

**TİTANYUM ALAŞIMLARININ KAYNAK SONRASI
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

SEMİH SEZER



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİTANYUM ALAŞIMLARININ KAYNAK SONRASI MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

SEMİH SEZER
0000-0002-3982-2816

Doç. Dr. Rukiye Ertan
(Danışman)
0000-0002-9631-4607

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2019

TEZ ONAYI

Semih Sezer tarafından hazırlanan "Titanyum Alaşımlarının Kaynak Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oyçokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç.Dr. Rukiye Ertan

Başkan: Doç.Dr. Rukiye Ertan
0000-0002-9631-4607
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Bölümü

İmza

Üye: Doç.Dr. Gökhan Sevilgen
0000-0002-7746-2014
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Bölümü

İmza

Üye: Dr. Selçuk Karagöz
0000-0002-1987-5750
Bursa Teknik Üniversitesi
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof.Dr.Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
27/09/2019

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27/09/2019
Semih Sezer

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTANYUM ALAŞIMLARININ KAYNAK SONRASI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ **Semih Sezer**

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç.Dr. Rukiye Ertan

“Titanyum Alaşımlarının Kaynak Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” isimli tez çalışmasında Grade 2 olarak da adlandırılan saf titanyum ile Ti6Al4V formülüne sahip titanyum alaşımı olan Grade 5, elektrik nokta direnç kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde kaynaklanmış ve buna bağlı kaynaklı parçaların mekanik davranışları karşılaştırılmıştır.

Elektrik nokta direnç kaynağında elektrodlardan geçen akım, elektroların iş parçasıyla temasını sağlayan kuvvet, kaynak zamanı gibi parametreler en temel önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin birbirleri ile kombinasyonları ve uygulanma miktarları kaynak kalitesini belirler. Kaynağın kalitesi birleştirilecek parçaların mekanik dayanımına doğrudan etki eder. İlgili kaynak parametrelerin saf titanyum ve titanyum alaşımlarının üzerinde dayanım ve sertlik özellikleri incelenerek uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titanyum, Elektrik nokta direnç kaynağı, kaynak parametreleri, mekanik özellikler.

2019, vii + 64 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOURS OF THE TITANIUM ALLOYS AFTER WELDING PROCESS

Semih Sezer

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automative Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Rukiye Ertan

In this thesis which is called ‘Investigation Of Mechanical Behaviours Of The Titanium Alloys After Welding Process’, electric resistance welding is done in different welding parametres of pure titanium Grade 2 and Grade 5 titanium alloy which has chemical formula ‘Ti6Al4V’ and compared the mechanical behaviours of the welded components.

The current passin through the electrodes, the force that causes the electrons to touch the workpiece, and the welding time are the most important factors. The combination of these factors with each other and the amount of application determine the quality of the welding. The quality of the welding, directly affects the mechanical strength of the parts to be joined. It is aimed to determine the proper welding parameters by studying the strength and hardness properties of the relevant welding parameters on pure and alloyed titanium.

Keywords: Titanium, Electric resistance spot welding, Welding parameters, Mechanical properties

2019, vii + 64 pages.

TEŐEKKÖR

Bilgi ve tecrübeleri ile her zaman her konuda yanımda olan, bana destek veren, çalışmamda deneyimlerini benden esirgemeyen, değerli danışman hocam Doç. Dr. Rukiye ERTAN'a, hayatımın her anında yanımda olan bana desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve eşime, parçaların kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan Kamak Rekor'da Kaynak Mühendisi olarak çalışan Metin ÇUKUR'a ve tez yazım konusunda destek aldığım Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi arkadaşım Tufan Gürkan YILMAZ'a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Semih SEZER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1.GİRİŞ.....	1
2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Titanyum Ve Alaşımları.....	6
2.2. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	7
2.2.1. Ticari Saf Titanyum.....	8
2.2.3. Yakın α Titanyum Alaşımları.....	9
2.2.4. α - β Alaşımları.....	9
2.2.5. β Titanyum Alaşımları.....	10
2.3. Titanyum Ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti.....	11
2.4. Nokta Direnç Kaynağı.....	14
2.4.1. Nokta Direnç Kaynağı Prensibi.....	14
2.4.2. Elektrik Direnç Kaynağı Yöntemleri.....	16
2.4.3. Nokta Direnç Kaynağı Oluşumu.....	19
2.4.4. Nokta Direnç Kaynağı Kabiliyeti.....	20
2.4.5. Kaynak Sırasında Sıcaklık Dağılımı ve Kaynak Çekirdeğinin Oluşumu.....	21
2.4.6. Kaynak Çevrimi.....	23
2.4.7. Nokta Direnç Kaynağı Değişkenlerinin İncelenmesi.....	25
2.4.8. Isı Kaybı.....	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
3.1. Materyal.....	33
3.2. Malzemelerin Kaynağa Hazırlanması.....	34
3.3. Malzemelerin Kaynağının Yapılışı.....	34
3.4. Test Numunesi Hazırlama İşlemleri.....	36
3.5. Mekanik Özelliklerin Tespiti.....	40
3.5.1. Çekme Testi.....	40
3.5.2. Kaynak Çekirdek Çapı Ölçümü.....	41
3.5.3. Vickers Sertlik Ölçümü.....	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
4.1. Çekme Testi.....	43
4.2. Kaynak Çekirdeği Çapı Ölçümü.....	53
4.3. Vickers Sertlik Ölçümü.....	55
5. SONUÇ.....	60
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
α	Alfa
β	Beta
Q	Enerji
I	Akım
R	Direnç
t	Süre
S	Kaynak kabiliyeti
T_{em}	Metalin Ergime Sıcaklığı
K_t	Isı iletim katsayısı
∞_t	Isı İletkenliği
d	Çap
F	Kuvvet

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	American Society for Testing and Materials
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
Gr	Grade (Seviye)
TIG	Tungsten Inert Gaz Kaynağı
GTAW	Gaz Tungsten Ark Kaynağı
GMAW	Gaz Metal Ark Kaynağı
PAW	Plazma Ark Kaynağı
LBW	Lazer Işın Kaynağı
EBW	Elektron Işın Kaynağı
RSW	Nokta Direnç Kaynağı
HV	Vickers Sertlik Değeri

İndisler	Açıklama
$^{\circ}$	Derece

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Nokta direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi.....	14
Şekil 2.2.	Nokta direnç kaynağı	15
Şekil 2.3.	Nokta direnç kaynağının prensip resmi.....	17
Şekil 2.4.	Nokta direnç kaynağının boyutları	18
Şekil 2.5.	Nokta direnç kaynak yönteminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 2.6.	Nokta direnç kaynağında bölgeler, dirençler ve sıcaklık dağılımı	22
Şekil 2.7.	Nokta direnç kaynağının çevrimi	24
Şekil 2.8.	Kaynak sırasında kaynak akımının çekirdek çapı, çekme dayanımı ve elektrod dalma derinliği üzerindeki etkileri	27
Şekil 2.9.	Kaynak kabiliyeti diyagramı	28
Şekil 3.1.	Kaynak işlemleri öncesi kesilmiş olan numune örneği.....	34
Şekil 3.2.	Nokta direnç kaynağı ile kaynak edilen parça geometrisi.....	34
Şekil 3.3.	Sağlam Makina Sanayi marka nokta direnç kaynağı makinesi.....	35
Şekil 3.4.	Kaynak işlemi sonucunda elde edilen numune	36
Şekil 3.5.	Streurs marka abrasif kesme cihazı	37
Şekil 3.6.	Metkon Ecopress-100 marka bakalite alma cihazı.....	37
Şekil 3.7.	Metkon-Forcimat marka otomatik parlatma cihazı.....	38
Şekil 3.8.	Bakalite alınmış sertlik ölçüm numunesi	39
Şekil 3.9.	Utest marka 25 tonluk üniversal çekme cihazı.....	40
Şekil 3.10.	Vickers sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi.....	41
Şekil 3.11.	Mikrosertlik değeri ölçüm noktaları.....	41
Şekil 3.12.	Duroline-Metkon marka sertlik ölçüm cihazı	42
Şekil 4.1.	20 çevrim kaynak süresinde birleştirilmiş numunelerin farklı akım değerlerindeki çekme grafikleri; a) Grade 2-2, b) Grade 2-5 ve c) Grade 5-5.....	45
Şekil 4.2.	4 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin farklı kaynak süresindeki çekme grafikleri; a) Grade 2-2, b) Grade 2-5 ve c) Grade 5-5.....	47
Şekil 4.3.	4 kA kaynak akımında birleştirilmiş farklı titanyum çiftlerine kaynak süresinin etkisi.....	48
Şekil 4.4.	Belirli kaynak sürelerinde birleştirilmiş farklı titanyum çiftlerine kaynak akımının etkisi; a) 20 çevrim, b) 30 çevrim	50
Şekil 4.5.	Kaynak kopma görüntüleri.....	51
Şekil 4.6.	Sabit kaynak sürelerinde birleştirilmiş farklı titanyum çiftlerine ait kaynak süresinin çekirdek çapı üzerine etkisi; a) 20 çevrim, b) 30 çevrim.....	54
Şekil 4.7.	Sabit kaynak akımında birleştirilmiş farklı titanyum çiftlerine ait kaynak süresinin çekirdek çapı üzerine etkisi	55
Şekil 4.8.	Sabit kaynak akımında birleştirilmiş Gr 2-2 titanyum çiftlerine ait sertlik ölçüm grafikleri; a) 3 kA, b) 4 kA ve c) 5 kA.....	57
Şekil 4.9.	Sabit kaynak akımında birleştirilmiş Gr 2-2 titanyum çiftlerine ait sertlik ölçüm grafikleri; a) 3 kA, b) 4 kA ve c) 5 kA.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. Bazı titanyum ve alaşımları için mekanik özellikler.....	7
Çizelge 2. 2. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri	8
Çizelge 2. 3. α ve β dengeleyici elementler.....	9
Çizelge 2. 4. Bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri.....	12
Çizelge 2. 5. Kaynaklı ve kaynaklı olmayan bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri ..	13
Çizelge 2. 6. Değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları	23
Çizelge 3. 1. Grade 2 ve Grade 5 titanyum malzemelerin kimyasal bileşimi	33
Çizelge 3. 2. Grade 2 ve Grade 5 titanyum malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri	33
Çizelge 3. 3. Nokta direnç kaynak makinesinin özellikleri	35
Çizelge 3. 4. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri	36
Çizelge 4. 1. Çekme testinde ölçülen çekme kuvveti ve uzama değerleri	43
Çizelge 4. 2. Kaynak parametreleri ve kopma sonucundaki görüntüleri	52
Çizelge 4. 3. Birleştirilen numunelerin kaynak çekirdek çapı büyüklükleri.....	53

1.GİRİŞ

Titanyum ve titanyum alaşımları; düşük yoğunluğu, korozyon direnci ve yüksek mukavemet gibi üstün özellikleri bulunan günümüzün mühim mühendislik malzemelerindendir. Titanyum elementinin kullanılmaya başlanması ilk olarak uçak ve uzay endüstrisiyle olurken, bahsi geçen üstün yönleri sebebiyle birçok alanda daha tercih edilmiştir. Düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemeti sebebiyle havacılık alanındaki uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, yüksek korozyon direncine sahip olması sebebiyle denizcilik ve kimya endüstrisi uygulamalarında da vazgeçilmez bir malzeme kaynağı haline gelmiştir. Diğer yandan son 30 yılda metalin yeni imalat yöntemlerinin ilerlemesine paralel olarak biyomedikal uygulamalarda (dişçilik ve ortopedi vb.) üstün özellikleri nedeniyle geniş kullanım alanı bulmuştur. Titanyum 25 yılı aşkın bir süredir kemik içi implant malzemesi olarak uygulanmaktadır. Kemik içi implantlar post, çubuk, ve bıçak biçiminde saf halde veya alaşımlı titanyum malzemedan imal edilir. Günümüzde cerrahi splint, protez eklem, dental implant, damar stentleri, parsiyel protez ve kuron köprü, son yıllarda uygulama geçilen titanyum kaplamalı meme protezleri, mutfak eşyası ve yüzük imalatı vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son 60 yılda önemli hale gelen titanyum, günümüzde en fazla kullanılan metaller listesinde alüminyum; demir ve magnezyumun ardından dördüncü sırada kendine yer bulmuştur. Saf titanyumun yoğunluğu $4,5 \text{ g/cm}^3$ olup, $1660 \text{ }^\circ\text{C}$ civarında bir ergime sıcaklığı bulunmaktadır. Titanyum alaşımlarının sahip olduğu mukavemet, yaklaşık 2,5 kat alüminyum alaşımlarından yüksek olmakla birlikte bazı alaşımlı çelikler ile eşit değere sahiptir.

Titanyum, kullanım ömrü boyunca ilk yatırım maliyeti çeliğe nazaran yüksek olmasına karşın, işletme maliyetini düşüren bir malzemedir. Örneğin titanyumun yaygınlaşması ile uçaklarda ağırlık önemli ölçüde azalmış ve bunun sonucunda yakıttan kazanç sağlanmıştır. Ayrıca kimyasal maddelerin sebep olduğu koroziye karşı titanyum yüzeyinde meydana gelen ince oksit tabaka korozyona yüksek direnç gösterdiği için işletme maliyetlerinde kazanımlar elde edilmiştir. Benzer çoğu uygulamada bakım zorluğu ve yüksek maliyetli klasik malzemeler yerini titanyuma bırakmaktadır.

Titanyum esaslı parçalarla oluşturulan sistemlerde yüksek güvenilirlik ile malzeme açısından uzun ömürlü ve yüksek performans elde edildiği görülmüştür.

Bahsi geçen bu olumlu özelliklerinin yanı sıra, titanyum kötü aşınma ve sürtünme özelliği sebebiyle hareketli temasın olduğu mühendislik uygulamalarında kullanılamamıştır. Yapışma derecesindeki sürtünmeye ve şiddetli aşınmaya bağlı olarak titanyum kullanılan uygulamalarda enerji ve malzeme kaybı görülmüştür. Aşınma neticesinde korozyon direncini sağlayan oksit yapı bozulmuş ve aşınma sonucunda korozyon da gerçekleşmektedir. Titanyumun aşınma ve sürtünme özelliklerini iyileştirmek için yüzey modifikasyon teknikleri ihtiyacı doğmuştur.

Elektrik nokta direnç kaynağı, kaynak konusunun önemli bir dalıdır ve havacılık, otomotiv ve diğer sanayi alanlarında yüksek verimliliği, düşük maliyeti ve deformasyonunun az olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürün kalitesinin iyileştirilmesi olarak, kaynak kalitesinin çevrimiçi incelenmesi konusu önem kazanmaktadır. Bu tez çalışması titanyum malzemelerin önemli bir birleştirme tekniği olan elektrik nokta direnç kaynağı ile kaynak edildiğinde kaynak kalitesinin belirlenmesi, kaynak parametrelerinin edinimi ve analizi ile kaynak işleminin güvenilir kalite değerlendirmesi konusunda bilgi edinme ve değerlendirme yöntemini ortaya koymaktadır.

2.KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Titanyum ve titanyum alaşımları birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Saf titanyum Grade 2 ve Ti6Al4V Grade 5 titanyum alaşımlarının nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinin yanı sıra; lazer, TIG vb. farklı kaynak metotları kullanılarak birleştirilmesi ile de alakalı çok sayıda kaynak da literatürde yer almaktadır (İşler, 1999; Gökdemir, 2005; İçdem, 2007; Gao ve ark., 2013; Akman ve ark., 2009; Mehdi ve ark., 2016; Karpagaraj ve ark., 2015).

Kaya (2010) tez çalışmasında 1,5 mm kalınlıkta ve 100x30 mm ebatlarında saf titanyum (Grade 2) sacları nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak birleştirmiştir. Kaynak işlemlerinde kullandığı parametreler; 3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5 ve 7 kA kaynak akımı ve 10, 20 ve 30 çevrim kaynak zamanı olmak üzere 18 farklı deney yapmış olup kaynaklı bağlantılar üzerinde kaynak parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Çekme-makaslama, sertlik ve mikroyapı kontrolleri yapmıştır. Elektrod kuvveti, kaynak akım ve zamanı arttıkça ısı girdisinin arttığını ve kaynak çekirdek çapı ve derinliğinin arttığını görmüştür.

Karaman (2007) ticari saflıktaki Grade 2 titanyum sacları 10 kA sabit kaynak akımında 2, 4 ve 6 kN elektrod güçlerinde, 5, 15 ve 25 çevrim kaynak zamanlarında ve kaynak atmosferini (argon ve açık hava) değiştirerek farklı parametrelerde nokta direnç kaynağı ile kaynak etmiştir. Kaynaklı parçaları, çekme testine tâbi tutmuş ve sertlik ile mikroyapı incelemeleri gerçekleştirmiştir. Deney sonuçları; kaynak zamanı ve elektrod kuvvetinin artması çekme dayanımını arttırdığını göstermektedir. Ayrıca kaynak sırasında argon gazının kullanımı kaynaklı parçaya daha yüksek çekme dayanımı özelliği kazandırdığını, sertliğe etkisinin bulunmadığını göstermiştir. Mikro yapı incelemelerinde deformasyonların kaynak bölgesinde oluştuğu ve tanelerde ikizleşmelerin görüldüğünü belirtmiştir.

Choi ve ark. (2008), deneylerinde sertleştirilmiş ASTM B265 Grade 2 saf titanyum numunesinin kaynak edilebilirliğini araştırmış ve kaynak paso sayısı, kaynak ortamındaki gaz miktarı ve kaynak süresinin kaynak kalitesine olan etkisini incelemişlerdir. Çekme ve darbe deneyi ile sertlik test sonuçlarında en az pasoya sahip parçalarda en yüksek çekme dayanımı görüldüğü, gaz miktarının fazla olduğu

numunelerde uzama ve çekme dayanımı olduğunu gözlemlemişlerdir. Sertlik ölçümleri, kaynaktan etkilenen bölgenin kaynak bölgesinden daha yüksek sertlikte olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca kaynak paso sayısı ile darbe sönümlenme enerjisini doğru orantılı etkilediğini göstermişlerdir.

Lacki ve ark. (2017) deneylerinde 0,8 mm kalınlığındaki saf titanyum Grade2 ve Grade 5 titanyum alaşımlarını kendi aralarında tek noktadan ve iki noktadan çekme test düzlemine paralel ve dik olacak şekilde üç farklı geometride kaynak ettikleri kirişi üç noktalı eğme testine ve farklı şekillerde nokta direnç kaynağı ile kaynak edilmiş numuneleri çekme testine tâbi tutmuşlardır. Ayrıca test sonucu çıkan deneysel verileri FEM tabanlı ADINA programında çıkan numerik veriler ile karşılaştırmışlardır.

Zhao ve ark. (2013) titanyum alaşımlarına nokta direnç kaynağında kaynak kalitesini etkileyen önemli bir parametre olan voltaj eğrisinin karakteristiğinin kaynak dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Kaynak kalitesini belirlemek için kullanılan dinamik voltajın kaynak kalitesi izleme amacıyla iyi bir parametre olduğunu kanıtladılar.

Chen ve ark. (2016) çalışmalarında kaynak parametrelerinin gerçek zamanlı olarak alınması ve analiz edilmesi yoluyla, elde edilen sinyalin karakteristik bilgisi, kaynak işleminin güvenilir kalite değerlendirmesi adına önemli bir ölçüt olduğunu göstermişlerdir.

Wan ve ark. (2016) 0,4 mm kalınlığındaki TC2 titanyum alaşımlı levhaların küçük ölçekli dirençli nokta kaynağında çoklu yanıt optimizasyon problemini çözmeyi amaçlamışlardır. Elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi kaynak parametreleri merkezi kompozit deney tasarımı ile düzenlemişlerdir. Kompozit kaynak kalitesi endekslerini hesaplamak için farklı ağırlıklı ana bileşen seçim stratejileri uygulamışlardır. Sonucunda kaynak akımı kaynak kalitesini etkileyen en önemli faktör olduğu tespit edilmiş olup genetik algoritma ile belirlenen optimum kaynak parametrelerini yapılan deneylerle de doğrulamışlardır.

Esendir (2008) tez çalışmasında St 37 ile 304 kalite paslanmaz çiftini ilk olarak üç farklı konstrüksiyon ve akım değerlerinde nokta direnç kaynağı ile kaynak etmiş. Ardından aynı tür malzemeleri yine üç farklı konstrüksiyonda ve aynı yöntem ile optimum akım değerinde kaynak ederek sonuçları karşılaştırmıştır.

Baytemir (2011) tez çalışmasında 1 mm kalınlıkta, 45x105 mm boyutunda AISI 430 ferritik ve AISI 310 ostenitik paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve kaynaklı parçaların mekanik özellik ve mikroyapı incelemelerini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında kN elektrod kuvveti, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 kA kaynak akımı ve 5, 15 ve 25 periyot kaynak zamanı olmak üzere 15 farklı parametrede gerçekleştirilmiştir. Artan kaynak akımı ve kaynak zamanı; kaynak çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliği artmış olduğu ve buna bağlı olarak çekme-makaslama mukavemeti de arttığını gözlemlemiştir.

Şafak (2011) tez çalışmasında uçak ve savunma endüstrisinde kaynak kabiliyeti bakımından farklılık arz eden AA5754 (AlMg) ve AA6061 (AlMgSi) alüminyum alaşımlarının nokta direnç kaynağı ile farklı kaynak parametreleri ile birleştirilip birleştirme bölgesinde meydana gelen mikroyapı değişimlerini incelemiştir. Kaynaklı ve kaynaklı bölgeden alınan numunelere çekme testleri uygulamışlardır.

