



**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN AL5754
MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA
KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ, MEKANİK VE
MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Orhan DEDEOĞLU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN AL5754 MALZEMENİN
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ,
MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Orhan DEDEOĞLU

Doç. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

TEZ ONAYI

Orhan DEDEOĞLU tarafından hazırlanan "OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN AL5754 MALZEMENİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ, MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

Başkan : Doç. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Müh. ABD

İmza


Üye : Doç. Dr. Rukiye ERTAN
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Müh. ABD

İmza


Üye : Dr. Öğr. Üy. Ali SAKİN
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji
Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Müh. ABD

İmza


Yukarıdaki sonucu onaylarım



Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü

9.../4.../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.

05/04/2019

Orhan DEDEOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN AL5754 MALZEMENİN
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ,
MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Orhan DEDEOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

Günümüzde, otomobillerde emisyon kısıtlamalarından dolayı ağırlık azaltma çalışmaları önem kazanmıştır. Bu durum, otomotiv endüstrisinde alüminyum alaşımların kullanımının artmasına ve son zamanlarda bu alaşımların kaynaklanabilirliğine odaklanılmasına neden olmuştur. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, alüminyum alaşımları birleştirmek için bir katı hal kaynak tekniği olarak geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağının türevidir.

Bu araştırmada, sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilen Al5754 levhaları (kalınlık 1 mm) için takım geometrisi ve takım devir hızı parametrelerinin, kaynağın mikroyapısı, makroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi deneysel analizlerle incelenmiştir. Kaynakların mekanik özellikleri, kesme makaslama testi ve mikro sertlik testleri uygulanarak araştırılmıştır. Mikroyapı ve makroyapı özellikleri sırasıyla; kırılma yüzeylerine uygulanan taramalı elektron mikroskobu yöntemiyle ve nitel görsel muayene ile incelenmiştir.

Bu incelemeler neticesinde: kesme makaslama mukavemetinin, sertliğin ve uzamanın maksimum değerleri -aynı zamanda en iyi değerleri- 1850 dev/dk takım devir hızında gözlemlenmiştir. Maksimum mukavemet değerlerine sahip deney konfigürasyonlarının, maksimum sertlik ve uzama değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Makroskobik incelemelerdeki bulgulara göre, deney konfigürasyonlarında; kesme kırılması, karma klivaj kırılması ve nugget çekme kırılması gözlemlenmiştir. Mikroskobik incelemelerde ise, test numunelerinde genellikle sünek kırılma bulunduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, mekanik özellikler, mikro yapı
2019, x + 103 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

“FRICTION STIR SPOT WELDING OF AL5754 MATERIAL USED IN
AUTOMOTIVE INDUSTRY AND INVESTIGATION OF MECHANICAL AND
MICROSTRUCTURAL PROPERTIES”

Orhan DEDEOĞLU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

Nowadays, lightweighting studies have gained importance due to emission restrictions in automobiles. This situation led to increase using aluminium alloys in the automotive industry and they have focused on the weldability of these alloys recently. Friction stir spot welding is the derivative of the friction stir welding developed as a solid-state welding technique for combining aluminium alloys.

In this research, the effect of tool geometry and tool rotational speed parameters on the microstructure, macrostructure and mechanical properties of the joint Al5754 sheets (thickness 1 mm) that are joined utilizing the friction stir spot welding method were investigated by experimental analysis. Mechanical properties of welds are investigated with tensile shear test and microhardness test. Features of microstructure and macrostructure are investigated with scanning electron microscope that is applied to fracture surfaces and qualitative visual examination, respectively.

As a result of these examinations: the maximum values as well as the best values of tensile shear strength, hardness and elongation were observed at the tool rotation speed of 1850 rpm. It is found that experimental configurations with the maximum strength values have the maximum hardness values and elongation values. In accordance with the findings in the macroscopic examination, shear failure, mixed cleavage failure and nugget pullout failure were observed in the experimental configurations. In microscopic examination, ductile fracture was generally found in the test samples.

Key words: Friction stir spot welding, mechanical properties, microstructure
2019, x + 103 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmam boyunca benden desteğini esirgemeyen bilgi ve tecrübeleri ile yardımcı olan Sayın Dr. Öğr. Üy. Ali SAKİN'e teşekkür ederim.

Bu araştırma, Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Bölümü (Proje No: KUAP (M)-2013/53) tarafından desteklenmiştir. Uludağ Üniversitesi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmaya katkıda bulunup bana yardımcı olan değerli arkadaşlarıma; Onur EROL, Muhammed Ali KÖKSAL, Cemal AYDEMİR, Selin AYDEMİR ve Arş. Gör. Ali Osman GÜNEY'e teşekkür ederim.

Deney numunelerinin kaynaklanması işleminde gösterdiği özveri ve yardımlar için Nurullah AKBULUT ve Gülermak Makine firmasının sahibi Mustafa GÜLERMAK'a teşekkür ederim.

Bu çalışma sırasında her zaman yanımda olan, karşılaştığım problemlerin çözümünde kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana destek olan değerli arkadaşım Arş. Gör. İbrahim TAŞ'a teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmemde büyük emeği olan, maddi ve manevi her zaman yanımda olan başta değerli Annem olmak üzere, aileme ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Orhan DEDEOĞLU
05/04/2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Alüminyum ve Alüminyum 5000 Serisi Alaşım.....	3
2.1.1. Otomotiv Endüstrisinde, Alüminyum ve Alüminyum Alaşımının Kullanım Alanları.....	5
2.1.2. Gemi ve Taşımacılık Yapım Endüstrisinde, Alüminyum ve Alüminyum Alaşımının Kullanım Alanları.....	6
2.1.3. Savunma ve Havacılık Endüstrisinde, Alüminyum ve Alüminyum Alaşımının Kullanım Alanları.....	6
2.2. Kaynak Teorisi	7
2.3. Birleştirmeye Genel Bakış	9
2.3.1. Füzyon Birleştirme.....	10
2.3.2. Mekanik Birleştirme.....	16
2.3.3. Yapıştırıcıyla Birleştirme	17
2.3.4. Katı Hal Birleştirme	18
2.3.5. Ultrasonik Metal Kaynağı.....	20
2.3.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	23
2.4. Alüminyum Alaşımaları İçin Geleneksel Kaynak Metodları	29
2.5. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı.....	29
2.5.1. Yeniden Doldurulmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı.....	33
2.5.2. Dikiş Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	35
2.5.3. Salınlı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	35
2.5.4. Pimsiz Kaynak Takımı Kullanılarak Yapılan Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı	36
2.6. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Geleneksel Kaynak Metodlarının Karşılaştırılması	36
2.7. Kaynak Araştırması.....	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM	67
3.1. Deney Malzemesi ve Özellikleri.....	67
3.2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Kullanılan Kaynak Takımı ve Özellikleri.....	68
3.3. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Kullanılan Kaynak Parametreleri	69
3.4. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Uygulaması	70
3.5. Mekanik Testlerin Yapılışı.....	72
3.5.1. Kesme Makaslama Testi ve Uzama Ölçümlerinin Yapılışı	72
3.5.2. Mikro Sertlik Testinin Yapılışı	73
3.6. Kırılma Morfoloji Analizlerinin Yapılışı	75
3.6.1. Makroyapı Analizlerinin Yapılışı	75
3.6.2. Mikroyapı Analizlerinin Yapılışı	76
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	77

4.1. Mekanik Testler	77
4.1.1. Kesme Makaslama Testi	77
4.1.2. Uzama Ölçümleri	79
4.1.3. Mikro Sertlik Testi	81
4.2. Kırılma Morfoloji Analizi	83
4.2.1. Makroyapı Analizi	83
4.2.2. Mikroyapı Analizi	88
5. SONUÇ.....	98
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	103



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
D1350	1350 dev/dk takım devir hızı ve pimsiz kaynak takımı kullanılarak birleştirilen deney grupları
D1850	1850 dev/dk takım devir hızı ve pimsiz kaynak takımı kullanılarak birleştirilen deney grupları
D2530	2530 dev/dk takım devir hızı ve pimsiz kaynak takımı kullanılarak birleştirilen deney grupları
P1350	1350 dev/dk takım devir hızı ve vida dişsiz dairesel pimli kaynak takımı kullanılarak birleştirilen deney grupları
P1850	1850 dev/dk takım devir hızı ve vida dişsiz dairesel pimli kaynak takımı kullanılarak birleştirilen deney grupları
P2530	2530 dev/dk takım devir hızı ve vida dişsiz dairesel pimli kaynak takımı kullanılarak birleştirilen deney grupları

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Aluminum Alloy (Alüminyum Alaşım)
AC	Alternating Current (Alternatif Akım)
Al	Alüminyum
AM	Ana Malzeme
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
BS	British Standards (İngiliz Standartları)
Büy.	Büyütme
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DNK	Direnç Nokta Kaynağı
EDNK	Elektrik Direnç Nokta Kaynağı
EN	European Standards (Avrupa Standartları)
FSSW	Friction Stir Spot Welding (Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı)
HRC	Hardness of Rockwell (Rockwell Sertliği)
HV	Hardness of Vickers (Vickers Sertliği)
IEB	Isıdan Etkilenen Bölge
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
KB	Karıştırma Bölgesi
MİG	Metal İnert Gaz
RSW	Resistance Spot Welding (Direnç Nokta Kaynağı)
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKNK	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
TEB	Termomekanik Etkilenen Bölge
TİG	Tungsten İnert Gaz
TWI	The Welding Institute (İngiliz Kaynak Enstitüsü)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. (a) Ayrılma mesafesi ile bağlanma kuvvleri ve (b) ayrılma mesafesi ile atomik bağdaki bağ enerjileri arasındaki ilişkinin şematik grafiği	8
Şekil 2.2. Direnç nokta kaynağının şematik gösterimi	11
Şekil 2.3. Lazer kaynağının şematik gösterimi	13
Şekil 2.4. TİG kaynağının şematik gösterimi (a) çeşitli çalışma modlarının özelliklerini ve (b) dolgu teliyle su soğutmalı elektrot konfigürasyonunu gösterir	15
Şekil 2.5. (a) Kendinden geçmeli perçin ve (b) clinching tekniklerinin şematik diyagramları	17
Şekil 2.6. Difüzyonla birleştirme için tipik bir konfigürasyon	19
Şekil 2.7. (a) Çift sonotrot makinesi, (b) tek sonotrot makinesi için tipik ultrasonik kaynak ekipman kurulumu	20
Şekil 2.8. Aynı metallerin ultrasonik kaynağında kaynak mukavemeti ile kaynak enerjisinin genelleştirilmiş değişimi	22
Şekil 2.9. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin şematik çizimi.....	24
Şekil 2.10. SKK için birleştirme konfigürasyonları: (a) Alın kaynağı, (b) Kenar alın kaynağı, (c) T alın kaynağı, (ç) Bindirme kaynağı, (d) Çoklu bindirme kaynağı, (e) T bindirme kaynağı ve (f) Köşe kaynağıdır.....	25
Şekil 2.11. SKK'nin tipik bölgeleri (A: Ana Malzeme, B: IEB, C: TEB, D: Nugget)...	26
Şekil 2.12. SKK takımının şematik çizimi.....	28
Şekil 2.13. TWI tarafından tasarlanan bazı takımlar.....	28
Şekil 2.14. TWI tarafından tasarlanan bazı omuz geometrileri	28
Şekil 2.15. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin şematik gösterimi (A: Daldırma, B: Karıştırma, C: Geri çekme)	30
Şekil 2.16. Sürtünme karıştırma nokta kaynağına ilişkin tipik bir örneğin enine kesit görünüşü.....	32
Şekil 2.17. Mazda RX-8 spor arabasının kapı sacı ve gövde sacı üzerinde yapılan SKNK uygulamasına ilişkin örnekler; (a) gövde paneli ve (b) yan kapı panelidir... 33	33
Şekil 2.18. Yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının temel prensibi; (a) Birinci Adım, (b) İkinci Adım, (c) Üçüncü Adım ve (ç) Dördüncü Adım	34
Şekil 2.19. Dikiş sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin şematik gösterimi.....	35
Şekil 2.20. Salınlımlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin şematik gösterimi..	36
Şekil 2.21. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminde kullanılan pimsiz takımlar... 36	36
Şekil 2.22. Al 5754 (üstte) - Al 7075 (altta) ve Al 5754 (altta) - Al 7075 (üstte) numune kombinasyonları için proses süresinin bir fonksiyonu olarak kırılma yükleri	40
Şekil 2.23. Esas metal, SKNK-1, SKNK-2, DNK-1 ve DNK-2 kaynak bağlantılarının kesme makaslama yükü değişimi.....	41
Şekil 2.24. SKNK takım geometrilerinin şematik gösterimi: (a) konkav omuz geometrili silindirik pimli takım, (b) düz omuz geometrili silindirik pimli takım, (c) konveks omuz geometrili silindirik pimli takım, (ç) konkav omuz geometrili silindirik pimli takım ve (d) konkav omuz geometrili üçgen pimli takım (Bütün pimlerin yüksekliği 1,6 mm'dir ve silindirik pimlerde M5 diş vardır; fakat üçgen pimde diş yoktur).....	42
Şekil 2.25. Numunelere ait maksimum kesme makaslama kuvveti değişimleri.....	43

Şekil 2.26. Bakır ara tabakalı ve ara tabakasız deney konfigürasyonlarının kesme makaslama yük değerleri	45
Şekil 2.27. DNK ve SKNK kaynaklı bağlantıların kesme makaslama mukavemetinin karşılaştırılması	46
Şekil 2.28. Takım devir hızının, 3 mm/s dalma oranında ve 2 s bekleme süresinde elde edilen kırılma mukavemetine etkisi	48
Şekil 2.29. Takım dalma hızının, 2000 dev/dk takım devir hızında ve 2 s bekleme süresinde elde edilen kırılma yüklerine etkisi.....	48
Şekil 2.30. (a) Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta) ve (b) Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonlarının karıştırma bölgesindeki magnezyum dağılımları	49
Şekil 2.31. (a) Al 5052 (üstte) - Al 5052 (altta), (b) Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta), (c) Al 6061 (altta) - Al 6061 (üstte) ve (d) Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonlarının Vickers sertlik dağılımı	50
Şekil 2.32. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynaklanmış Mg (üstte) - Mg (altta) levha numunlerinin kaynak hattı boyunca tipik mikrosertlik profili ((a) Karıştırma bölgesi (KB), (b) Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB), (c) Isıdan etkilenen bölge (IEB) ve (d) Ana metal (AM))	51
Şekil 2.33. Farklı takım tasarımları.....	52
Şekil 2.34. Al 5754/Al 6111 bindirmeli bağlantılarda kırılma yükü özellikleri ile takım dönme hızı arasındaki ilişki	52
Şekil 2.35. Deney numunelerinin kaynaklama pozisyonları: (a) Al 5754 (altta) - Al 2024 (üstte) (durum 1) ve (b) Al 5754 (üstte) - Al 2024 (altta) (durum 2).....	54
Şekil 2.36. Takım eğim açısı ve bekleme süresinin, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynaklanan birbirine benzemeyen bağlantıların kesme makaslama kırılma yükü üzerindeki etkisi (Takım dalma derinliği 2,65 mm)	55
Şekil 2.37. Birçok bekleme süresinde, takım devir hızı ile maksimum kuvvetin değişimi	56
Şekil 2.38. Farklı bekleme süresinde, takım devir hızı ile tamamen metalürjik olarak birleşen bölgenin maksimum genişliğinin değişimi.....	57
Şekil 2.39. Farklı takım tasarımları.....	58
Şekil 2.40. Her iki konfigürasyon için penetrasyon derinliğinin: (a) etkin kaynak kaynak genişliği ve (b) kanca yüksekliği üzerindeki etkileri	60
Şekil 2.41. Takımların geometrisi ve vida dişleri konumu	61
Şekil 2.42. SKNK takım profili ve pim boyutu: (a) vida dişli oluklu silindirik, (b) konik silindirik ve (c) düz silindirik.....	62
Şekil 2.43. Devir hızının maksimum çekme mukavemeti üzerine etkisi.....	63
Şekil 2.44. Levha numunelerinin kaynaklama konumlandırılması: P tipi, C tipi ve M tipi	65
Şekil 2.45. Kırılma yükü ve kırılma enerjisi sonuçları	66
Şekil 3.1. Deney numunesinin (a) boyutları ve (b) fotoğrafı	67
Şekil 3.2. A tipi takımın (a) boyutları ve (b) fotoğrafı.....	68
Şekil 3.3. B tipi takımın (a) boyutları ve (b) fotoğrafı.....	69
Şekil 3.4. Kaynak aparatı (a, b) şematik gösterimi ve (c) fotoğrafı.....	71
Şekil 3.5. Numunelerin kaynak konumunun (a) izometrik görünüşü, (b) üstten görünüşü ve yandan görünüşü	71
Şekil 3.6. (a) UTEST markalı çekme basma test cihazı, (b) ekstansometre	73
Şekil 3.7. Bakalitli numunelerin fotoğrafları	74

Şekil 3.8. Metkon markalı Vickers mikro sertlik test cihazı.....	74
Şekil 3.9. Numunenin mikro sertlik ölçüm noktaları; (a) A tipi kaynak takımı ile yapılan kaynaklar ve (b) B tipi kaynak takımı ile yapılan kaynaklar	75
Şekil 3.10. ZEISS EVO 40 markalı taramalı elektron mikroskobu	76
Şekil 4.1. Bütün deney konfigürasyonları için elde edilen kesme makaslama yükleri...	77
Şekil 4.2. Bütün deney grupları için elde edilen uzamalar	79
Şekil 4.3. Vickers sertlik değerleri; (a) A tipi kaynak takımı ile yapılan kaynaklar ve (b) B tipi kaynak takımı ile yapılan kaynaklar.....	81
Şekil 4.4. Kırılmış kaynak bağlantılarının kırılma modları (A: Mod 1 (Kesme Kırılması), B: Mode 2 (Karma Klivaj Kırılması), C: Mode 3 (Nugget Çekme Kırılması))	84
Şekil 4.5. Pimli kaynak takımı ile yapılan SKNK işleminin (a) enine kesit görünüşü ve (b) nugget alanı ve karıştırma bölgesinin üstten görünüşü	86
Şekil 4.6. Pimsiz kaynak takımı ile yapılan SKNK işleminin (a) enine kesit görünüşü ve (b) nugget alanı ve karıştırma bölgesinin üstten görünüşü	87
Şekil 4.7. P1850 test numunesinin (a) üst levha arka yüzeyinin ve (b) A, B, C, D, E, F ve G noktalarının mikrografları	89
Şekil 4.8. P1850 test numunesinin (a) alt levha üst yüzeyinin ve (b) A, B, C, D ve E noktalarının mikrografları	91
Şekil 4.9. D1850 test numunesinin (a, b) üst levha arka yüzeyinin ve (c) A, B, C, D, E, F, G ve H noktalarının mikrografları.....	93
Şekil 4.10. D1850 test numunesinin (a, b) alt levha üst yüzeyinin ve (c) A, B, C, D, E ve F noktalarının mikrografları.....	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Alüminyumun genel özellikleri	3
Çizelge 2.2. Alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve endüstriyel kullanım alanları..	4
Çizelge 2.3. SKNK için en önemli işlem parametreleri.....	30
Çizelge 3.1. Alüminyum 5754 alaşımının kimyasal bileşimi	67
Çizelge 3.2. Alüminyum 5754 alaşımının mekanik özellikleri	67
Çizelge 3.3. Takım çeliğinin kimyasal bileşimi.....	68
Çizelge 3.4. SKNK işlem parametreleri.....	70
Çizelge 3.5. SKNK işleminin tüm deney konfigürasyonları	70
Çizelge 3.6. Deney konfigürasyonları için imal edilmiş numuneler.....	72
Çizelge 4.1. Bütün deney konfigürasyonları için kesme makaslama yük değerleri	78
Çizelge 4.2. Bütün test grupları için uzama değerleri.....	80
Çizelge 4.3. Bütün deney konfigürasyonları için maksimum ve minimum sertlik değerleri	82

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde, güvenlik performansını etkilemeden yakıt ekonomisini iyileştirmek ve emisyonları azaltmak için ağırlık azaltmak büyük bir zorluktur. Yapılan çalışmalarda, araç ağırlığındaki her % 10'luk düşüş için yakıt tüketiminin % 5,5 azaltılabildiği ve bir aracın ağırlığındaki 0,45 kilogramlık bir azalmanın, araç ömrü boyunca karbondioksit emisyonlarını 9,07 kilogram azaltacağı rapor edilmiştir. Bir otomobil, genellikle sürüş sistemi, motor sistemi ve egzoz sistemini barındıran çelikten yapılmış bir şasi ve dış panellerden oluşur. Şasi ağırlığı bir otomobilin toplam ağırlığının % 70'i kadardır (Yuan 2008).

