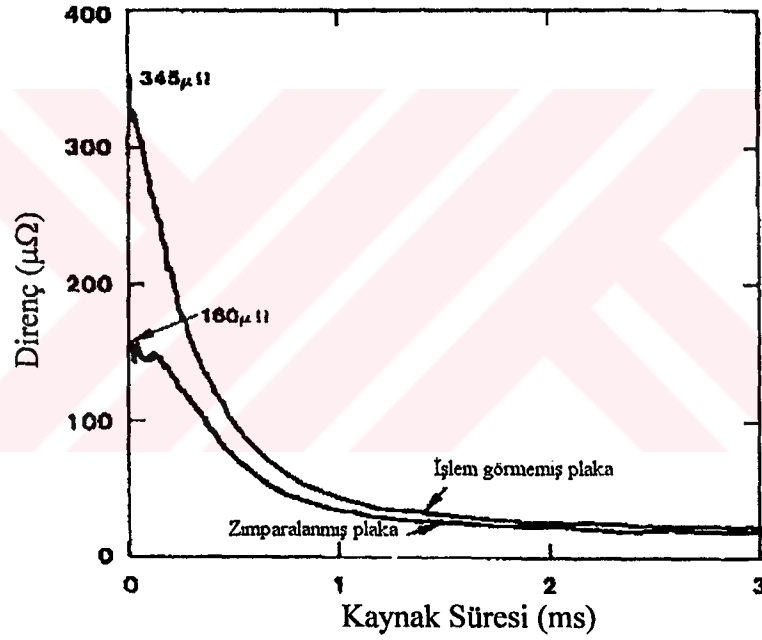
I = Akım (A)

I_{maks} = Pik akım (A)

Temas yüzeyinde, direnç nedeniyle oluşan ısı kaynak çekirdeği oluşumunu yönlendirir. Alüminyum nokta direnç kaynağıyla alakalı yapılan modelleme çalışmalarında, iş parçası-elektrot yüzeyindeki direnç ihmal edilmiştir (Wei ve Ho, 1990; Wei ve Yeh, 1991; Browne vd., 1995a; 1995b; Wei vd., 1996; Hao vd., 1996). Browne vd'ne (1995b) göre deneysel ölçümler göstermiştir ki iş parçası-elektrot yüzeyindeki direnç, temas yüzeyindeki direnç ile karşılaştırıldığında çok düşüktür ve modelleme çalışmaları sonuçlarına göre elektrotun yüzeyinde oluşan ısının nokta oluşumuna etkisi çok azdır. Bunun yanında çelikle kıyaslandığında, alüminyum alaşımlarının özgül direnci düşük olduğu için malzeme direncinden kaynaklanan ısı önemli olmamaktadır (Browne vd., 1995b). Bu yüzden malzeme

direncinin nokta oluşumu ve boyutları üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği sonucuna varılabilir.

Alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında yüzey durumları dikkate alınmaksızın görülmüştür ki yüksek temas direnci, ilk periyodun birinci çeyreğinde hızlıca düşer ve $20 \mu\Omega$ 'luk bir değere ulaşır (Thornton vd., 1996). Nokta direnç kaynağında kalıntı olarak temas direnci yaklaşık olarak $5 \mu\Omega$ 'a düşer. Direnç değişiminin büyük bir bölümü kaynak akımının ilk periyodunun birinci çeyreğinde olduğu için direnç değişiminin alüminyum alaşımlarının kaynak çekirdeği büyümesinin devamı yönünde az bir önemi vardır (Thornton vd., 1996). Şekil 8.6'da ilk periyodunun birinci çeyreğindeki direnç değişimi görülmektedir.



Şekil 8.6 İlk periyodunun birinci çeyreğindeki direnç değişimi (1)

Khan vd. (2000a), alüminyum nokta direnç kaynağı için nümerik ısıl model geliştirmiştir. Burada temas yüzeyindeki direncin kaynak noktası boyutlarına olan etkisini deneysel ve modelleme çalışmaları yaparak araştırmışlardır. Çizelge 6.2'de ele alınan test olayları görülmektedir. Dikkat edilirse burada ele alınan 8 olay için başlangıç temas yüzeyi direnci ve oluşan kaynak çekirdeğinin hacmi verilmektedir. Yapılan çalışma ile alakalı diğer değerler Çizelge 6.3 ve 6.4'te görülmektedir.