Aras (2016) tez çalışmasında Usibor 1500, Ductibor 500 ve DP800 çelik malzemelere farklı akım değerlerinde nokta direnç kaynağı ile birleştirilerek kaynak edilebilirliği ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Antika (2017) tez çalışmasında otomotiv sektöründe kullanılan gelişmiş mukavemetli çeliklerin kendi aralarında nokta direnç kaynağı ile kaynatılması ve mekanik davranışlarını incelemiştir. Kaynak akımı ve kaynak süresinin çekme dayanımını arttırdığı bunun da sebebinin ısı girdisi ve hızlı soğumaya bağlı oluşan yapı oranları ile alakalı olduğunu saptamıştır. Ayrıca çalışmasında 1500 Mpa ve 600 Mpa dayanımlarındaki çeliklerin birbiri ile kaynatılması sonucu elde edilen kaynaklı numunenin dayanımı düşük çelik özellikleri gösterdiği ve tasarımda buna dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Oğuz (2018) tez çalışmasında paslanmaz çelik ve galvanizli çelik çiftinin nokta direnç kaynağında kaynak akımı, elektrod kuvveti ve kaynak zamanı parametrelerinde birleştirilmesi ile elde edilen numunelere dayanım, sertlik ve mikroyapı ölçümleri yaparak mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışması sonucunda bahsi geçen çelik çifti için optimum kaynak parametrelerini belirlemiştir.

2.1. Titanyum Ve Alaşımları

Titanyum ve alaşımları 1952 yılından itibaren yapısal malzemeler olarak kullanım alanı bulmuş olan yeni mühendislik malzemelerindendir. Titanyum alaşımları, yüksek dayanım/ağırlık oranı, yaklaşık 550 °C yüksek dayanım özelliklerine ve bilhassa oksitleyici asitlerde ile klorit madde ortamlarında mükemmel korozyon dirençlerine sahiptir.

Titanyum 4,5 g/cm³ yoğunluğu, 126 kg/mm² olan akma dayanımı, 253°C'den yaklaşık 500 °C'ye kadar ısı aralığında yüklenebilme kabiliyeti, bakır ve krom-nikelli çeliklere oranla yüksek korozyon direnci titanyumu diğer metal malzemelerden üstün kılan en önemli özelliklerdendir. Titanyum ve alaşımları; kimyasal endüstri, uzay araçları, otomotiv, spor aletleri imalatı, sağlık, uçak, nükleer güç santrallerinde, enerji, yiyecek ve denizcilikte yaygın kullanım alanı bulmuşlardır. Titanyum malzemelerinin, yapışkan koruyucu titanyum oksit filmi 535 °C'nin altında ki sıcaklıklarda korozif etkilere karşı yüksek direnç göstermektedir. Ancak, yapışkan koruyucu titanyum oksit film 535 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kırılır ve karbon, oksijen, azot ve hidrojen gibi küçük atomlar titanyumu kırılgaştırır.

Saf titanyum, biyolojik açıdan uyumluluk ve mekanik özelliklerinden dolayı medikal uygulamalarda geniş kullanım alanı bulmuştur. Titanyum alaşımlar yüksek korozyon dayanımı özellikleri nedeniyle insan vücudunda implant olarak kullanılan en önemli metallerdir. Ayrıca fiziksel ortamlarda çok iyi korozyona karşı direnç göstermesi, yoğunluğunun düşük olması, kimyasal tepkimelere olan ilgisinin düşük olması, mekanik dayanımının yüksek olması ve zehirli olmaması bu malzemenin kullanımı daha cazip hale getirmektedir. Titanyum; yorulma ömrünün uzun olması, yüksek tokluk özelliği, kaynak kabiliyetinin iyi olması ve düşük yoğunluk göstermesi sebebiyle askeri alanda, malzemenin kimyasal etkilere maruz olduğu, deniz ile temas eden yapılarda tercih edilen bir malzemedir. Titanyum ve alaşımlarından günümüzde kullanımda olan bazı gruplar Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Bazı titanyum ve alaşımları için mekanik özellikler (Gökdemir, 2005)

Malzeme		Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Ticari saflıkta Ti	% 99,5 Ti	241	172	24
	% 99 Ti	552	483	15
α Ti alaşımları	% 5 Al-% 2,5 Sn	862	779	15
β Ti alaşımları	% 13V-% 11Cr-% 3Al	1290	1214	5
α 'ya yakın Ti alaşımları	% 8Al-% 1Mo-% 1V	966	828	14
	% 6Al-% 4Zr-% 2Sn-% 2Mo	1007	993	3
α - β Ti alaşımları	% 8Mn	996	862	15
	% 6Al-% 4V	1034	966	8
	% 7Al-% 4Mo	1172	1034	10
	% 6Al-% 6V-% 2Sn	1103	1034	12

Titanyum düşük sıcaklıklarda Hegzagonal sıkı paket (HSP) yapılı α ve 882 °C'den yüksek sıcaklıkta Hacim merkezli kübik (HMK) β allotropik bir malzemedir. Alaşım elementleri katı eriyik mukavemetlenmesini artırır ve allotropik dönüşüm sıcaklığını düşürürler. Alaşım elementleri titanyum-kalay, titanyum-alüminyum, titanyum-mangan ve titanyum-molibden olarak dört gruba ayrılabilir. Kalay vb. ilave metaller, dönüşüm sıcaklığını etkilemeden katı eriyik mukavemetlenmesi sağlar. Oksijen, alüminyum, hidrojen ve diğer α dengeleyici (kararlaştırıcı) elementler α 'dan β 'ya dönüşüm sıcaklığını yükseltir. Molibden, vanadyum, niyobyum ve tantalyum gibi β dengeleyici elementler dönüşüm sıcaklığını azaltır, hatta β 'nın oda sıcaklığında dengeli kalmasına sebep olur. Ayrıca krom, mangan ve demir ötektoid reaksiyon oluşturur, α - β dönüşüm sıcaklığını azaltır bunun yanı sıra oda sıcaklığında iki faz oluştururlar.

2.2. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları yapıdaki faz oranlarına göre, α , $\alpha + \beta$ alaşımları ve β alaşımları olmak üzere toplam 3 gruba ayrılırlar. En fazla α fazından oluşan alaşımlar ' α alaşımı' olarak adlandırılırken, az miktardaki β kararlaştırıcı elementler ile birlikte genel olarak α fazı içerenler ' α yakın α titanyum alaşımları' olarak isimlendirilirler. $\alpha + \beta$ karışımından oluşanlar ' $\alpha + \beta$ alaşımlar' olarak nitelendirilirler. ' β alaşımları' ise çözündürme ısı işlemi ve soğutulduktan sonra oda sıcaklığında β fazının kararlı hale getirildiği titanyum alaşımlarıdır.

2.2.1. Ticari Saf Titanyum

Ticari saf titanyum; titanyumun içerisinde az miktarlarda oksijen, hidrojen, azot, demir ve karbon elementlerinin yer aldığı çok seyreltik alaşımlardır. Karbon, azot ve oksijen elementleri titanyumun sünekliğini azaltırlarken aynı anda malzemeyi güçlendirir. Bu malzemenin mikro yapısı tamamen α fazından oluşur. Saf titanyum yaygın olarak 650-700 °C’de tavlansarak kullanılmaktadır. Böyle bir ısı işlem sonucunda mikro yapı ince eş eksenli α taneciklerden oluşmaktadır. Eğer saf titanyum β alanı içerisinde ısıtılması durumunda (900-950 °C) hızlı bir tane büyümesi meydana gelir ve soğumayla birlikte kaba tırtıllı α şekillendirilir.

Alaşımlandırılmamış titanyum malzemenin kullanım nedeni yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır. Ticari saflıktaki titanyum nispeten zayıftır ve yüksek sıcaklıklarda dayanımını kaybeder. Fakat çok iyi korozyon direncine sahiptir. Bu sınıftaki alaşımlar çok düşük sıcaklık uygulamaları içinde gereklidir. Uygulamaları; ısı eşanjörleri, boru donanımları, reaktörler, pompalar ile kimya ve petrol endüstrileri için valfleri içerir. Titanyum ayrıca rafinerilerde kullanım alanı bulmuştur; çünkü kloritler, sülfidler ve petrol rafine etmede kullanılan diğer kimyasallara karşı direnç gösterirler. Çizelge 2.2’de ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri
(Kahraman, 2007)

ASTM Standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm sıcaklıkları (°C)		Alaşım elementleri				
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40

2.2.3. Yakın α Titanyum Alaşımları

Yakın α titanyum alaşımları; α faz yapısında bir miktar β fazı içeren alaşımlardır. β dengeleyici elementler olan az miktardaki vanadyum ve molibden (yaklaşık %1-2) elementlerinden, bu alaşımların oda sıcaklığında bir miktar β fazı oluşturması için katılır. Kalay ve zirkonyum elementlerinin ilavesi bu alaşımlarda alüminyum içeriklerini azaltırken dayanımları aynı kalmaktadır.

2.2.4. α - β Alaşımları

α ve β dengeleyicilerin uygun değerlerde kullanılması ile oda sıcaklığında α ve β 'nin bir karışımı elde edilir. Tavlama işlemi, iyi dayanım dengesi ve yüksek süneklik gibi üniform özellikler kazandırır. Alaşımı β dönüşüm sıcaklığının altına ısıtmak, az miktar α 'nın kalmasını ve tane irileşmesini önler. Yavaş soğutma işlemi, küçük olan β faz tanelerini çevreleyen eksenleri eş α tanelerini, hızlı soğutma işlemi ise iğne şeklinde α fazını meydana getirir.

α - β titanyum alaşımlarına çözündürme ısıl işlemi, su verme ve dayanımın artması için yaşlandırma işlemleri uygulanabilmektedir. Bu alaşımların mikro yapıları ilk olarak kimyasal kompozisyona, işlem geçmişine ve ısıl uygulamalara göre belirlenir. Alaşımların mikro yapıları genelde çifttir ve farklı mikro yapısal oluşumlardan meydana gelmektedir. Çizelge 2.3'de α ve β dengeleyici elementler görülmektedir.

Çizelge 2. 3. α ve β dengeleyici elementler (İşler, 1999)

Alaşım elementi	Alaşım elementi miktarı (Ağırlıkça %)	Yapı hatası
Alüminyum	2-7	Alfa dengeleyici
Kalay	2-6	Alfa dengeleyici
Vanadyum	2-15	Alfa dengeleyici
Molibden	2-13	Alfa dengeleyici
Krom	2-12	Alfa dengeleyici
Bakır	1-3	Alfa dengeleyici
Zirkonyum	2-8	Sürünme dayanımını artırır
Silisyum	0,05-1	Sürünme dayanımını artırır

Uygulanmakta olan titanyum alaşımlarının %70'i α - β alaşımlarından oluşur. α - β alaşımlarının en çok kullanılan türü Ti-6Al-4V formülüne sahip % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren α - β alaşımlarıdır ve bu alaşım sahip olduğu üstün özellikler nedeniyle çokça kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımı mükemmel çekme ve yorulma dayanımı ile yüksek korozyon direnci göstermektedir. Ayrıca bu alaşımlar işlenebilirlik ve ticari olarak elde edilebilirlik gibi yönlerinden ötürü ekonomik bakımdan da oldukça kullanışlıdır. Bu özelliklerinden ötürü bu alaşımlar çoğunlukla petrokimyasal fabrikalar için malzeme olarak, uçak sanayi ve tıbbi implant ile makine parçaları imalatında kullanılmaktadır. Ayrıca, uçak iskeleti, roketler, jet motorları ve iniş takım dişlileri için parçalar, ısı işlem görmüş alfa-beta alaşımları için tipik uygulamalardır. Haddelenmiş veya ekstrüze edilmiş işlem ürünleri daha çok uçak parçalarının imalatında kullanılmakta olup, hassas döküm düşük maliyet ve hasar toleransının yüksek olması özelliğinden ötürü komplike parçaların imalatında tercih edilmektedirler. Bu alaşımlarda meydana gelen döküm kusurları sıcak izostatik presleme işlemi sayesinde giderilmektedir. Bu malzemenin birleştirilmesinde kaynak teknolojisi tercih edilmektedir.

Ti-6Al-4V alaşımı kolay kaynak edilebilir ve işlenebilir özelliktedir. Ekstrüzyon, levha, çubuk ve tel şeklinde mamül halde bulunur. Bu alaşıma 1138 MPa'a kadar çıkan bir çekme dayanım sahip olabilmesi için ısı işlem uygulanır ve 482 °C gibi iyi bir metalürjik kırılma noktasına ulaşır. Bu alaşımın dezavantajı sertleşebilirlik özelliğinin düşük olması ve 25,4 mm kadar olan kısmının sertleşebilir olmasıdır. α - β titanyum alaşımları arasında şekil verilebilirliği yüksek olan Ti-6Al-4V alaşımının üstün mekanik özellikler göstermektedir. Bunun nedeni alüminyum elementinin güçlü bir katı çözücü sertleşme etkisi göstermesi, vanadyum elementinin oda sıcaklığında β fazını stabil hale getirerek yüksek sıcaklıklarda sünekliği iyileştirmesidir.

2.2.5. β Titanyum Alaşımları

Bu alaşımlar yüksek miktarda β fazı kararlaştırıcı elementleri olan molibden ve vanadyum içerirler. Sertleştirilebilirlik, yüksek yoğunluk, soğuk şekil verebilme ve dövülebilirlik gibi özelliklere sahiptirler. β alaşımları β dengeleyicileri ile zenginleştirilmişlerdir. Bu sebeple hızlı soğuma ile tamamı β 'dan meydana gelen

dengelessiz bir faz oluşur. Tavlanmış durumda mikro yapıda sadece β fazı bulunur. β matrisi içinde α fazının çökmesiyle sertleştirilebilirler. Katı eriyik mukavemetlenmesi ile asıl dayanım elde edilir. Uygulamaları yüksek dayanımlı bağlama elemanları, kırışler ve uzay uygulamalarında bağlantıları içerir.

2.3. Titanyum Ve Alaşımalarının Kaynak Kabiliyeti

Titanyum ve titanyum alaşımalarının gazlara karşı olan hassasiyeti farklı kaynak yöntemlerinin uygulanmasını sınırlamakla birlikte bazı ek önlemlerin alınmasını gerektirmektedir. Buna rağmen titanyum ve titanyum alaşımalarının önemli bir kısmının iyi bir kaynak kabiliyeti olduğu söylenebilir. Titanyum alaşımalarının yüksek sıcaklıkta havada bulunan gazları bünyesine almasından ötürü yapıda gevrekleşme meydana gelmektedir. Bundan dolayı kaynak işlemi koruyucu gaz altında yapılmalıdır. Ana metal ve ilave metal kaynak sırasında kirlenmeyi önlemek için temiz olması gerekir. Titanyum ve titanyum alaşımaları; östenitik paslanmaz çelik veya alüminyum kaynağında kullanılan ekipmanlar ve gaz metal ark kaynağı, plazma ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağıyla kaynak edilebilmektedirler.

Alaşımssız titanyumlar ve tüm α alaşımaları kaynak edilebilmektedirler. Ti-6Al-4V formülüne sahip α - β alaşımı ile az miktarda β kararlılaştırılmış alaşımalar da kaynaklanabilirler. Fakat, kuvvetli β kararlılaştırılmış α - β alaşımaları kaynak işlemi sırasında gevrekleşirler. Buna rağmen çoğu β alaşımaları başarılı bir şekilde kaynak edilebilirler. Bunun için kaynağın yaşlandırma sertleşmesi ile malzemeyi kuvvetlendirme işlemi dikkatle uygulanmalıdır, aksi takdirde bazı β alaşımalarında yaşlandırılmış kaynaklar tamamen gevrek hale gelebilir.

Alaşımssız haldeki titanyumlar % 98,5 - % 99,5 civarında saf halde bulunmaktadır. Saf titanyum, tavlanmış halde soğuk işlemde geçmiş titanyumlardan daha iyi kaynak edilebilirler. α alaşımaları Ti-5Al-5Sn-5Zr, Ti-5Al-20Sn, Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo, Ti-8Al-1Mo-1V ve Ti-7Al-12Zr daima tavlanmış vaziyette kaynak edilebilirler. α - β alaşımı olan Ti-6Al-4V alaşımı; tavlanmış halde veya eriyik işlem ve kısmi yaşlandırma şartlarında kaynak edilebilir.

Yakın α titanyum alaşımları genel olarak kaynak edilebilirler. Ancak bazı alaşımlar iyi derecede kaynak kabiliyetine sahipken bazılarının kaynak kabiliyeti nispeten düşüktür. Yakın α titanyum alaşımlarından Ti-8Al-1Mo-1V iyi bir kaynak kabiliyetine sahiptir. Çizelge 2.4’de bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2. 4. Bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri (Kahraman, 2007)

Alaşım Türü	Alaşım Sembolü	Kaynak Edilebilirlik
Ticari saflıktaki Titanyum	-	Çok iyi
α Alaşımları	Ti-0,2Pd	Çok iyi
	Ti-5Al-2,5Sn	İyi
	Ti-5Al-2,5Sn-ELI	Çok iyi
α 'ya yakın Ti Alaşımları	Ti-8Al-1Mo-1V	Çok iyi
	Ti-66Al-2Cb-1Ta-0,8Mo	Çok iyi
	Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	İyi
α - β Ti Alaşımları	Ti-6Al-4V	İyi
	Ti-6Al-4V-ELI	Çok iyi
	Ti-7Al-4Mo	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-6Al-4V-2Sn	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-8Mn	Kaynak yapılması önerilmez
β Alaşımları	Ti-13V-11Cr-3Al	İyi

Titanyum ve alaşımlarının kaynak kabiliyetini arttırmak için uygun alaşım türü ile çevre şartlarına uygun kaynak yöntemini seçmek önemlidir. Isıl iletkenliği düşük olan titanyumun, kaynak dikişi uzun süre yüksek sıcaklıkta kaldığı için havanın etkisinden korunması gereken dikiş uzunluğu artmaktadır. ITAB bölgesi dar olmaktadır. Soğuma süresindeki artış tane büyümesine sebep olmaktadır. Kaynak bölgesindeki ısı yoğunluğu dar bir alanda arttırmak ve kaynak hızını yükseltmek, titanyum malzemenin kaynak soğuma hızını arttırılabilir. Bu sebepten ITAB’ın dar bir alanda sınırlandırılabilirdiği kaynak yöntemleri titanyum malzemenin kaynağında tercih edilmelidir.

Çoğu α - β alaşımlarının düşük kaynak sünekliğine sahip olması, ITAB’da veya kaynak bölgesinde meydana gelen faz dönüşümlerinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple α - β alaşımları; ergime bölgesinin β içeriğini azaltır ayrıca kaynağın sünekliğini arttırmak için alaşımsız Ti veya α -Ti alaşımı ilaveleriyle kaynaklanırlar. Fakat hassas alaşımlarda bu tarz ilavelerin katılması, ITAB’ın gevrekleşmesini önlemez. Çizelge 2.5’de kaynaklı ve kaynaklı bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 5. Kaynaklı ve kaynaklı bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri
(Kaya, 2010)

Malzeme Durumu	Çekme Mukavemeti		Gerilme Mukavemeti		Uzama (%)	Minimum Yarıçap Eğilme	Sertlik	
	MPa	ksi	MPa	ksi			Knoop	Rockwell
Ti Grade I								
Kaynaklı	315	46	215	31	50.4	0.7 t	140	63.5 HRB
Tek Pasolu Kaynak	345	50	225	37	37.5	1.0 t	140	55.8 HRB
Çok Pasolu Kaynak	365	53	270	39	37.7	-	-	-
Enine Kaynak	325	47 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti Grade 2								
Kaynaklı	460	67	325	47	26.2	2.9 t	165	80.6 HRB
Tek Pasolu Kaynak	505	73	380	55	18.3	2.9 t	175	83.1 HRB
Çok Pasolu Kaynak	510	74	385	56	13.3	-	-	-
Enine Kaynak	475	69 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti Grade 3								
Kaynaklı	545	79	395	57	25.9	1.9 t	175	94.4 HRB
Tek Pasolu Kaynak	605	88	475	69	15.5	4.7 t	220	92.4 HRB
Çok Pasolu Kaynak	615	89	480	70	14.7	-	-	-
Enine Kaynak	560	81 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti Grade 4								
Kaynaklı	660	96	530	77	22.3	3.2 t	215	23.4 HRC
Tek Pasolu Kaynak	695	101	580	84	16.4	5.6 t	240	21.2 HRC
Çok Pasolu Kaynak	710	103	585	85	16.0	-	-	-
Enine Kaynak	660	96 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti-5Al-2.5Sn-Eli								
Kaynaklı	850	123	805	117	15.7	3.8 t	265	33.2 HRC
Tek Pasolu Kaynak	920	133	770	112	9.8	5.9 t	310	28.0 HRC
Çok Pasolu Kaynak	935	136	820	119	7.5	-	-	-
Enine Kaynak	850	123 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti-6Al-2Nb-1Ta-1Mo								
Kaynaklı	895	130	855	124	9.7	2.8 t	275	29.6 HRC
Tek Pasolu Kaynak	930	135	800	116	5.9	7.7 t	300	27.7 HRC
Çok Pasolu Kaynak	945	137	815	118	5.7	-	-	-
Enine Kaynak	890	129 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti-3Al-2.5V								
Kaynaklı	705	102	670	97	15.2	4.0 t	230	23.6 HRC
Tek Pasolu Kaynak	705	102	600	87	12.7	5.4 t	250	19.6 HRC
Çok Pasolu Kaynak	745	108	625	91	11.2	-	-	-
Enine Kaynak	710	103 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti-6Al-4V								
Kaynaklı	1000	145	945	137	11.0	2.6 t	320	32.2 HRC
Tek Pasolu Kaynak	1060	154	920	133	3.5	10.5 t	350	35.9 HRC
Çok Pasolu Kaynak	1090	158	945	137	3.2	-	-	-
Enine Kaynak	1015	147 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti-8Al-1Mo-1V								
Kaynaklı	1060	154	1020	148	15.0	2.9 t	325	36.0 HRC
Tek Pasolu Kaynak	1085	157	930	135	5.5	7.0 t	345	35.2 HRC
Çok Pasolu Kaynak	1115	162	960	139	3.2	-	-	-
Enine Kaynak	1060	154 (a)	-	-	-	-	-	-
Ti-6Al-6V-2Sn								
Kaynaklı	1060	154	1005	146	9.8	2.8 t	350	34.0 HRC
Tek Pasolu Kaynak	1295	188	1255	182	0.3	26.6 t	420	46.8 HRC
Çok pasolu Kaynak	1280	186	-	-	0.1	-	-	-
Tek Pasolu Kaynaktan Sonra Fırında Soğutma 830°C	1050	152	990	144	3.7	15.5 t	-	-
Ti-13V-11Cr-3Al								
Kaynaklı	965	140	910	132	13.9	2.7 t	300	30.6 HRC
Tek Pasolu Kaynak	950	138	925	134	11.6	2.7 t	320	30.1 HRC
Çok Pasolu Kaynak	925	134	875	127	9.1	-	-	-
Enine Kaynak	950	138 (a)	-	-	-	-	-	-

(a) Ana metalde oluşan çatlak

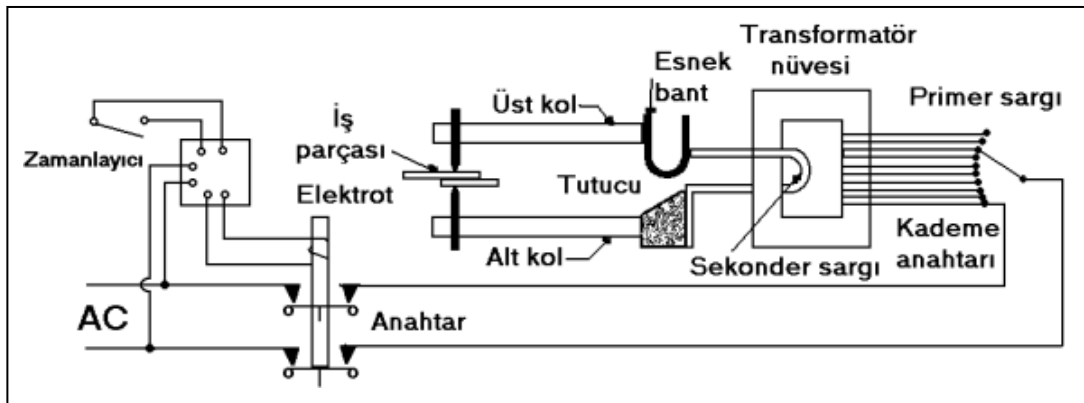
Titanyum ve alaşımları ergitmeli kaynak yöntemleri olan; plazma ark kaynağı (PAW), gaz tungsten ark kaynağı (GTAW), lazer ışın kaynağı (LBW), gaz metal ark kaynağı (GMAW), elektron ışın kaynağı (EBW) ve nokta direnç kaynağı (RSW) ile kaynak edilmektedir.