Çelik, geniş yelpazedeki beğenilen özellikleri, işlem kolaylığı, bulunabilirliği ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle otomotiv endüstrisinde geniş çapta uygulanmaktadır. Ancak, alüminyum gibi hafif malzemeler çelik ile karşılaştırıldığında çelik daha avantajlı görünmesine rağmen alüminyum yaklaşık üç kat daha düşük yoğunluklu, yüksek korozyon direnci ve % 85-95'e ulaşan geri dönüşüm derecesine sahiptir. Alüminyum alaşımları, çelik yerine kullanılmaya güçlü bir adaydır ve son zamanlarda otomotiv üreticileri alüminyum kullanımını giderek arttırmaktadırlar (Yuan 2008).

Otomobilin yapısında alüminyum ile çeliğin yer değiştirmesi için verimli olarak kullanılabilen kaynak metodlarının keşfedilmesine ihtiyaç vardır. Mevcut kaynak teknikleri; nokta direnç kaynağı ve kendinden geçmeli perçinler kullanılmaktadır. Ancak, özellikle de yüzey oksit film tabakası gibi fiziksel özelliklerinden dolayı bu birleştirme teknikleri alüminyum alaşımlarına kolaylıkla uygulanamaz. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK), alüminyum alaşımlarını birleştirmek için bir katı hal metodu olarak 1991 yılında 'The Welding Institute (TWI) (Abington, Birleşik Krallık)' tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağının türevidir. Bu bilinen birleştirme mekanizmasının çatlak, porozite, kabargıç, kirletici oluşturmaması alüminyum birleştirme teknikleri için avantajdır (Yuan 2008).

Sürtünme karıştırma nokta kaynağının, otomotiv ve diğer ilgili endüstrilerde ağırlık azaltma uygulamalarındaki potansiyeli nedeniyle birçok sektörde yaygınlaşabilir. Bu

Çalışmada, bu kaynak yöntemine ait araştırılmamış parametrelerin incelenerek literatüre kazandırılmasını hedeflenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda, 1 mm kalınlığındaki alüminyum 5754 alaşımı levha numuneleriyle altı farklı deneysel konfigürasyon oluşturulmuştur. Bu konfigürasyonlar, literatürde yer alan çalışmalarda kullanılmamış olan  farklı takım devir hızı ve en yaygın kullanılan iki farklı kaynak takımı geometrisiyle sürtünme karıştırma nokta kaynağı metodu kullanılarak kaynaklanmıştır. Ardından, kaynak bağlantıları üzerinde kesme makaslama testi, mikro sertlik testi ve kırılma morfoloji analizi yapılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Alüminyum ve Alüminyum 5000 Serisi Alaşım

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, soda kutuları ve ev ocaklarından otomotiv ve uçak yapılarına kadar modern yaşamda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek süneklik, mükemmel şekillenebilirlik ve yüksek korozyon direnci özelliklerine sahip olması taşıtlarda özellikle sürgülü kapı, motor kaputu, bagaj kapağı gibi kaporta panelleri için kullanımında umut verici adaylar olmasını sağlamaktadır (Yuan 2008). Alüminyumun genel özelliklerine ilişkin bilgiler Çizelge 2.1’de yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Alüminyumun genel özellikleri (Kahraman 2009’dan değiştirilerek alınmıştır)

Atom ağırlığı	26,97
Yoğunluğu (20°)	2,70
Kristal kafes yapısı	KYM (Kübik Yüzey Merkezli Yapı)
Ergime sıcaklığı	659,8 °C
Ergime ısısı	93 cal/g
Isıl iletkenliği (20°C)	0,52 (cm)(cal)/(cm ²)(s)(°C)
Özgül ısısı	0,2259 cal/g °C
Isıl genleşme katsayısı	(23,8)(10 ⁻⁶)/°C
Akma mukavemeti	100 - 300 N/mm ²
Sertlik (HB25)	120 - 200
Çekme mukavemeti	400 - 900 N/mm ²
Elektrik direnci (20°C)	2,699 aQ(cm)
Kopma uzaması	% 35 - 45
Elastiklik modülü	72 000 N/mm ²

Alüminyum alaşımları; elektrik iletkenleri üretiminde, bina kaplamaları, kimya ve gıda endüstrisinde saf alüminyum, alüminyum mutfak eşyaları, taşıt, havacılık ve makina imalat endüstrisinde de yaygın bir kullanma alanına sahiptir. Alüminyum ve alüminyum

alaşımlarının kullanıldığı başlıca endüstriyel alanlar Çizelge 2.2’de yer almaktadır (Kahraman 2009).

Çizelge 2.2. Alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve endüstriyel kullanım alanları (Kahraman 2009’ dan değiştirilerek alınmıştır)

Alüminyum Alaşımı	Endüstriyel Kullanım Alanları	Ürün Biçimi
Saf alüminyum	Depolama tankları ve düşük mukavemetli korozyona dirençli kazan yapımı, çatı kaplama, folyo ve ambalaj malzemesi, zırlama.	Ekstrüzyon ürünleri, haddelenmiş levha, folyo.
2000 serisi (Al-Cu alaşımları)	Silindir kafaları, taşıt tekerlek jantları, ağır dövme parçalar, havacılık ve uzay araçlarında kullanılan yapısal elemanlar, pistonlar, çok yüksek zorlanmaya maruz parçalar.	Dövme parçalar, ekstrüzyon ürünleri, haddelenmiş levha ve sac.
3000 serisi (Al-Mn alaşımları)	Kimyasal madde varilleri ve tankları, çatı kaplama ve zırlama, kimyasal madde ve gıda taşıma ekipmanları, ambalaj malzemesi.	Dövme parçalar, ekstrüzyon ürünleri, haddelenmiş levha ve sac.
4000 serisi (Al-Si alaşımları)	Supap gövdeleri, silindir kafaları, mimari amaçlı kullanılan elemanlar, motor blokları, kaynak telleri.	Döküm parçalar, tel.
5000 serisi (Al-Mg alaşımları)	Tren vagonu, yapısal elemanlar, kazan ana yapı levhaları, mimari amaçlı kullanılan elemanlar, otomobil, güçlü yapı elemanları, zırlama, kazanlar ve depolama tankları.	İçi boş elemanlar ve borular, dövme parçalar, ekstrüzyon ürünleri, haddelenmiş levha ve sac.

Çizelge 2.2. Alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve endüstriyel kullanım alanları (Kahraman 2009'dan değiştirilerek alınmıştır) (devam)

6000 serisi (Al-Si-Mg alaşımları)	Tren vagonu, mimari amaçlı kullanılan elemanlar, otomobil, deniz taşıtları ve deniz üstü yapı elemanları, yüksek mukavemetli yapı elemanları.	İçi boş elemanlar ve borular, dövme parçalar, ekstrüzyon ürünleri, haddelenmiş levha ve sac.
7000 serisi (Al-Mg-Zn alaşımları)	Zırh levhaları, ağır taşıt ve vagonlarda kullanılan ekstrüzyon ürünleri, uçaklarda kullanılan kalın kesitli dövme parçalar, askeri köprüler, yüksek mukavemetli yapı elemanları.	Dövme parçalar, ekstrüzyon ürünleri, haddelenmiş levha ve sac.

Alüminyum 5000 serisi alaşımlar ısıtıl işlem uygulanamayan seridir. Çekme mukavemet değerleri 124-352 N/mm² arasındadır. Bu seride bulunan alaşımlar alüminyum - magnezyum alaşımlarıdır. Kimyasal bileşimlerdeki magnezyum oranı % 0,2-6,2 arasındadır. Isıl işlem uygulanamayan alaşımların mukavemet değerleri değerlendirildiğinde en yüksek mukavemet değerine bu seri sahiptir (Kahraman 2009).

Basıncılı kaplar, binalar, gemi yapımı, köprüler ve taşımacılık gibi uygulamalarda, alüminyum 5000 serisinde yer alan alaşımların sahip olduğu kolay kaynak edilebilme özelliğinden dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar (Kahraman 2009).

2.1.1. Otomotiv Endüstrisinde, Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Otomobillerde bulunan bileşenler alüminyumdan üretilmektedir ve alüminyumun; geri dönüşümü, yakıt verimini artırması ve korozyon direnci gibi çevresel konular nedeniyle kullanımını artmaktadır (Kahraman 2009).

Otomobillerin ana yapısal koponentlerinden olan şaft, ön ve arka süspansiyon, tekerlek ve motor blokları gibi bileşenler tamamen alüminyumdan üretilebilmektedir. Ayrıca, klima parçaları, radyatör ve ısı eşanjörleri gibi yapısal olmayan koponentler de alüminyumdan üretilebilmektedir (Kahraman 2009).

Alüminyum alaşımlarının otomobillerde kullanılmasıyla, araçların çarpışmalarda daha iyi performans göstermesini sağlamakta ve ölümlü kazaların önlenmesine de yardımcı olmaktadır. Alüminyumlar ile çelikler kıyaslandığında, aynı mukavemet değerlerine sahip yapılarda alüminyumunların ağırlıkları çelilere göre % 45 daha düşüktür. Otomobilin toplam ağırlığında meydana gelen ağırlık düşüşleri, çarpışmalarda absorbe edilmesi gereken kinetik enerji miktarını düşürür (Kahraman 2009).

2.1.2. Gemi ve Taşımacılık Yapım Endüstrisinde, Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Hızlı feribot projelerinde, deniz taşımacılığı sektöründe alüminyumun kullanımına bağlı olarak ilerlemeler ortaya çıkmıştır. Hızlı feribotlar ifadesi dalga kıran sallar, tek veya çok bölmeli gemiler, kargo yükü ve büyük yolcu yüküne sahip yüksek hızlarda taşımacılık yapan küçük gemiler için kullanılmaktadır. Yüksek hızlı deniz taşıtlarının üretiminin gelişmesini, alüminyumun sahip olduğu korozyon direnci ve düşük ağırlık / yüksek mukavemet oranı mümkün kılmaktadır (Kahraman 2009).

Taşıma araçları, otomotiv sektöründeki sebeplere benzer olarak tasarım aşamasında daha çok alüminyum içerecek şekilde tasarlanmakta ve imal edilmektedirler (Kahraman 2009).

2.1.3. Savunma ve Havacılık Endüstrisinde, Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

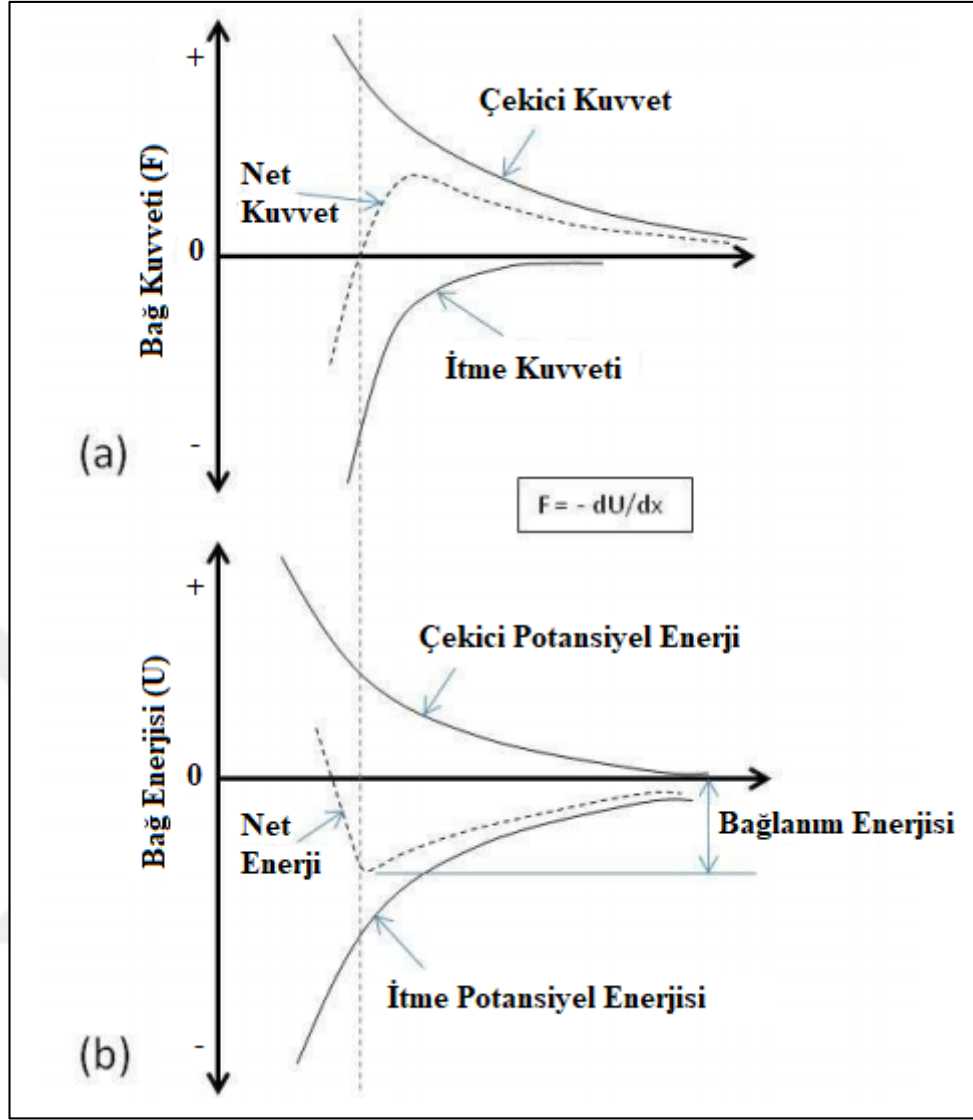
Savunma ve havacılık endüstrilerinde, ısıl işlem uygulanamayan mukavemeti yüksek olan 5000 serisi alüminyum alaşımlar bazı uygulamalarda kullanılmakta; fakat ısıl işleme tabi tutulabilen üstün mekanik özelliklere sahip olan bazı özel tür alüminyum alaşımlar da tercih edilmektedirler.

Havacılık sektöründe, iyi mukavemet özelliklerini geniş bir sıcaklık yelpazesinde gösteren 7075, 2090, 2024, 2014 ve 2219 alüminyum alaşımları kullanılmaktadırlar. Bu alüminyum alaşımlar yüksek performans uygulamalarında tercih edilmektedirler.

2.2. Kaynak Teorisi

Aynı tür bağ yapısına sahip iki malzemeyi yeterince yakın bir yere getirmek, malzemelerin atomları ve molekülleri arasındaki kuvvetlerin dengelenmesini sağlar. Bu, genellikle basınç ve ısı kombinasyonu ile sağlanır. Bu atomik yakın temas seviyesinin elde edilmesi aynı zamanda oksitler gibi tüm kirletici maddelerin birleşme hattından uzaklaştırılmasını gerektirir; fakat doğal olarak, birleştirilen malzemelerde bulunanla aynı tipte bağların oluşması ile sonuçlanacaktır (yani metaller metalik bağlar oluşturur). Atomların, iyonların veya moleküllerin bir seviyeye kadar ara difüzyonu, bu işlem esnasında yüksek sıcaklıkların ve basınçların uygulanmasının doğal bir sonucu olarak; sıvılar, katılar veya sıvı ve katıların kombinasyonları arasında meydana gelir (Panteli 2012).

Atomlar diğer atomlara yaklaştığı zaman, dipolar bağlar atomlar arasındaki elektrostatik çekimi oluşturan etkidir. Bu çekim bir araya geldiklerinde daha da artmaktadır. Buna karşın, atomları çevreleyen negatif yüklü elektronlar da yaklaşır ve bu, artan bir elektrostatik itme gücü yaratır. Çekici ve itici güçlerin dengelendiği (yani net kuvvet = 0) ve net potansiyel enerjinin minimumda olduğu bir denge vardır (Şekil 2.1). Bu denge ayrılma mesafesinde, elektronların atomlar arasında paylaşılması veya transferi stabil bir konfigürasyon ile sonuçlanır ve malzemeleri birbirine kaynaklamak için gerekli olan, atomik olarak temiz bir arayüzey ile birlikte bu yakınlıktır (Panteli 2012).