Khan vd. (2000a) tarafından yapılan çalışmalar kullanılarak, Şekil 8.6'deki eğri davranışı baz alınır, iş plakası-elektrot, malzeme direnci ihmal edilirse, (8.5) eşitliği yardımı ile ısıl verim (η) hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{Q_{lei}}{Q} \cdot \%100 \quad (8.5)$$

Q_{lei} = Toplam ergime ısısı (J)

Q = Nokta kaynağı sırasında oluşan ısı (J)

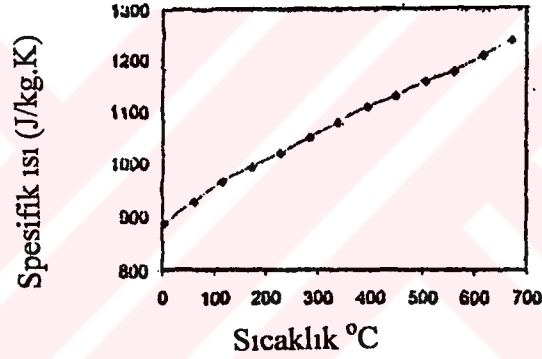
Toplam ergime ısısı, ısınma ısısı ile toplam ergime gizli ısısından oluşur. Isınma ısısı (Q_1) (8.6) eşitliği ile ifade edilir.

$$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (8.6)$$

m = Çekirdek ağırlığı (g)

c^* = Spesifik ısı (J/gK)

ΔT = Sıcaklık aralığı



Şekil 8.7 Spesifik ısı ve sıcaklık değişimi (Khan vd.,2000b).

Toplam ergime gizli ısısı (Q_2) formülü de (8.7) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$Q_2 = m \cdot L \quad (8.7)$$

L^{**} = Ergime gizli ısısı (J/g)

Sonuçta toplam ergime ısısı, (8.8) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$Q_{lei} = Q_1 + Q_2 \quad (8.8)$$

*Hesaplamalarda c , Şekil 8.7'deki lineer davranış gösteren eğrinin ortalaması olarak alınmıştır. Bu da yaklaşık olarak $1083 \cdot 10^{-3}$ J/gK'dir.

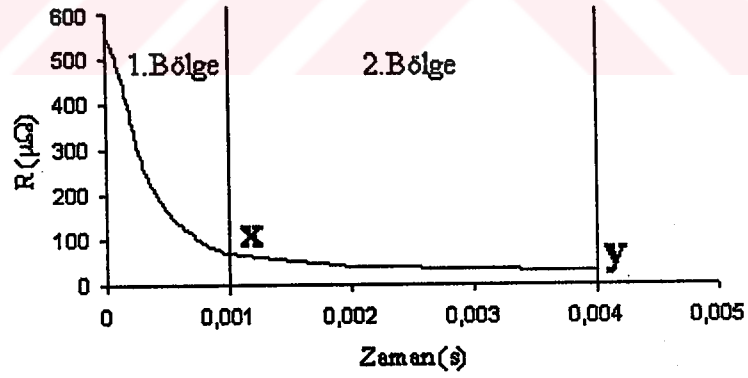
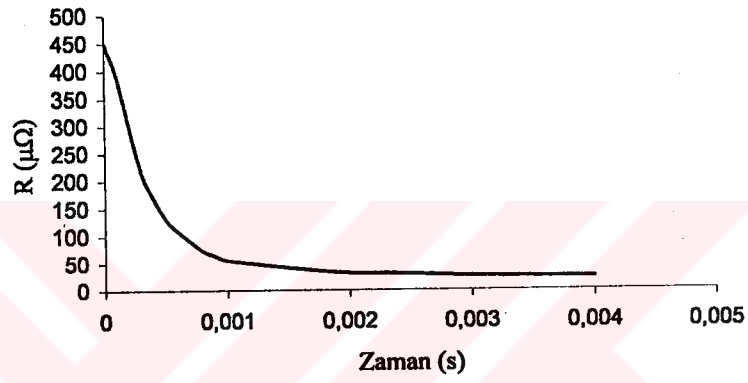
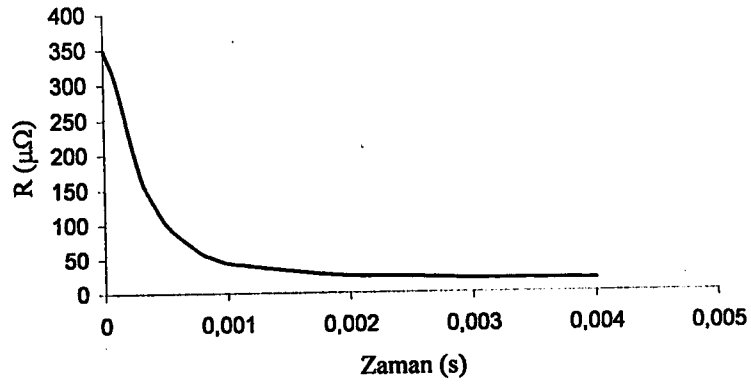
** $L = 397$ J/g