2.4. Nokta Direnç Kaynağı

Nokta direnç kaynağı, elektrodlar arasında kuvvet etkisiyle duran iş parçalarından geçen elektrik akımına, kaynak edilecek olan iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ile gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir. Gerekli akım, şebekeden sağlanan yüksek gerilim ve düşük elektrik akımını, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetindeki kaynak akımına dönüştüren kaynak makinası yardımı ile elde edilir. Gerekli olan basınç veya elektrod kuvveti ise, mekanik veya pnömatik tertibatlar vasıtası ile gerçekleştirilir.

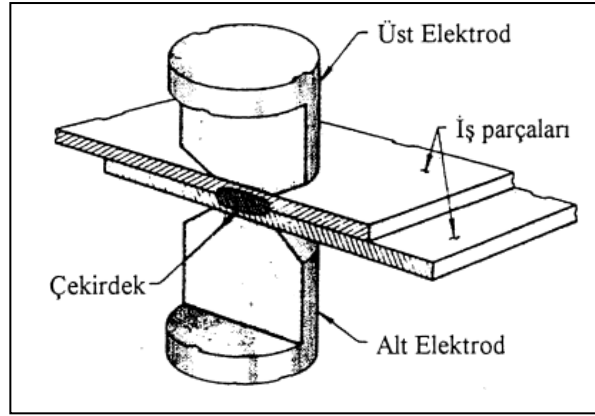
2.4.1. Nokta Direnç Kaynağı Prensibi

Nokta direnç kaynağında ısı transformatörler yardımı ile elde edilir. Transformatörler şebeke elektriğinin voltajını düşürür ve akımını arttırlar. Nokta direnç kaynağı, elektrodlar tarafından uygulanan basınç altında bulunan iş parçalarında, geçen elektrik akımına karşı parçaların gösterdikleri direnç ile sağlanan ısı ile parçaların tek ya da daha fazla noktada bölgesel olarak ergitilip basınç altında birleştirilmesine dayanan bir kaynak yöntemidir. Bir direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Akım yoğunlaşması ile ısıtılan kaynak metalinde erimiş çekirdek meydana gelir. Akım kesilince, kaynak metali hızla soğuyup katılaştırken elektrod kuvveti uygulanmaya devam etmektedir.



Şekil 2. 1. Nokta direnç kaynağı makinesinin elektriksel sistemi (Yener, 1999)

Saniyenin bir diliminde tamamlanan her kaynaktan sonra elektrodlar geri çekilmektedir. Kaynak dikişinin boyut ve şekli, ilk olarak elektrod uçlarının boyut ve şekliyle sınırlıdır. İç yüzeylerde kaynak çekirdeği oluşur fakat tamamen dış yüzeylere doğru genişlemez (Şekil 2.2). Düzgün bir nokta kaynağındaki çekirdeğin kesiti oval şekilde, üstten görünüşü ise elektrod ucu şeklinin aynı olup (çoğunlukla yuvarlak), yaklaşık olarak aynı boyuttadır. Elektrod gücüne dayanabilecek yeterli esas metal olmasını ve kaynak sırasında yerel distorsiyonun kaynaktan metal fişkırmasına neden olmasını engellemek için, noktalar iş parçasının kenarından yeterli uzaklıkta olmalıdır.



Şekil 2.2. Nokta direnç kaynağı (Gürdaş, 1999)

Kaynak işlemi, bir düğmeye ya da pedala basarak makineyi devreye sokan ve devreden çıkaran operatörler tarafından gerçekleştirilir. Bu nedenle, gaz kaynağı, sert ve yumuşak lehimleme ve özellikle ark kaynağı gibi birleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, kaynak başına düşen işçilik masrafı bu yöntemde oldukça düşüktür. Diğer yandan, nokta direnç kaynağı makinesi, diğer kaynak yöntemleri için gerekli olan ekipmanların maliyetleri ile kıyaslandığında daha pahalıdır. Bu kaynak yönteminde, ilave malzeme kullanılmadığından dolayı sağlanan hafiflik, özel kaynak beceri gerektirmemesi, yüksek kaynak mukavemeti, estetik ve kaynak hızının yüksek oluşu gibi sebeplerle, günümüzde otomotiv ile uçak endüstrisinde ve metal eşya imalatında geniş çapta kullanılmaktadır.

Direnç kaynağı, ısı işlem uygulanan tüm metal ve alaşımlarına uygulanır. Çoğunlukla aynı metallerin kaynağında kullanılır. Millerin alın kaynakları, çeşitli boru imalatları, ince sac kaynakları, bağlantı elemanları bu yöntemle kaynak olabilmektedir.

Günümüzde kara ve hava taşıtlarında ince sac nokta kaynak robotları geliştirilip kullanılmaktadır.

2.4.2. Elektrik Direnç Kaynağı Yöntemleri

Elektrik direnç kaynağı metotlarının çok çeşitli türleri vardır. Bu yöntemlerde lokal olarak yüksek bir direnç meydana getirmek ve böylece bağlantı noktalarında ısıyı yoğunlaştırabilmek için farklı teknikler kullanılır. Direnç, iletkenin öz direncine ve geometrisine bağlıdır. İşlem sırasında birleştirilecek parçalar arasında sınırlı bir akım yolu meydana getirilerek, lokal yüksek bir direnç oluşturma yoluna gidilir (kabartılı nokta kaynağı). Bu yöntem akım yoğunlaştırılması olarak bilinir. Tüm direnç kaynağı metotlarında, akım taşıyan elektrodlar ve birleştirilecek parçalar arasında fiziksel bir temasın olması gerekir.

Bütün elektrik direnç kaynağı yöntemleri, uygun bir akım şiddeti-kaynak zamanı optimizasyonu gerektirir. Akım kapalı bir devre boyunca geçer. Akımın sürekliliği, kullanılan yöntem uygun olarak şekillendirilmiş elektrodların uyguladığı basma kuvveti sayesinde gerçekleşir. Kaynak sırasında çeşitli işlemlerin sırası en genel halde şöyle ifade edilebilir: Öncelikle sınırlı bir metal hacminin ergimesi için gerekli ısı miktarını temin etmek ve bu metalin basınç altında yeniden katılaşmasıyla soğumasına olanak sağlamaktır. İş parçasının ısınma ve soğuma hızları, zaman tasarrufu ve ısı kayıplarının azaltılması açısından oldukça yüksek olmalıdır. Eğer soğuma hızı gevrek bir kaynak dikişi elde edecek kadar yüksek ise, kaynak makinesinde gerçekleştirilen bir ısıtma işlemi gerekmektedir.

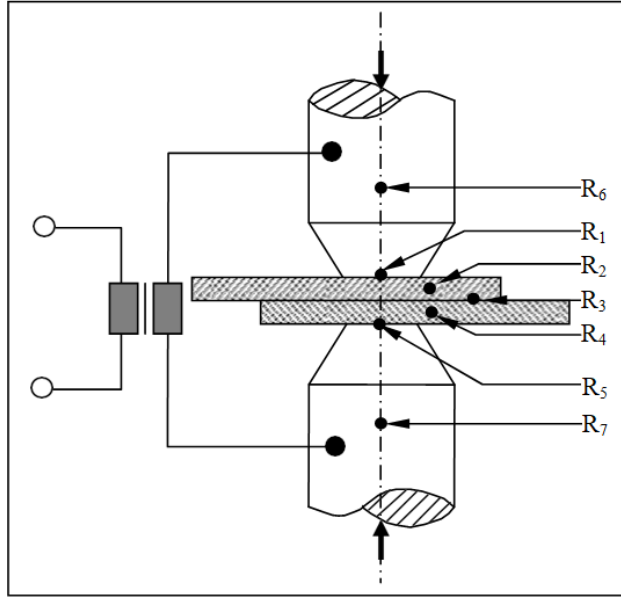
Elektrik direnç kaynağı yöntemleri üç gruba ayrılmaktadır:

- 1- Nokta Kaynağı
- 2- Dikiş Kaynağı
- 3- Kabartı Kaynağı.

Nokta Kaynağı

Nokta kaynağının prensibi, elektrodlar arasında uygulanan kuvvet altında bulunan iş parçalarından geçirilen elektrik akımına, kaynak edilecek iş parçalarının oluşturduğu

direnç ile oluşan ısı etkisiyle gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir (Şekil 2.3). Gereklî akım, şebekeden sağlanan yüksek gerilim ve düşük elektrik akımını, düşük gerilim ve yüksek akım şiddetindeki kaynak akımına dönüştüren kaynak makinası yardımı ile elde edilir. Gereklî basınç veya elektrod kuvveti, mekanik veya pnömatrik ekipmanlar ile sağlanır.



Şekil 2.3. Nokta direnç kaynağının prensip resmi (Kaya, 2010)

I akımı, R ohm direncinden, t süresince geçtiğinde, Joule kanununa göre, J birim ısı ortaya çıkar.

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

$$\text{Burada, } R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \text{ 'dir.} \quad (2.2)$$

Sekonder devredeki toplam dirençtir. Bu dirençler (Şekil 2.3)

- Temas dirençleri

R₁, R₅ : Elektrod - İş parçası temas direnci

R₃ : İş parçası - İş parçası temas direnci

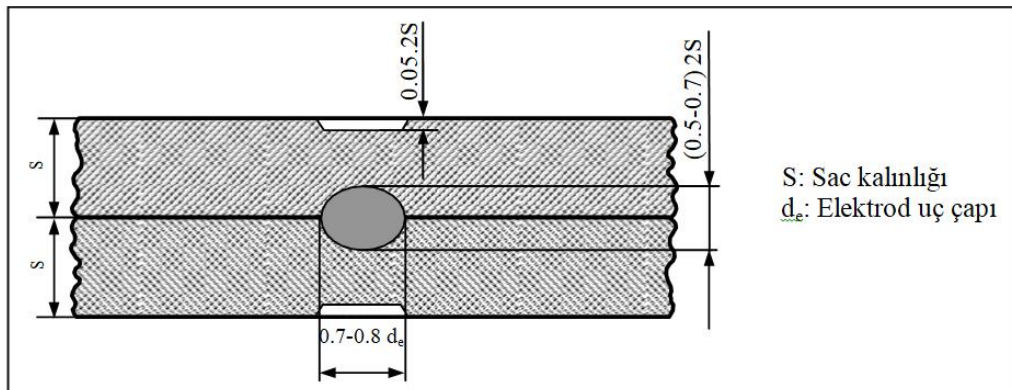
- Malzeme dirençleri

R₆, R₇ : Elektrodların direnci

R₂, R₄ : İş parçalarının dirençleri

Malzeme direnci, malzemenin fiziksel özelliklerinden kaynaklanır ve değişken değildir. Temas dirençleri ise; malzeme ve elektrod uç geometrisine göre değişkenlik gösterir. Kaynak esnasında R_3 , en büyük ısının oluşacağı direnç olmaktadır. Diğer bölgelerde dirençlerin ısınma miktarlarının oldukça az olması istenir. Bu durum; I_k kaynak akımı, t_k kaynak süresi ve F elektrod kuvvetinin uygun değerlerde seçilmesiyle gerçekleşir. R_1 , R_3 ve R_5 temas dirençleri kaynağın kalitesini etkilerler. R_3 kaynak bölgesinde sıcaklık, malzemenin T_e ergime sıcaklığının üzerine çıkar. Bu bölgede katıdan sıvı hale gelen malzeme, kaynak sonucunda kaynak çekirdeğini oluşturur. R_1 ve R_5 temas bölgelerindeki ısı artışı, iyi ısı ileten elektrod ve malzeme yüzeyleri vasıtasıyla düşük tutulur. Yüzeylerde yağ, boya ve pas gibi ısı iletimini engelleyen katmanların oluşması istenmez. Temas dirençleri, ısı miktarları farklı olmasına ve bağlantının mukavemet özelliklerinin değişiklik göstermesine sebep olur.

Nokta direnç kaynağında, hatalı kaynak dikişlerinin oluşumunu engellemek için, elektrod kuvveti, akım uygulaması sonu arttırılmaktadır. Kullanılan elektrodun çapının büyüklüğü nokta çapının büyüklüğünü belirler. Kusursuz bir kaynaklı birleştirmede nokta çapı $(0,7-0,8) \cdot d_e$ şeklinde düşünülebilir. İdeal olan nokta çapının, elektrod çapına eşit olmasıdır. Kaynak noktası ile ilgili diğer ebatlar ve maksimum değerler Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4. Nokta direnç kaynağının boyutları (Esendir, 2008)

Dikiş Kaynağı

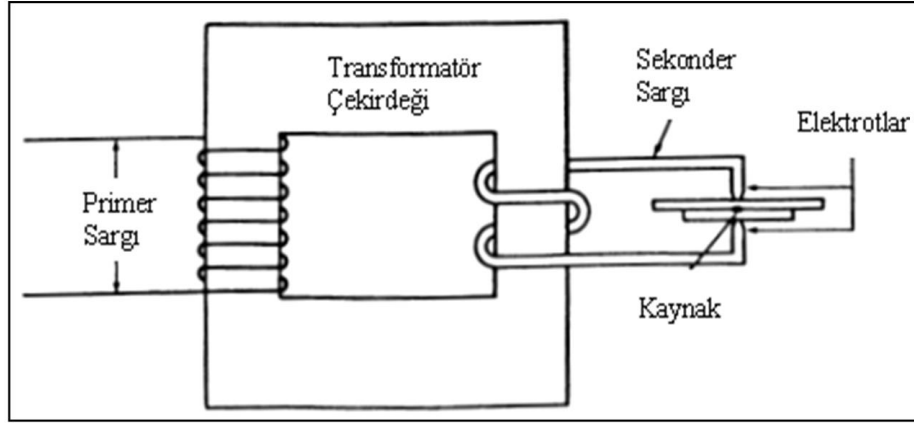
Dikiş kaynağı, dönel elektrodlarla yapılan, seri nokta kaynaklarından oluşan bir kaynak türü olarak ifade edilebilir. Üst üste konulan iş parçaları; malzemelerin akıma karşı kazandığı direnç ile oluşturduğu ısı etkisiyle temas yüzeylerinden ergitilerek birleştirilir. Bu yöntem genel anlamda nokta direnç kaynağına benzerdir. Dikiş kaynağının diğer elektrik direnç kaynak yöntemlerinden üstün olan özelliği, kesintisiz bir dikiş eldesi ve sızdırmazlık istenen bazı uygulamalarda iyi sonuç vermesidir. Teçhizat açısından farklı yanı ise elektrod geometrileridir. Standart haldeki direnç dikiş kaynağı makinelerinin haricinde, özel ihtiyaç sebebi ile farklı tasarımlarda kaynak makinesi de imal edilmiş ve bu tekniğin verimi daha da artmıştır.

Kabartı Kaynağı

Dikiş kaynağı ve elektrik nokta direnç kaynaklarının her ikisinde de genel prensip; ara yüzeyde akımın yoğunlaşmasına bağlı elektrodları şekillendirerek ve ergime sadece iş parçalarının arasındaki temas eden yüzeyde sınırlı olarak gerçekleşir. Kabartı kaynağında ise; saclardan birinin yüzeyinde yükselen kabartının bulunduğu bölge kaynak yeri olarak saptanır. Saclar üst üste getirildiğinde, temas noktası sadece kabartının bulunduğu noktadadır. Ara yüzeyden geçen akım kabartı boyunca yoğunlaşır ve kabartı hızla ısınmaya başlar. Kabartı plastik bir hal alır ve sonuçta ergidiği için çöker böylece ara yüzeyde ergimiş bir bölge meydana gelir. Kabartı kaynağında, işlem sonucunda alınan sonuç direnç nokta kaynağı ile benzerdir.

2.4.3. Nokta Direnç Kaynağı Oluşumu

Nokta direnç kaynağı, elektrodlar tarafından uygulanan kuvvet altında bulunan iş parçalarında, geçen elektrik akımına bağlı oluşan dirençten sağlanan ısı etkisiyle, parçaların tek yada daha çok noktada bölgesel olarak ergitilip basınç altında birleştirilmesine dayanan bir kaynak yöntemidir. Akım konsantrasyonu ile ısıtılarak kaynak metalinde ergimiş çekirdek meydana gelir. Elektrik akımı kesildiği anda, kaynak metali hızla soğur ve katılaşıyor iken elektrod kuvvetinin etkisi devam etmektedir. Bir sonraki adımda elektrodlar geri çekilerek iş parçası serbest bırakılır. Kaynak işlemi genellikle 1 saniyeden daha az bir sürede tamamlanır. Şekil 2.5’de nokta direnç kaynak makinesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Nokta direnç kaynak yönteminin şematik gösterimi (Anık, 1993)

Nokta kaynağında kullanılan makineler, şebeke elektriğini bünyesinde mevcut olan transformatörden geçirerek voltajını düşürür ve akım şiddetini artırır. Makinenin kapasitesine göre akım, 2.000 ile 120.000 amper arasında değişebilir. Elektrotlar iş parçalarına önceden ayarlanmış zaman aralıklarında yaklaşır ve uzaklaşır. İş parçasını sıkı tutan elektrotlar pnömomatik, hidrolik veya mekanik cihazlar yardımıyla hareket eder.

2.4.4. Nokta Direnç Kaynağı Kabiliyeti

Kaynak kabiliyeti; net olarak tanımlanabilen bir özellik olmamakla birlikte metalik malzemelerin birleşme kabiliyeti olarak adlandırılabilir. Metallerin yüksek derecede kaynak kabiliyetine sahip olması; kaynak sırasında herhangi bir tedbire gerek kalmadan farklı kaynak şartlarında istenilen seviyede kaynak kalitesinin elde edilebileceği anlamı taşır. Düşük dereceli kaynak kabiliyeti ise; kaynakta iyi sonuç elde edebilmek için özel önlemlere ihtiyaç duyulduğunu ve kaynak şartlarının çok dar sınırlar arasında uygulanması gerektiği anlamı taşımaktadır.

Metallerde nokta direnç kaynağı kabiliyeti; üç faktör ile kontrol altına alınmıştır.

- 1- Metalin ısı iletkenlik katsayısı
- 2- Metalin ısı direnci
- 3- Metalin ergime sıcaklığı

Metal malzemelerin nokta direnç kaynak kabiliyetleri arttıkça kaynak kalitesi ve mukavemeti yükselirken kaynak hataları azalmaktadır. Metalin saflığı arttıkça kaynak kabiliyeti doğru orantılı olarak artar. Fakat endüstride metaller saf halde kullanılması tercih edilmez. Metalin kaynak kabiliyeti yüksek ise o metalin kaynak makinesi ve teçhizatını daha sade bir hal alır. Bu aynı zamanda kaynağın ekonomik olması anlamına da gelir. Metalik malzemelerde alaşım elemanı sayısı ve yüzde miktarı arttıkça nokta kaynak kabiliyeti azalır.