Şekil 2.1. (a) Ayrılma mesafesi ile bağlanma kuvvetleri ve (b) ayrılma mesafesi ile atomik bağdaki bağ enerjileri arasındaki ilişkinin şematik grafiği (Panteli 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Mükemmel temizliğe sahip iki malzeme eşit uzaklığa getirilirse ve yüzeyleri mükemmel bir şekilde düz ise, arayüzeyleri boyunca bağlar oluşturacaklar; kaynak çizgisi kalıntısı olmadan ve kaynak bölgesinde dökme malzemelere eşdeğer özellikler ile mükemmel bir şekilde kaynaklanacaklardır (yani, % 100 kaynak verimliliği). Bu idealize edilmiş durum, hiçbir malzeme atomik olarak düz olmadığı için gerçekleşmez. Bu nedenle, malzemeler bir araya getirildiğinde başlangıçta yalnızca yüzeylerindeki ayırık ve düzensiz noktalara temas ederler. Messler (2004), bu yüzey düzensizlikleri nedeniyle iyi işlenmiş ve parlatılmış iki yüzey içinde her milyar atomda yalnızca bir tanesinin diğer atoma eşit

uzaklıkta var olabileceğini belirtmektedir. Eğer eşit uzaklık elde edilecekse, oksit ve absorbe katmanlar da kaynaklanacak malzemelerin yüzeylerindeki atomlar arasında bir bariyer oluşur ve bu bariyerin ortadan kaldırılması gerekir. Gerçekte, ana malzemelerin mukavemetinin sadece milyarda birine sahip olan bir birleştirme yeri kullanışsızdır; bu nedenle daha fazla atomik temas gereklidir. Bu, ısı veya basınç uygulayarak veya her ikisiyle elde edilir. Isı ve basıncın her ikisi, yüzeyde adsorbe edilmiş gaz veya nemi uzaklaştırarak veya düzenini bozarak ve oksit katmanını parçalayarak yardımcı olur. Isıtma, plastik deformasyonun basınç altında gerçekleşmesi ve atomların yaklaşmasına izin verecek kadar akma mukavemetini azaltmak için de gereklidir. Bazı kaynak türlerinde malzemeyi eritmek için yeterli ısı uygulanır (füzyon kaynağı gibi). Bu durumda; sıvı madde içindeki atomlar, genellikle dolgu malzemesi eklenmesine yardımcı bir durum olan eşit uzaklık ile yeniden düzenlenebilir ve katılabilir. Kaynağa baskı uygulamak, pürüzlerin plastik olarak deforme olmasına ve temas alanının artmasına neden olur. Sürtünme birleştirmesinde oksit tabakasını parçalamak için deformasyon da kullanılır (Panteli 2012).

2.3. Birleştirmeye Genel Bakış

Günümüzde araba gövdesi üretimi, çelik kaporta yapısını bir arada tutan yaklaşık 3000 ayrı nokta kaynağına dayanmaktadır. Çelik için birleştirme teknolojisi olarak, sağlam ve düşük maliyetli, direnç nokta kaynağı (DNK) tekniği on yıllar boyunca kullanılmıştır. Buna karşılık alüminyumun kaynaklanması, yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip bir yüzey oksit tabakası oluşumu nedeniyle zordur. Kaynak bölgesinin ergime sıcaklığı üzerinde stabil bir sıcaklığa sahip olabilmesi için oksit tabakasının kırılması gerekmektedir (Panteli 2012).

Birleştirme teknikleri füzyon birleştirme, mekanik birleştirme yapııştırıcıyla birleştirme, katı hal birleştirme, ultrasonik metal kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) olarak sınıflandırılabilir.

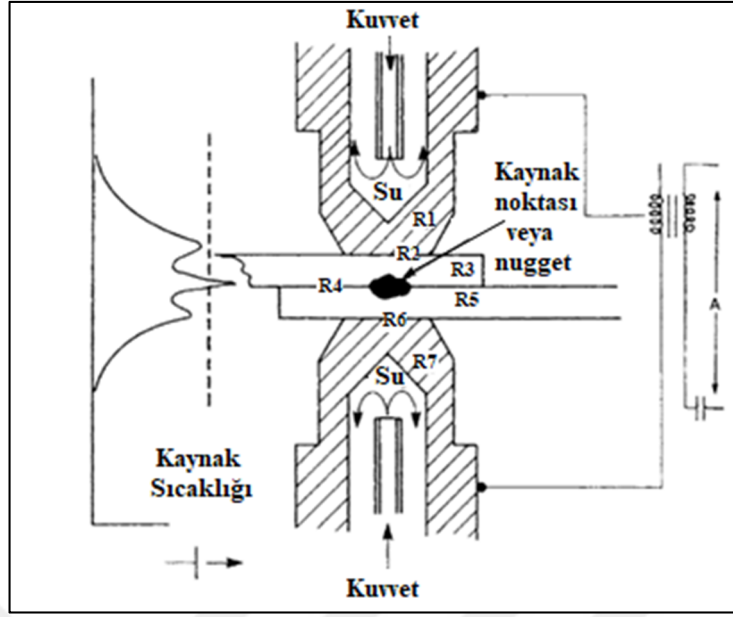
2.3.1. Füzyon Birleştirme

Füzyon birleştirme, direnç nokta kaynağı, lazer kaynağı ve ark kaynağı gibi çeşitli teknikleri kapsar. Bütün füzyon teknikleri komponent üzerine ısı kaynağı uygular ve onları kontak alanından ertirir. Sonuç olarak komponentler birleşik bir şekilde tekrar katılaşırlar. Farklı füzyon tekniklerinde farklı ısı kaynakları kullanır ve kaynak kalitesi ısıtma hızına, maksimum sıcaklığa, yüksek sıcaklıktaki zamanın uzunluğuna ve soğutma oranına bağlıdır; çünkü bu faktörler ertime havuzunun boyutunu ve katılaşmış bağlantının mikroyapısını belirler (Panteli 2012).

Direnç Nokta Kaynağı

Direnç nokta kaynağı, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan iyi bilinen bir işlemdir. Devrenin bir parçasını oluşturan iş parçasından bir elektrik akımı geçirilir (şekil 2.2). İş parçası içindeki direnç, üst üste bindirilmiş iki lehvanın bağlanma noktasını ertirmek ve levhaların bu arayüzde birleşmesi için yeterli ısı üretir. Kaynak, temas direncinin en yüksek olduğu ve en fazla ısının üretileceği noktada gerçekteşecektir (Panteli 2012).

Eriyik havuzu genellikle katı maddeye göre genişler ve levhalara bir kenetleme kuvveti uygulanarak levhalar tutulur. Uygulanan bu kenetleme işlemi, iş parçaları arasında iyi temasın sürdürülmesine de hizmet etmektedir. Elektrotların şekillerinin mevcut konsantrasyonu etkilemesi ve kenetleme kuvvetinin elektrotlar üzerinden uygulanması bu işlem için elektrotların çok önemli olduğunu göstermektedir. Bir kaynak oluşturmak için, tipik olarak 0,5 saniyenin altındaki kısa kaynak zamanlarında birkaç bin amperlik bir akım uygulanır (Panteli 2012).



Şekil 2.2. Direnç nokta kaynağının şematik gösterimi (Panteli 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Kaynak noktasına iletilen ısı miktarı; elektrotlar arasındaki direnç, ısı kaybı faktörü, akımın genliği ve süresi ile belirlenir. DNK işlemi esnasındaki ısı üretim formülü (Yuan 2008):

$$H = I^2 R T K \quad (2.1)$$

Bu denklemdenki değişkenler;

I: Kaynak üzerinde amper cinsinden geçen akım,

R: Bir elektrottan diğer elektrota Ohm cinsinden direnç,

T: Saniye cinsinden akım süresi,

K: Isı kaybı faktörüdür.

Sağlıklı bir kaynak için ihtiyaç duyulan enerjinin miktarı; elektrodun tipinin, sac metal malzemenin özelliklerinin ve kalınlığının değişimiyle değişir. Çok az veya çok fazla ısı iyi bir birleştirme sağlamaz. Çok az ısı ergime eksikliğine ve kötü kaynak yapılmasına neden olur. Çok fazla ısı, çok fazla malzeme ertirir ve kaynak yapmak yerine bir delik açar (Yuan 2008).

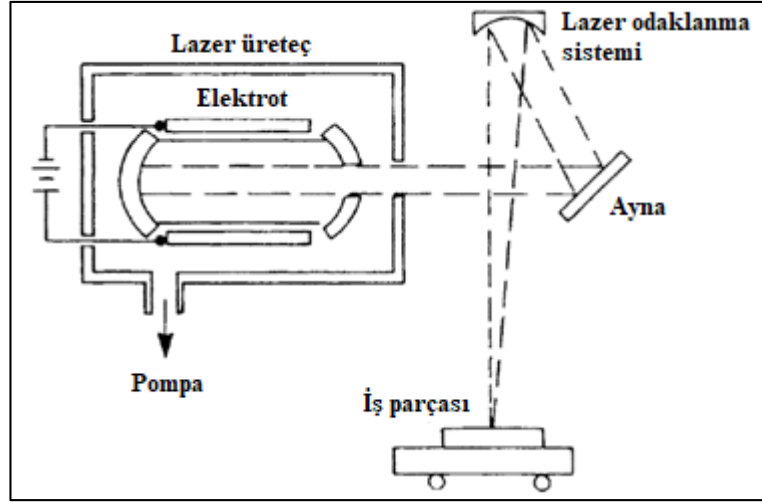
Günümüzde, DNK metodu; otomotiv endüstrisinde 3 mm kalınlığa kadar üst üste bindirilen araç çelik gövde parçalarını, hızlı ve ucuz bir şekilde kaliteli kaynaklarla birleştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda bazı avantajlar göstermektedir: iş parçasında çarpılmanın kısıtlanması, yüksek üretim oranları ve kolay otomasyon. Buna karşın, DNK metodunun alüminyum alaşımlı levhalara uygulanmasının birçok dezavantajı vardır; yüksek ısı girişi, gözeneklilik, çatlaklar. Ayrıca, DNK işlemi esnasında şiddetli elektrot ucu aşınma problemiyle karşılaşmaktadır (Yuan 2008).

Bu teknik çeliğin nokta kaynağı için yaygın olarak kullanılmasına rağmen, alüminyuma uygulamak daha zordur. Asıl sorun, alüminyumun iletkenliğidir ve bu nedenden dolayı elektrot, alüminyuma yapışma eğilimindedir. Bu gerekçeye bağlı olarak sürekli bakım gerektiren bir işlemdir. Tipik bir alüminyum otomotiv alaşımını (Al 6061) kaynaklamak için çeliği birleştirmek için gereken akımdan üç kat daha yüksek olan bir akıma gereksinim duyulur. Daha yüksek bir kenetleme kuvveti de gereklidir. Alüminyumların kaynak işlemi sırasında elektrotlara uygulanan yüksek kenetleme kuvvetleri nedeniyle elektrotlar, çeliklerdeki uygulamalara kıyasla çok daha hızlı bir şekilde aşınırlar ve buna bağlı olarak daha sık düzeltilmelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Panteli 2012).

Genel olarak, direnç nokta kaynağı metodu alüminyum kaynağına uygulanabilecek bir işlemdir. Elektrot bozulma oranı, düşük iletkenliğe sahip olan bir kapak plakası kullanılarak yavaşlatılabilir (Panteli 2012).

Lazer Kaynağı

Lazer kaynağında konsantre ısı kaynağı olarak optik lensler kullanılarak 1012 W/m^2 mertebesinde oluşturulan yüksek yoğunluklu bir foton ışını kullanılır. Fotonlar iş parçasına çarptığında, hızla küçük bir alanı ısıtırlar. Lazer Kaynağının şematik gösterimi Şekil 2.3'de gösterilmiştir (Panteli 2012).



Şekil 2.3. Lazer kaynağının şematik gösterimi (Panteli 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

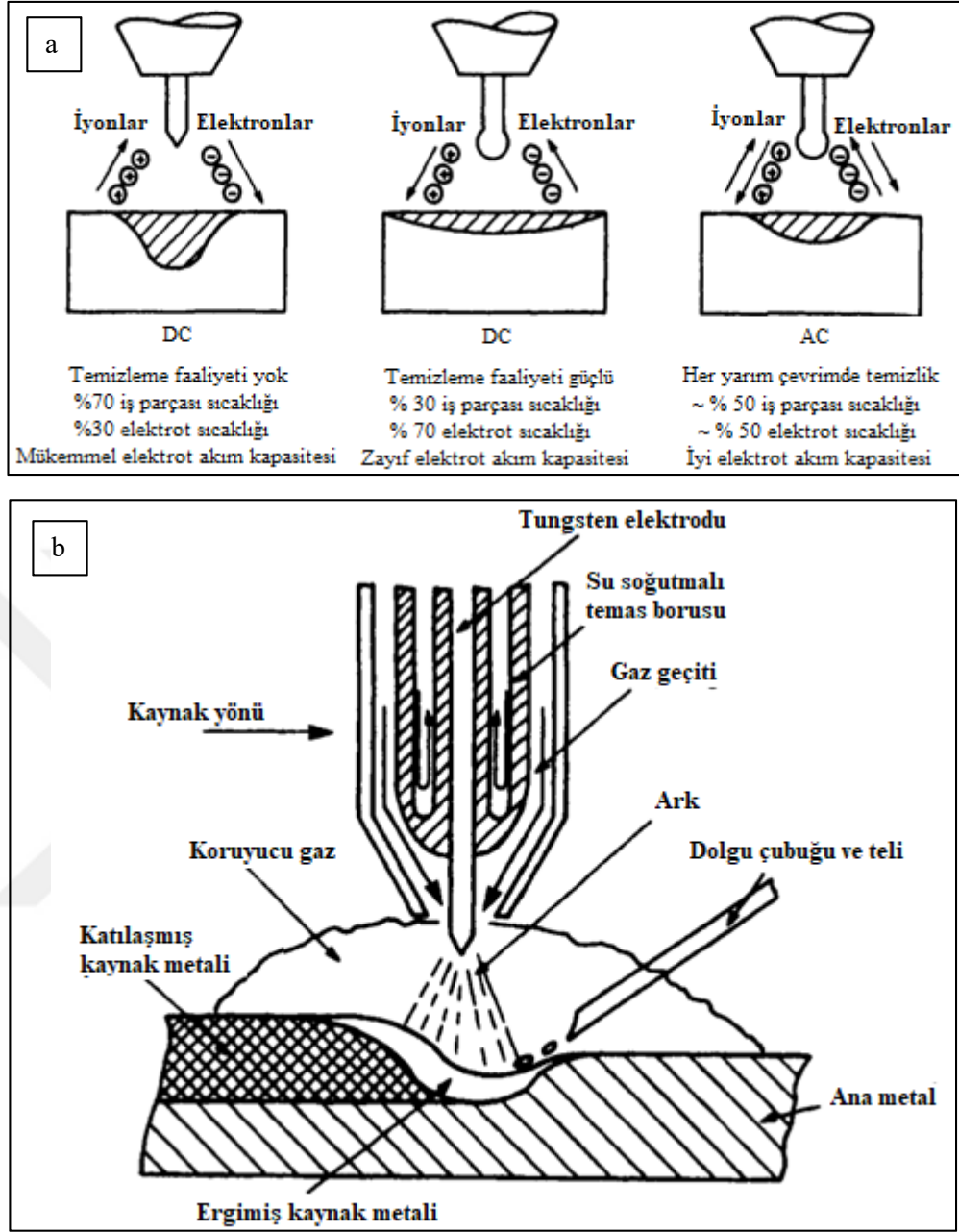
Işın çok yoğunlaştıkça, ısıtma hızla ve küçük bir alanda meydana gelir ve bu da küçük bir ısıdan etkilenen bölge ve sınırlı termal bozulma ile sonuçlanır. Fiber optik teknolojisindeki ve daha yüksek güçlü ışınlar kullanabilme kabiliyetindeki gelişmeler, lazer kaynağı işleminde yüksek işlem hızlarına ve otomasyona olanak sağlamaktadırlar. Ancak, nispeten pahalı ve verimsiz bir işlemdir. Ayrıca, bu kaynak işlemi için boyutsal sınırlamalar da bulunmaktadır. Bileşenler arasındaki boşluklar, lazerin küçük nokta çapından dolayı malzemenin kalınlığının % 10'undan fazla olamaz (Panteli 2012).

Alüminyum birleştirmek için lazer kaynağı kullanılabilir; ancak alüminyuma ait yüksek yüzey yansıtıcılığı ve yüksek ısı iletkenliğinden dolayı lazer kaynağı için yüksek güçlü bir ışın gerekmektedir. Bu teknik göreceli olarak pahalıdır ve gücün artırılmasıyla ilgili ekstra maliyetle, otomotiv endüstrisine uygulanamayacak kadar pahalı kabul edilir. Lazer kaynak tekniği alüminyum alaşımlarına uygulandığında, düşük ergime noktasına sahip alaşım elementleri içermesinden dolayı çatlak duyarlılığı problemi meydana gelir. Ayrıca empürite atomlarının çekirdek sınırlarında sıvı halde bulunan segragasyona uğrayabilir. Katılma sırasında büzülme meydana geldiğinde, taneler arası çatlama termal gerilmelerden kolaylıkla ortaya çıkabilir (Panteli 2012).

Ark Kaynağı

Ark kaynağı terimi; metal inert gaz (MİG) kaynağı, tungsten inert gaz (TİG) kaynağı ve ikisinin çeşitli türevlerini içeren çeşitli teknikleri kapsar. Bütün ark kaynağı teknikleri, pozitif iyonlar ve termal olarak yayılan elektronlar iş parçasına doğru hızlandırıldığında kinetik enerjinin ısıya dönüşeceği bölge üzerinde ısı sağlamak için bir elektrik arki kullanır. Günümüzde, hem MİG hem de TİG kaynağı otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan tekniklerdir (Panteli 2012).

TİG kaynağı, elektrotun tungstenden yapıldığı, tükenmez elektrotlu ark kaynağı işlemine bir örnektir. Tungsten elektrot oksidasyondan korumak için inert bir gaz (genellikle argon veya helyum) ile korunur. Elektrotun pozitif veya negatif olduğu bir DC akımıyla veya kaynak çevrimi sırasında polariteyi değiştiren bir AC akımıyla kullanılabilir (Şekil 2.4 a). Seçilen akım modu arkın yapısını ve dolayısıyla kaynağın karakteristiklerini etkiler. İş parçası pozitif terminale bağlanırsa, elektronlar tungsten elektrodundan yayılır ve ark boyunca hızlanırlar. Elektronlar yüksek hızlarda hareket ettiklerinden iş parçasına çarptıklarında büyük miktarda ısı üretirler ve kaynak havuzu da derin ve dardır. İş parçası negatif terminale bağlandığında, iş parçalarındaki ısı girişi daha yüksek enerjili elektronların elektrota doğru ilerlediği esnada çok düşüktür ve bunun sonucunda su soğutması gerekir (Şekil 2.4 b). İş parçasına ısı girişi düşük olduğundan, bu yöntem ince kesitlere veya özellikle ısıya duyarlı malzemelere uygundur. Büyük pozitif iyonlar yüzeye iyon demeti frezeleme ile çarptıklarında yüzeysel oksitler ortadan kaldırabildiğinden kolayca oksitlenen metaller için de faydalıdır. AC modunu kullanmak, bu iki tipi aralarında geçiş yapacak şekilde birleştirir. Bu, iş parçası üzerinde meydana gelen pozitif iyonların temizleme etkisinin bir derecesi ile makul ısı üretimi ve penetrasyonunun elde edildiği anlamına gelir (Panteli 2012).