Khan vd (2000a) çalışmasında kullanılan dört akım değeri (Çizelge 6.2), (2.1) eşitliğindeki kullanılan I değerlerine, Şekil 6.4'de gösterilen I_{maks} eğrisi göz önüne alınarak, değerlerinin (8.4) eşitliğine yerleştirilmesiyle dönüştürüldü (Çizelge 8.5).

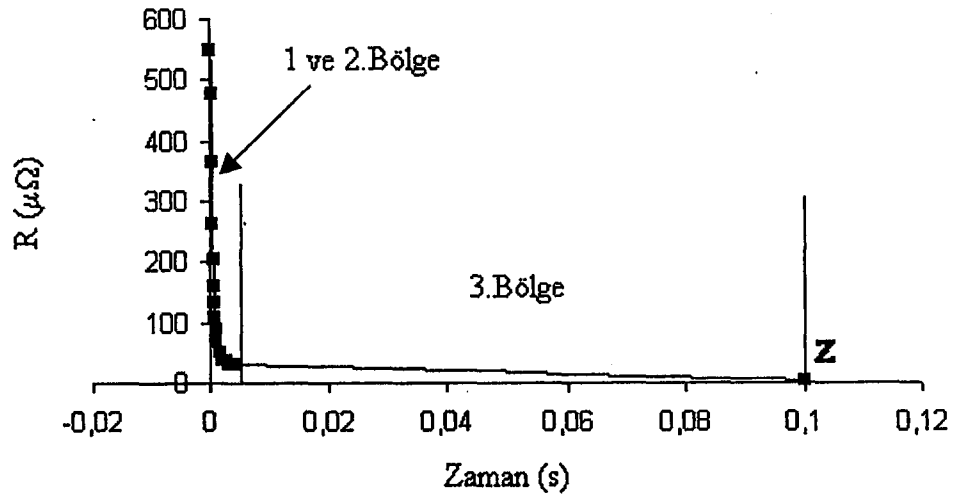
Çizelge 8.5 Kaynak zamanı boyunca akımın değişimi

Kaynak zamanı (periyot)	I_{maks} (kA)				I (kA)			
	45	47	49	51	45	47	49	51
1	25,0	26,0	27,2	28,3	17,68	18,38	19,25	20,02
2	34,0	35,5	37,0	38,7	24,04	25,10	26,18	27,33
3	42,0	44,0	45,7	47,9	29,70	31,11	32,34	33,88
4	45,0	47,0	49,0	51,2	31,82	33,23	34,65	36,19
5	18,0	19,0	19,6	20,7	12,73	13,44	13,86	14,63
6	10,0	10,5	10,9	11,4	7,07	7,42	7,70	8,08

Khan vd (2000a) tarafından yapılan çalışmada $350\mu\Omega$, $450\mu\Omega$, $550\mu\Omega$ olmak üzere üç değişik başlangıç temas yüzeyi direnci vardır (Çizelge 6.2). Bu değerlerden hareketle iş parçası –elektrot yüzeyi direnci ve malzeme direnci ihmal edilmek koşulu ile Şekil 8.6 göz önüne alınarak direnç-zaman eğrisi çizilebilir (Şekil 8.8).



Şekil 8.8 $350 \mu\Omega$, $450 \mu\Omega$, $550 \mu\Omega$ için ilk periyodunun birinci çeyreğindeki direnç değişimi.



Şekil 8.9 Kaynak zamanı boyunca direnç değişimi.

Çizelge 8.6 Sınır bölgelerinde direnç ve zaman değerleri.