Örneğin çeliklerde olduğu gibi, bir metalin akıma karşı oluşturduğu direnç ne kadar yüksek, ergime sıcaklığı ve ısı iletme yeteneği de ne kadar düşük ise bu malzeme bir seviyeye kadar kaynak edilebilir. Isıl direnci düşük olan fakat ısı iletme katsayısı fazla olan düşük sıcaklıkta ergiyen metaller güç kaynak yapılmaktadır. Bunlarda demir dışı hafif metallerdir. Kaynak kabiliyeti faktörünün hesaplanması aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$S = \frac{\alpha_t}{T_{em} \cdot K_t} \times 100 \quad (2.3)$$

S : Kaynak kabiliyeti

α_t : Isı iletkenliği

T_{em} : Metalin ergime sıcaklığı

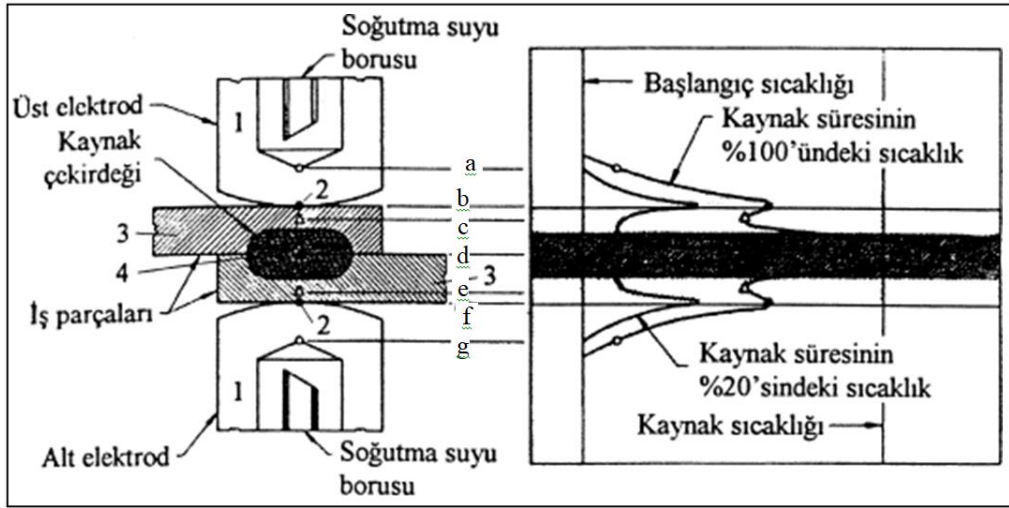
K_t : Isı iletme katsayısı

Nokta direnç kaynağı, birleştirilen malzemeler bakımından diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha fazla serbestliğe sahiptir. Nokta direnç kaynağı yöntemiyle bir çok metal ve metal çiftlerini değişik şekil ve ebatlarda kusursuz olarak kaynak edilebilmektedir. Ayrıca kaplamalı malzemeleri de bu kaynak yöntemi ile birleştirmek mümkündür.

2.4.5. Kaynak Sırasında Sıcaklık Dağılımı ve Kaynak Çekirdeğinin Oluşumu

Nokta direnç kaynak makinelerinin sekonder devreleri, kaynak edilecek parçalar dahil bir seri dirençten meydana gelmiştir. Bu dirençlerin toplamı elektrik akım şiddetini belirler. Elektrik akımı (A) devrenin her noktasında, o noktadaki dirençten bağımsız olarak aynıdır. Bunun yanı sıra herhangi bir noktada oluşan ısı, tamamen o noktadaki direnç ile orantılı olarak değişiklik göstermektedir. Sekonder devreyi meydana getiren elektriksel sistem, istenilen noktada ısı oluşturacak ve sistemin diğer elemanlarının

göreceli olarak soğuk kalmasını temin edecek biçimde düşünülmüştür. Şekil 2.6'da elektrodlar arasında bulunan iş parçasında çeşitli bölgelerdeki direnç noktaları gösterilmiştir. Uygulanan akımla birlikte ısı bir noktada oluşmaz. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi yedi farklı bölgede, bölgenin sahip olduğu direnç oranında ısı üretilir. Isının oluşması istenilen bölge 4 nolu bölgedir. Bunun haricindeki noktalarda meydana gelen ısıların oluşması istenmez. Grafikte başlangıç sıcaklığı düşey çizgiyle belirtilmiştir. En büyük direnç 4 nolu düzlemedir. Bu sebeple en yüksek ısı da bu bölgede oluşur ve 2 nolu noktalarda ikinci derece etkili olan dirençler meydana gelir. Buna paralel olarak 2 nolu bölgelerde ısı hızla artış göstermektedir.



Şekil 2.6. Nokta direnç kaynağında bölgeler, dirençler ve sıcaklık dağılımı (Anık, 1991)

Şekil 2.6'da bahsi geçen dirençler şunlardır;

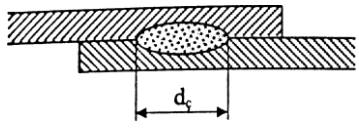
1. Elektrod direnci,
2. Elektrod-levha arası temas direnci,
3. Levha direnci,
4. Levhalar arası temas direncidir.

Kaynak süresindeki % 20'ye karşılık gelen çizgi, kaynak akımının uygulanmaya başlandığı ilk anlarda oluşmaktadır. Kaynak süresinin % 100'ündeki sıcaklık çizgisi maksimum noktadaki ısıyı göstermektedir. Bu nedenle 2 nolu bölgedeki ısılar bu düzlemlere temas eden 1 nolu bölgede bulunan su soğutmalı elektrodla doğru hızla iletilir. 4 nolu bölgede oluşan ısı diğer bölgelerdeki ısılardan her zaman yüksektir.

Parçaların birleşmesi 4 nolu bölgede oluşacak ve sonuçta ergimeyle birlikte kaynak çekirdeği o bölgede oluşacaktır.

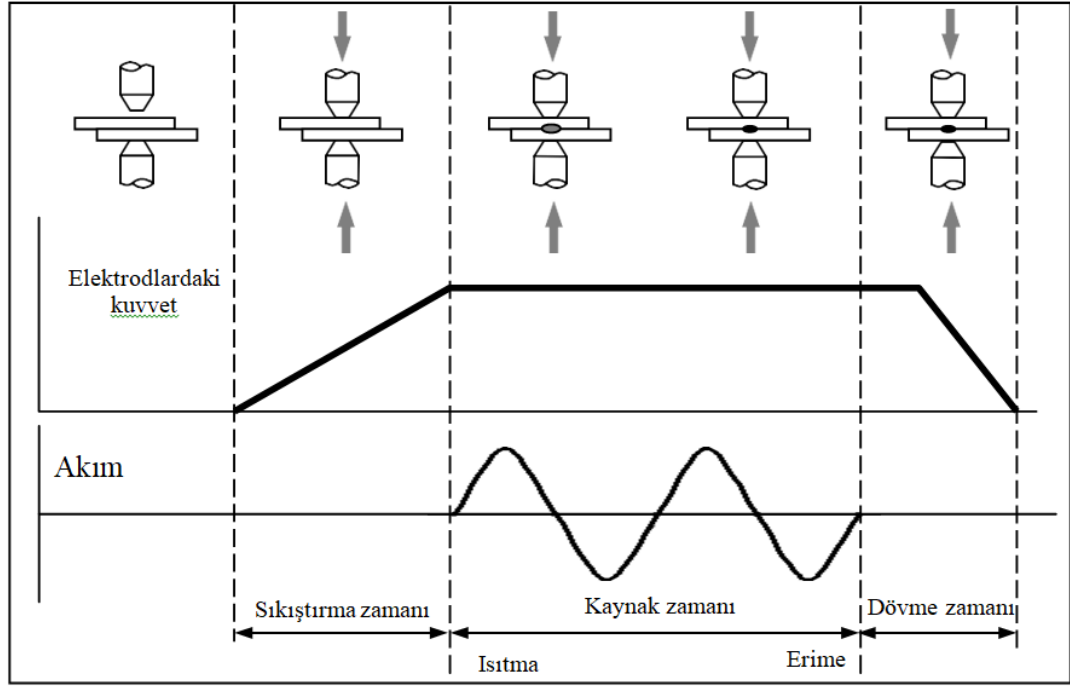
Kaynak noktaları, parçaların elektrod kuvveti ile karşılaşması sonucunda kaynak edilen noktadan ergiyik metalin kıvılcım halinde sıçramasını önlemek için kenarlardan yeterince uzak olmalıdır. Ayrıca, parça üzerinde kaynak edilen noktanın haricinde paralel akım geçişlerini önlemek için ardışık kaynak noktaları arasındaki mesafe yeteri kadar büyük olmalıdır. Kaynak çekirdeklerinin, kaynağın yapıldığı sac kalınlığına bağlı olarak boyutları değişmektedir. Çizelge 2.6'da değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları verilmektedir.

Çizelge 2. 6. Değişik sac kalınlıkları için kaynak çekirdeği çapları (Yener, 1999)

Tek sacın kalınlığı	mm				
	0,5	1,0	1,5	2,0	
	Em Büyük	6,0	9,0	10,0	13,0
	En Küçük	2,5	4,0	5,0	7,0

2.4.6. Kaynak Çevrimi

Tüm direnç kaynağı metotları, uygun bir akım şiddeti-kaynak zamanı düzenlemesi gerektirir. Kaynak bölgesinde meydana gelen soğuma ve ısınma hızları, zaman açısından mümkün olduğu kadar yüksek tutulmalıdır. Genel olarak nokta kaynağı, üç periyottan meydana gelir; sıkıştırma, kaynak ve dövme zamanlarıdır. Bu sürelerle bağlı olarak direnç nokta kaynağı aşamaları Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Nokta direnç kaynağının çevrimi (Kahraman ve Gülenç, 2009)

- 1- Kaynak edilecek parçalar elektrodlar arasında konulur. Kaynağın pozisyonunun doğruluğundan emin olmak adına iş parçasını elektrodlarla hizalarken dikkatli olunmalıdır. Bir ayak anahtarı veya pedalı vasıtasıyla kaynak çevrimi başlatılır.
- 2- Elektrodlar birbirine doğru yaklaşır, iş parçasını sıkıştırmaya başlar ve sacları temas ettirir.
- 3- Sıkıştırma zamanı olarak bilinen belirli bir süre içerisinde basınç en uygun değere kadar yükseltilir.
- 4- Sisteme akım verilir, kaynak öncesinde makinada belirlenmiş bir süre boyunca ergimenin meydana getiren akım devrede kalır ve kaynak dikişi gerekli boyuta gelinceye kadar büyür. Genelde kaynak zamanı bir saniyeden daha kısadır ve periyot (cycle) ile ifade edilir. Bir periyot 1/50 saniyeye eşittir.
- 5- Elektrodların meydana getirdiği basınç, kaynak bölgesi katılaşırken dövme veya tutma zamanı da denilen bir süre boyunca uygulanır.
- 6- İşlem sonucunda basınç kaldırılır, elektrodlar birbirinden uzaklaşır ve kaynaklı iş parçası makineden alınır.

2.4.7. Nokta Direnç Kaynağı Değişkenlerinin İncelenmesi

Kaynak işlemi sırasındaki akım ve zamanlama 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 ergiyen hacim fazlalaşır ve ergiyik 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 elektrod 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. Direnç nokta kaynağında, yapılacak kaynağın sağlamlığı için kaynak değişkenleri her zaman birleştirilecek sac parçaların ince kalınlıkta olanına göre ayarlanır.

Kaynak kalitesini etkileyen başlıca kaynak değişkenleri şu şekilde sıralanır;

- 1- Elektrod bileşimi ve şeklinin ısınma üzerine etkisi
- 2- Kaynak akımının etkisi
- 3- Kaynak zamanının etkisi
- 4- Kaynak kuvvetinin etkisi
- 5- İş parçasının malzemesi
- 6- Kaynak edilecek parçaların yüzeylerinin etkisi
- 7- Kaynaklı noktalar arasındaki mesafenin ısınma üzerine etkisi

Kaynak Akımının Etkisi

Kaynak için ısı gerekir. Isının oluşmasında dirençten sonra etkili olan etmen ise akımdır. Isı formülünde gösterildiği üzere akımın karesi kadar bir çarpan oluşturmaktadır. Bu nedenle istenen kriterlere uygun bir kaynak elde etmek için akım değerini iyi seçmek gerekir.

Kaynak akımı, transformatör sekonder sargısı, sargıyı kollara bağlayan esnek bantlar, kollar, elektrodlar ve iş parçasından oluşan sekonder devreden akar. Isı, devrenin her noktasında Eşitlik 2.4'deki formüle göre oluşmaktadır.

$$Q = K \cdot I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.4)$$

Burada;

Q: Elde edilen ısı miktarı (joule),

K: Sabit bir sayı,

I: Kaynak akım şiddeti (Amper),

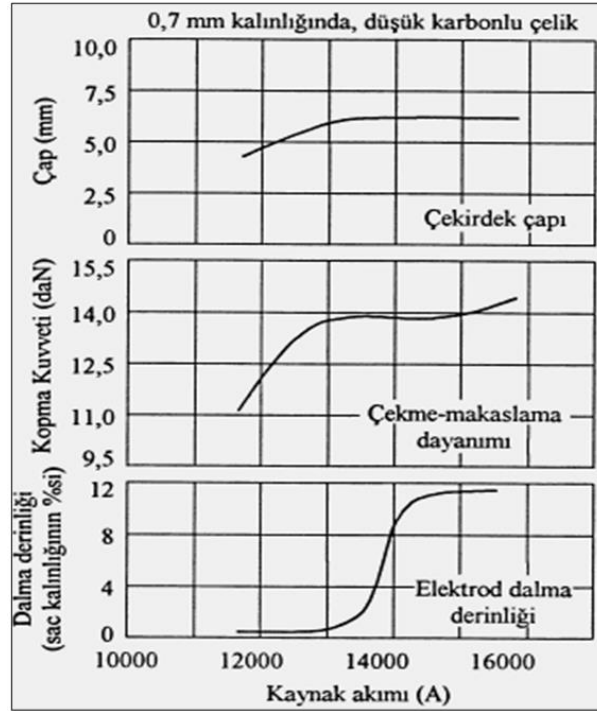
R: Devredeki elektrik dirençlerinin toplamı (Ohm),

t: Kaynak akımının devrede kalma süresidir (saniye)

Isının bir bölümü elektrodlerden ve iş parçalarından iletim, taşınım ve ışıyım yoluyla kaybolur. Bu kayıpların büyüklüğü genelde bilinmemektedir. Çeliğin ısı iletimi yaklaşık olarak bakırın % 12'sine eşittir. Bu yüzden, çelik bakır esaslı elektrodlarla kaynak edildiğinde, yeterli kaynak akımı sağlandığında, iş parçalarının ara yüzeyinde oluşan ısı, kaynak bölgesinden, elektrod uçlarında oluşan ısının su soğutmalı elektrodla iletilmesine oranla, daha yavaş uzaklaşmaktadır. Böylece, önce iş parçalarının ara yüzeyi ergime sıcaklığına ulaşmakta ve kaynak bu ara yüzeyde oluşmaktadır.

Kaynak akımı, bağlantının çekme dayanımı ve elektrod dalma derinliğinin çekirdek çapı üzerindeki etkisi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Akım 13500 A'nın üzerine çıktığında 6 mm'lik çekirdek çapında önemli bir artış olmamıştır, fakat elektrod dalma derinliğinde bir artış meydana gelmiştir. Optimum akıma ulaşılan kadar çekme dayanımı hızlı bir şekilde artmakta, fakat akım 14000 A'nın biraz üzerine çıktığında dayanım biraz

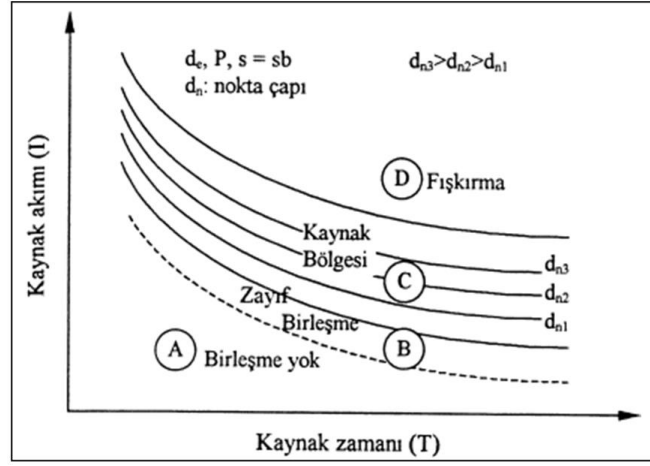
düşmektedir. Dalma derinliği, 13500 A'lık kaynak akımında sac kalınlığının % 2'sinden, 14000 A'nın biraz üstünde % 10 civarına kadar çıkmaktadır.



Şekil 2.8. Kaynak sırasında kaynak akımının çekirdek çapı, çekme dayanımı ve elektrod dalma derinliği üzerindeki etkileri (Kaya, 2010)

Isı üretiminde en önemli değişken olan kaynak akımı, akımın dikkatle kontrol edilmesini gerektirmektedir. Akım değerinin değişmesine şebeke geriliminde meydana gelen değişimler ve kaynak makinasının sekonder devresinde yapılan bir takım değişiklikler etken olabilir. Ayrıca kaynak sırasında kaynak bölgesinde bulunan akımın yoğunluğunda da bir azalma olabilir. Bu olay, akımın bir önceki kaynak noktasından ve elektrodların tesir ettiği alan dışındaki metalik temas noktalarında kısa devre olması neticesinde meydana gelir. Kısa devre sonucunda nokta çapı istenilen değere erişemez. Bunun yanı sıra kullanıma bağlı olarak, uç çapı çeşitli nedenlerden dolayı büyümüş olan elektrodlar, akım yoğunluğunda azalma meydana getirir.

Belirli bir levha malzemesi ve kalınlığı, elektrod uç çapı ve elektrod kuvveti için bir kaynak kabiliyeti diyagramı (akım-zaman diyagramı) elde etmek mümkündür (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Kaynak kabiliyeti diyagramı (Almus, 2006)

Bu diyagram dört bölgeye ayrılmaktadır. A bölgesinde herhangi bir ergime ve kaynaklı birleşme yoktur. B bölgesinde ergime gerçekleşmeden sadece basınç sebebi ile meydana gelen zayıf bir birleşme meydana gelir. C bölgesi ergime veya kaynağın gerçekleştiği bölgedir. Ergime C ve B bölgelerinin sınır eğrisinden itibaren başlar ve ergimiş kaynak bölgesinin ebatları, bu bölge içine doğru girdikçe artar. Sonuçta nokta çapı d_n , elektrod çapı d_e 'ye yaklaşık olarak eşit olur. C bölgesi malzemenin cinsine bağlıdır. Bazı metallerde bu bölge dar olduğu için kaynak zamanı akımın hassas bir biçimde ayarlanması gerekir. Uygulamada, akım ve zaman değerleri C bölgesinin üst kısmına yakın kalacak şekilde seçilir. D bölgesi ise fıskırma bölgesidir ve C bölgesinin üst sınırından itibaren fıskırma başlar.

Kaynak Zamanının Etkisi

Kaynak zamanı çok kısa belirlenirse kaynak çekirdeğinin çapı çok küçük kalabilir veya başka bir deyişle kaynak tutmayabilir. Kaynak zamanı olması gerekenden uzun seçildiğinde ise ergimiş bölge fazla büyüyeceğinden dolayı baskı neticesinde patlar, ergimiş malzeme aradan fıskırır ve çok derin izler oluşur. Kaynak işleminde lokal bir bölgenin ertilmesi istenildiğinden, ergiyik civarında malzeme kristal yapısında bir takım değişiklikler meydana gelir. Kaynak işleminin hemen ardından elektrodlar kaldırılırsa kaynak bölgesinde oluşan ısı engellenemez ve geniş bir halka biçiminde etrafa yayılır. Elektrod temas yüzeyi siyah veya menevişli bir renkte olabilir. Kaynağın ardından elektrodlar bir süre bekletilirse (tutma zamanı), malzemedeki ısı, su ile soğurular ve elektrodlar tarafından uzaklaştırıldan kaynak izi küçük ve beyaz olur.

Isı (enerji) formülü $Q= K.I^2.R.t$ (2.4), toplam direnç sabit olmak üzere, devrenin herhangi noktasında oluşan ısı; kaynak süresi (akımın geçtiği süre) ve kaynak akımının karesi ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Isı geçişinin zamanın bir fonksiyonu olmasından dolayı, uygun çekirdek çapının elde edilmesi için gereken süre, akımın ne kadar arttığına bakmaksızın, sınırlı ölçüde azaltılabilir. Temas yüzeylerinde ısı oluşumu çok hızlı olduğunda, özellikle elektrod temas yüzeylerinde, oyuklar ve fişkırtma meydana gelir.

Kaynak akımı ve basınç artırılarak kaynak süresinde biraz azalma sağlanabilir. Akımdaki yükselmeden dolayı oluşan fişkırtmayı önlemek için yüksek basınç gereklidir. Kısa kaynak süresi ile yüksek akım yada uzun kaynak süresi ile düşük akımda, aynı büyüklükte nokta çapı elde edilebilir. Bunlardan birincisi kısa süreli kaynak, ikincisi uzun süreli kaynak adını alır.

Sağamış olduğu büyük faydalardan ötürü, kısa süreli kaynak tekniği daha fazla gelişmiş olup daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Eskiden, çok ince levhaların birleştirilmesinde birkaç saniyeye varan kaynak süresi, kontrol organları ve akım devrelerindeki büyük iyileştirmeler ile periyotlar mertebesine kadar inmiştir. Kaynak süresinin azalması ile gerçekleşen ısı kayıpları da azaldığı için kaynak işleminde ısı verim artmıştır. Düşük karbonlu alaşımsız çeliklerin direnç kaynağında, kısa süreli kaynak işlemi için gerekli kaynak süresi 2.5 bağıntısıyla belirlenebilir:

$$T = 8.s \quad (2.5)$$

Bu bağıntıda, T (periyod) kaynak süresi, s (mm) levha kalınlığıdır. 50 Hz frekanslı bir şebekede 1 periyot 1/50 saniyedir.