Şekil 2.4. TİG kaynağının şematik gösterimi (a) çeşitli çalışma modlarının özelliklerini ve (b) dolgu teliyle su soğutmalı elektrot konfigürasyonunu gösterir (Messler 2004'den değiştirilerek alınmıştır)

MİG kaynağı, elektrotun katı bir sürekli tel olduğu, tükenebilen elektrotlu ark kaynağı işlemine bir örnektir. Bu tel ayrıca bir dolgu teli görevi görür ve koruyucu gazın bileşimi, güç kaynağı, ark akımı ve gerilimi, tel bileşimi ve tel besleme hızı gibi işlem değişkenlerini idare ederek, elektrot telinden aktarılan metalin yapısı kontrol edilebilir. Metal aktarımı; püskürtme (sprey), büyük küre biçimi veya kısa devre şeklinde

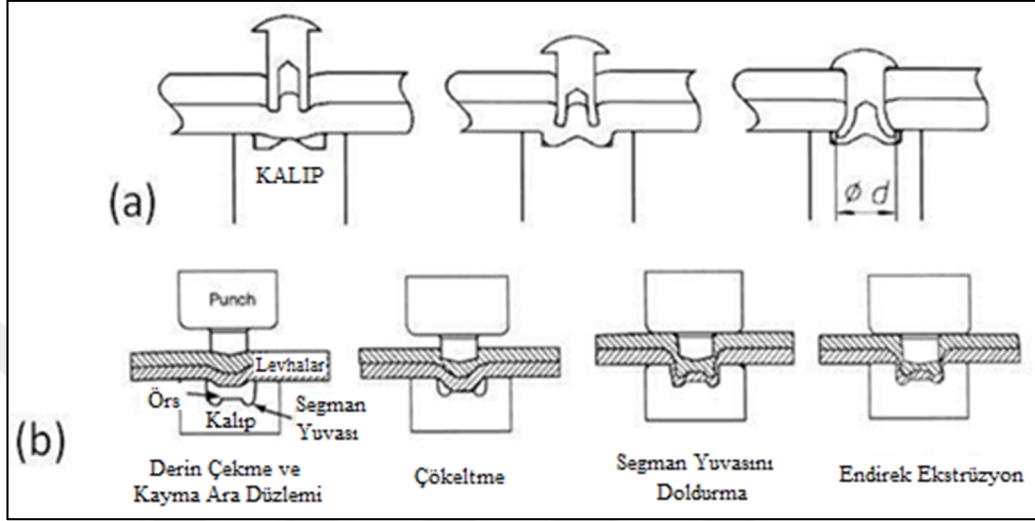
gerçekleşir. Püskürtme şeklindeki aktarım, pozitif elektrotlu ve yüksek akım ve gerilimli bir DC akım ile elde edilir ve minimal sıçramaya sahip ince bir ergimiş metal damlası spreyini iş parçasına aktarır. Büyük küre biçimi şeklindeki aktarım, düşük akımlarda gerçekleşir ve iş parçasına daha fazla metal damlası düşmesine neden olur. Bu önemli sıçramalara neden olur. Kısa devre şeklindeki aktarım, kürecikler ara sıra ergitme havuzuna dokunduğunda ve boşluğu birleştirdiğinde gerçekleşir. Kürecikler, damlamayı önlemek için yavaş bir şekilde oluşmalıdır; bu nedenle düşük bir akım ve düşük bir voltaj kullanılır. Metal aktarım modunu kontrol edebilmenin yanı sıra, akım modu sabit veya darbeli olabilir. Darbe akımı, çok yüksek akımlara ihtiyaç duyulmaksızın püskürtme aktarımının gerçekleştirilebileceği anlamına gelir. Çoğu MİG kaynağı bir DC akım kullanır ve büyük küre biçimi şeklindeki aktarım, kısa devre şeklindeki aktarım ve darbeli akım modları negatif bir elektrot ile çalışır. Sprey şeklindeki aktarım pozitif bir elektrot kullanma eğilimindedir. Bu kontrol edilebilir değişkenler nedeniyle çok yönlü bir kaynak yöntemidir (Panteli 2012).

Çoğu alüminyum alaşımda bir dolgu maddesi kullanılmadan yapılan ark kaynağı kaynakların çatlama karşı hassas olmasına neden olur; çünkü düşük ergime noktalı alaşım elementleri segragasyona uğrarsa tane sınır filmi oluşturabilirler. Bu nedenle, soğumadaki büzülme gerilimi uyguladığı zaman, taneler ile taneler arası çatlama arasındaki uyumu azaltır. Bazı alaşımlarda, yüksek silikon içeriğine sahip bir dolgu teli eklenerek kırılma önenebilir; fakat mekanik özellikleri etkileyebilir. Ark kaynağı, bozulmaya neden olabilecek büyük bir ısı girişi gerektirir. Kaynağın ısısı, kaynak etrafındaki alanı etkiler ve etkilenmeyen malzeme ile kıyaslandığında oldukça önemli özelliklerde farklılık göstermesine neden olabilir. Kaynak sonrası ısıl işleme, özellikler daha düzgün hale getirilebilir. Bu işleme alüminyumunu kaynaklamak için gereken güç girişi, çelik için yapılan uygulamalardan daha yüksektir (Panteli 2012).

2.3.2. Mekanik Birleştirme

Mekanik birleştirme, sıvı fazın mevcut olmadığı soğuk şekillendirme işlemidir. Kendinden geçmeli perçin ve ‘clinchin’, otomotiv endüstrisinde popüler mekanik

bağlantı teknikleri olarak görünmektedir (Panteli 2012). Perçinler, üst levhayı delip alt levhaya doğru genişleyerek mekanik bir kenetleme oluşturur (Şekil 2.5 a) (Panteli 2012). Clinching bağlantıları, üst malzemeyi alt malzemenin içine doğru zorlar ve perçinlere ihtiyaç duymadan bir kilitleme oluşturur (Şekil 2.5 b) (Panteli 2012).



Şekil 2.5. (a) Kendinden geçmeli perçin ve (b) clinching tekniklerinin şematik diyagramları (Panteli 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Her iki teknikte birleşme yerinin kalınlığına bakılmaksızın hızlı bir şekilde uygulanır. İşlemler kolayca otomatikleştirilebilir, az kurulum gerektirir ve düşük enerjili işlemlerdir. Duman, emisyon ya da yüksek akım olmadığından diğer yöntemlerin çoğundan çok daha güvenlidirler. Ayrıca, birbirinden farklı malzeme kombinasyonlarını eşit derecede kolaylıkla birleştirebilirler. Mekanik bağlantı elemanlarının kullanılmasının sınırlamaları; birleştirme yerinin her iki tarafına erişimin gerekli olması, clinching işleminin güçlü yanlarının az olması ve perçin işleminde birleştirme yerinin içine ağırlığı artıran ilave malzeme yerleştirilmesidir. Ancak, bu sürecin ezici dezavantajı tüketim maliyetlerin yüksek olmasıdır. Perçinli birleşme yerleri, sürtünme ve yorulma nedeniyle zamanla gevşeyebilir ve bu da yapısal rijitlik kaybına neden olur (Panteli 2012).

2.3.3. Yapıştırıcıyla Birleştirme

Yapıştırıcıyla birleştirme tekniği; alüminyum, magnezyum ve ikisinin farklı kombinasyonlarının yapıştırılması için birçok avantaja sahiptir. Bir ark kaynağı gibi

komponentleri bozmaz. Kesintisiz yapışma gerilimi daha kolay dağıtır. Birleşme yerinin sertliği daha yüksektir. Enerji soğurumu, gürültü ve titreşim sönümleme özellikleri iyidir. Yorgunluk direnci, kenarlardaki stres konsantrasyonunun azalması nedeniyle iyidir. Komponentler yüksek kayma mukavemetine sahiptir. Yapışkan katman, birleşme yerini etkin bir şekilde kapatır. Ayrıca, yapışkan tabaka malzemeler arasında bir engel görevi görmektedir. Bu nedenle birbirleriyle temas ettikleri diğer işlemlerde uyumsuz olabilecek pek çok farklı malzeme bu yöntemle birleştirilebilir (Panteli 2012).

Bu tür bir birleştirme için kullanılan yapıştırıcıların çoğu epoksi veya solvent bazlıdır. Bu maddeler tehlikeli duman oluşturması nedeniyle çevresel sorunlara yol açar. Ortaya çıkan sorunlar; nakliye, depolama, kullanım koşulları ve atıkların bertarafı ile ilgilidir. Bu nedenle sıkı madde kontrolü uygulanmalıdır ve bu durumu çoğu yapıştırıcının sınırlı raf ömrüne sahip olması daha da karmaşıklaştırmaktadır. Mekanik olarak, yapıştırılmış birleştirme yerlerinin kayma mukavemeti ve sertliği iyidir; fakat bunu elde etmek için bir ısı kürü gereklidir. Ancak, yapıştırıcıyla birleştirilmiş alüminyum komponentlerin soyma özellikleri ve darbe performansı çoğu zaman kötü olması, bu işlemin otomotiv endüstrisinde kullanımı için ana dezavantajdır (Panteli 2012).

Oksit katman, bu işlem için bir sorun ortaya çıkartabilir ve temizlemek için bir ön işlem gereklidir. Bu ön işlem, yapıştırıcıyla birleştirme sürecine ilave bir adım eklemektedir. Ayrıca, yüzey hazırlığının kalitesi birleştirme yerinin mukavemeti için çok önemlidir (Panteli 2012).

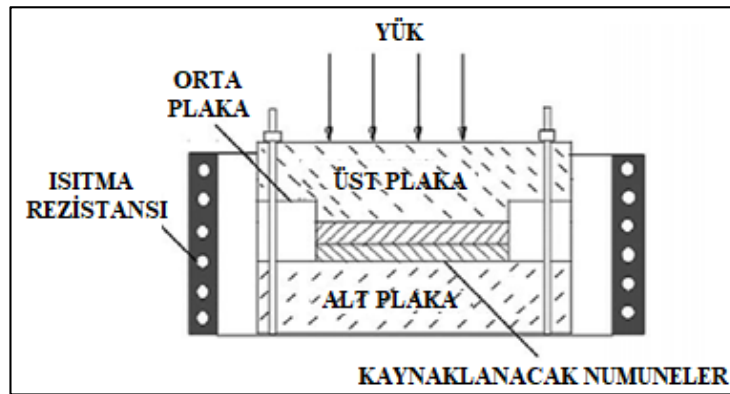
2.3.4. Katı Hal Birleştirme

Katı hal kaynağı, kaynak yapılacak malzemeleri erime noktalarını aşmadan atomik olarak yakın bir temasa sokar. Genel olarak bu birleştirme yöntemi, ısı uygulanarak plastik deformasyona olanak vermesi ve basıncın malzemeleri bağlamasını kapsamaktadır. Katı hal kaynağı, ya yüksek basınçlı atomları birlikte zorlayarak arayüzey boyunca yüksek düzeyde interfüzyonunun ya da arayüzeyde sürtünme oluşumunun oksit tabakalarını ve pürüzlü temas yayılımını uzaklaştırmasının sonucudur (Panteli 2012).

Difüzyonla birleştirme, iki metalin erime sıcaklığının % 50-70'inde birleştirilebileceği bir katı hal birleştirme metodudur. Bu uygulama ya yüksek basınç ve yüksek gerinme oranları ile soğuk olarak ya da düşük basınç ve yüksek gerinme oranları ile yüksek sıcaklıkta (erime noktasının altındaki sıcaklıkta) gerçekleştirilir. Arayüzeyde boşluk oluşmasını önlemek için bir basınç düzeyi gereklidir ve işlem genellikle vakum altında gerçekleştirilir (genellikle Vakum Difüzyon Birleştirilmesi olarak adlandırılır). Bu süreçte üç kritik değişken vardır: sıcaklık, basınç ve zaman. Tipik olarak, birleştirme süresi yaklaşık 1-3 saattir, bu durum otomotiv endüstrisinde difüzyonla birleştirme metodunun kullanılması için engel teşkil edebilir. Ayrıca, vakum tesisleri ve koruyucu gaz odaları için büyük bir sermaye yatırımı gerekecektir. Bu nedenlerden dolayı, bu metod otomotiv endüstrisine kullanılmamaktadır (Panteli 2012).

Alüminyumun difüzyonla birleştirilmesi, yüzey oksit tabakası nedeniyle zor olabilir. Katı halde kalmak için genellikle yaklaşık 500 °C'de gerçekleştirilir; ancak bu oksit tabakasını parçalamak için yeterli değildir. Sonuç olarak, yüzey bir vakum ortamında iyonik aşındırma veya uygun bir metalik kaplama püskürtmesiyle temizlenmelidir (Panteli 2012).

Difüzyonla birleştirme işlemi için tipik bir konfigürasyon Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Panteli 2012).

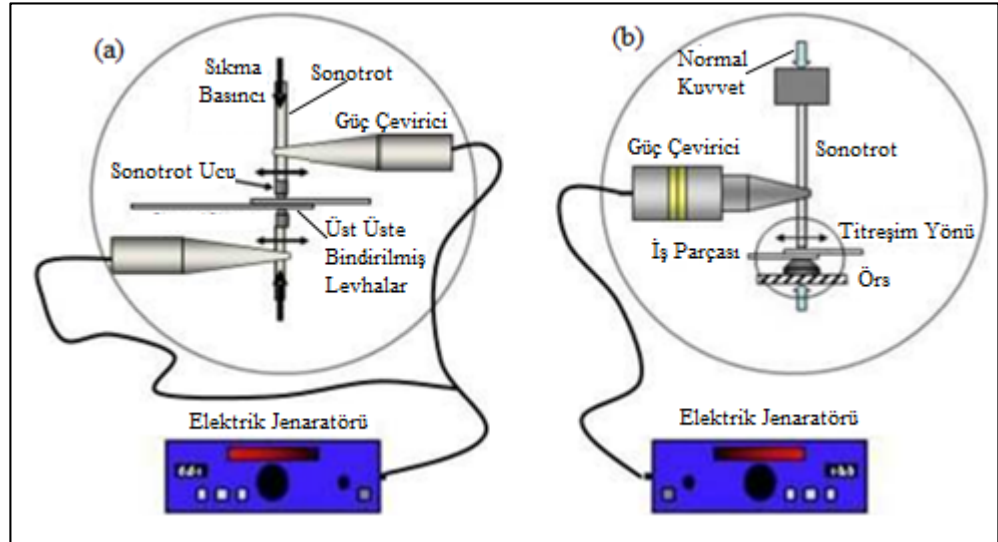


Şekil 2.6. Difüzyonla birleştirme için tipik bir konfigürasyon (Panteli 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

2.3.5. Ultrasonik Metal Kaynağı

Ultrasonik kaynak, çok fazla ısı üretmeden nispeten hızlı bir sürede iki malzemeyi birleştirmek için makul basınç ile yüksek frekanslı titreşimi birleştirir. Elektrik enerjisi, yüksek frekanslı mekanik titreşimler tarafından ısı enerjisine dönüştürülür. Bir sıkıştırma kuvveti altındaki titreşim, iki birleşme yüzeyi arasındaki oksitleri veya kirleticileri parçalayan ve temiz yüzeyler bırakan arayüzey hareketi oluşturur. Metalurjik bağlar temiz yüzeyler arasında sıkı temas bulunurken oluşur. Metal ultrasonik kaynaktaki ekipman tasarımları değişkendir; titreşimi bir örs üzerine kelepçelenmiş bir iş parçasının üst yüzeyine aktaran tek bir sonotrota veya iş parçasının her iki yüzeyine de titreşimi aktaran çift bir sonotrota sahip olabilir (Şekil 2.7). Titreşimler, önceden belirlenmiş bir frekansta, genellikle 10-75 kHz aralığında, yanal olarak uygulanır (Panteli 2012).

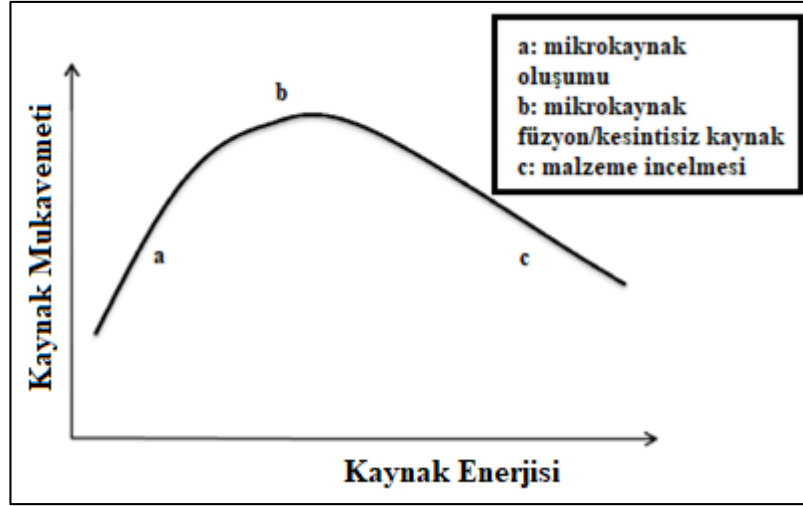
Ultrasonik kaynak makinesi (Şekil 2.7), yükselticiden piezoelektrik güç çeviricisine kadar güç besleyen bir elektrik jeneratörüne sahiptir. Güç çeviricisi, bir frekans yönlendiricisi ile güçlendirilen gücü mekanik titreşime dönüştürür. Frekans yönlendiricisinin uç ucunda, iş parçası ile temas halinde olan bir kaynak ucu vardır. Sıkma basıncı pnömatik bir silindir ile sağlanır (Panteli 2012).



Şekil 2.7. (a) Çift sonotrot makinesi, (b) tek sonotrot makinesi için tipik ultrasonik kaynak ekipman kurulumu (Panteli 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Titreşimin iş parçası üzerindeki bir sıkma kuvveti üzerindeki etkisi; plastik deformasyon, elastik histerezis ve sürtünme ile ısı oluşturmaktır. İlk olarak, elastik deformasyon ve sürtünme ısı oluşumuna katkıda bulunur, daha sonra mikro-bağ oluşmaya başladıkça plastik deformasyon baskın ısı kaynağı haline gelir. Metaller genellikle yüksek ısı iletkenliğine sahip olduklarından, ısı deformasyon bölgesi boyunca hızla dağılır ve kaynak sıcaklığı, kaynak gücü ve kaynak süresiyle artar. Arayüz sıcaklıkları parametrelere büyük ölçüde bağlıdır; fakat genellikle erime sıcaklığının 0,4-0,8'i arasındadır (Panteli 2012).