	Zaman (s)	Direnç ($\mu\Omega$)		
	0	350	450	550
x	0,001	44	56	68
y	0,004	19	24	29
z	0,100	5	5	5

Şekil 8.8 ve 8.9'da görüldüğü gibi direnç zaman eğrisi üç bölgeye ayrılabilir. (2.1) eşitliğinde $R.t$ çarpanı olduğu için bu yola gidilmiştir. Sınır değerler kullanılarak birinci bölgede $R.t$ çarpanı için üçgen, ikinci ve üçüncüde yamuk alanı hesaplanacaktır.

Çizelge 8.7 Her bir olay için ısınma ısı (Q₁) değerleri.

Olay	Çekirdek yüksekliği h (mm)	Çekirdek Çapı d (mm)	$m = \frac{\pi.d^2}{4}.h.y$ m (g)	m (g).10 ⁻³	Specific ısı c (J/gK)	Sıcaklık Farkı ΔT (660-20)°C	Isınma ısı Q ₁ (J)
A	0,426	2,245	0,0040	4,00	1,083	640	2,77
B	0,989	3,905	0,0281	28,10	1,083	640	19,45
C	1,593	5,278	0,0826	82,60	1,083	640	57,22
D	0,776	3,787	0,0207	20,70	1,083	640	14,35
E	1,035	4,416	0,0376	37,60	1,083	640	26,03
F	1,326	4,951	0,0605	60,05	1,083	640	41,91
G	0,162	1,165	0,0004	0,40	1,083	640	0,28
H	0,437	2,553	0,0053	5,30	1,083	640	3,67

Çizelge 8.8 Her bir olay için toplam ergime gizli ısısı.

Olay	Kaynak çekirdeği ağırlığı m (g)	Ergime gizli ısısı L (J/g)	Toplam ergime gizli ısısı Q ₂ (J)
A	0,0040	397	1,59
B	0,0281	397	11,16
C	0,0826	397	32,79
D	0,0207	397	8,22
E	0,0376	397	14,93
F	0,0605	397	24,02
G	0,0004	397	0,16
H	0,0053	397	2,10

Çizelge 8.9 Her bir olay için toplam ergime ısısı.

Olay	Isınma ısısı Q ₁ (J)	Toplam ergime gizli ısısı Q ₂ (J)	Toplam ergime ısısı Q _{topl} (J)
A	2,77	1,59	4,36
B	19,45	11,16	30,61
C	57,22	32,79	90,01
D	14,35	8,22	22,57
E	26,03	14,93	40,96
F	41,91	24,02	65,93
G	0,28	0,16	0,44
H	3,67	2,10	5,77

Çizelge 8.10 Olaylarda oluşan ısı.

Olay	I (A) x(10 ³)			R.t (Ω.s) x (10 ⁻⁶)			Q (J)			
	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	1.Bölge	2.Bölge	3.Bölge	Toplam
A	17,68	17,68	20,51	0,225	0,12	1,392	70,3	37,5	585,6	693,4
B	17,68	17,68	20,51	0,225	0,12	1,392	70,3	37,5	585,6	693,4
C	17,68	17,68	20,51	0,225	0,12	1,392	70,3	37,5	585,6	693,4
D	18,38	18,38	21,45	0,225	0,12	1,392	76,0	40,5	640,5	757,0
E	19,25	19,25	22,33	0,225	0,12	1,392	83,4	44,5	694,1	821,9
F	20,02	20,02	23,40	0,225	0,12	1,392	90,2	48,1	762,2	900,5
G	17,68	17,68	20,51	0,175	0,09	1,152	54,7	28,1	484,6	567,4
H	17,68	17,68	20,51	0,275	0,15	1,632	86,0	45,9	686,5	818,4

Çizelge 8.9 ve 10'da sırasıyla her bir olaydaki kaynak çekirdeği için toplam ergime ısısı ve oluşan ısı bulunmuştur. (8.5) eşitliğinde bunlar yerine konularak ısı verim bulunabilir.