Kısa süreli kaynak işleminde, işlemin hızlı gerçekleşmesi sebebiyle sadece kaynak bölgesi ergime sıcaklığına ulaşır ve levhaların dış yüzeylerinde aşırı bir ısınma olmadan kaynak işlemi biter. Bu yüzden, elektrodların temas yüzeyleri deforme olmaz. Uzun süreli kaynakta ise, levhaların diğer bölgelerinde de sıcaklık yüksek miktarda bir artış gösterir. Bunun sonucunda, levhaların dış yüzeyleri yumuşar ve elektrodlar levhaların yumuşak yüzeylerinin içine gömülür ve derin izler bırakır.

Kaynak zamanı, kaynak akımı kesildikten sonra kaynak bölgesindeki soğuma hızına etki eder. Uzun süreli kaynak işleminde, kaynak bölgesine yakın olan bölgelerin sıcaklığı yükseldiği için, sıcaklık farkı ve bunun sonucunda kaynaktan sonraki soğuma hızı düşüktür. Bu yüzden, % 0,3 karbon içeren çeliklerde sertleşmeyi engellemek için uzun süreli kaynak tercih edilir. Uzun süreli kaynak işlemi ayrıca, elektrodlar tarafından sıkıştırılması zor olan parçaların birleştirilmesinde yine tercih edilmektedir.

Kaynaklı Noktalar Arasındaki Mesafenin Etkisi

İkinci noktaki kaynak, kaynak akımının birinci noktadaki kaynaktan yada ikinci kaynak noktasında elektrodlar arasına yerleştirilen metalden geçmesine sebep olacak kadar birinci noktaya yakın yapılırsa şönt akımı yani atlama meydana gelir. Kaynak akımı iki yolun direnciyle ters orantılı olarak akar. Akım bölünmesi, ikinci kaynak noktasında, esas metal direncinin ara yüzey direncine oranına bağlıdır.

İkinci ve bunu takip eden kaynaklar yapıldığında, elektrodlar arasındaki metal bölünmüş devre olur; akımın bir bölümü metalden bir önceki kaynağa doğru hareket ederken, kalanı ikinci kaynak noktasındaki elektrod uçları arasındaki metalden akar. İlk nokta kaynağına olan mesafe yeterince büyükse, metalden direkt olarak akanla karşılaştırıldığında ilk nokta kaynağı boyunca olan yolun direnci yüksektir ve şöntlenme etkisi ihmal edilebilir. İlk nokta kaynağına olan mesafe kısa ise akımın önemli bir kısmı ilk nokta kaynağına atlar. Bu gerçekleşen atlama (kısa devre) sebebiyle, nokta çapı istenilen değere ulaşmaz. Bu durumu engellemek için, d_n nokta çapı olmak üzere, nokta merkezleri arasındaki mesafe $3d_n$ 'den fazla olması yeterlidir.

Elektrod uçları arasında bulunan metalin sıcaklığı artınca o noktadaki direnç de artar ve böylece şöntlenme etkisine eklenir. Elektrik direnci yüksek olan metaller düşük dirençli olan metallere oranla şöntlenme etkisinden daha az etkilenirler.

Düşük karbonlu çelik parçaların kaynağında minimum aralık, metalin kalınlığı, ergimiş bölgenin çapı ve kaynak bölgesindeki yüzeylerin temizliğine bağlıdır. Daha yüksek akım ve elektrod kuvveti, daha kısa kaynak süresi ve hızlı takip ile kaynaklar, önemli bir atlama olmadan, çeşitli çizelgelerde tavsiye edilen kaynak aralığından daha düşük bir değerde yapılabilir.

Kaynaklar levhanın kenarına yada flanşa çok yakın yapılırsa, elektrod basıncı ve ısıya dayanabilecek esas metal hacmi yetersiz kalır. Bu, kaynaktan sıcak metalin uzaklaştırılmasına sebep olacak şekilde, kenar boyunca etkili kuvvette düşüşe ve eşit olmayan ısınmayla sonuçlanır. Nokta kaynaklan dikey flanşa veya yan duvara çok yakın yapıldığında, elektrod ve iş parçası arasında arklanma meydana gelebilir yada kıvrılma açısından dolayı kaynak bölgesindeki yüzeylerde zayıf bir oturma meydana gelebilir.

2.4.8. Isı Kaybı

Kaynak işleminde ısı kaybı, akımın uygulandığı andan, kaynağın oda sıcaklığına soğumasına kadar geçen zaman aralığında değişen hızlarla devam eder. Isı kaybı 2 aşamada irdelenmelidir:

- 1- Akımın uygulama zamanı esnasında oluşan ısı kaybı
- 2- Akımın kesildikten sonra meydana gelen ısı kaybı

Birinci safhadaki meydana gelen ısı kaybının büyüklüğü aşağıdaki etmenlere bağlıdır:

1. Metalin bileşimi
2. Parçaların kütlesi
3. Kaynak süresi
4. Dış soğutma aracı

Bunlardan iş parçasının bileşimi ve kütlesi kontrol edilemez. Verilen akım şiddeti için, üretilen ısı miktarı elektrik iletkenliği ile ters orantılı olarak değişmektedir. Isıl iletkenlik, ısının kaynak bölgesinden iletme hızını tayin eder. Bu iki etmen metallerde aynı yönde paralel olarak görülür. Örneğin, bakır gibi yüksek iletken bir metalde üretilen düşük miktardaki ısı yüksek bir hızla çevre metale ve elektrodla doğru kaybolur. Eğer elektrodlar, akım kesildikten sonra iş parçaları ile temasta kalırsa, elektrod malzemesinin yüksek ısı iletimi nedeniyle, kaynak bölgesi hızla soğur.

Elektrodlar efektif bir biçimde su ile soğutulduğunda ısı kaybı hızlı olur. Kaynak bölgesinden iş parçasına doğru olan soğuma hızı, uzun kaynak zamanı kullanılarak azaltılabilir. Bu usul, çevre metale daha fazla ısı iletimine izin verir ve çevre metalin sıcaklığını artırarak kaynak bölgesi ile çevre metal arasındaki sıcaklık farkını azaltır. Sıcaklık farkı soğuma hızlarını kontrol etmede çok önemlidir. Genellikle uzun kaynak

zamanının uygulandığı kalın levhalarda soğuma hızı düşük, kısa kaynak zamanının uygulandığı ince levhalarda soğuma hızı yüksektir.

Elektrodlar kaynak bölgesinden hemen kaldırıldığında, ısı kaynak noktasını çevreleyen metale ve atmosfere geçecektir. Bu durumda soğuma hızı bir miktar azalır, ince parçalar göz önüne alındığında, distorsiyon sebebiyle bu yöntem sakıncalı olabilir. Kalın parçalarda, mukavemet nedeniyle, daha büyük olan kaynak bölgesinin, ergimiş halden itibaren soğumasına imkan vermek için ilave zaman gereklidir. Bu sebeple, ısının büyük bir kısmının çevre metale iletilmesine müsaade etmeksizin, elektrodları, kaynağın soğumasına imkan verecek kadar yeterli bir zaman yerinde tutmak uygundur.

Kaynağı her zaman soğutmak uygun değildir. Su almaya karşı hassas malzemeler ele alındığında, elektrodları kaynak akımının kesilmesini takiben mümkün olduğu kadar çabuk kaldırmak gerekir. Böylece ısının çevre metale yayılması mümkün olur ve dik soğuma gradyantı oluşmaz.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında, 1 mm kalınlığında hava aracı gövde parçaları, kriyojenik kaplar, ısı eşanjörleri, kondenser boruları gibi elemanların yapımında kullanılan ticari saflıktaki titanyum Grade 2 ile bıçaklar, diskler, uçak gövdeleri, bağlantı elemanları, göbeklerin yapımında ve biyomedikal implantlarda kullanılan Ti6Al4V kimyasal formülüne sahip Grade 5 sac malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan Grade 2 ve Grade 5 titanyum malzemelerin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Grade 2 ve Grade 5 titanyum malzemelerin kimyasal bileşimi
(Anonim, 2019/a)

ASTM Standardı	İmpüriteler							
	C	Fe	Al	H	N	O	V	Ti
Grade 2	Max 0,1	Max 0,3	-	Max 0,015	Max 0,03	Max 0,25	-	99,2
Grade 5	-	Max 0,25	6	-	-	Max 0,2	4	90

Çizelge 3. 2. Grade 2 ve Grade 5 titanyum malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Anonim, 2019/b)

Fiziksel Özellikler	Grade 5	Grade 2
Yoğunluk	4.43 g/cc	4.51 g/cc
Mekanik Özellikler		
Vickers Sertliği	349	145
Max Çekme Dayanımı	950 MPa	344 MPa
Akma Sınırındaki Gerilme Dayanımı	880 MPa	275-410 MPa
Kopma Uzaması	14 %	20 %
Kesit Alanı Daralması	36 %	35 %
Elastiklik Modülü	113.8 GPa	105 GPa

3.2. Malzemelerin Kaynağa Hazırlanması

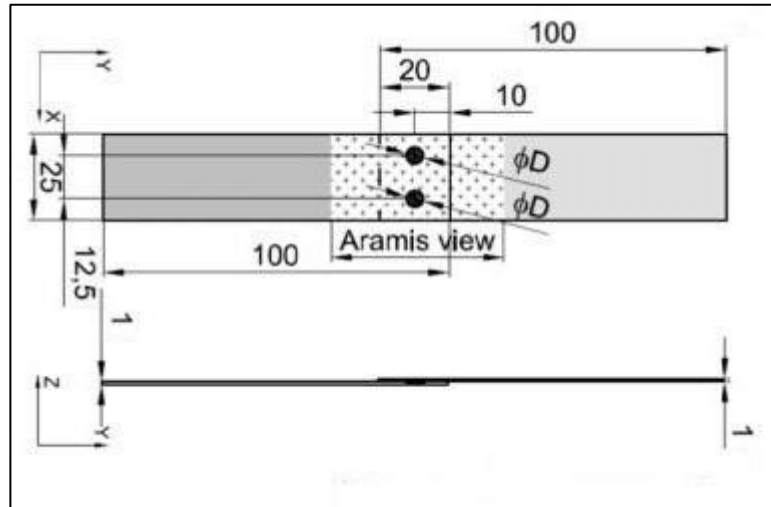
Çalışmada kullanılan 1 mm kalınlığındaki titanyum sac malzemeler ASTM standartları göz önünde bulundurularak Durmazlar marka giyotin makas ile Şekil 3.1'deki gibi 100 mm x 25 mm ebatlarında kesilmiştir.



Şekil 3.1. Kaynak işlemleri öncesi kesilmiş olan numune örneği

3.3. Malzemelerin Kaynağının Yapılışı

100 x 25 x 1 mm ebatlarında kesilmiş Grade ve Grade 5 titanyum numuneler Şekil 3.2'de belirtildiği gibi bindirme şeklinde iki noktadan punta kaynak ile kaynak edilmiştir.



Şekil 3.2. Nokta direnç kaynağı ile kaynak edilen parça geometrisi

(Lacki ve Niemiro, 2016)

Deneyde kullanılan numunelerin direnç nokta kaynağı ‘Sağlam Makina Sanayi’ marka su soğutmalı direnç nokta kaynak makinası ile kaynatılmıştır. Kullanılan nokta direnç kaynak makinası özellikleri Çizelge 3.3’de, kaynak makinesi fotoğrafı ise Şekil 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3. 3. Nokta direnç kaynak makinesinin özellikleri

Makine Markası	Sağlam Makina Sanayi
Makina Tipi	Armed Upper Spot Welding Machine
Makine Gücü	45 kVA
Çevrim Oranı	%50
Besleme Gerilimi	400 V (3 fazlı)
Maksimum Hava Basıncı	6 Bar
Su Debisi	15 lt/dk
Nominal Frekansı	50-60 Hz
Maksimum Kaynak Akımı	12500 A
Elektrod Malzemesi	Kesik konik uçlu ticari saflıkta Cu (Bakır)



Şekil 3.3. Sağlam Makina Sanayi marka nokta direnç kaynağı makinesi

Öncelikle, titanyum levhaların birleştirilebileceği, kaynak parametrelerini belirlemek için ön deneyler yapılmıştır. Ön çalışmalarda, nokta direnç kaynak işlem parametrelerinden; kaynak makinesinin özellikleri de dikkate alındığında kaynak akımı ve kaynak zamanı değiştirilerek titanyum numunelerin birleştirilebildiği kaynak parametreleri belirlenmiştir. Kaynak akımı ve kaynak zamanının çok düşük ve çok yüksek seçilerek gerçekleştirilen ön deneylerde, yetersiz birleştirme ve fazla

deformasyondan dolayı kabul edilebilir kaynak çekirdeği sınırları aşılmıştır. Ön deneylerin değerlendirilmesi sonucunda; kaynak akımı olarak 3, 4 ve 5 kA ve kaynak zamanı olarak ise; 20, 30 ve 40 çevrim kaynak süresinin uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Deneylerde uygulanan kaynak parametreleri Çizelge 3.4’de verilmiştir. Kaynak işlemleri her bir parametre grubundan 4’er adet olacak şekilde yapılmıştır. Gr 2-2 birleştirmesi için 28 adet, Gr 2-5 için 28 adet, Gr 5-5 için 28 adet olmak toplam 84 adet numune kaynak edilmiş ve kaynak işlemi biten numuneler, açık havada soğutulmuşlardır.

Çizelge 3. 4. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parametreleri

Akım Şiddeti	Gr 2-2	Gr 5-5	Gr 2-5
3kA	20	20	20
	30	30	30
4kA	20	20	20
	30	30	30
	40	40	40
5kA	20	20	20
	30	30	30

3.4. Test Numunesi Hazırlama İşlemleri

Kaynak işlemi sonucunda, 100x25 mm ebatlarında elde edilen birleştirmelerden 4 kA ve 30 çevrim kaynak zamanında Gr 2-5 malzemelerin kaynak edilmesi ile elde edilen numune Şekil 3.4’de, örnek olarak verilmiştir. Çekme deneyi için, 100x25 mm boyutlarındaki bu numuneler kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Kaynak işlemi sonucunda elde edilen numune

Yapılacak olan sertlik ölçümleri için kaynaklı numunelerden kaynak bölgelerinden yaklaşık 25 mm boyunda parçalar Streurs marka abrasif kesme cihazında kesilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Streurs marka abrasif kesme cihazı

Daha sonra 25x25 mm ebatlarındaki numuneler, kaynak çekirdeği merkezinden tekrar kesilerek sertlik ölçümleri için hazır hale getirilmişlerdir. Kesme esnasında istenmeyen dönüşümlerin meydana gelmemesi için bor yağlı soğutma sıvısı kullanılmıştır.

Sertlik ölçüm numuneleri, epoksi reçine içine soğuk olarak Metkon Ecopress-100 marka cihaz (Şekil 3.6) ile 200°C sıcaklıkta, 270 P basınç altında 30 mm çapında bakalite alınmışlardır.



Şekil 3.6. Metkon Ecopress-100 marka bakalite alma cihazı

Bakalite alınmış numunelerin yüzeyinde, kesen aletin kesme izleri oluşur. Ayrıca kesme işlemi sırasında numunenin yüzeyi bir miktar deforme olur. Zımparlama ve parlatmanın amacı numunenin kesilen yüzeyinde deformasyona uğramış bu tabakanın ortadan kaldırılmasıdır.

Bakalite alınan kaynaklı numunelerin yüzeyleri su zımparası ile zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi sırasıyla; P180-320-800-1000-2000 gritlik silisyum karbür su zımparası ile yapılmıştır. Zımparalama işleminden geçen numunelere düzgün bir malzeme yüzeyinin elde edilmesi adına son olarak parlatma işlemi uygulanacaktır. Parlatma işleminin amacı; yüzeyde oluşan çiziklerin giderilmesi ve bunun sonucunda ayna gibi bir görünüm elde etmektedir. Parlatma işleminde; numuneler dönen bir diskin üzerinde bulunan 3 µm'lik keçeden geçirilmiştir ve bu keçenin üzerine de elmas pasta emdirilmiştir. Parlatma işlemi Metkon-Forcimat marka otomatik parlatma cihazı (Şekil 3.7) kullanılarak 600 dev/dk hız kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her bir numune 3 dakika boyunca disk üzerinde tutulmuş ve bu işlem yük uygulanmadan gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Metkon-Forcimat marka otomatik parlatma cihazı

Bakalite alınmış ve parlatma işlemlerinden geçirilmiş sertlik ölçümüne hazır sertlik numunelerinin bir örneği Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8. Bakalite alınmış sertlik ölçüm numunesi

Yukarıda bahsi geçen numune hazırlama çalışmaları Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır.

3.5. Mekanik Özelliklerin Tespiti

3.5.1. Çekme Testi

Nokta direnç kaynaklı titanyum sacların mekanik özelliklerini belirlemek için Şekil 3.9'da resmi verilen, Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Malzeme laboratuarındaki 25 ton kapasiteli Utest marka universal çekme testi cihazı kullanılmıştır. Nokta direnç kaynak yöntemi ile 7 grup olarak farklı parametrede birleştirilmiş kaynaklı numuneler, standartlara uygun olarak çekme deney cihazına bağlanmış ve çekme testi 10 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında, gerilme ve % uzama değerleri, çekme cihazı üzerindeki proplar ile bilgisayara aktarılarak otomatik olarak kaydedilmiştir.

Çekme deneyleri, kaynak esnasında meydana gelebilecek kaynak hatalarının etkisini en az seviyede tutabilmek amacıyla, her bir parametreden 3 adet numuneye uygulanmış ve grafikler bu üç sonucun ortalaması alınarak çizilmiştir.



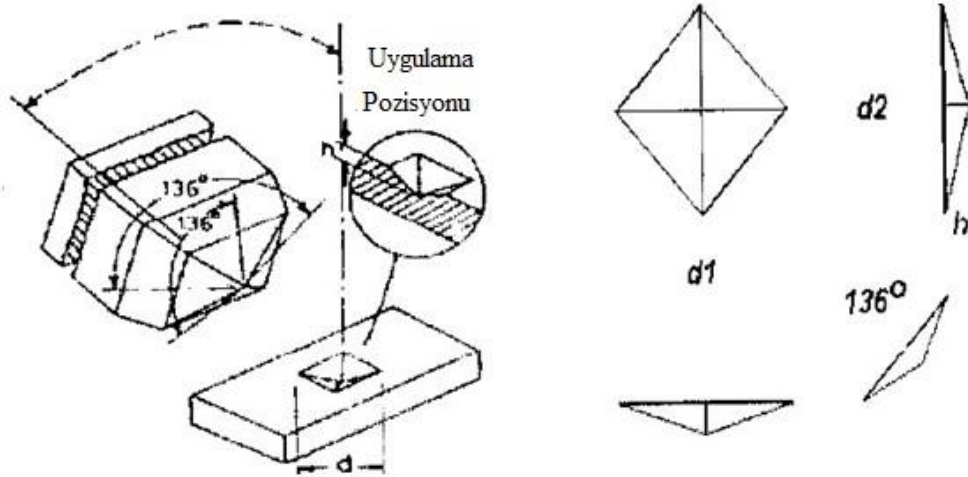
Şekil 3.9. Utest marka 25 tonluk universal çekme cihazı

3.5.2. Kaynak Çekirdek Çapı Ölçümü

Nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş titanyum malzemelerde, elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak zamanının kaynaklı birleştirmeler üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile kaynak çekirdek çapları dijital kumpas ile ölçülmüştür.

3.5.3. Vickers Sertlik Ölçümü

Vickers sertlik testi, en duyarlı sertlik ölçme yöntemidir. Daha uzun zaman almasına karşın, özellikle araştırma amacı ile mikro sertlikleri ölçmeye uygundur. 1920’li yıllarda İngiltere’de Vickers Ltd.’ in mühendisleri tarafından bulunmuştur. Bu testte kullanılan uç, kare tabanlı bir piramit olup (Şekil 3.10), piramit ucunun tepe açısı 136° ’dir ve bu uç belirli bir kuvvet altında malzeme yüzeyine uygulandığında malzeme üzerinde bir eşkenar dörtgen oluşturmaktadır.

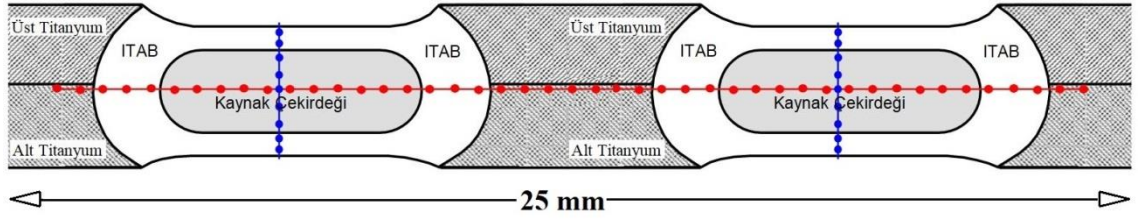


Şekil 3.10. Vickers sertlik deneyinde kullanılan ucun şematik gösterimi (Güler, 2013)

Ucun malzeme yüzeyinde oluşturduğu iz’in d_1 ve d_2 köşegen uzunluklarının ölçülerek ortalamasından hareketle d mesafesi hesaplanır. Uygulanan kuvvet (F) ve hesaplanan d uzunluğu aşağıdaki ifadeye yerine yazılarak Vickers sertlik değeri (HV) aşağıdaki ifadeyle hesaplanmaktadır.