İlk temas, iş parçalarının yüzeylerindeki pürüzler arasında meydana gelir ve basınç altındaki bu bölgeler arasındaki sürtünme, ısı üretir. Temas alanı giderek artar ve bu nedenle daha fazla sürtünme ve daha fazla ısınma olur. Isı ve deformasyon kombinasyonu, oksit tabakasının veya yüzey kirleticisinin parçalanmasına yol açar. Bir sıkıştırma kuvveti altındaki titreşim, iki birleşme yüzeyi arasındaki oksitleri veya kirleticileri parçalayan ve temiz yüzeyler bırakan arayüzey hareketi oluşturur. Pürüzler arasında temas başlayıp ve büyüdüğünde -bu işlem kaynak alanı boyunca uniform olmayan bir işlemdir- ilk olarak temasın ilk yapıldığı bölgelerde oksit katmanları parçalanır. Bu durum, titreşim yönünde uzunlamasına doğrultuda şekil olarak eliptik olan mikrokaynaklar ile sonuçlanır. Kaynak ilerledikçe, plastik deformasyon nedeniyle sıcaklık hızla artar ve daha fazla mikrokaynaklar oluşur. Mevcut mikrokaynaklar en sonunda birleşip kesintisiz bir kaynak bölgesi oluşturuncaya kadar büyürler. Düşük kaynak enerjilerinde, mikrokaynaklar güçlü bir bağ oluşturmak için sayıları çok az ve boyutları çok küçüktür. Optimum kaynak enerjilerinde, mikrokaynaklar birleştirilmiş ve kesintisiz bir bağ oluşturmuştur. Yüksek enerjilerde, malzeme geniş bir yumuşama yaşayabilir ve sıkma kuvveti tabaka incelmeye neden olabilir; çünkü malzeme kaynak bölgesinden dışarı akar ve kaynak direncini azaltır. Bu nedenlerle, kaynak enerjisi ile kaynak mukavemeti için genel trend maksimum seviyeye yükselecektir ve kaynak enerjisi daha da arttıkça azalacaktır (Şekil 2.8) (Panteli 2012).



Şekil 2.8. Aynı metallerin ultrasonik kaynağında kaynak mukavemeti ile kaynak enerjisinin genelleştirilmiş değişimi (Panteli 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Genellikle, ultrasonik kaynaklarda üç ayrı bölge görülür: Kaynak Bölgesi, Kaynaktan Etkilenen Bölge ve Kompresyon Bölgesi. Kaynak bölgesinde birleştirme hattının yakınındaki taneler, bu bölgede çok fazla malzeme akışı olduğu için önemli ölçüde deforme olabilir. Kompresyon bölgesinde (sonotrod uçlarının altında), taneler salınım yönünde uzar; fakat tanelerin büyüklükleri önemli ölçüde değişmez (Panteli 2012).

Ultrasonik kaynak tekniği, farklı erime noktalarına sahip olan, arayüzeyde kırılma fazlar oluşturma eğiliminde olan veya ısıya duyarlı bileşenlerin yakınında bulunan farklı malzeme kombinasyonlarının kaynaklanmasına olanak sağladığı için kullanışlıdır (Panteli 2012).

Ultrasonik kaynağın dezavantajları, ağır komponentlerin yüksek frekansta titreşmesi için çok fazla enerji gerektirmesidir; bu nedenle pratikte küçük komponentler, ince tabakalar ve teller ile sınırlıdır (Panteli 2012).

Ultrasonik kaynakta birçok değişken vardır (Panteli 2012):

- Titreşim frekansı
- Güç dağılımı
- Kaynak süresi / Kaynak enerjisi

- Sıkma basıncı
- Uç geometrileri

Titreşim frekansı ve güç dağılımı, ultrasonik kaynak ekipmanının genel olarak sabit özellikleridir. Kaynak süresi, basınç ve enerji değişebilir. Kaynak süresi ve kaynak enerjisi, iş parçasına verilen gücü göstermek için sıklıkla birbirinin yerine kullanılır (Panteli 2012). Bu durumu ifade eden denklem aşağıda yer almaktadır.

$$E = PT \quad (2.2)$$

E: Enerji (J)

P: Güç (W)

T: Zaman (s)

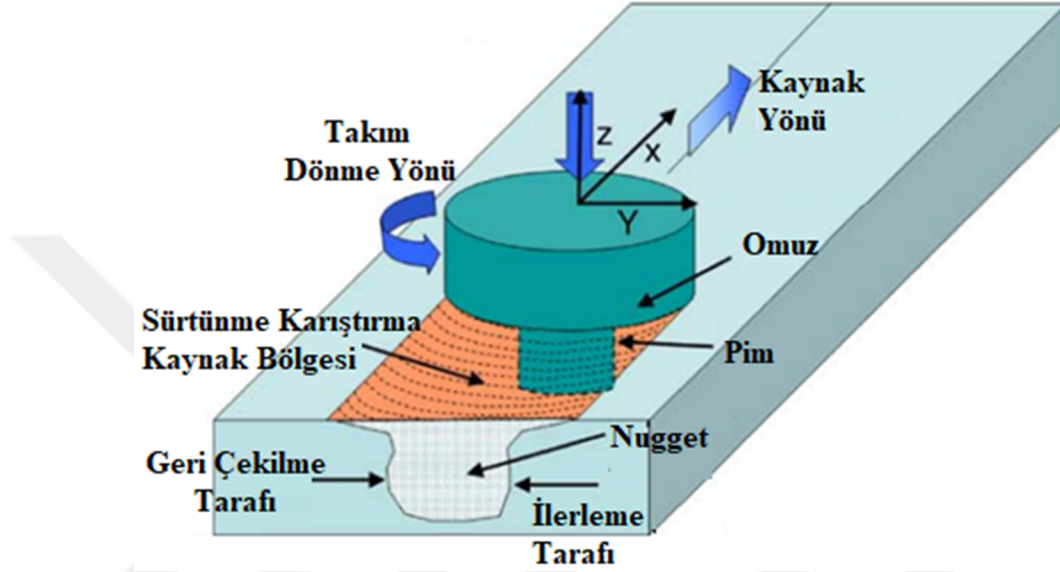
Alüminyum ve alüminyum alaşımları, plastik malzemeler, bakır ve bakır alaşımları gibi malzemeler ultrasonik kaynak metodu kullanılarak kaynaklanmaktadır. Bunlara ek olarak, birbirinden farklı malzemeler (alüminyum ile cam ya da seramik gibi) de bu yöntem ile birleştirilmektedir. Ultrasonik kaynak metoduyla bütün alüminyum alaşımlar birleştirilebilir; ancak temper ve alaşım durumuna göre kaynaklanabilirliğin derecesi değişir (Sudağ 2011).

2.3.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünmeli karıştırma kaynağı, TWI tarafından 1991 yılında icat edilmiş bir katı hal kaynak işlemidir. İşlemin temel prensipleri çok basittir ve dönen bir kaynak takımının üst üste binen veya bitişik olacak şekilde konumlanan iki plakaya dalmasıdır. Isı, takım omuzu tarafından uygulanan kesme kuvvetlerinden ve uygulanan normal basınçtan kaynaklanan sürtünme ile üretilir. Threadgill ve ark. (2009) bu kaynak işlemi şu şekilde tanımlamaktadır: “Bir iş parçasına göre döngüsel bir şekilde hareket eden bir takımın, birleştirme bölgesine girdiği, yerel olarak plastikleştirdiği ve arayüzey boyunca hareket ettiği, böylece iş parçaları arasında katı hal birleşimine neden olduğu iki veya daha fazla iş parçasını birleştirme yöntemidir”. Temel olarak, sürtünmeden kaynaklanan ısının takım

pimi etrafındaki malzemenin yumuşamasına neden olması nedeniyle kısıtlı bir ekstrüzyon işlemi olarak düşünülebilir; ancak takım omzu kaynak bölgesini sınırladığı için kaçamaz. Bunun yerine, ilerleyen takımın etrafına çıkar (Panteli 2012).

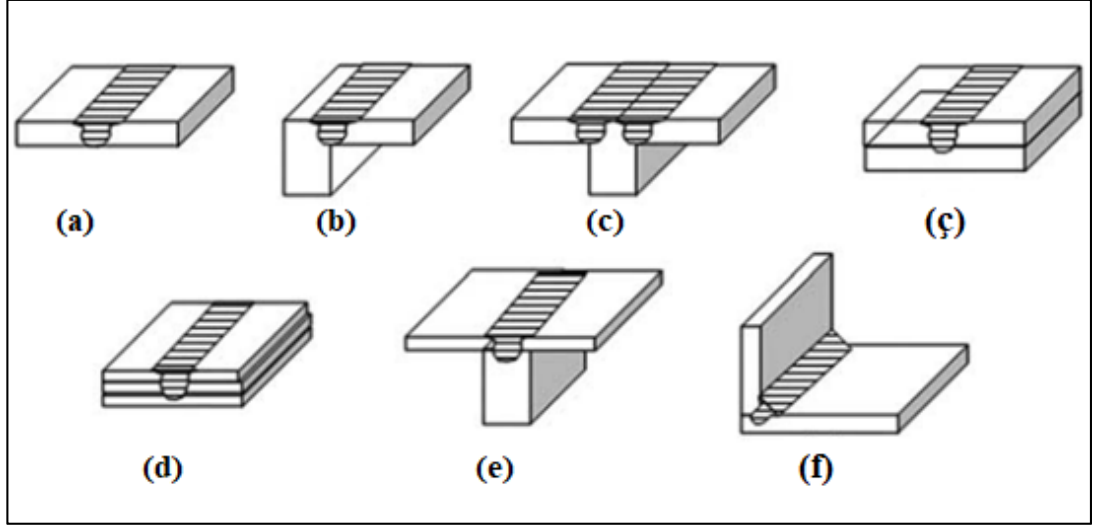
Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin şematik çizimi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin şematik çizimi (Mishra ve Ma 2005'den değiştirilerek alınmıştır)

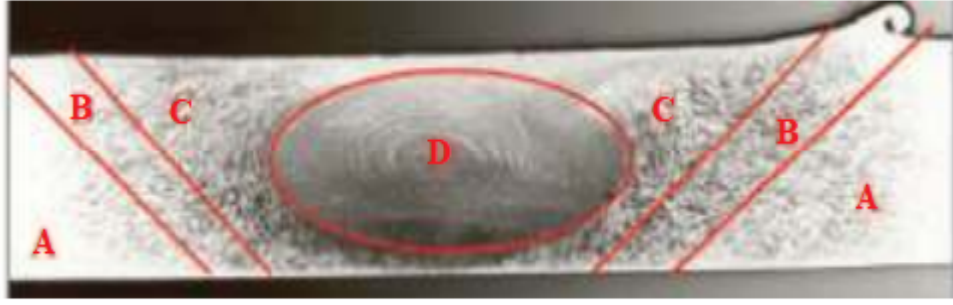
Malzeme bu işlem ile etkili bir şekilde karıştırıldıkça, doğası gereği asimetriktir ve çıkan malzemenin çoğu takımın geri çekilme tarafına geçecektir. Diğer işlemlere kıyasla (ekstrüzyon gibi) gerilme oranları çok yüksektir. Bu nedenden dolayı bu birleştirme işlemi, termal ve deformasyon etkilerinin bir birleşimidir (Panteli 2012).

SKK metodu kullanılarak birleştirilecek levhalar için birleştirme konfigürasyonları: alın kaynağı (Şekil 2.10 a), kenar alın kaynağı (Şekil 2.10 b), T alın kaynağı (Şekil 2.10 c), bindirme kaynağı (Şekil 2.10 ç), çoklu bindirme kaynağı (Şekil 2.10 d), T bindirme kaynağı (Şekil 2.10 e), köşe kaynağı (Şekil 2.10 f). SKK için en uygun birleştirme konfigürasyonları; alın kaynağı ve bindirme kaynağıdır (Mishra ve Ma 2005).



Şekil 2.10. SKK için birleştirme konfigürasyonları: (a) Alın kaynağı, (b) Kenar alın kaynağı, (c) T alın kaynağı, (ç) Bindirme kaynağı, (d) Çoklu bindirme kaynağı, (e) T bindirme kaynağı ve (f) Köşe kaynağıdır (Mishra ve Ma 2005'den değiştirilerek alınmıştır)

SKK metoduyla imal edilen kaynakların mikroyapıları üç kategoriye ayrılabilir: kaynaktan etkilenmeyen ana malzeme, ısıdan etkilenen; ancak deformasyondan etkilenmeyen malzeme ve hem ısı hem de deformasyondan etkilenen malzeme (Panteli 2012). Bu üç alana sırasıyla: Ana Malzeme (AM), Isıdan Etkilenen Bölge (IEB) ve Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB) adı verilir (Şekil 2.11) (Panteli 2012). TEB, kaynağın genişliği boyunca uzanır ve üst yüzeydeki takım omuz çapına ve alt yüzeydeki takım pimi çapına eşit bir minimum genişliğe sahip olacaktır (Panteli 2012). Alüminyum gibi bazı malzemelerde bu alan her zaman tamamen yeniden kristalleşmez (Panteli 2012). TEB içindeki yeniden kristalize malzeme alanı; Nugget ve Karıştırma Bölgesi (KB) olarak adlandırılır (Şekil 2.11) (Panteli 2012 ve Ojo 2016). Takım ile eşleşen bu malzeme yoğun gerinmeye maruz kalır. TEB içinde kalan malzeme, takımın etrafından akan malzemeyi sınırladığından daha az gerinmeye maruz kalır (Panteli 2012).



Şekil 2.11. SKK'nin tipik bölgeleri (A: Ana Malzeme, B: IEB, C: TEB, D: Nugget) (Panteli 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Bu süreçte ulaşılan sıcaklıklar literatürde değişiklik gösterir ve seçilen malzemelere ve parametrelere bağlıdır; ancak bunlar alüminyum için 450 - 480 ° C arasındadır. Malzeme ergidiğinde füzyon kaynağında karşılaşılan sorunları ortadan kaldırmak için malzemenin sıcaklığı, ergime sıcaklığının 0,8'ini aşmaması gerekir. Alüminyumun ergime sıcaklığına bu sıcaklıklar yakındır; bu nedenle sıcaklık malzemeyi eritmeyecek şekilde dikkatle kontrol edilmelidir (Panteli 2012).

Bu tür bir kaynağın birçok avantajı vardır: kalıcı gerilmeler düşük sıcaklıktan dolayı daha düşüktür, kaynaklar geleneksel füzyon kaynaklarından daha az kusurludur, gözeneklilik veya sıcak çatlama ile ilgili herhangi bir problem yoktur, süreç kolayca otomatikleştirilebilir ve uzman kaynak becerileri gerektirmez, işlem göreceli olarak düşük enerjilidir, sarf malzeme maliyeti veya çevresel tehlikesi yoktur ve koruyucu gaz veya dolgu teli gerekmez (Panteli 2012).

Dezavantajları: bir dolgu teli olmadan dolgu kaynaklarının kolayca oluşturulamaması, özellikle karmaşık parçalar zordur; çünkü karmaşık takımlar ve mastarlamının gerekli olması ve takım piminin çıkarıldığı malzemede bir delik bırakmasıdır (Panteli 2012).

Bir sürtünme karıştırma kaynağının kalitesi kritik işlem parametrelerine bağlıdır. Ana parametreler (Panteli 2012):

- Devir hızı (devir/dk)
- Yer değiştirme hızı (mm/dk)

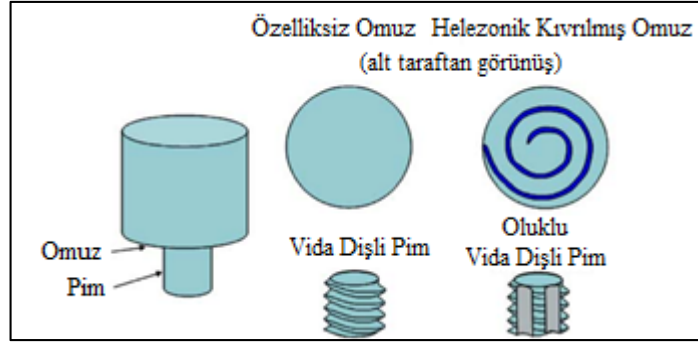
- Dalma derinliği (mm)
- Eğim açısı (°)
- Takım tasarımı

Makinenin parametrelerine ek olarak, kaynak yapılan malzemelerin özelliklerinin de etkisi vardır. Tipik olarak, belirtilmiş bir malzeme için bir dizi parametreler ile hatasız kaynaklar elde edilebilir; işlem limitlerini, aşırı ısınma veya ısınma altında olunması belirler; çünkü bu kusur oluşumuna yol açar. Bu işlemin limitleri dahilinde, yukarıdaki parametreler değiştirilerek kaynak özellikleri değiştirilebilir (Panteli 2012).

Yer değiştirme hızı çok yüksekse veya devir hızı çok düşükse, boşluklar oluşabilir. Dalma derinliği pimin ucu alt yüzeye yakın olacak şekilde (alt yüzeye temas etmeden) ve takım omuzu üst yüzeye temas edecek şekilde ayrıca kontrol edilmelidir. Sıcaklığı kontrol eden ana parametreler, devir hızı ve yer değiştirme hızıdır. Sıcaklığın, malzemenin erime sıcaklığının altında kalmasını sağlamak ve aynı zamanda plastik akışa izin verecek kadar yüksek olmasını sağlamak için devir hızı ve yer değiştirme parametreleri kontrol edilmelidir. Tipik olarak bu sıcaklık, erime sıcaklığının yaklaşık 0,8'idir (Panteli 2012).

Takımın geometrisi malzeme akışını kontrol eder ve başarılı bir kaynak elde etmek için kritik öneme sahiptir. Takım geometrisi döndükçe oluşturduğu sürtünme ile ısınmaya katkıda bulunur ve takım geometrisi, sürtünme karıştırma kaynağıyla ilişkili kesme ve basınç kuvvetlerine deforme olmadan sıcaklık altında dayanabilmelidir. Takım tasarımında; kesit şekli, konik açısı, omuz çapına göre uzunluk, takım ağız şekli gibi özellikler, içbükey veya dışbükey olabilen helisler ve dişler gibi malzeme akışı ve bağlanma/yapışma kuvveti üzerindeki etkileri kontrol etmek için ayarlanabilecek birçok değişken vardır (Panteli 2012).

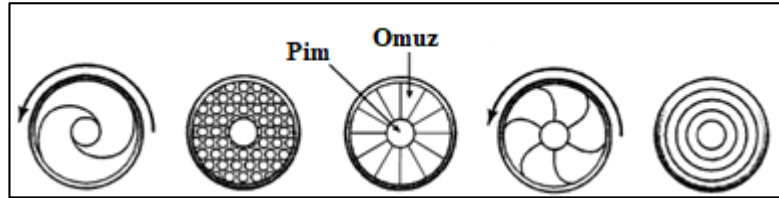
Şekil 2.12'te SKK takımının şematik çizimi verilmiştir. TWI tarafından tasarlanan bazı takımlar (Şekil 2.13) ve bazı omuz geometrileri (Şekil 2.14) gösterilmektedir.