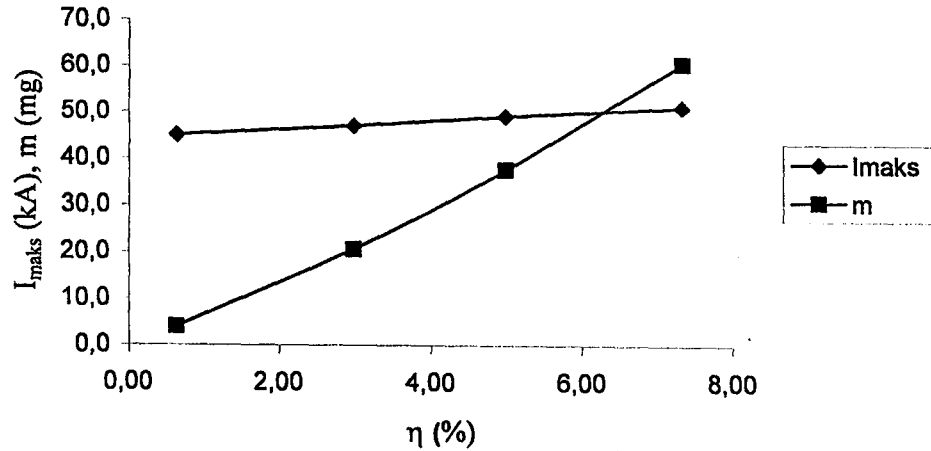
Çizelge 8.11 Her bir olayda oluşan ısı verim.

Olay	Ergime ısısı Q_{lei} (J)	Oluşan ısı Q (J)	Isıl verim η (%)
A	4,36	693,4	0,63
B	30,61	693,4	4,41
C	90,01	693,4	12,98
D	22,57	757,0	2,98
E	40,96	821,9	4,98
F	65,93	900,5	7,32
G	0,44	567,4	0,08
H	5,57	818,4	0,68

Çizelge 6.2'ye tekrar dönlürse A, D, E, F olaylarında diğer koşullar sabit kalmak koşulu ile akımın değiştiği aynı şeyin dirençte A, G, H olaylarında gözlemlendiği görülmektedir. Buradan hareketle ısı verimin mercek ağırlığı-akım ve mercek ağırlığı-direnç değişimi ile olan ilişkisi bulunabilir.

Çizelge 8.12 Akım değişiminin çekirdek ağırlığı ve ısı verime etkisi.

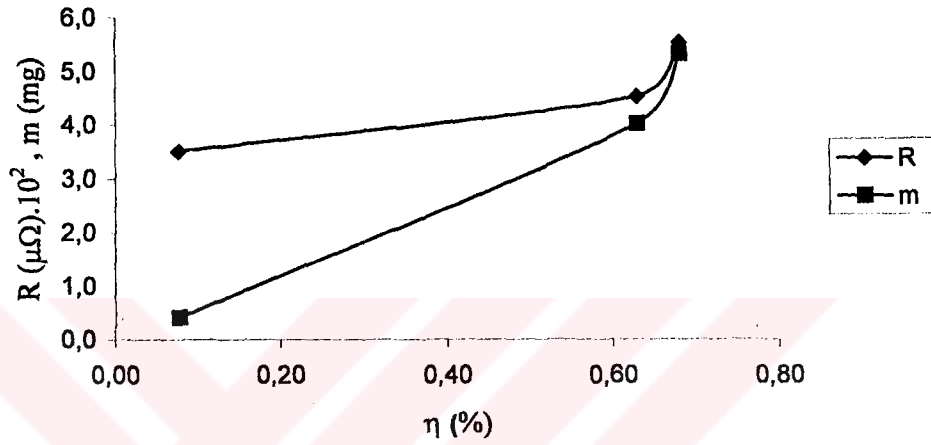
Olay	Isıl verim η (%)	Pik Akım I_{maks} (kA)	Çekirdek Ağırlığı m (mg)
A	0,63	45,0	4,0
D	2,98	47,0	20,7
E	4,98	49,0	37,6
F	7,32	51,0	60,5



Şekil 8.10 Akım değişiminin kaynak çekirdeği ağırlığı ve ısı verime etkisi.

Çizelge 8.13 Direnç değişiminin kaynak çekirdeği ağırlığı ve ısı verime etkisi.

Olay	Isıl verim η (%)	Direnç R ($\mu\Omega$). 10^2	Mercek Ağırlığı m (mg)
G	0,08	3,5	0,4091
A	0,63	4,5	3,9945
H	0,68	5,5	5,2991



Şekil 8.11 Direnç değişiminin kaynak çekirdeği ağırlığı ve ısı verime etkisi.