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2} \quad (3.1)$$

Farklı kaynak parametrelerinde nokta direnç kaynağı ile birleştirilen titanyum malzemelerde kaynak akımı ve kaynak zamanının; ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeği üzerindeki sertlik değişimini tespit etmek amacıyla kaynaklı numunelerin tümüne sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri için hazırlanmış numuneler üzerinde, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi iki adet puntanın bulunduğu kaynak ekseninde gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, 25 mm uzunluğundaki ölçüm ekseninde 0,5 mm aralıklarla parça başına 50 noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. Mikrosertlik değeri ölçüm noktaları

Mikrosertlik deneyleri, Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği, Malzeme Laboratuvarında bulunan Şekil 3.12’de resmi verilen Duroline-Metkon marka cihaz ile HV cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde 10 saniye boyunca 500 grf yük (HV0,5) malzeme üzerinde tahribat bırakarak boyutsal ölçüm yapılmış ve kaynak bölgesi ile kaynaktan etkilenen bölge ve parça genelinde çıkan sertlik sonuçları değerlendirilmiştir.



Şekil 3.12. Duroline-Metkon marka sertlik ölçüm cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çekme Testi

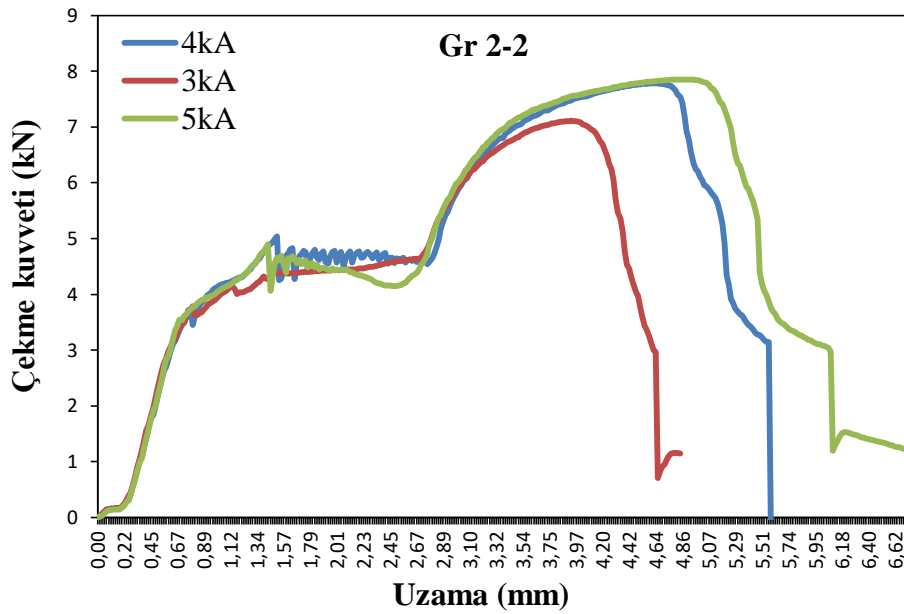
Farklı kaynak parametrelerinde (3, 4 ve 5 kA kaynak akımı ve 20, 30 ve 40 çevrim kaynak süresinde, Grade 2-2, Grade 2-5 ve Grade 5-5 malzemelerin birbirleri ile toplam 21 farklı parametre grubu oluşturulmuştur. Nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş titanyum saclar üzerinde, farklı parametrelerin kaynağının mekanik özelliklere etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için her parametre grubundan 3'er adet olmak üzere toplam 63 numuneye çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda elde edilen 3 değerın ortalamaları Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4. 1. Çekme testinde ölçülen çekme kuvveti ve uzama değerleri

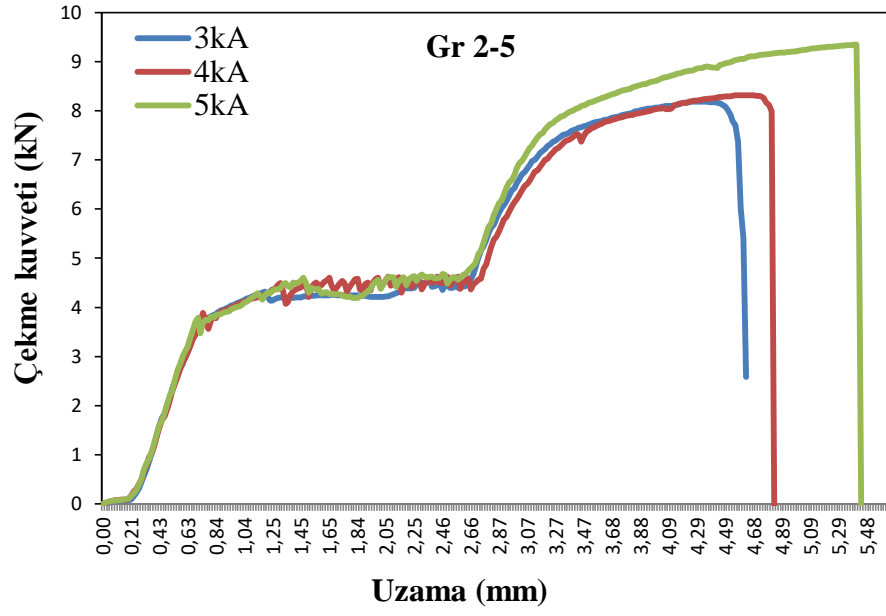
Kaynak Edilen Parçalar	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (çevrim)	Maksimum Çekme Kuvveti (N)	Maksimum Çekme Noktasındaki Uzama (mm)
Gr 2-2	3	20	7.187	4,06
		30	7.027	3,87
	4	20	7.800	4,66
		30	8.053	5,19
		40	8.207	5,24
	5	20	7.883	4,99
30		8.340	5,27	
Gr 2-5	3	20	8.270	4,19
		30	8.340	4,25
	4	20	8.253	4,52
		30	8400	4,85
		40	9.203	6,20
	5	20	9.177	5,17
30		9.193	6,46	
Gr 5-5	3	20	10.540	3,33
		30	11.363	3,38
	4	20	12.210	3,57
		30	13.550	4,07
		40	13.920	4,10
	5	20	15.030	3,94
30		15.975	4,14	

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen Grade 2 ve Grade 5 titanyum sacların kendi içinde ve birbiriyle olan kaynaklı bağlantılara ait Çizelge 4.1'deki çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, en düşük çekme dayanımı tüm malzeme gruplarında 3kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak zamanında, en yüksek çekme dayanımı 5kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak zamanı ile birleştirilen numunelerden elde edilmiştir. Aynı şekilde en düşük ve en yüksek uzama miktarı da aynı kaynak parametrelerinde elde edilmiştir. Çizelge 4.1 genel olarak incelendiğinde, kaynak parametrelerinden kaynak akımı ve kaynak süresinin artmasıyla, çekme ve % uzama değerlerinin doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

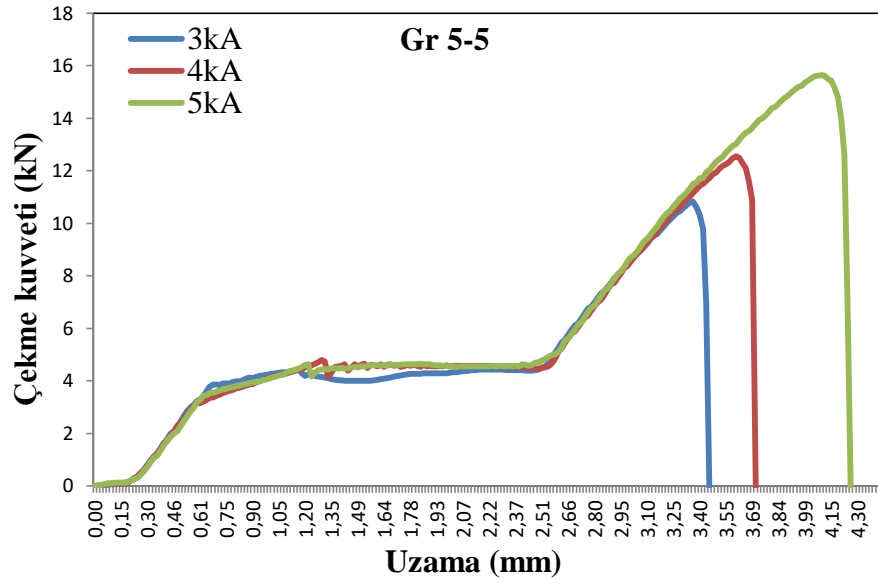
Sabit 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilmiş Grade 2-2, Grade 2-5 ve Grade 5-5 titanyum çiftlerinin farklı akım değerlerindeki davranışına ait çekme grafikleri Şekil 4.1'de görülmektedir.



(a)



(b)



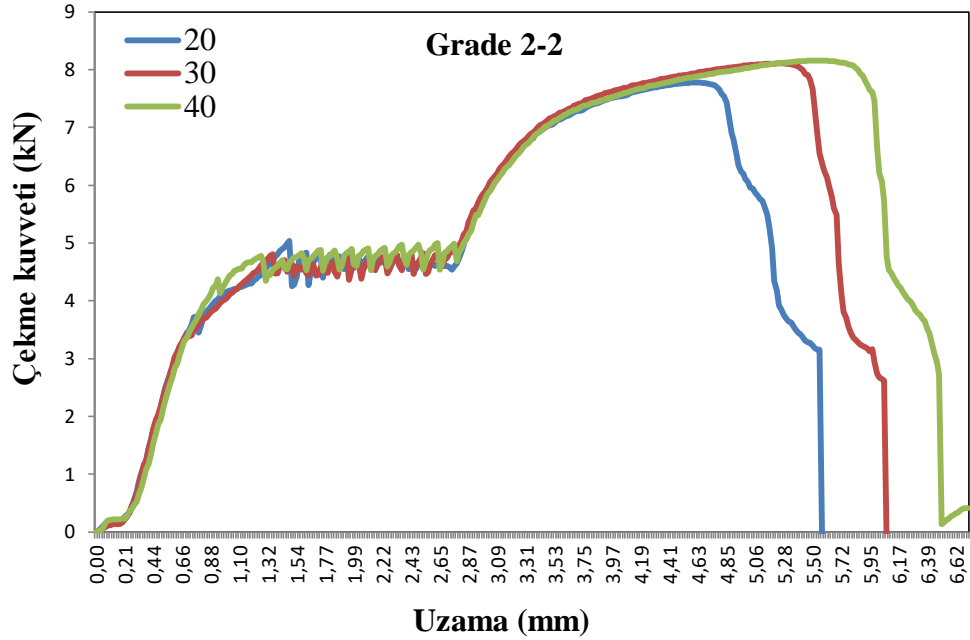
(c)

Şekil 4.1. 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilmiş numunelerin farklı akım değerlerindeki çekme grafikleri; a) Grade 2-2, b) Grade 2-5 ve c) Grade 5-5

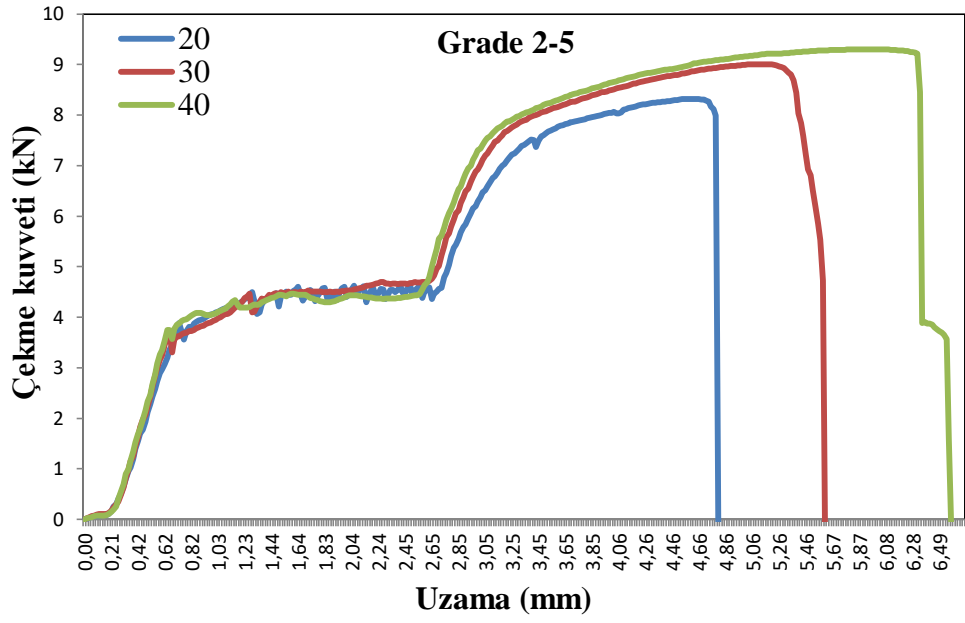
Nokta direnç kaynağında kaynak akımının, kaynaklı bağlantıların çekme dayanımına etkisi Çizelge 4.1'deki veriler ve Şekil 4.1'deki grafikler incelenecek olursa, kaynak akımı artışına paralel olarak, çekme dayanımının arttığı görülmektedir.

Sabit 20 çevrim kaynak süresinde, Grade 5-5 malzeme çiftinin kaynaklı birleştirilmesi ele alınacak olursa; 3 kA kaynak akımında birleştirilen numunenin çekme dayanımı 10.540 N iken, bu değer aynı parametrelerde 4 kA kaynak akımında 12.210 N ve 5 kA kaynak akımında ise 15.030 N olarak ölçülmüştür. Kaynak süresi 30 çevrime yükseltildiğinde, 3 kA kaynak akımında birleştirilen numunenin çekme dayanımı değeri 11.363 N iken, 4 kA kaynak akımında 13.550 N'a ve 5 kA kaynak akımında ise 15.975 N'a yükselmiştir. Sonuç olarak; nokta direnç kaynağı ile birleştirmiş numunelerde kaynak akımının artmasıyla, ısı girdisi artmış, dolayısıyla kaynak çekirdeği genişlemiş, bu genişleme sayesinde kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları artmıştır.

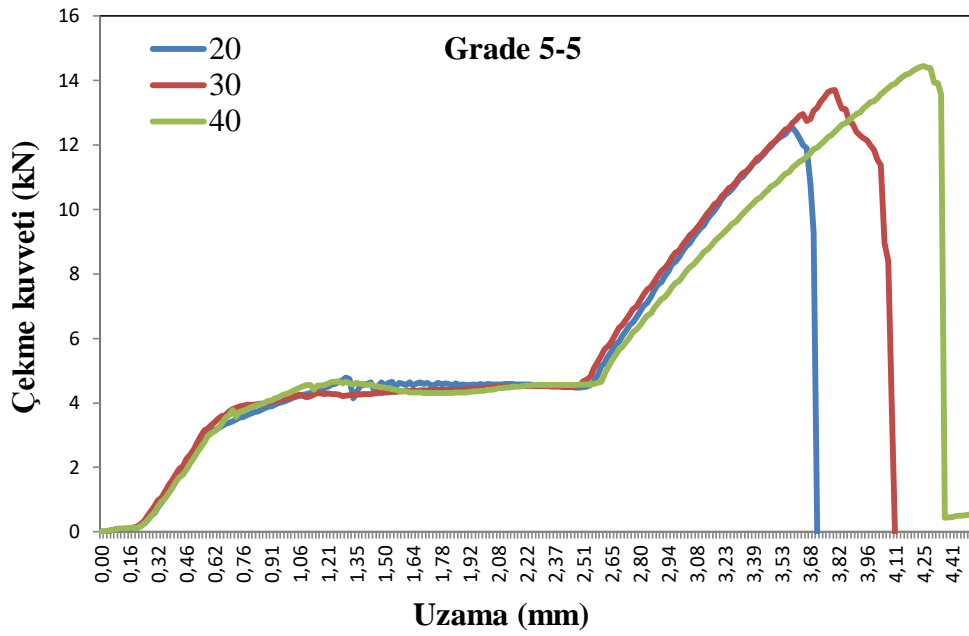
Sabit 4 kA akım değerinde gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin farklı kaynak sürelerindeki davranışına ait çekme grafikleri Şekil 4.2 verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

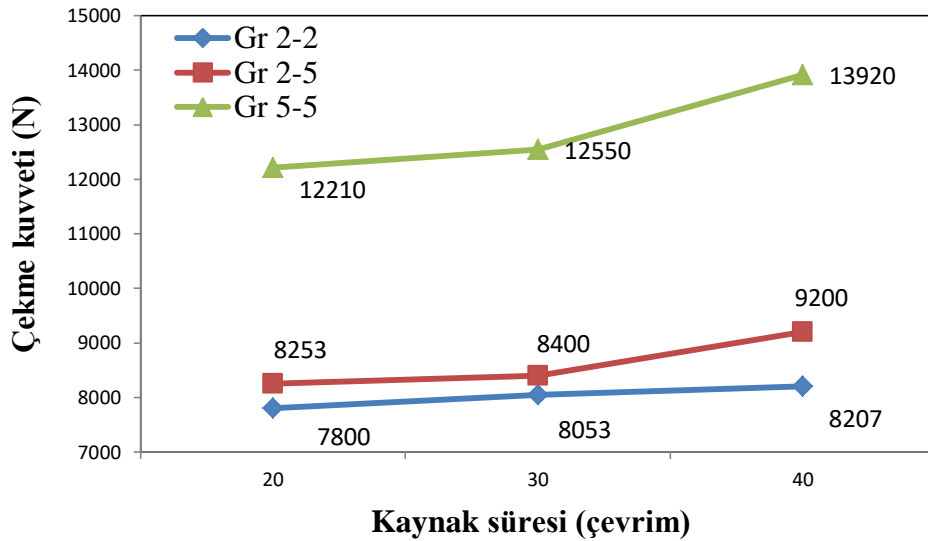
Şekil 4.2. 4 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin farklı kaynak süresindeki çekme grafikleri; a) Grade 2-2, b) Grade 2-5 ve c) Grade 5-5

Çalışmalarımız sonucunda titanyum sacların nokta direnç kaynağında artan kaynak zamanının, kaynaklı bağlantıların çekme dayanımında etkili olduğu görülmektedir. (Çizelge 4.1, Şekil 4.2).

Sabit 4 kA kaynak akımında, Grade 5-5 malzeme çiftinin kaynaklı birleştirilmesi ele alınacak olursa; 20 çevrim kaynak süresinde çekme dayanımı 12.210 N ölçülürken, bu değer kaynak zamanının 30 çevrime yükseltilmesiyle 13.550 N'a ve 40 çevrime yükseltilmesiyle de 13.920 N'a yükselmiştir. Benzer biçimde diğer parametre (kaynak akımı) sabit tutulduğunda kaynak zamanının artmasıyla bütün bağlantılarda çekme değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; kaynak zamanı 20 çevrim iken, ısı girdisinin düşük olması nedeniyle kaynak çekirdek çapı küçük oluşmuştur. Bunun sonucu olarak, kaynaklı bağlantıların çekme kuvvet değerleri de düşük olmaktadır. Kaynak zamanı artmasıyla (20, 30 ve 40 çevrim) ısı girdisi artmakta, buna bağlı olarak da kaynak çekirdek çapı artmakta, dolayısıyla çekme kuvveti artmaktadır.

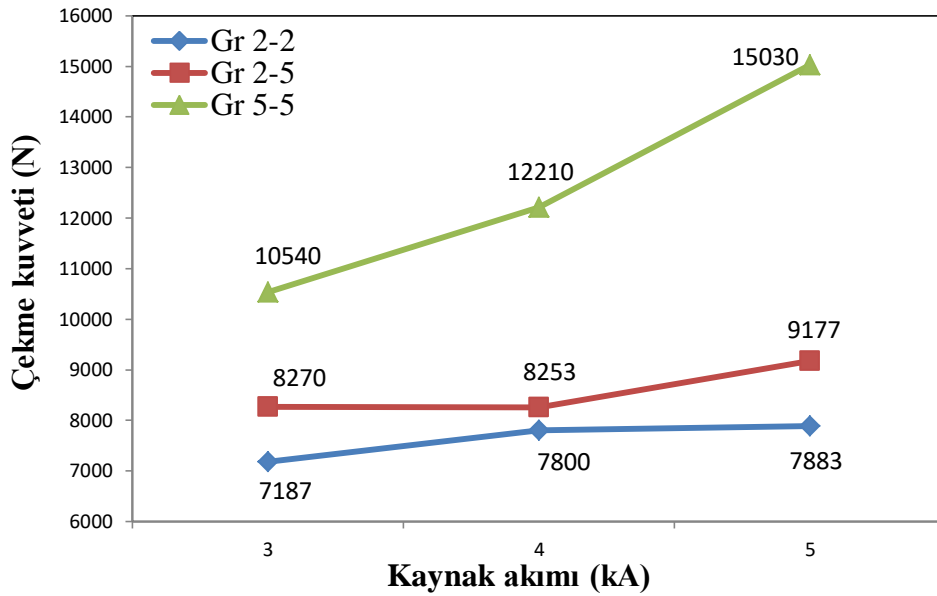
Çalışmamızın diğer bir parametresi olarak farklı malzeme çiftlerinin belirli kaynak parametrelerindeki davranışlarına bakılacak olursa, Şekil 4.3'de sabit 4 kA kaynak akımında farklı sürelerde nokta direnç kaynağı ile birleştirilen çeşitli malzeme çiftlerine ait çekme kuvvetleri görülmektedir.