Şekil 2.12. SKK takımının şematik çizimi (Mishra ve Ma 2005'den değiştirilerek alınmıştır)

Model Adı	Cylindrical	Whorl™	MX triflute™	Flared triflute™	A-skew™	Re-stir™
Şematik Görünüş						
Takım Pim Şekli	Vida Dişli Silindirik	Vida Dişli Konik	Üç Kanallı Vida Dişli Konik	Üç Kanallı Genişletilmiş Kanal Uçları	Vida Dişli Silindirik Eğimli	Vida Dişli Konik

Şekil 2.13. TWI tarafından tasarlanan bazı takımlar (Al-Zubaidy 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.14. TWI tarafından tasarlanan bazı omuz geometrileri (Mishra ve Ma 2005'den değiştirilerek alınmıştır)

Alüminyum alaşımlar hem hafif hem de mekanik özelliklerinin çok iyi olmasından dolayı otomobil, uçak, helikopter ve tren gibi taşıtların üretiminde kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımların kaynaklanmalarında ergitme kaynaklarının kullanılması çeşitli problemlere ve zorluklara yol açmaktadır. Bu karşılaşılan zorlukları ve problemleri ortadan kaldırmak için sürtünme karıştırma kaynağı geliştirilmiştir ve endüstride kullanılmaya başlanmış bir birleştirme tekniğidir. Günümüzde endüstride; alüminyum ekstrüzyon

levhaların büyük paneller haline getirilmesi işleminde ve birleştirilme işleminde, levha halindeki kurşun, alüminyum, plastik ve bakır gibi malzemeleri birleştirilme işleminde, feribotların güverte üretiminde, uçak, tren gövde parçalarının üretiminde, otomobil gövde parçalarının üretiminde, uzay mekiklerinin yakıt yankı üretiminde sürtünme karıştırma kaynağı metodu kullanılmaya başlanmıştır (Sudağ 2011).

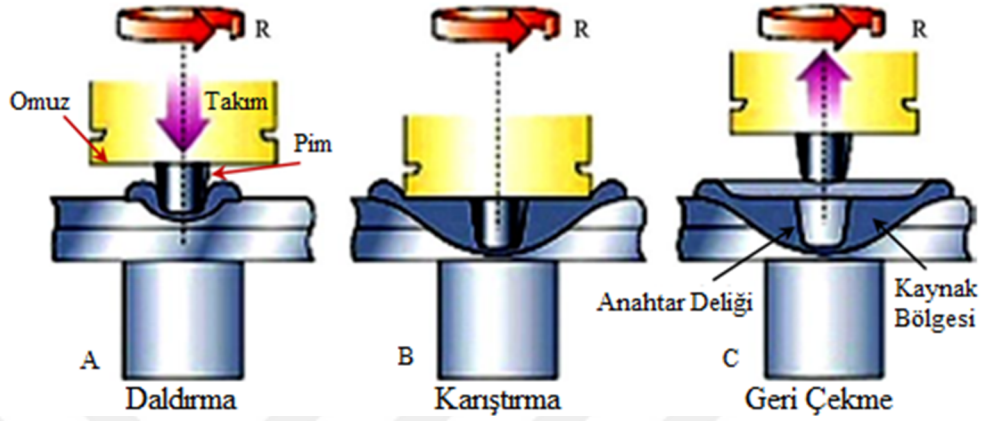
2.4. Alüminyum Alaşımları İçin Geleneksel Kaynak Metodları

Birleştirme mekanizmasına ve enerji kaynağına göre pek çok kaynak metodu vardır. Otomotiv endüstrisinde alüminyum alaşımlarının kaynağı için kullanılan geleneksel yöntemler; direnç nokta kaynağı ve kendinden geçmeli perçindir (Yuan 2008). Kendinden geçmeli perçin ve direnç nokta kaynağı Bölüm 2.3’de anlatılmıştır.

2.5. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, geleneksel ‘doğrusal’ sürtünme karıştırma kaynağından türetilmiş nispeten yeni bir tekniktir. Bu teknoloji ilk önce ‘Alman araştırma merkezi GKSS’ tarafından geliştirilmiştir ve o zamandan beri ‘Mazda Motor Corporation’ ve ‘Kawasaki Heavy Industry’ tarafından endüstriyel olarak uygulanmıştır. SKNK, SKK ile aynı avantajları paylaşmaktadır: her ikisi katı hal işlemi olup birbirine benzemeyen malzemeleri ve düşük çarpılmalar ile füzyon kaynağı zor olan malzemelerin birleştirilmesi gerçekleştirilebilir. Geleneksel SKK'den tek farkı, SKNK'de takımın sadece üst üste binen levhalara dalması ve kaynak birleştirme hattı boyunca hiçbir takım hareketi olmamasıdır. Şematik olarak Şekil 2.15'de gösterilen SKNK işlemi, üst üste bindirilmiş iki metal levhayı birleştirmek için kullanılır. Temel olarak üç aşamadan oluşur: daldırma, karıştırma ve geri çekme. İşlem, genelde üst üste bindirilmiş iş parçasına dalan pime sahip olan bir omuzdan oluşan dönen takım ile başlar. Takım omzu üst levhanın üst yüzeyine temas ettiğinde, aşağı yönlü kuvvet uygulanırken, alt levhanın altındaki destek aracı (örs) bu aşağı yönlü kuvvete dayanak olur. Takım dönüşü ve aşağı yönlü kuvvet, sürtünme ve plastik deformasyondan ısı üretmek için uygun bir süre (bekleme süresi) boyunca devam eder. Bu ısı metali yumuşatır ve takımın dönüşü plastikleştirilmiş metalin hem çevresel hem de aksenel yönde akmasına neden olur. Takım omzu, pimin etrafındaki üst ve alt levhanın yüzeyleri arasında bir katı hal bağ

bölgesi oluşmasına neden olan dövme basıncını uygular. Son olarak; takım levhalardan geri çekilir ve sonuç, takım çıkarıldıktan sonra pimin bıraktığı karakteristik bir merkezi deliğe sahip bir kaynaktır (Al-Zubaidy 2016).



Şekil 2.15. Sürünme karıştırma nokta kaynağı işleminin şematik gösterimi (A: Daldırma, B: Karıştırma, C: Geri çekme) (Al-Zubaidy 2016'den değiştirilerek alınmıştır)

SKNK metodu ile yapılan kaynak işlemini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır; bu parametrelerden en önemlileri Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. SKNK için en önemli işlem parametreleri (Ojo 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)

Makine ile ilgili değişkenler	Takım tasarımı ile ilgili değişkenler	Diğer değişkenler
Takım eğiklik açısı	Geometri özellikleri	İş parçasının özellikleri
Takım devri	Diş hatvesi	Örs büyüklüğü
Kaynak hızı	Pim uzunluğu	Örs malzemesi
Daldırılma kuvveti/derinliği	Pim çapı	İş parçasının büyüklüğü
	Omuz çapı	
	Omuz ve pimin malzemesi	

SKNK'de ısı, iki kaynak tarafından üretilir: dönen takım ile iş parçası arasındaki sürünme ve kaynak bölgesindeki plastik deformasyon. Sürünme karıştırma nokta kaynağı

sırasında üretilen toplam ısı enerjisi (Q_{toplam}), aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenebilir (Al-Zubaidy 2016):

$$Q_{toplam} = \delta Q_{yapışma} + (1 - \delta) Q_{kayma} \quad (2.3)$$

$$Q_{toplam} = \frac{2}{3} \pi \omega [\delta \tau_{akma} + (1 - \delta) \mu p] [(R_{omuz}^3 - R_{pim}^3)(1 - \tan a) + R_{pim}^3 + 3R_{pim}^2 H_{pim}] \quad (2.4)$$

Bu denklemdeki değişkenler;

δ : temas durumu değişkenidir (boyutsuz kayma oranı),

τ_{akma} : kaynak sıcaklığında malzemenin akma gerilmesidir,

μ : sürtünme katsayısıdır,

p : temas arayüzündeki homojen basınçtır,

ω : açısal dönme hızıdır,

a : koni açısıdır,

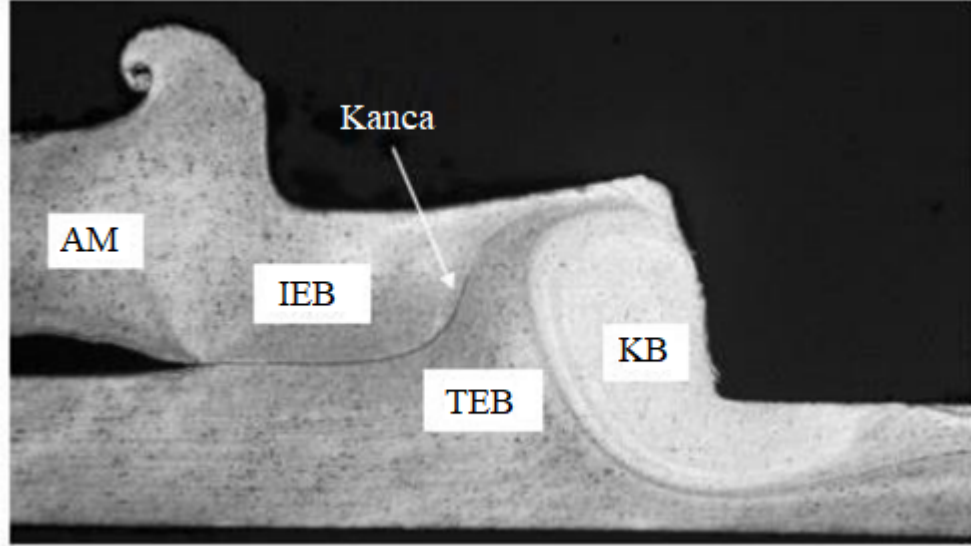
R_{omuz} : omuz yarıçapı,

R_{pim} : pim yarıçapı,

H_{pim} : pim yüksekliğidir (Al-Zubaidy 2016).

SKNK metodunun, diğer kaynak tekniklerinde olduğu gibi bazı sınırlamaları vardır. Birincisi, nispeten uzun kaynak çevrimidir (tipik olarak 2 ile 5 saniye). Bu kaynak çevrim süresi, seri otomotiv imalatı sürecine uygun olması için 1,0 saniyeden az olmalıdır. İkinci dezavantajı, takımın piminden kaynaklanan anahtar deliğidir. Pimin oluşturduğu anahtar deliği, alt tabakaya neredeyse nüfuz ettiği için istenmeyen bir durumdur ve malzemenin işletme süresi boyunca korozyon direncini etkileyebilir. Ayrıca, kaynak hattı boyunca klavajlı düşük kırılma enerjilerinden dolayı bu bağlantı metodunun tam bir metalurjik bağ oluşturması kolay değildir. Genel olarak çatlağın izlediği yolun; kaynak hattını, pimin yakınında yukarı doğru bükülen levhalar arasındaki arayüzey boyunca takip etme eğilimi vardır. Bu olgu bazen Şekil 2.16'te gösterildiği gibi bir 'kanca' olarak adlandırılır. Kısmi bir metalurjik bağı temsil eden kancanın oluşumunun takım geometrisinden önemli ölçüde etkilendiği keşfedilmiştir (Al-Zubaidy 2016).

Şekil 2.16'da gösterilen; Ana Malzeme (AM), Isıdan Etkilenen Bölge (IEB), Karıştırma Bölgesi (KB) ve Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB) Bölüm 2.3.6'da anlatılmıştır.



Şekil 2.16. Sürtünme karıştırma nokta kaynağına ilişkin tipik bir örneğin enine kesit görünüşü (Tunçel 2015'den değiştirilerek alınmıştır)

Son yıllarda SKNK teknolojisinin kullanımındaki hızlı büyüme, anahtar deliğini ortadan kaldırmak ve kaynak kayma mukavemetinde bir artışa yol açan kaynaklı alanını artırmak amacıyla, bu tekniği değiştiren çeşitli varyasyonların gelişmesine yol açmıştır (Al-Zubaidy 2016). Bu varyasyonlardan bazıları: yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı, dikiş sürtünme karıştırma nokta kaynağı, salınımlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı ve pimsiz kaynak takımı kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağıdır.

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı farklı türde metallerin (demir, magnezyum, titanyum, alüminyum alaşımları ve bakır) birleştirilmesinde çok etkili olan bir metottur. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı metodunda işlem koşulları serttir; bu zorlayıcı şartlar altında takımının çalıştırılması nedeniyle ergime noktası yüksek olan malzemelerin birleştirilmesi kolay değildir (Ojo 2016).

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı tekniği icat edildiği zamandan itibaren otomotiv, havacılık, tren imalatı ve gemicilik sektörlerinde kabul görmüş ve uygulanmıştır (Ojo

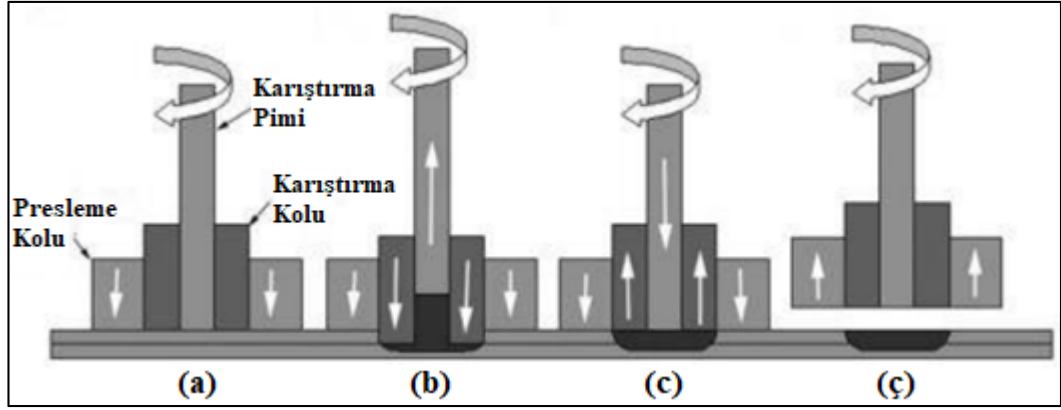
2016). Bu kaynak metodunun uygulama alanları; oyuk ısı eşanjörleri, ticari gemi yapımı, delta II roketler, otomotiv parçaları, lazer sistem hücreleri, motor hücreleri, tren gövdesi, uçak yapısı, uzay mekiği dış tankları ve besin tepsileridir (Ojo 2016). Otomotiv endüstrisinde, Mazda RX-8 spor arabasının kapı sacı ve gövde sacı üzerinde yapılan SKNK uygulamasına ilişkin örnekler Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Mazda RX-8 spor arabasının kapı sacı ve gövde sacı üzerinde yapılan SKNK uygulamasına ilişkin örnekler; (a) gövde paneli ve (b) yan kapı panelidir (Tunçel 2015’den alınmıştır)

2.5.1. Yeniden Doldurulmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Bu teknikte, birbirinden bağımsız olan karıştırma pimi, karıştırma kolu ve presleme kolu kullanır. Karıştırma iğnesinin, karıştırma kolunun ve presleme kolunun bağıl hareketini tam olarak kontrol edilmesiyle -birleştirme merkezinde bir anahtar deliği oluşturmadan- malzeme doldururken karıştırma takımı çıkarılır. Yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının -dört adımdan oluşan- temel prensibi Şekil 2.18’de gösterilmiştir (Song ve ark. 2012).



Şekil 2.18. Yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının temel prensibi; (a) Birinci Adım, (b) İkinci Adım, (c) Üçüncü Adım ve (ç) Dördüncü Adım (Tunçel 2015’den değiştirilerek alınmıştır)

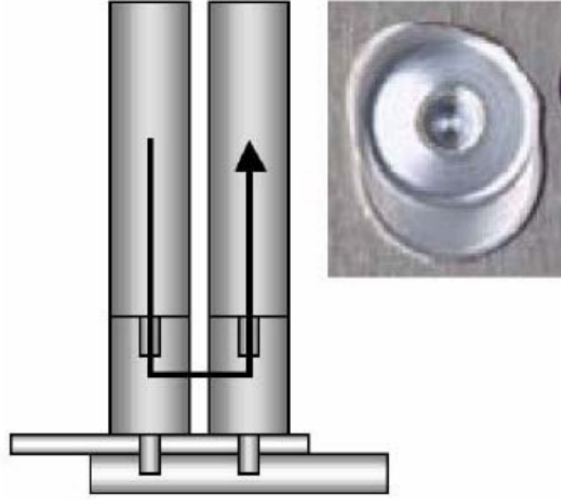
Yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin adımları (Song ve ark. 2012):

- Birinci Adım: Pres kolları iş parçasına baskı uygular, karıştırma takımı ve karıştırma kolları iş parçası yüzeyine yerleştirilir, döndürülür; iş parçasına sürtünür ve ısınır, bu durum malzemeyi plastikleştirir (Şekil 2.18 a).
- İkinci Adım: Karıştırma kolları, basınç eşliğinde malzemenin içine doğru hareket etmektedir ve karıştırma pimi de yukarı doğru hareket etmektedir. Takım ve karıştırma setinin oluşturduğu boşluğa malzeme akar (Şekil 2.18 b).
- Üçüncü Adım: Karıştırma pimi, malzeme akışını -karıştırma kolları yükselirken- iş parçasına doğru yönlendirir (Şekil 2.18 c).
- Dördüncü Adım: Pres kolları ve karıştırma takımı, karıştırma kollarının alt yüzeyi ile aynı hizada olduktan sonra iş parçasının yüzeyinden uzaklaştırılırlar ve üst üste gelen iş parçası lehim bağlantıları ile birbirine bağlanır (Şekil 2.18 ç).

Yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağının ekipmanı nispeten karmaşıktır, kaynak hızı yavaştır; fakat kaynaktaki anahtar deliği bulunmamaktadır ve ürün yüzeyinin düzgün olması için çok uygundur (Song ve ark. 2012).

2.5.2. Dikiş Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

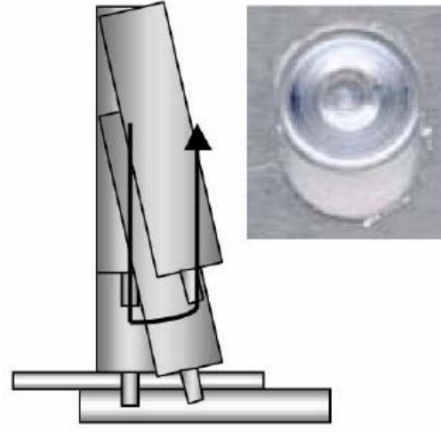
Dikiş sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknolojisinde, kaynak takımının iş parçasına dalması adımımdan sonra takımın iş parçasından çıkarılmadan önce belirli kısa bir mesafe iş parçası içinde ilerler (Şekil 2.19). Birleşme alanının genişleterek daha yüksek mukavemete sahip olmak, bu kaynak teknolojisinin amacıdır (Yuan 2008).



Şekil 2.19. Dikiş sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin şematik gösterimi (Yuan 2008'den alınmıştır)

2.5.3. Salımlı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Salımlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknolojisinin temel özelliği, karıştırma aletinin, nokta kaynağını gerçekleştirmek için merkezin etrafındaki yarıçap ile belirli bir mesafeye sahip belirli bir açıyla dönmesidir (Şekil 2.20). Karıştırma aleti önce iş parçasının içine doğru bastırılır, belirli bir yöne salınım yapar ve son olarak iş parçasından çıkartılır. Salımlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknolojisi, ortak arayüzün kaynak çarpılmasını etkili bir şekilde ortadan kaldırabilir, etkili birleştirme yeri genişliğini artırabilir ve birleştirme yeri mukavemetini etkili bir şekilde iyileştirilebilir (Song ve ark. 2012).