Çizelge 4.5 ve 4.6'teki 1,02 mm saclar dikkate alınırrsa denilebilir ki Çizelge 6.2'deki C,E,F olaylarında Çizelge 4.5 ve 4.6'daki çap değerleri yaklaşık olarak elde edilmektedir. Buradan hareketle Çizelge 8.11'e bakıldığında, istenilen kaynak çekirdeği formu elde etmek için alüminyum alaşımlarındaki ısı verim değeri %5 ile %13 arasındadır sonucuna varılabilir.

Şekil 8.10'de görüldüğü gibi akımdaki %13'lük artış elde edilirken, kaynak çekirdeği ağırlığı ile ısı verim arasında lineer bir ilişki vardır.

Şekil 8.11'ye bakılırsa dirençte akımda olduğı gibi kaynak merceği ağırlığı ve ısı verim arasında lineer bir ilişki elde edilememiştir.

9. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Nokta direnç kaynağı sırasında oluşan çekirdek verimi birbirleri ile etkileşim halinde olan parametrelere dayanır. Bunlar direnç, akım, kaynak zamanı, sac kalınlığı, uygulanan kuvvet, elektrot ucu ile soğutma suyu arasındaki uzaklık, elektrot ucu yapısı gibi parametrelerdir. Kaynak direncini, temas yüzeyindeki direnç, iş parçası elektrot yüzeyindeki direnç, malzeme direnci ve yan devre direnci olarak bileşenlerine ayırabiliriz.

Çelikle kıyaslandığında, alüminyum alaşımlarının özgül direnci düşük olduğu için malzeme direncinden kaynaklanan ısı önemli değildir (Browne vd., 1995b). Bu yüzden malzeme direncinin nokta oluşumu ve boyutları üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek seviyelerde olduğu sonucuna varılabilir.

Alüminyum nokta direnç kaynağıyla alakalı yapılan çoğu modelleme çalışmalarında, iş parçası-elektrot yüzeyindeki direnç ihmal edilmiştir (Wei ve Ho, 1990; Wei ve Yeh, 1991; Browne vd., 1995a; 1995b; Wei vd., 1996; Hao vd., 1996). Browne vd.'ne (1995a) göre deneysel ölçümler göstermiştir ki iş parçası-elektrot yüzeyindeki direnç, temas yüzeyindeki direnç ile karşılaştırıldığında çok düşüktür ve modelleme çalışmalarının da sonucu olarak görülmüştür ki elektrotun yüzeyindeki oluşan ısının nokta oluşumuna etkisi çok azdır.

Kaynak edilecek malzemelerin temas yüzeyinde, direnç nedeniyle oluşan ısı çekirdek oluşumunu yönlendirir. Direnç bileşenleri içinde nokta boyutlarının oluşumu için en önemlisi temas yüzeyindeki dirençtir. Alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağında temas yüzeyindeki direncin çekirdek oluşumu ve boyutları üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu çalışmada daha önce yapılmış olan deneysel ve simülasyon çalışmalarının analizi yoluna gidilip direnç bileşenleri ile nokta boyutları arasındaki ilişki incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1 Yükleme durumunda ve sac yüzeyi kaplı ise görünen temas alanı yarıçapı artmakta iken temas yüzeyindeki direnç, düzensiz bir seyir göstermektedir (Şekil 8.2).
- 2 Sac yüzeyi kaplı değilken ise direnç, kaplı duruma göre düşüktür ve görünen temas alanı yarıçapı artıka düzenli bir şekilde düşme eğilimi göstermektedir (Şekil 8.3).
- 3 Pratikte elektrot temas düzlemi çapı ile görünen temas alanı çapı aynı alınabilir. Bu varsayımla ve elde edilen diyagramlar yardımıyla (Şekil 8.2 ve Şekil 8.3) yüzeyi kaplı ve kaplı olmayan alüminyum alaşımları için istenen direnç değeri uygun elektrot ve kuvvet tatbikiyle elde edilebilir.