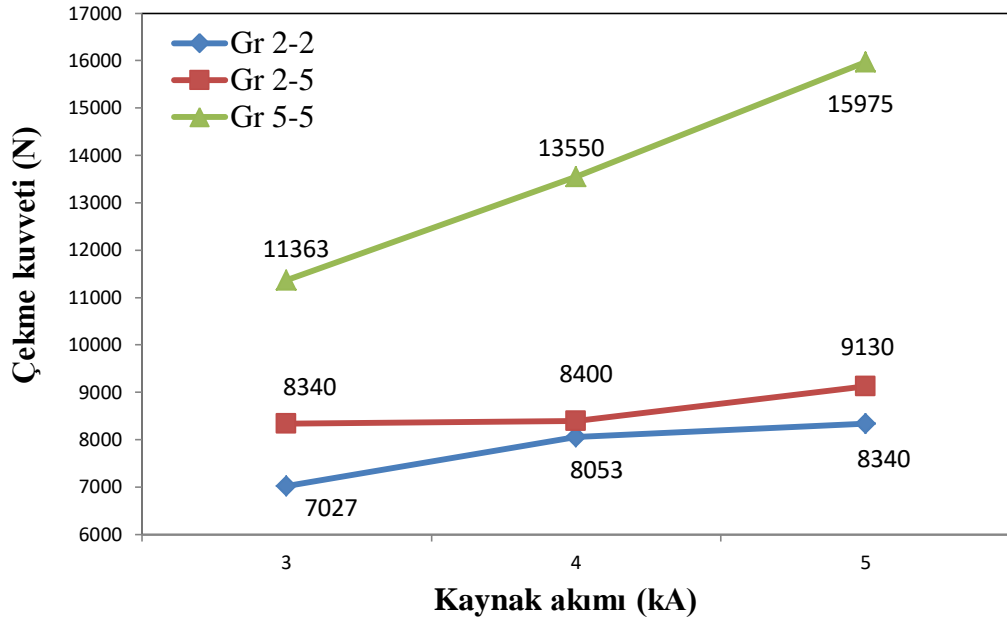
Şekil 4.3. 4 kA kaynak akımında birleştirilmiş farklı titanyum çiftlerine kaynak süresinin etkisi

Şekil 4.3 incelendiğinde tüm malzeme gruplarında sabit akım değerinde kaynak süresi arttıkça çekme kuvvetinin arttığı görülmüştür. Gr 5-5 malzeme çiftinde kaynak süresinin artışı daha belirgin artışlar göstermiştir. 20–30 çevrim aralığında Grade 2 ve Grade 5'in bulunduğu tüm malzeme çiftlerinde artış %1-1,03 aralığında ölçülürken, 30–40 çevrim aralığında Gr 2-2 grubunun artış miktarı sabit kalırken (%1,02), Gr 5 malzemenin içinde bulunduğu Gr 2-5 ve Gr 5-5 malzeme gruplarının çekme kuvvetinde %1,1 mertebesinde artış göstermiştir. Çalışmada kullanılan Grade 2 olan saf titanyumun çekme dayanımı, alaşımlandırılmış Grade 5 titanyum malzemedan daha düşüktür. Gr 2-5 malzeme grubunun çekme dayanımı grafiği Gr 2-2 ve Gr 5-5 değerlerinin arasında çıkmış olup Gr 2-2 grup malzemenin çekme dayanımına daha yakın bir değer göstermiştir.

Malzeme davranışları diğer açıdan bakılacak olursa Şekil 4.4'de sabit kaynak sürelerinde farklı kaynak akım değerlerinde nokta direnç kaynağı ile birleştirilen çeşitli malzeme çiftlerine ait çekme kuvvetleri görülmektedir.



(a)



(b)

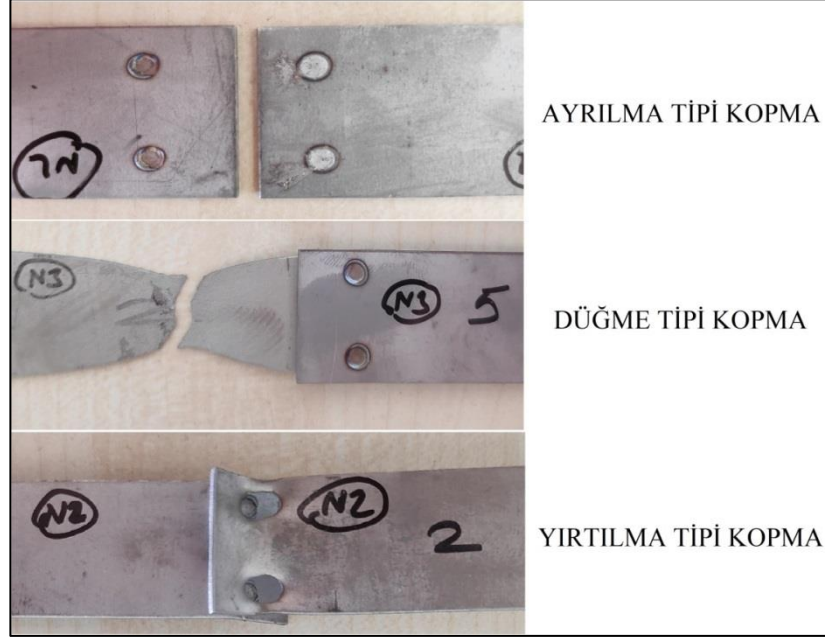
Şekil 4.4. Belirli kaynak sürelerinde birleştirilmiş farklı titanyum çiftlerine kaynak akımının etkisi; a) 20 çevrim, b) 30 çevrim

Çekme testi yapılan numunelerdeki kopma türleri incelenerek, kriterlere uygun olup olmadığı ve kaynaklı bağlantılarda kaynak akımı ve kaynak zamanının kopma türüne etkisi incelenmiştir. Kaynaklı bağlantılarda düğme, ayrılma ve yırtılma türü olmak üzere üç tip yırtılma mevcuttur.

Ayrılma tipi kopma, kaynak parametrelerinin yetersiz olduğu, düşük kaynak akımından dolayı oluşan düşük ısı girdisine bağlı olarak kaynak çekirdeği çapının küçük olduğu kopma tipidir ve çekme dayanımı esas metal dayanımından daha düşüktür. İstenilmeyen bir kopma tipidir.

Düğme tipi kopma, kaynak parametrelerinin uygun seçildiğini gösteren, kaynak zamanı artışıyla ısı girdisinde artış meydana gelen; buna bağlı olarak kaynak çekirdeği çapının büyük olduğu ve çekme dayanımında da yükselmenin görüldüğü kopma türüdür. Kaynaklı bağlantıdan istenilen tür kopma şeklidir. Bu kopma türünde, malzemenin kopma tipi kaynaklı bölgeden kopmadan, malzemedan yırtılmaya doğru gitmektedir. Bunun nedeni çekirdek bölgesinin çekme değerinin, malzemenin çekme değerinden daha yüksek olmasıdır.

Yırtılma tipi kopma ise kaynak parametrelerinin aşırı seçildiği, yüksek kaynak akımından dolayı aşırı ısı girdisine bağlı olarak meydana gelen aşırı ergime ve fişkırmadan dolayı, çekme dayanımı düşük görülen ve istenmeyen kopma tipidir. Şekil 4.5’de bahsedilen bu kopma türlerine ait örnekler verilmektedir.
























Şekil 4.5. Kaynak kopma türleri

Bu tez çalışmasında üç tip kopmanın görülebilmesi amaçlanmış olup parametreler buna uygun seçilmiş ve bu üç kopma tipinin de örnekleri elde edilmiştir. Bazı kaynaklı birleştirmelerde düşük akım veya kaynak süresine bağlı olarak yeterli çekirdek çapı oluşamamış ve çekme testi sırasında kaynak çekirdeklerinden ayrılma tip kopma olmuştur. Bu kopma tipine Grade 5-5 titanyum sac birleşimlerinde akım değeri fark etmeksizin 20 çevrim kaynak süresi seçilen numuneler örnek gösterilebilir.

Bazı kaynaklı birleştirmeler düğme kopma türünden olup kaynak bölgesinden değil malzemenin kendisinden incelererek kopma göstermiştir. Bu sonuç, kaynak parametrelerinin uygun olarak seçildiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Grade 2-5 titanyum sacların 5kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak süresi seçilerek yapılan nokta direnç kaynağında bu kopma tipi görülmüştür.

Bazı kaynaklı birleştirmelerde ise uygun değerden fazla seçilmesi sebebiyle çekme testinin ilerleyen zamanlarda kaynak çekirdeklerinden yırtılma tip kopma görülmüştür. Grade 2-2 saf titanyum sacların 5 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresi seçilerek elde edilen numunelerde bu tip kopma görülmüştür. Çizelge 4.2’de tüm parametre gruplarında kaynaklı numunelere ait çekme testi sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4. 2. Kaynak parametreleri ve kopma sonucundaki görüntüleri

Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (evrim)	Kopma Görüntüleri		
		Gr 2-2	Gr 2-5	Gr 5-5
3	20			
	30			
4	20			
	30			
	40			
5	20			
	30			

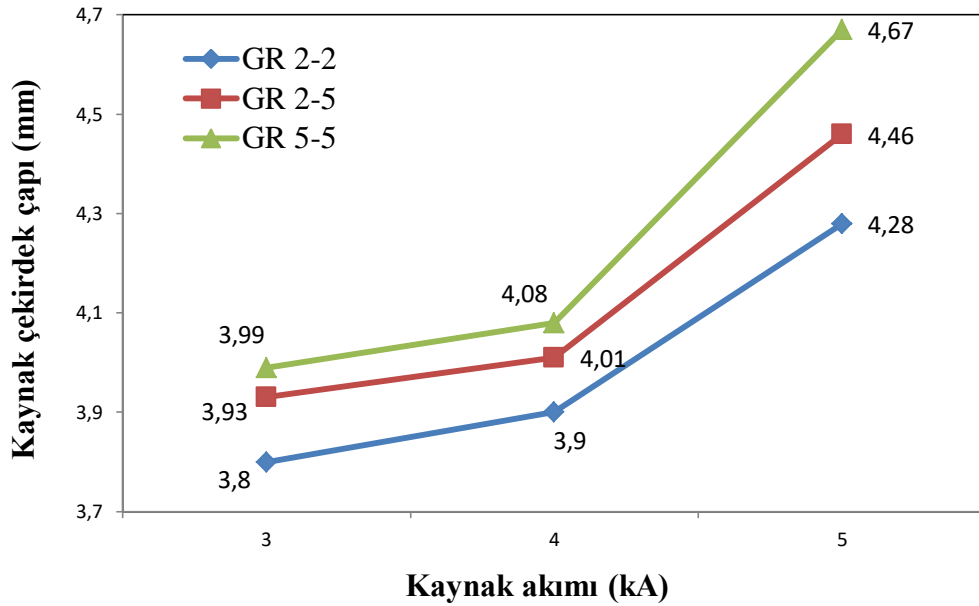
4.2. Kaynak Çekirdeği Çapı Ölçümü

Farklı parametreler (3, 4 ve 5 kA kaynak akımı, 20, 30 ve 40 çevrim kaynak zamanı) kullanarak, nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numuneler üzerinde çekirdek çapı ölçümü yapılmıştır. Değişen kaynak parametrelerinin çekirdek çapı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu ölçümlerin ortalama değerleri Çizelge 4.3’de ise sayısal olarak verilmiş olup Şekil 4.6’da sabit kaynak sürelerinde farklı malzeme çiftlerinin çekirdek çap büyüklükleri grafik olarak gösterilmiştir.

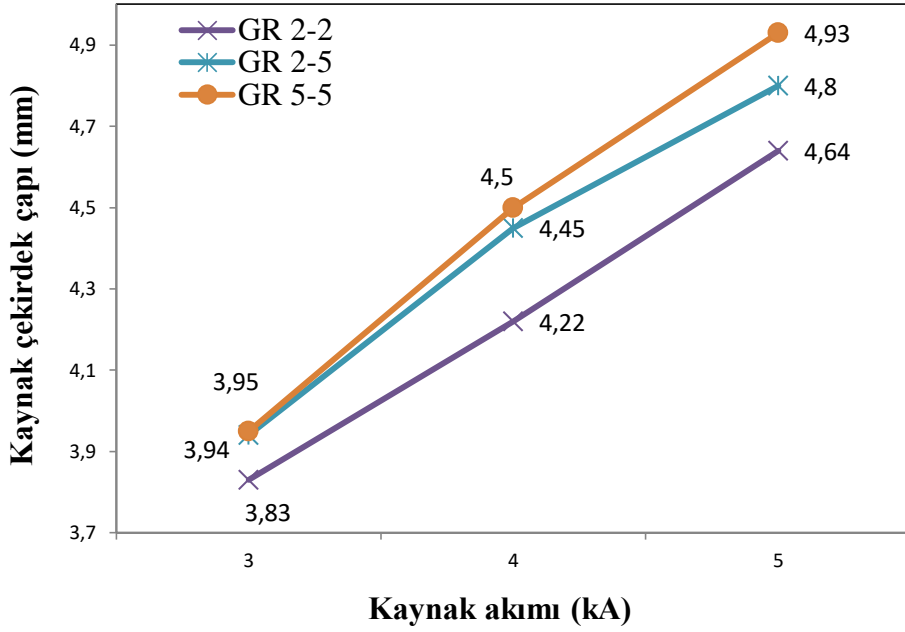
Çizelge 4. 3. Birleştirilen numunelerin kaynak çekirdek çapı büyüklükleri

	GR 2-2	GR 2-5	GR 5-5
3kA-20	3,8	3,93	3,99
3kA-30	3,83	3,94	3,95
4kA-20	3,9	4,01	4,08
4kA-30	4,22	4,45	4,5
4kA-40	4,3	4,69	4,73
5kA-20	4,28	4,46	4,67
5kA-30	4,64	4,8	4,93

Çizelge 4.3 incelendiğinde en büyük kaynak çekirdeği çapı 4,93 mm olarak 5 kA akım değerinde ve 30 çevrim kaynak süresinde ölçülmüş, en küçük kaynak çekirdeği çapı ise 3 kA akım değeri ve 20 çevrim kaynak süresinde 3,8 mm olarak belirlenmiştir.



(a)

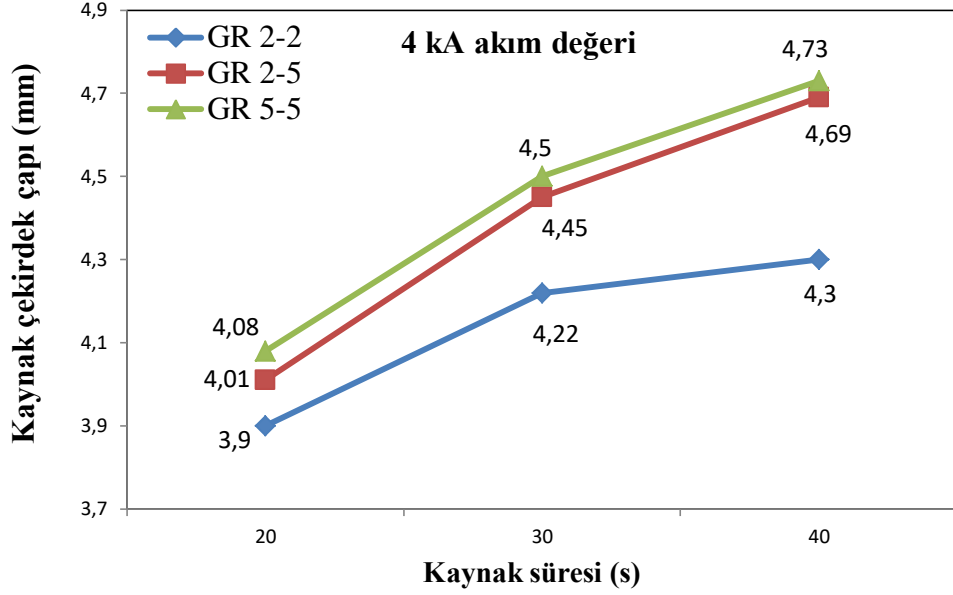


(b)

Şekil 4.6. Sabit kaynak sürelerinde birleştirilmiş farklı titanyum çiftlerine ait kaynak süresinin çekirdek çapı üzerine etkisi; a) 20 çevrim, b) 30 çevrim

Şekil 4.6 incelendiğinde sabit 20 çevrim kaynak süresinde; 3–4 kA akım aralığında tüm malzeme gruplarında çekirdek çaplarının oranı %1,02 olarak görülürken, 4–5 kA arasında akım değerindeki artışa bağlı olarak gerçekleşen kaynak çekirdek çaplarının artış oranı %1,09-1,14 olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra sabit 30 çevrim kaynak süresinde 3–5 kA aralığında akım değerinin artışına doğru orantılı olacak şekilde kaynak çekirdek çaplarının artış oranı tüm malzeme gruplarında %1,10 civarında tespit edilmiştir.

Şekil 4.7.'de sabit akımda farklı malzeme çiftlerinin çekirdek çap büyüklükleri grafik olarak gösterilmiştir.



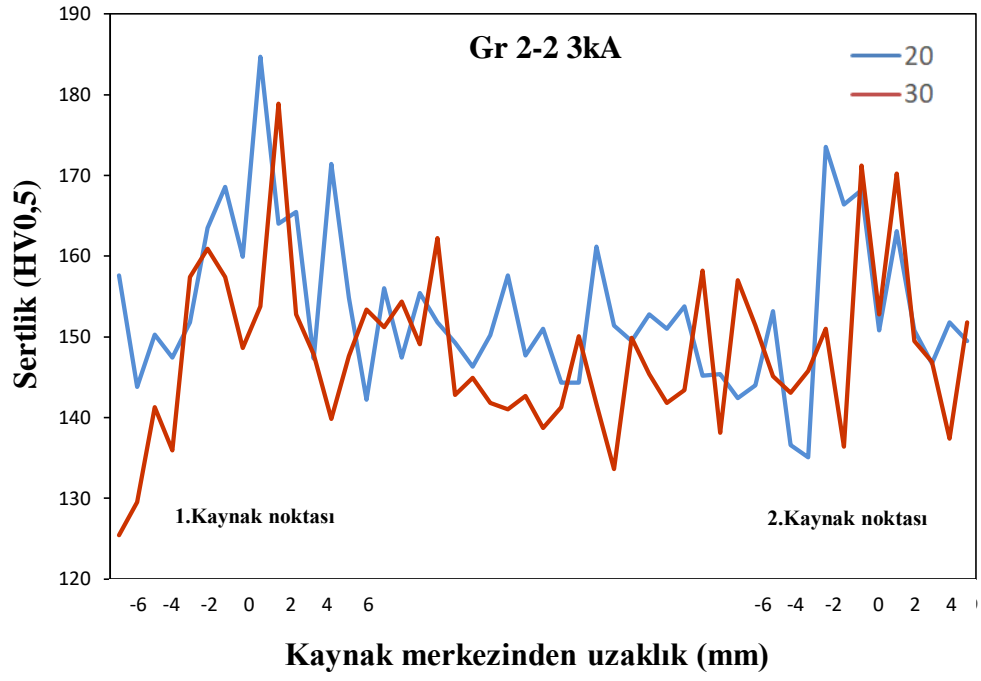
Şekil 4.7. Sabit kaynak akımında birleştirilmiş farklı titanyum çiftlerine ait kaynak süresinin çekirdek çapı üzerine etkisi

Şekil 4.7’de sabit 4 kA akım değerinde ise 20–30 çevrim kaynak süresinde tüm malzeme gruplarında çekirdek çaplarının artış oranı %1,10 civarında görülürken, 30–40 çevrim arasında kaynak süresinin artışa bağlı olarak gerçekleşen kaynak çekirdek çaplarının oranı Gr 2-2 grubunda düşüş görülerek %1,02 değerinde olduğu saptanmıştır.

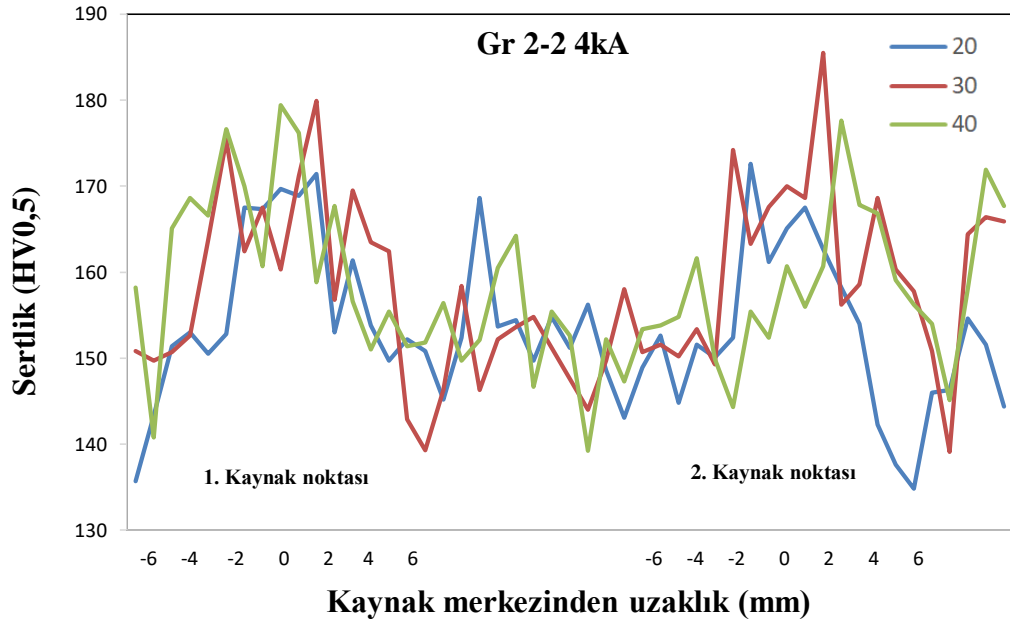
4.3. Vickers Sertlik Ölçümü

Nokta direnç kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen titanyum malzemelerde, kaynak bölgesindeki (ana malzeme, ITAB ve kaynak çekirdeği) sertlik değişimini belirlemek amacıyla kaynaklı numunelerin tümüne sertlik testleri uygulanmıştır. Kaynaklı numunelerdeki sertlik taramaları iki adet puntanın bulunduğu kaynak ekseninde gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, 25 mm uzunluğundaki ölçüm ekseninde 0,5 mm aralıklarla parça başına 50 ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir.