Şekil 2.20. Salınlı sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin şematik gösterimi (Yuan 2008'den alınmıştır)

2.5.4. Pimsiz Kaynak Takımı Kullanılarak Yapılan Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Bu kaynak teknolojisinin karıştırma takımları sadece pimsiz omuza sahiptir ve Şekil 2.21'de gösterildiği gibi kaynak takımının omzu, farklı tiplerde imal edilebilir. Lehim bağlantılarında, karıştırma takımının ve iş parçası yüzeyinin sürtünme ısısı tarafından üretilen difüzyon bağı ile oluşan bir karıştırma deliği yoktur. Bu kaynak teknolojisinin avantajları; takım geometrisinin basit olması, kolay kırılmaması ve uzun ömürlü olmasıdır (Song ve ark. 2012).



Şekil 2.21. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminde kullanılan pimsiz takımlar (Song ve ark. 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

2.6. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Geleneksel Kaynak Metodlarının Karşılaştırılması

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı otomotiv endüstrisinde alüminyum kapı, motor kaputu ve bagaj kapaklarının üretiminde kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma nokta

kaynağı; DNK ve kendinden geçmeli perçin gibi geleneksel kaynak işlemleriyle karşılaştırıldığında aşağıdaki avantajlara sahiptir (Yuan 2008).

- Gözeneklilik, çatlaklar ve kirlilik olmadan yüksek kaynak mukavemeti. SKNK işlemi esnasında ergime malzemesi yoktur.
- Küçük kaynak deformasyonu. SKNK, malzemelerde ergime olmadan gerçekleşen bir katı hal kaynak işlemidir; bu nedenle deformasyonlar DNK ve kendinden geçmeli perçinden daha küçüktür.
- Tehlikeli emisyon yoktur ve çevre dostudur. SKNK işlemi esnasında kaynak sıçraması ve ses oluşmamakta, buhar emisyonu da daha düşük seviyededir.
- Daha az bakım gerektirir. Çünkü, SKNK'de kullanılan ekipman sayısı, DNK ve kendinden geçmeli perçin için kullanılanlardan daha azdır.
- Daha düşük ekipman yatırımı. Alüminyum için DNK'ye kıyasla ekipman yatırımında yaklaşık % 40 azalma olduğu Yuan (2008) tarafından rapor edilmiştir. Büyük ölçekli elektrik beslemesi gerekmez ve SKNK için takımlar tüketilebilir değildir.
- Yüzey temizliği, delme ve perçin veya cıvata gibi hazırlık ve sarf malzeme gerekmemektedir.
- Birkaç işlem parametresi içeren basit birleştirme mekanizması sayesinde yüksek tekrarlanabilirlik ve tutarlılık gösterir.
- Düşük enerji tüketimi. SKNK'de tüketilen tek enerji; takımı döndürmek ve yürütmek için gereken elektriktir. DNK ile karşılaştırıldığında, SKNK işleminin enerji tüketimi; alüminyum için % 99 ve çelik için % 80 azalmıştır.

2.7. Kaynak Araştırması

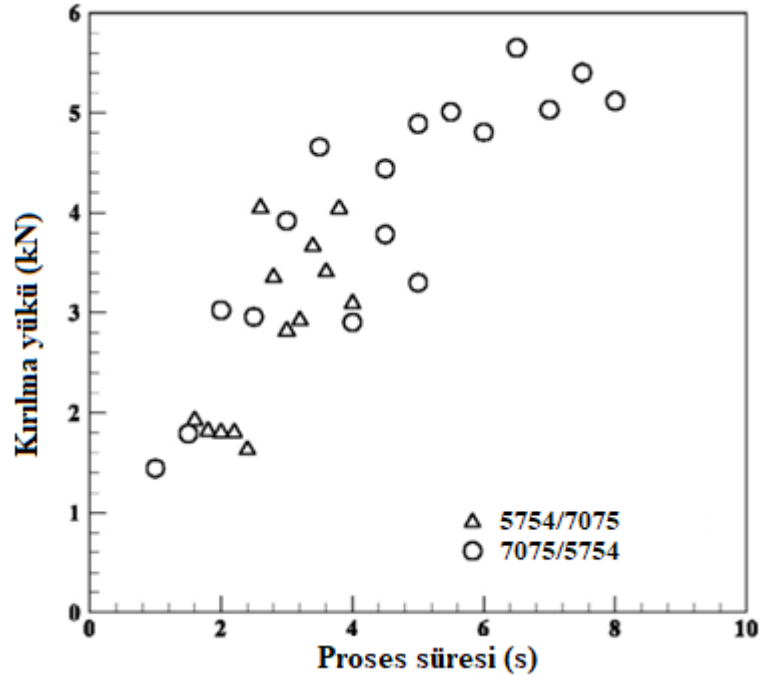
Otomotiv endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarından biri de 5000 serisi alüminyum alaşımları grubunda yer alan alüminyum 5754 alaşımıdır. Bu bölümde, alüminyum 5000 serisi alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağı metoduyla birleştirmesine ilişkin araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalar yer almaktadır.

Su ve ark. (2006) 'Material Flow During Friction Stir Spot Welding' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-H12 (kalınlık 1,5 mm) - Al 6111-T4 (kalınlık 1,3 mm), Al 6061 MMK (kalınlık 0,5 mm - 1,5 mm) - Al 6061-T6 (kalınlık 1,5 mm), Al 6061 MMK - Al 5754-H12 ve Al 5754-Al 2024 levha numunelerini kaynaklamışlardır ve kaynak işleminin malzeme akışına etkilerini araştırmışlardır (Metal Matriks Kompozit (MMK); Al 6061-T6/20 hac.-% Al₂O₃). Sonuç olarak pürüzsüz takım pimi kullanılarak yaptıkları kaynaklarda üst levha malzemesinin dönen takım piminin ucunda ileriye doğru itildiğinde, üst levha malzemesinin alt levha malzemesinin içine doğru hareket ettiği tespit etmişlerdir ve bu işlem esnasında üst levha malzemesinin; takım piminin dibine yapıştığı ve takım pimi çevresinde yapışkan bir tabaka oluştuğu da tespit etmişlerdir. Alt levha malzemesinin, dönen takım pimi anahtar deliğini oluşturduğunda spiral bir hareketle yukarıya ve dışa doğru yer değiştirdiğini saptamışlardır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında iki farklı malzeme akışı oluştuğu tespit etmişlerdir. Üst levha malzemesi, takım pimi tarafından aşağıya doğru hareket ettirildiğinde aşağıya doğru, saat yönünün tersinde ve pim çevresinde bir iç akış oluşturduğunu saptamışlardır. Alt levha malzemesinde ise sarmal bir hareketle yukarıya ve dışa doğru hareket eden bir dış akış bölgesi oluşturduğunu tespit etmişlerdir.

Su ve ark. (2007) 'Intermixing in Dissimilar Friction Stir Spot Welds' konulu makale çalışmalarında, Al 5754-H12 (kalınlık 1,5 mm) ve Al 6111-T4 (kalınlık 1,3 mm) levha numunelerinin sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi esnasında alüminyum alaşımların birbirine karışmasını deneysel ve sayısal modelleme kombinasyonu kullanılarak araştırmışlardır. Araştırmacıların Al 5754 üstte Al 6111 altta konumlandırarak gerçekleştirdikleri kaynak işlemi için; takım geometrisini (vida dişli pim ve vida dişsiz pim), takım bekleme süresini ve takım dalma hızını değişken

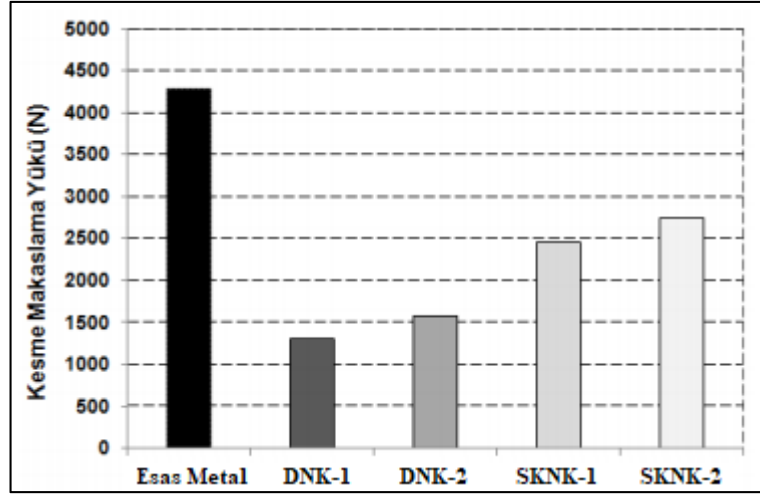
parametreler olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak, farklı malzemenin birbirine karışmasında; pürüzsüz takım pimi kullanarak yapılan kaynakta takım bekleme süresinin bulunması veya bulunmamasının kaynak işlemi için etkisini tespit edememişlerdir. Aynı zamanda farklı malzemenin birbirine karışmasında; vida dişli takım kullanılarak yapılan kaynak işlemi için takım bekleme süresinin bulunmamasının kaynak işlemi üzerinde etkisinin olmadığını saptamışlardır. Farklı malzemenin birbirine karışmasında takım pim geometrisinin vida dişli olmasının neden olduğunu öne sürmüşlerdir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında iki farklı malzeme akışı oluştuğunu tespit etmişlerdir. Üst levha malzemesinde, takım pimi aşağıya doğru hareket ettirildiğinde aşağıya doğru ve takım pimi çevresinde bir iç akış oluştuğunu belirtmişlerdir. Alt levha malzemesinde ise yukarı yönlü ve dışa doğru hareket eden bir dış akış bölgesi oluştuğunu saptamışlardır.

Tran ve ark. (2009) 'Effects Of Processing Time on Strengths and Failure Modes of Dissimilar Spot Friction Welds Between Aluminum 5754-O and 7075-T6 Sheets' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-O (kalınlık 2 mm) ve Al 7075-T6 (kalınlık 1,6 mm) levha numunelerini göreceli konumlandırarak kaynaklamışlardır ve kaynak işlemi proses süresinin; kaynak mukavemeti ve kırılma modları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Al 5754 (altta) - Al 7075 (üstte) ve Al 5754 (üstte) - Al 7075 (altta) olmak üzere iki kaynaklama pozisyonu için proses süresini değişken parametre olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak hem Al 5754 (altta) - Al 7075 (üstte) hem de Al 5754 (üstte) - Al 7075 (altta) numune kombinasyonları için proses süresi arttıkça, kesme makaslama kırılma yük değerlerinin arttığını belirtmişlerdir (Şekil 2.22). Al 5754 (altta) - Al 7075 (üstte) numune kombinasyonu kaynaklarının maksimum kırılma yük değeri, Al 5754 (üstte) - Al 7075 (altta) numune kombinasyonu kaynaklarından yaklaşık % 40 daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir. Hem Al 5754 (altta) - Al 7075 (üstte) hem de Al 5754 (üstte) - Al 7075 (altta) numune kombinasyonları kaynakları optik ve taramalı elektron mikrografları kırılıma modunun öncesinde ve sonrasında incelemişlerdir. Mikrografları incelediklerinde, farklı proses sürelerinde yapılan kaynakların farklı kaynak geometrileri ve farklı kırılma modlarının oluştuğunu gözlemlemişlerdir.



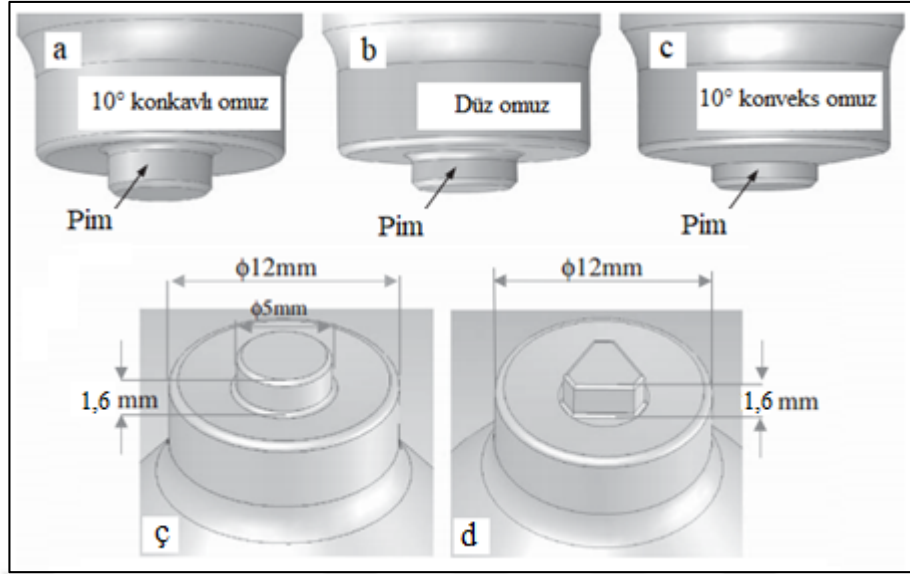
Şekil 2.22. Al 5754 (üstte) - Al 7075 (altta) ve Al 5754 (altta) - Al 7075 (üstte) numune kombinasyonları için proses süresinin bir fonksiyonu olarak kırılma yükleri (Tran ve ark. 2009'dan değiştirilerek alınmıştır)

Kahraman (2009) 'Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alaşımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı (RSW) ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (FSSW) Yöntemleri ile Birleştirilmesi' konulu tez çalışmasında, 1 mm kalınlığında Al 5754 levha numunelerini; direnç nokta kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemleri ile kaynaklamıştır ve kaynakların metalurjik ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Ayrı ayrı elektrik direnç nokta kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynakların mukavemet değerlerini saptamak amacıyla numunelere çekme testi uygulamıştır ve metalografik incelemeye tabi tutmuştur. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için değişken parametreler olarak, takım geometrisini, pim yüksekliğini ve kaynak bekleme süresini belirlemiştir. Direnç nokta kaynağı için değişken parametre olarak, yüzey temas direnç değerini belirlemiştir. Sonuç olarak; sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile yapılan kaynakların mekanik özelliklerinin, direnç nokta kaynağı ile yapılan kaynakların mekanik özelliklerinden daha iyi olduğunu tespit etmiştir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Esas metal, SKNK-1, SKNK-2, DNK-1 ve DNK-2 kaynak bağlantılarının kesme makaslama yükü değişimi (Kahraman 2009'dan değiştirilerek alınmıştır)

Badarinarayan ve ark. (2009) 'Effect of Tool Geometry on Hook Formation and Static Strength of Friction Stir Spot Welded Aluminum 5754-O Sheets' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754(kalınlık 1,32 mm) levha numunelerini kaynaklamışlardır. İlk adım olarak; takım omuz profilinin, kanca geometrisi ve statik mukavemette etkisinin karşılaştırılmasını, konkav, konveks ve düz (herbiri vida dişli silindirik pimler olan) takım omuz profilleri arasında araştırmışlardır (Şekil 2.24 a, b, c). İkinci adım olarak; takım profilinin etkilerini, silindirik ve üçgen geometri için incelemişlerdir (Şekil 2.24 ç, d). Takım omuz profilleri arasında en yüksek statik mukavemeti iç bükey takım omuz profilinin gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Takım geometri profilleri karşılaştırıldığında; silindirik takım profili -iç bükey takım omuz profili grupları- ile yapılmış kaynakta, kaynak bölgesinde sürekli bir kanca geometrisi ve geniş bir karıştırma bölgesi oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Üçgen takım profili ile yapılan kaynakta ise sabitlenmiş bir kanca geometrisi ve çok daha küçük bir karıştırma bölgesinin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

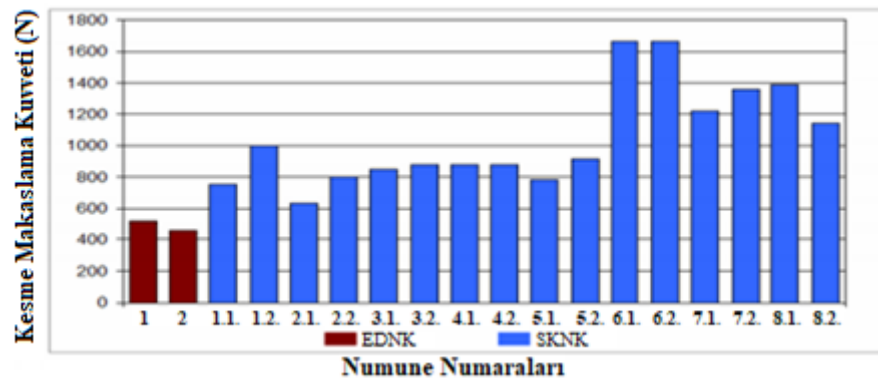


Şekil 2.24. SKNK takım geometrilerinin şematik gösterimi: (a) konkav omuz geometrili silindirik pimli takım, (b) düz omuz geometrili silindirik pimli takım, (c) konveks omuz geometrili silindirik pimli takım, (ç) konkav omuz geometrili silindirik pimli takım ve (d) konkav omuz geometrili üçgen pimli takım (Bütün pimlerin yüksekliği 1,6 mm'dir ve silindirik pimlerde M5 diş vardır; fakat üçgen pimde diş yoktur) (Badarinarayan ve ark. 2009'dan değiştirilerek alınmıştır)

Figner ve ark. (2009) 'Friction Stir Spot Welds Between Aluminium and Steel Automotive Sheets: Influence of Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructural' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-H111 (kalınlık 2 mm) ve galvaniz çelik HX340 LAD (kalınlık 1 mm) levha numunelerini; Al 5754 üstte ve galvaniz çelik HX340 LAD alta konumlandırarak kaynaklamışlardır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için; takım devir hızını ve takım bekleme süresini, kaynak işlemi için değişken parametreler olarak belirlemişler ve mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kaynak arayüzünün kesit mikroyapısını, ışık optik mikroskopuyla ve taramalı elektron mikroskopuyla incelemişlerdir. Kaynakların mukavemetini; kesme makaslama mukavemet testleri ve titreşim yorulma testleri ile incelemişlerdir. Sonuç olarak; kaynak parametrelerini, statik kesme makaslama mukavemet değerine göre optimize etmişlerdir. Çeliğin, taramalı elektron mikroskopu ile analizlerinde, pimin altında ve karıştırma bölgesindeki dalganın içinde çok ince taneler gözlemlemişlerdir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağının sürtünme aşamasında çelikten ayrılan demir parçacıklarının mekanik karıştırma yoluyla alüminyum alaşıma transfer olduğunu saptamışlardır. Sürtünme karıştırma nokta

kaynağının bağlanma ara yüzünde, Fe₂Al₅ intermetalik bileşik tabakaları (tabaka kalınlığı 1 µm - 30 µm) oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Er (2010) 'Elektrik Direnç ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynaklı Alüminyum Alaşımı Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi' konulu tez çalışmasında, elektrik direnç nokta kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemleri ile kaynaklamış olduğu Al 5005 (kalınlık 1,5 mm) levha numunelerinin kaynak performansı açısından karşılaştırılmasını yaparak sürtünme karıştırma nokta kaynağı için optimum kaynak parametrelerini araştırmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için; takım devir hızını, takım bekleme süresini, takım dalma derinliğini değişken parametreler olarak belirlemiştir. Kaynak performansını değerlendirmek için numunelere çekme-kesme testi uygulamıştır. Sonuç olarak; sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemiyle yapılmış kaynakların mekanik özelliklerinin, elektrik direnç nokta kaynağı (EDNK) yöntemiyle yapılmış kaynaklara göre daha iyi olduğunu tespit etmiştir (Şekil 2.25). Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için; en yüksek kesme makaslama mukavemet değerinin (1660 N) elde edildiği kaynak işlem parametrelerini, optimum kaynak parametreleri olarak kabul etmiştir. Bu durumun; takım devir hızı 1500 devir/dk, takım dalma derinliği 2,6 mm ve takım bekleme süresi 10 s kaynak işlem parametrelerinde meydana geldiğini gözlemlemiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi için, kaynak performansına etki eden en önemli kaynak işlem parametresinin takım dalma derinliği olduğunu tespit etmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi için, takım dalma derinliğinin artması ile kesme makaslama mukavemet değerinin arttığını belirtmiştir.