- 4 Yüzeyi kaplı alüminyum alaşımlarında, metalik temas noktalarının çap uzunluğundaki artışın temas direncini azalttığı, aynı şekilde metalik temas noktalarının çap uzunluğundaki azalmanın da temas direncini arttırdığı görülmüştür. Çizelge 8.3'e bakılırsa yüzeyi kaplı alüminyum alaşımlarında metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ile temas yüzeyi direnci arasındaki bu ilişki görülebilir. Bu ilişkiyi üç kısımda inceleyebiliriz. İlk kısımda 1-5 kN'luk yük altında metalik temas noktalarının çap uzunluğunun azalması ile temas direncinde bir artma olmaktadır. İkinci kısımda, 5-8 kN yük altında, metalik temas noktalarının çap uzunluğunun artışı ile temas direncinde bir azalma son bölümde ise, 8-10 kN yük altında, ilk bölümün tekrarı görülmektedir.
- 5 Yüzeyi kaplı olmayan alüminyum alaşımlarında metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğu ile temas yüzeyi direnci arasındaki ilişki ise düzenli bir davranış gösterir. Metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğundaki artış temas yüzeyi direncinde lineere benzer bir düşüş oluşturmaktadır (Şekil 8.5).
- 6 Kaplı ve kaplı olmayan alüminyum alaşımları için metalik temas noktalarının toplam çap uzunluğunun elde edilmesiyle eğer metalik temas noktalarının toplam sayısı (n) tespit edilebilirse, metalik temas noktalarının daire kesitli olduğu kabulü ile metalik temas noktası yarıçapı bulunabilir.
- 7 Diğer kaynak parametreleri aynı kalmak koşulu ile kaynak akımını 45 kA'den 51 kA'ye yükselmesiyle yani yaklaşık %13'lük artışı elde edilmesiyle, kaynak çekirdeği ağırlığı ile ısı verim arasında lineer bir ilişki görülmektedir (Şekil 8.10).
- 8 Dirençte, akımda olduğu gibi kaynak çekirdeği ağırlığı ve ısı verim arasında lineer bir ilişki elde edilememiştir (Şekil 8.11).
- 9 Çizelge 4.5 ve 4.6'teki 1,02 mm saclar dikkate alınır ise denilebilir ki; Çizelge 6.2'deki C,E,F olaylarında Çizelge 4.5 ve 4.6'daki çap değerleri yaklaşık olarak elde edilmektedir. Buradan hareketle, Çizelge 8.11'e bakıldığında, öngörülen boyutlarda kaynak çekirdeği formu elde etmede alüminyum alaşımlarındaki ısı verim değeri %5 ile %13 arasında olabildiği sonucuna varılabilir.

KAYNAKLAR

- Ank, S., (1960), Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı, İTÜ, İstanbul.
- ASM, (1989), Metals Handbook, Vol.6. Ninth Edition, Ohio.
- Browne, D.J., Chandler, H.W., Evans J.T. ve Wen J., (1995), "Computer Simulation of Resistance Spot Welding in Aluminum: Part 1", Welding Journal, 74 (10): 339-344.
- Browne, D.J., Chandler, H.W., Evans J.T., Wen J. ve Newton, C.J., (1995), "Computer Simulation of Resistance Spot Welding in Aluminum:Part: 2", Welding Journal, 74 (12): 417-422.
- Cho,H.S. ve Cho, Y.J., (1989), "A Study of the Thermal Behavior in Resistance Spot Welding, Welding Journal, 68 (6), 236-244.
- Cohen, M.A. ve Apte, U., (1997), Manufacturing Automation, Irwin, Chicago.
- Crinon, E. ve Evans, J.T., (1998), "The Effect of the Surface Rougness,Oxide Film Thickness and Interfacial Sliding on the Electrical Contact Resistance", Materials Science and Engineering A, 242: 121-128.
- ed.Davis, J.R., (1993), Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Metarials Park,OH.
- ed.Zalensas,D.L., (1986), Aluminum Casting Technology, American Foundrymen's Society.
- Erk, Ş., Gümüş, İ., Şimbil, İ.,Çıngı, Emel. ve Bolcan, S., (1993), Temel Fizik Deneylei, Fatih Gençlik Vakfı Matbaası, İstanbul.
- Eryürek, İ.B., (1976), Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Temas Direncinin Etüdü, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul (yayımlanmamış).
- Gould,J.E., (1987), "An Examination of Nugget Development during Spot Welding, Using Both Experimental and Analytical Techniques", Welding Journal, 66 (1), 1-10.
- Gould, J.E., (1994), "Modelling Primary Dentride Arm Spacing in Resistance Spot Welds Part 1", Welding Journal, 73 (4):67-74.
- Gourd, L.M., (1996), Kaynak Teknolojisinin Esasları (Çev., İ.B.Eryürek., O.Bodur., A.Dikicioğlu.), Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Gültekin, N., (1991), Kaynak Tekniği, Engin Ofset, İstanbul.
- Gürdaş, M.D., (1999), Kaynaklı Konstrüksiyonlarda Alüminyum Ve Alaşımlarının Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul (yayımlanmamış).
- Hao, M., Osman, K.A., Boomer, D.R. ve Newton, C.J., (1996), "Developments in Characterization of Resistance Spot Welding of Aluminum", Welding Journal, 75 (1): 1-8.
- Han, Z., Orozco, J., Indacochea, J.E. ve Chen, C.H., (1989), "Resistance Spot Welding: A Heat Transfer Study", Welding Journal, 68 (9): 363-371.
- Hehl, D., Maile, K., Roos, E., Wijaranakula, W., (1984), "Factors Affecting Temperature Distribution and its Calculations in the AC and DC Resistance Spot Welding of Aluminum Sheet", Schweissen und Schneiden, 36 (2): 64-67.
- James,P.S., Chandler, H.W., Evans, J.T., Wen, J., Browne, D.J. ve Newton,C.J., (1997), "The Effect of Mechanical Loading on the Contact Resistance of Coated Aluminum", Materials Science and Engineering A, 230: 194-201.