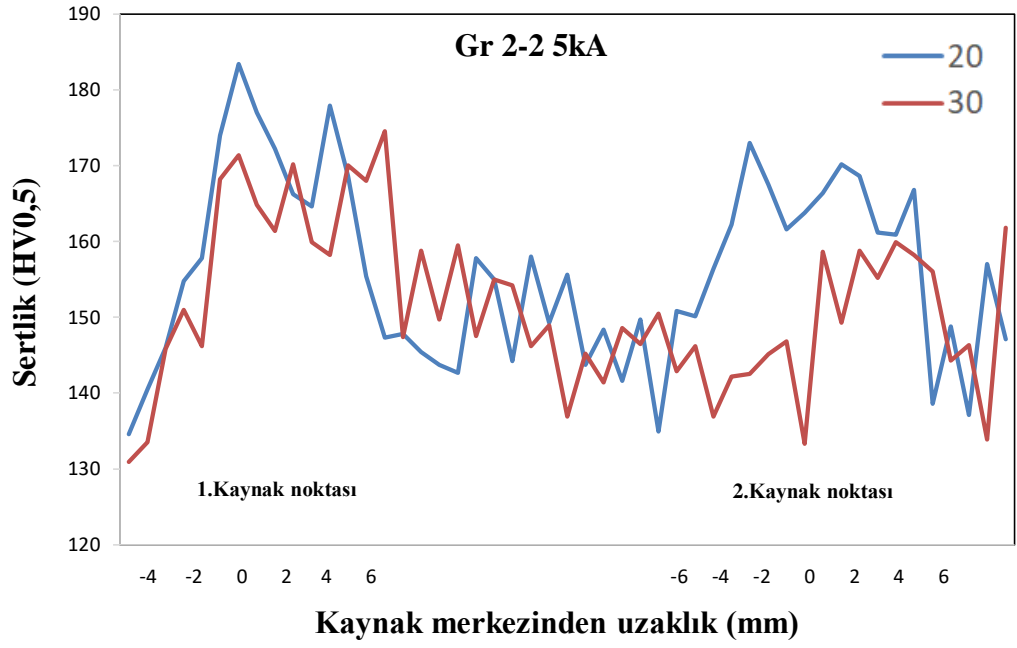
Kaynaklı birleştirmelere uygulanan sertlik deneyi sonuçlarından örneğin Gr 2-2 titanyum malzeme çiftine 3, 4 ve 5 kA kaynak akımı kullanılarak gerçekleştirilen birleştirmelerin sertlik dağılımları sırasıyla Şekil 4.8’de verilmiştir.



(a)



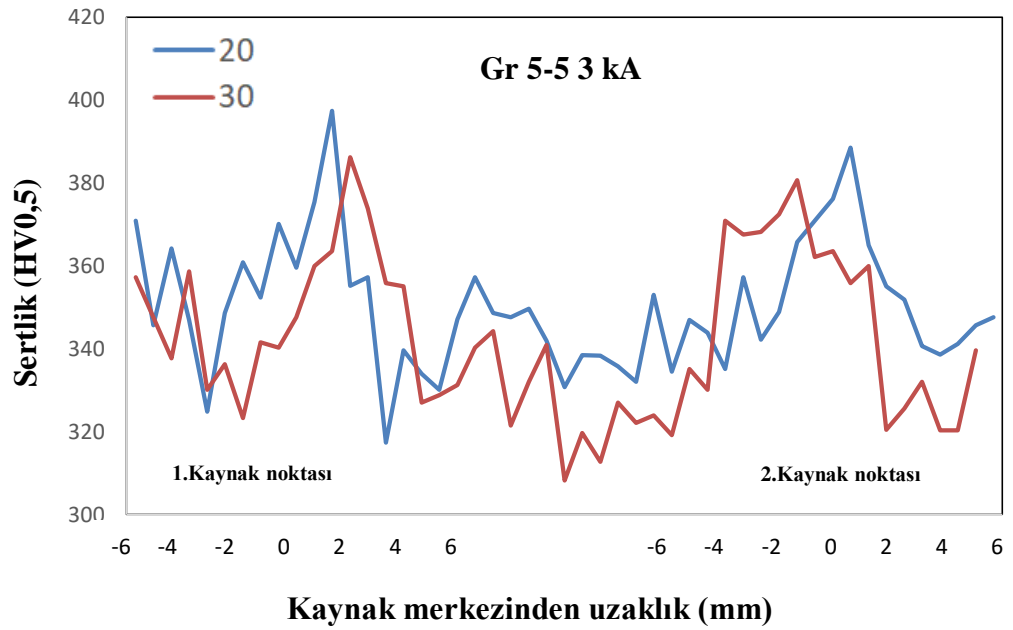
(b)



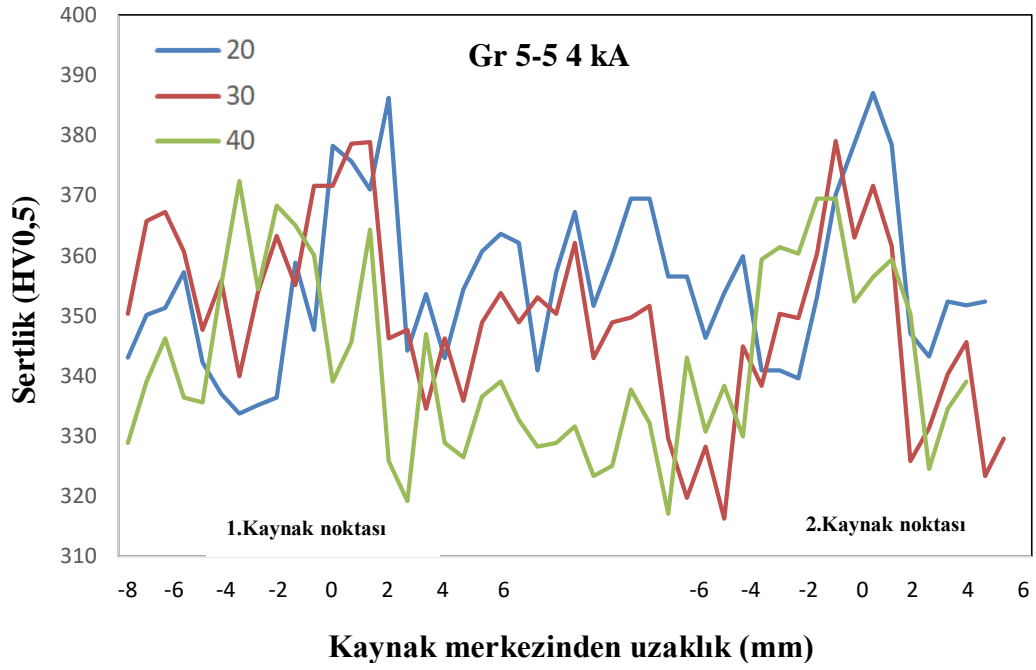
(c)

Şekil 4.8. Sabit kaynak akımında birleştirilmiş Gr 2-2 titanyum çiftlerine ait sertlik ölçüm grafikleri; a) 3 kA, b) 4 kA ve c) 5 kA

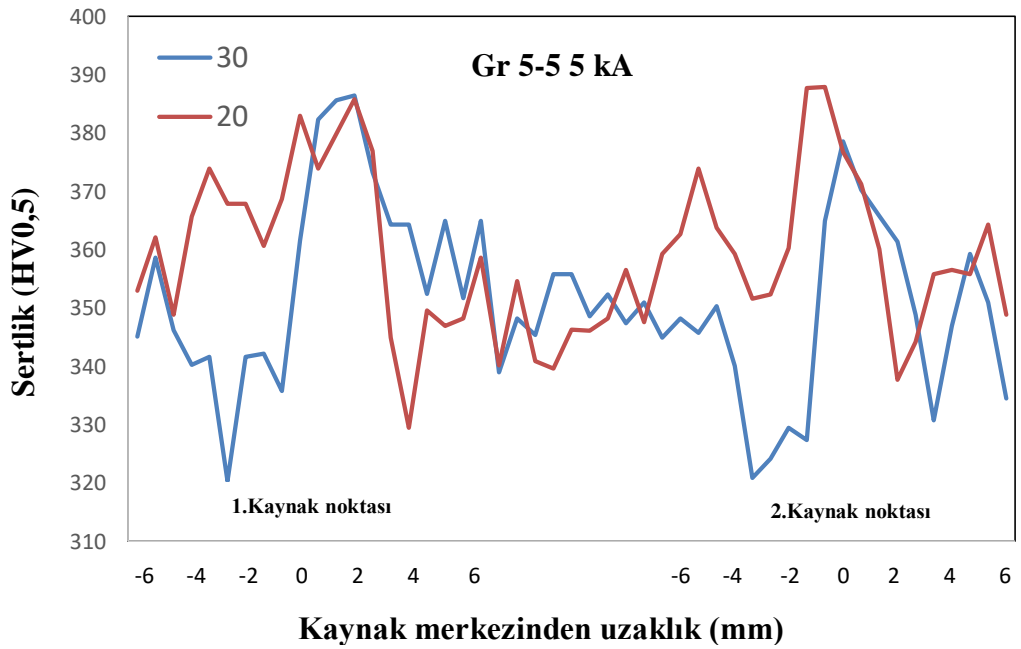
Şekil 4.9’da Grade 5-5 titanyum malzeme çiftine ait 3, 4 ve 5 kA kaynak akımı kullanılarak gerçekleştirilen birleştirmelerin sertlik dağılımları verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9. Sabit kaynak akımında birleştirilmiş Gr 5-5 titanyum çiftlerine ait sertlik ölçüm grafikleri; a) 3 kA, b) 4 kA ve c) 5 kA

Grafikler bakıldığında; kaynak çekirdeğinden esas metale doğru gidildikçe sertlikte bir düşüş olduğu görülmektedir. Burada maksimum sertlik değerleri kaynak çekirdeğinde görülürken, sırasıyla ITAB ve ana malzeme bölgeleri takip etmektedir.

Kaynak parametrelerinden kaynak akımı ve kaynak zamanının, kaynaklı bağlantıların sertlik değişimi üzerindeki etkisi incelendiğinde; gerek kaynak akımı ve gerekse kaynak zamanının artmasıyla, kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerlerinin çok belirgin olmamakla beraber artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş numunelerden elde edilen sertlik grafiklerinde dikkat çeken bir başka nokta da, her iki kaynak noktasında da ölçülen sertlik değerlerinin birbirlerine yakın olmasına rağmen birinin diğerine oranla bir miktar daha yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi; nokta direnç kaynağının aynı şartlarda yapılırsa da 1. kaynak noktasındaki kaynak işlemi esnasında kaynak makinası ile parça arasında oluşan elektriklenme/ark sonucu 2. kaynak noktasındaki kaynak işlemi sırasında ilk kaynak bölgesine akımın kaçması ve buna bağlı olarak kaynak veriminin düşmesidir.

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak edilen bölgede ölçülen sertlik değerlerinin esas metalden daha fazla olduğu, ayrıca, kaynak parametre değerlerinin artmasıyla da, sertlik değerlerinde bir miktar sertlik artışı olduğu tespit edilmiştir. Buradan, kaynak esnasında kaynak bölgesine verilen ısının etkili olduğu sonucunu çıkarılabilir. Kaynak işlemi esnasında uygulanan kaynak akımı ve kaynak zamanının artmasıyla kaynak bölgesine verilen ısı miktarı artmaktadır. Yüksek ısı girdisiyle birlikte kaynak bölgesinde ısı daha uzun süre kalmakta, bu da sertliğin azda olsa yükselmesine neden olmaktadır.

Kaynaklı birleştirmelerin tümünde, kaynak zamanı ve kaynak akımı artışı ile ısı girdisi artmış ve kaynak çekirdeği genişlemiştir. Bu nedenle, kaynak çekirdeğinin sertlik değeri, tutma zamanı boyunca elektrod gücünün sebep olduğu deformasyon sertleşmesinden dolayı esas metal ve ITAB'dan daha yüksek olduğu bulunmuştur.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, 1mm kalınlıkta ve 100x25 mm boyutlarında ticari saflıktaki Grade2 ve Ti6Al4V kimyasal formülüne sahip Grade 5 titanyum saclar nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri; malzemelerin birbirleriyle ve kendi içlerinde çiftler oluşturarak 3, 4 ve 5 kA kaynak akımı ve 20, 30 ve 40 çevrim kaynak zamanı olmak üzere 21 farklı parametrede yapılmış olup kaynaklı parçalar üzerinde etkileri araştırılmıştır. Kaynak edilen parçaların dayanımının belirlenmesi için çekme testine tabi tutulmuştur. Kaynak edilen numunelerde oluşan kaynak çekirdeklerinin çapları dijital kumpasla vasıtası ile ölçülmüştür. Ayrıca, parçaların kaynak bölgelerinde, ITAB ve ana malzeme üzerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Ticari saflıktaki Grade 2 ve Ti6Al4V kimyasal formülüne sahip Grade 5 titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirildiği ve farklı kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı bu tez çalışma sonucunda;

1. Farklı parametreler kullanılarak nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerin tümünde birleşme gerçekleşmiştir.
2. Artan kaynak akımı ve kaynak zamanıyla birleştirilen numunelerin çekme dayanımları artmıştır.
3. Çekme testleri sonucunda; ITAB'da ve ana malzemede meydana gelen düğme tipi kopmalarda kaynak dikişlerinin güvenli olduğunu, kaynak noktalarında görülen ayrılma ve yırtılma tipi kopmanın gerçekleştiği kaynakların güvenli olmadığı parametrelerle saptanmıştır.
4. Kaynak çekirdeği çap ölçümleri neticesinde; artan kaynak akımı ve kaynak zamanıyla ısı girdisi artmış ve buna bağlı olarak kaynak çekirdeği çapı Gr 5-5 alaşımı çiftinde daha belirgin olmak üzere tüm malzeme çiftlerinde artış meydana gelmiştir. Kaynak akımı çekirdek çapı üzerinde kaynak süresine göre daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
5. Sertlik ölçümleri sonucunda, en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinde ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzemenin takip ettiği bir kez daha belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Akman, E., Demir, A., Canel, T., Sınmazçelik, T. 2009.** Laser Welding Of Ti6Al4V Titanium Alloys, *Journal Of Materials Processing Technology*; 209:3705-3713
- Almus, Z. 2006.** “Nokta direnç kaynağında ara bağlayıcının birleşme özelliklerine etkilerinin araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-63.
- Anık, S. 1983.** “Kaynak teknolojisi el kitabı”, Giriş Makine ve Montaj Sanayi A.Ş., 175-193.
- Anık, S. 1991.** “Kaynak tekniği el kitabı”, Gedik Holding Yayını, İstanbul 124-131.
- Anık, S., Anık, E., Vural, M. 1993.** “1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı, Cilt 1”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 186-195.
- Anonim, 2019/a.** Titanium Grade 2. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTU020> - (Erişim tarihi: 23.08.2019).
- Anonim, 2019/b.** Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641> - (Erişim tarihi: 23.08.2019).
- Antika, Y.E. 2017.** Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Direnç Nokta Kaynağı (Rsw) İle Birleştirilip Mekanik Özelliklerinin Ve Kabul Kriterlerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- Aras, S. 2016.** Nokta Direnç Kaynağı Uygulanan Farklı Çeliklerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Baytemir, M. 2011.** Ostenitik Aısı 310-Feritik AISI 430 Paslanmaz Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı İle Birleştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- Brunette, D.M., Tengwall, B., Textor, M. And Thomsen, P. 2001.** Titanium in Medicine, Springer Verlag, Heidelberg.
- Chen, S., Sun, T., Jiang, J.Qi., Zeng, R. 2016.** Online Monitoring And Evaluation Of The Weld Quality Of Resistance Spot Welded Titanium Alloy. *Journal of Manufacturing Processes*;23:183-191
- Choi, B.H., Choi, B.K. 2008.** The Effect Of Welding Conditions According To Mechanical Properties Of Pure Titanium. *Journal Of Materials Processing Technology* 201; 526–530
- Cui, C., Hu, B., Zhao, L., Liu, S. 2011.** Titanium Alloy Production Technology, Market Prospects And Industry Development. *Mater Des*;32:1684–91.
- Derlatka, A., Dyrner, M., Lacki, P. 2016.** Evaluation of load-bearing capacity of resistance spot welding (RSW) joints made of titanium Gr 5 sheets. *KEM*;687:212–9.
- Esendir, E. 2008.** Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı İle Birleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Gao, X-L., Zhang, L-J., Liu, J., Zhang, J-X. 2013.** A Comparative Study Of Pulsed Nd:YAG Laser Welding And TIG Welding Of Thin Ti6Al4V Titanium Alloy Plate, *Materials Science & Engineering A*; 559:14-21

- Gökdemir, Y. 2005.** Saf Titanyum ve Ti6Al4V Alaşımının Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Güler, H. 2013.** Investigation of Usibor 1500 Formability in a Hot Forming Operation. *Materials Science (Medžiagotyra)*; 19.
- Gürdaş, M. 1999.** “Kaynaklı konstrüksiyonlarda alüminyum ve alaşımlarının kullanılması”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-65.
- İşler, A. 1999.** Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem ve Mekanik Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İçdem, C. 2007.** Saf Titanyum Ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımlarının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Kahraman, N. 2007.** The Influence Of Welding Parameters On The Joint Strength Of Resistance Spot-Welded Titanium Sheets. *Materials & Design*; 28:420-427
- Kahraman, N., ve Gülenç B. 2009.** “Modern kaynak teknolojisi”, Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti., Ankara, 1-99.
- Karpagaraj, A., Shanmugam, N.S., Sankaranarayanan, K. 2015,** Some Studies On Mechanical Properties And Microstructural Characterization Of Automated TIG Welding Of Thin Commercially Pure Titanium Sheets. *Materials Science and Engineering: A*; 640:180-189
- Kaya, Y. 2010.** Titanyum Sacların Nokta Direnç Kayanğı İle Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Karabük.
- Lacki, P., Niemi, J. 2016.** Strength Evaluation Of The Beam Made Of The Titanium Sheets Grade 2 And Grade 5 Welded By Resistance Spot Welding. *Composite Structure*; 159:538-547
- Long, M. and Rack, H.J. 1998.** Titanium alloys in total joint replacement- a materials science perspective, *Biomaterials*, 19, 1621-1639.
- Mehdi, B., Badji, R., Ji, V., Allili, B., Bradai, D., Deschaux-Beaume, F., Soulié, F. 2016.** Microstructure and residual stresses in Ti-6Al-4V alloy pulsed and unpulsed TIG welds, *Journal of Materials Processing Technology*; 231:441-448
- Oğuz, H. 2018.** Paslanmaz Çelik-Galvanizli Çelik Çiftinin Elektrik Nokta Direnç Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynaklı Birleştirmenin Dayanım Ve Mikroyapı Özellikleri Üzerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.
- Pouranvari, M., Marashi, S.P.H. 2013.** Critical review of automotives steels spot welding: process, structure and properties. *Sci Technol Weld Join*; 18:361–403.
- Spena, P.R., de Maddis, M., Lombardi, F. 2015.** Mechanical strength and fracture of resistance spot welded advanced high strength steels. *Procedia Eng*; 109:450–6.
- Şafak, S.A. 2011.** Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- Tanrıöver, K. ve Taşçı, A. 1997.** Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlemi, *Makine Magazin*, 58.
- Wan, X., Wang, Y., Zhang, P. 2014.** Modelling The Effect Of Welding Current On Resistance Spot Welding Of DP600 Steel. *J Mater Process Technol*; 214:2723–9.

Wan, X., Wang, Y., Zhao, D. 2016. Multi-response optimization in small scale resistance spot welding of titanium alloy by principal component analysis and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 83:545-559

Yener, S. 1999. “Otomotiv sanayinde kullanılan direnç nokta kaynak elektrodu ömrünün deneysel analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13-37.

Zhang, H., Wang, F., Xi, T., Zhao, J., Wang, L., Gao, W. 2015. A Novel Quality Evaluation Method For Resistance Spot Welding Based On The Electrode Displacement Signal And The Chernoff Faces Technique. *Mech Syst Signal Process*;62– 63:431–43.

Zhao, D., Wang, Y., Sheng, S., Lin, Z. 2013. Real Time Monitoring Weld Quality Of Small Scale Resistance Spot Welding For Titanium Alloy. *Measurement*;46:1957–63.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : SEMİH SEZER
Doğum Yeri ve Tarihi : OSMANGAZİ, 1989
Yabancı Dili : İNGİLİZCE, İSPANYOLCA, FRANSIZCA

Eğitim Durumu:
Lise : ŞÜKRÜ ŞANKAYA ANADOLU LİSESİ, 2003 – 2007
Lisans : YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, 2007 – 2012
Yüksek Lisans : BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ, 2014 –

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

STL MAKİNA KLİNİK A.Ş
07.2012 – 04.2013 : PROJE TASARIM MÜHENDİSİ

MAYSAN MANDO
04.2014 – 01.2015 : ARGE PROJE MÜHENDİSİ

BURSA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ
02.2015 – : KONTROL MÜHENDİSİ

İletişim (e-posta) : semihsezer89@hotmail.com

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	Semih Sezer
Tez Adı	Titanyum Alaşımlarının Kaynak Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi
Enstitü	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Türü	Yüksek Lisans Tezi
Tez Danışman(lar)ı	Doç. Dr. Rukiye Ertan
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) izni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezinden fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezimin sadece içindikiler, özet, kaynakça ve içeriğinin % 10 bölümünün fotokopi çekilmesine izin veriyorum <input type="checkbox"/> Tezinden fotokopi çekilmesine izin vermiyorum
Yayımlama izni	<input checked="" type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin Veriyorum

Hazırlamış olduğum tezimin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih : 30.09.2019

İmza :