- Khan, J.A., Broach, K. ve Kabir, A.A.S.A., (2000), "Numerical Thermal Model of Resistance Spot Welding in Aluminum", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 14 (1): 88-95.
- Khan, J.A., Xu, L., Chao, Y.J. ve Broach, K., (2000), "Numerical Simulation of Resistance Spot Welding Process", *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, 37 (4): 425-446.
- Kissell, J.R. ve Ferry, R.L., (1995), *Aluminum Structures: A Guide to their Specifications and Design*, Wiley, New York.
- Leone, G.L. ve Altshuller, B., (1984), "Improvement on the Resistance Spot Weldability of Aluminum Body Sheet", Paper No: 840292, SAE Inter. Congress and Exposition, Detroit, Mich., Feb. 27-Mar. 2.
- ODTÜ KTM., (1998), *Elektrik Nokta Direnç Kaynağı Eğitim Semineri Ders Notları*, Mercedes-Benz Türk A.Ş., İstanbul.
- Rice, W. ve Funk, E.J., (1967), "An Analytical Investigation of the Temperature Distributions during Resistance Welding", *Welding Journal*, 46 (4): 175-186.
- Smith, W.F., (2001), *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (Çev., N.G.Kımkıoğlu), Literatür Yayıncılık*, İstanbul.
- Thonton, P.H., Kraue, A.R. ve Davies, R.G., (1996), "Contact Resistance in Spot Welds", *Welding Journal*, 75 (12): 402-412.
- Thonton, P.H., Kraue, A.R. ve Davies, R.G., (1997), "Contact Resistance of Aluminum", *Welding Journal*, 76 (8): 331-341.
- Wei, P.S. ve Ho, C.Y., (1990), "Axisymmetric Nugget Growth during Resistance Spot Welding", *Journal of Heat Transfer*, 112 (5): 309-316.
- Wei, P.S. ve Yeh, F.B., (1991), "Factors Affecting Nugget Growth with Mushy-Zone Phase Change during Resistance Spot Welding", *Journal of Heat Transfer*, 113 (8): 643-649.
- Wei, P.S., Wang, S.C. ve Lin, M.S., (1996), "Transport Phenomena during Resistance Spot Welding", *Journal of Heat Transfer*, 118 (8): 762-773.
- Xu, L. ve Khan, J.A., (1999), "Nugget Growth Model for Aluminum Alloys during Resistance Spot Welding", *Welding Journal*, 78 (11): 367-372.

INTERNET KAYNAKLARI

- 1- <http://www-iwse.eng.ohio-state.edu/we702/newpage1.htm>
- 2- <http://www.ez.org/aluminum.htm>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	03.01.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1993-1996	Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi.
Lisans	1996-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fak. Makine Mühendisliği Bölümü.
	1998-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fak. Endüstri Mühendisliği Bölümü.
Yüksek Lisans	2000-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mak. Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı.