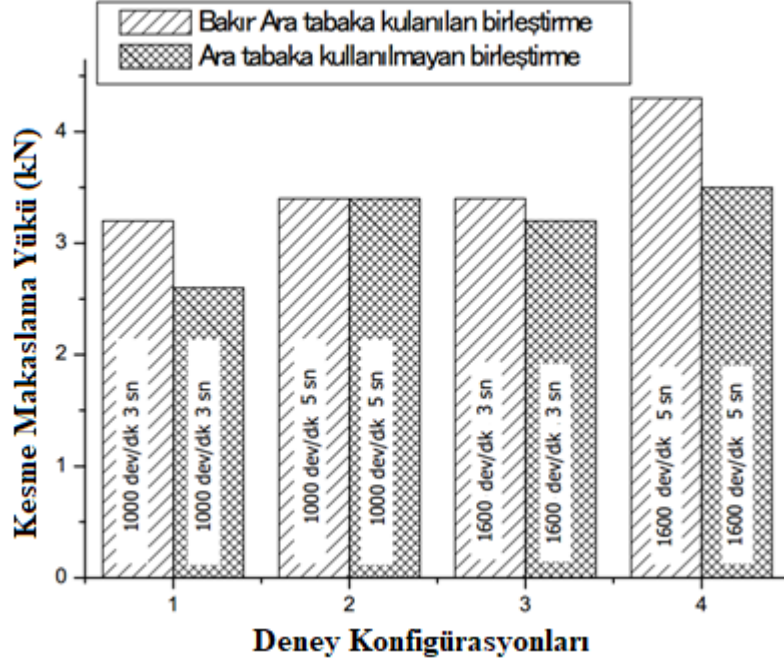


Şekil 2.25. Numunelere ait maksimum kesme makaslama kuvveti değişimleri (Er 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)

Tran ve Pan (2010) 'Failure Modes of Friction Stir Spot Welds in Cross Tension Specimens of Dissimilar Aluminium Sheets' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-O (kalınlık 2 mm) ve Al 7075-T6 (kalınlık 1,6 mm) levha numunelerini çapraz konumlandırarak kaynaklamışlardır ve kaynakların kırılma modlarını araştırmışlardır. Al 5754 üstte Al 7075 altta ve Al 5754 altta Al 7075 üstte olmak üzere iki kaynaklama pozisyonunda kaynakların kırılma modlarını araştırmak için yarı statik yükleme koşulları altında optik mikrograflarını, kırılma öncesinde ve sonrasında incelemişlerdir. Lineer elastik gerilme yoğunluk faktörü çözümlerine dayalı olarak, çapraz konumlandırarak kaynakladıkları ve doğrusal konumlandırarak kaynaklandıkları numunelerin yük taşıma kapasitelerini ve yorulma verilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak; sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile çapraz konumlandırarak kaynakladıkları numunelerdeki kırılma yükleri, doğrusal konumlandırarak kaynakladıkları numunelerinkinden daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Mikrograflar incelemeleri sonucunda, çapraz konumlandırarak kaynakladıkları numunelerdeki kırılmanın esas nedeninin arayüzey yüzeyindeki kırılmadan kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Çapraz konumlandırarak kaynakladıkları numunelerdeki kırılma modlarının, doğrusal konumlandırarak kaynakladıkları numunelerinkinden farklı olduğunu saptamışlardır.

Kaçar ve ark. (2011) 'Al-Cu-Al Malzeme Çiftinin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Kabiliyeti' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemini kullanarak, levha halindeki Al 5754 (kalınlık 2 mm) malzeme çiftini bakır (kalınlık 0,5 mm) ara tabaka kullanarak (Al-Cu-Al) kaynaklamışlardır ve kaynakların mekanik özellikleri ve mikroyapısını araştırmışlardır. Takım devir hızını (1000 dev/dk ve 1600 dev/dk), takım bekleme süresini (3 s ve 5 s) kaynak işlemi için değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Elde ettikleri verileri, bakır ara tabaka kullanılmadan birleştirilen aynı cins malzeme çiftinden elde ettikleri bulgularla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak; sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynaklamış oldukları Al-Cu-Al numunelerinin kesme makaslama yükü taşıma kapasitelerinin, takım devir hızı ve takım bekleme süresi arttıkça arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.26). Bakır ara tabaka kullanarak kaynaklamış oldukları Al-Cu-Al malzeme çiftinin kesme makaslama yükü taşıma kapasitelerinin, bakır ara tabaka kullanılmadan aynı kaynak parametreleri ile kaynaklamış oldukları Al-

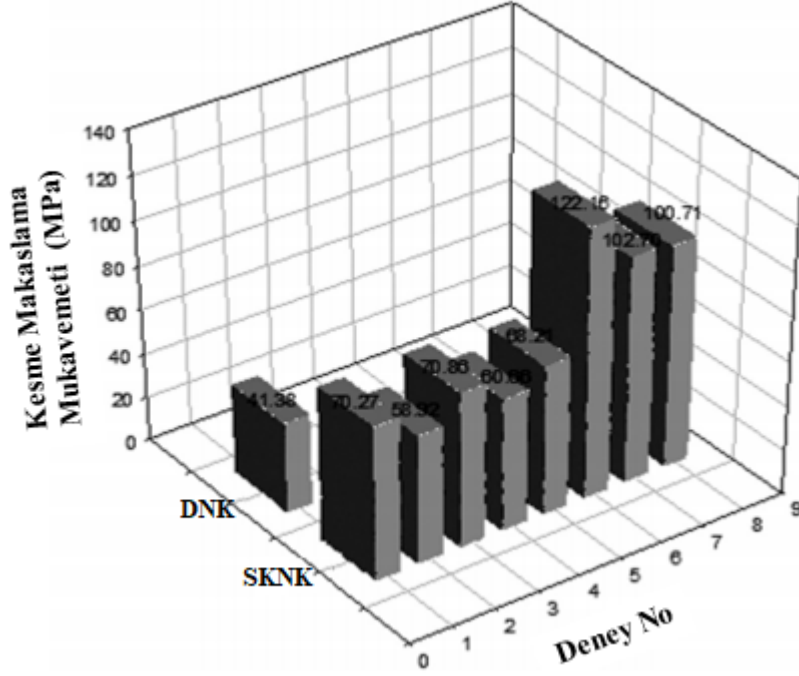
Al malzeme çiftinden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 2.26). Metalografik incelemeler neticesinde, takım profili etrafındaki yarı katı-sıvı haldeki akıcı metalde çok yüksek oranda plastik deformasyon oluştuğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.26. Bakır ara tabakalı ve ara tabakasız deney konfigürasyonlarının kesme makaslama yük değerleri (Kaçar ve ark. 2011’den değiştirilerek alınmıştır)

Kulekci ve ark. (2011) ‘Experimental Comparison of Resistance Spot Welding and Friction-Stir Spot Welding Processes for the En Aw 5005 Aluminum Alloy’ konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5005 (kalınlık 1,5 mm) levha numunelerini kaynaklamışlardır. Takım devir hızını, pim yüksekliğini ve takım bekleme süresini değişken parametre olarak belirlemişlerdir ve kaynaklı bölgedeki kesme makaslama mukavemetini ve sertlik artışını araştırmışlardır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile elde ettikleri sonuçları, geleneksel direnç nokta kaynağı uygulamasıyla elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır (Şekil 2.27). Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynakladıkları numunelerin kesme makaslama mukavemet değerini, en fazla etkileyen ana faktörün pim yüksekliği parametresi olduğunu tespit etmişlerdir. Pim yüksekliğini arttırdıkça mukavemet değerlerinin iyileştiğini saptamışlardır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynaklamış oldukları numunelerin; kesme makaslama mukavemet değerinin, plastik deformasyon değerinin ve sertlik artışı değerinin direnç

nokta kaynağı ile kaynakladıkları numunelere göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

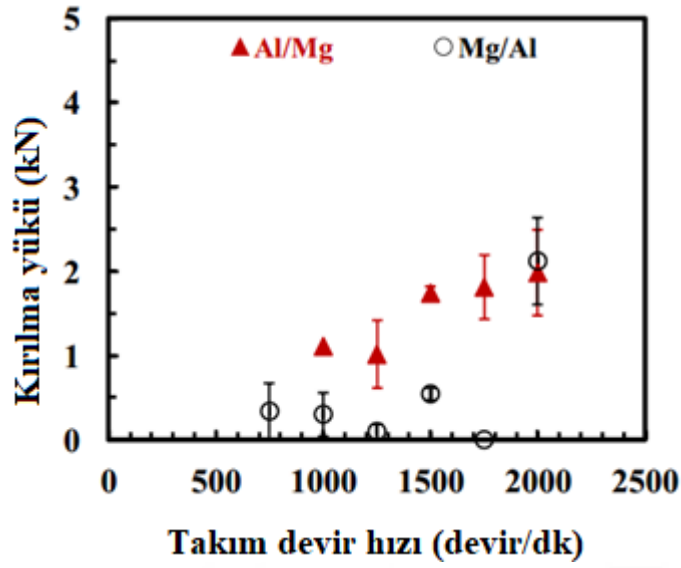


Şekil 2.27. DNK ve SKNK kaynaklı bağlantıların kesme makaslama mukavemetinin karşılaştırılması (Kulekci ve ark. 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

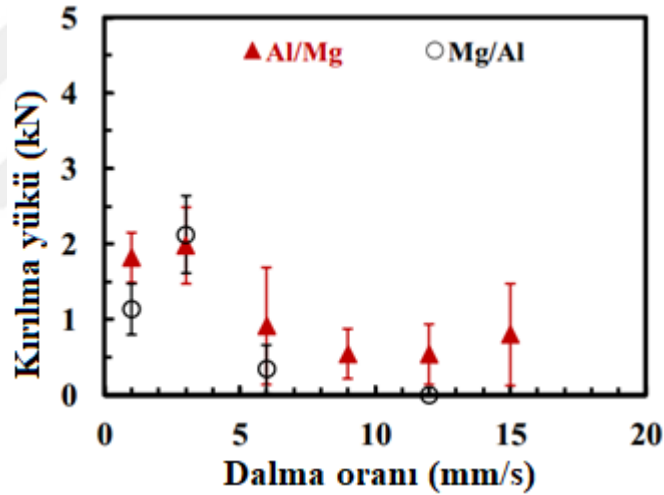
Kulekci ve Er (2012) 'Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynaklı En Aw - 5005 (Al Mg1) Alüminyum Alaşımı için Optimum Kaynak Parametre Seviyelerinin Belirlenmesi' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemiyle Al 5005 (kalınlık 1,5 mm) levha numunelerini kaynaklamışlardır ve optimum kaynak parametrelerini araştırmışlardır. Takım devir hızını (1500 dev/dk ve 2000 dev/dk), takım bekleme süresini (5 s ve 10 s), takım dalma derinliğini (2,2 mm ve 2,6 mm) kaynak işlemi için değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Kaynak performansını değerlendirmek için numunelere çekme-kesme testi deneyi uygulamışlardır. Sonuç olarak, en yüksek kesme makaslama mukavemet değerinin (1660 N) elde edildiği kaynak işlem parametrelerini, optimum kaynak parametreleri olarak kabul etmişlerdir. Bu durumun; takım devir hızı 1500 devir/dk, takım dalma derinliği 2,6 mm ve takım bekleme süresi 10 s kaynak işlem parametrelerinde meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Kaynak performansına etki eden en önemli kaynak işlem parametresinin takım dalma derinliği

olduğunu tespit etmişlerdir. Takım dalma derinliğinin artması ile kesme makaslama mukavemet değerinin arttığını belirtmişlerdir.

Cao ve ark. (2012) ‘Tensile Strength of Friction Stir Spot Welded Dissimilar AA5754-to-AZ31B Alloys’ konulu bildiri çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-O ve Mg AZ31B-H24 (kalınlık 2 mm) levha numunelerini göreceli konumlandırarak kaynaklamışlardır ve kaynaklı numunelerin kesme makaslama mukavemetini araştırmışlardır. Al 5754 (üstte) - Mg AZ31B (altta), Al 5754 (altta) - Mg AZ31B (üstte), Al 5754 (üstte) - Al 5754 (altta) ve Mg AZ31B (altta) - Mg AZ31B (üstte) olmak üzere dört kaynaklama pozisyonu için takım devir hızını, takım dalma oranını ve takım bekleme süresini değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak; Al/Al kaynaklarının, Mg/Mg kaynaklarına kıyasla daha yüksek mukavemet değerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Al/Mg kaynaklarının, Al/Al kaynakları veya Mg/Mg kaynaklarına kıyasla en düşük kesme makaslama mukavemet değerine sahip olduğunu saptamışlardır. Al/Mg kaynakları için kesme makaslama mukavemet değerinin, takım devir hızının artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.28). Al/Mg kaynakları için kesme makaslama mukavemet değerinin, takım dalma oranının ve takım bekleme süresinin artmasıyla arttığını saptamışlardır; fakat takım dalma oranının ve takım bekleme süresinin çok fazla artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir (Şekil 2.29). Al/Al kaynakları veya Mg/Mg kaynakları için kesme makaslama mukavemet değerinin, takım bekleme süresi arttırılmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, Al/Al ve Mg/Mg kaynaklarının çoğunlukla nugget çekme modunda kırılmış olduğunu saptamışlardır ve bu nedenle daha yüksek kesme makaslama mukavemeti değerleri elde ettiklerini belirtmişlerdir. Al/Mg ve Mg/Al kaynakları ise arayüzey modunda kırılmış olduğunu tespit etmişlerdir ve bu nedenle en düşük kesme makaslama mukavemet elde ettiklerini belirtmişlerdir.



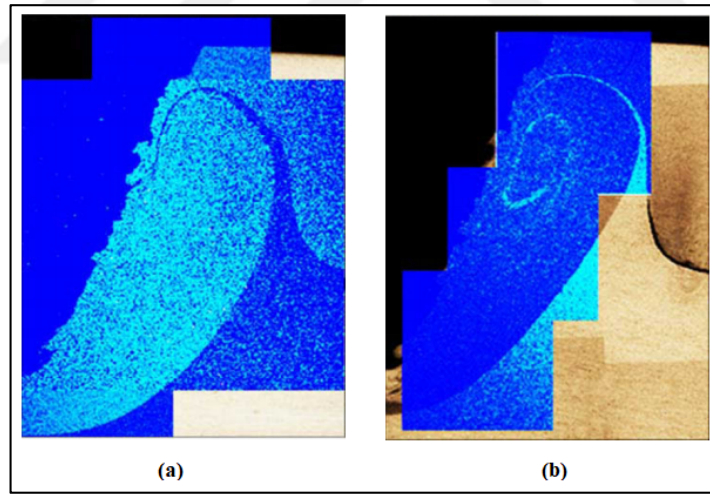
Şekil 2.28. Takım devir hızının, 3 mm/s dalma oranında ve 2 s bekleme süresinde elde edilen kırılma mukavemetine etkisi (Cao ve ark. 2012'den değiştirilerek alınmıştır)



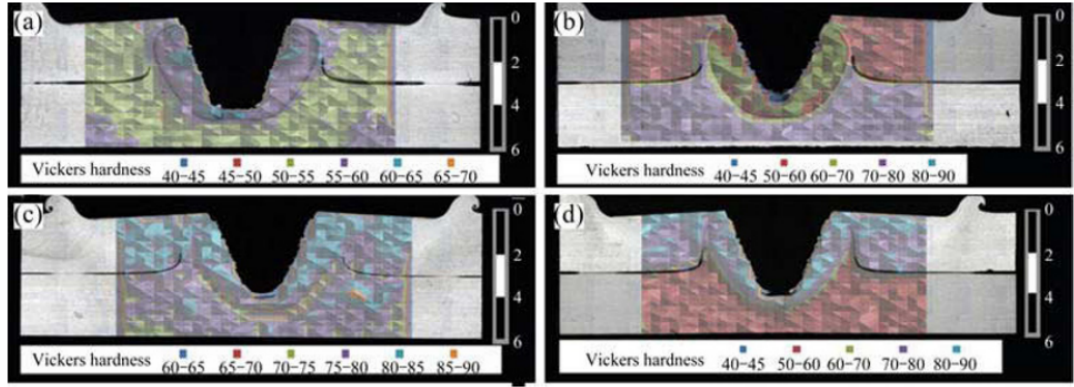
Şekil 2.29. Takım dalma hızının, 2000 dev/dk takım devir hızında ve 2 s bekleme süresinde elde edilen kırılma yüklerine etkisi (Cao ve ark. 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Jeon ve ark. (2012) 'Material Properties of Friction Stir Spot Welded Joints of Dissimilar Aluminum Alloys' konulu makale çalışmalarında; Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5052-H32(kalınlık 3 mm) ve Al 6061-T6(kalınlık 3 mm) levha numunelerini göreceli konumlandırarak kaynaklamışlardır. Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta), Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte), Al 5052 (üstte) - Al 5052 (altta) ve Al 6061 (altta) - Al 6061 (üstte) olmak üzere dört kaynaklama pozisyonu için mekanik özellikleri mikrosertlik ölçümleri ile

araştırmışlardır ve karıştırma bölgesindeki malzeme karışımını elektron mikroskop analizörü ile incelemişlerdir. Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta) ve Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonlarının karıştırma bölgesindeki magnezyum dağılımının elektron mikroskop analizörü incelemeleri sonucunda malzemelerin akış gerilimi ve vizkozitelerinin farklı olması nedeniyle ilgili numune kombinasyonlarında birbirinden oldukça farklı karıştırma bölgeleri oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.30). Vickers sertlik deneyleri sonuçlarını incelendiklerinde Al 5052 (üstte) - Al 5052 (altta), Al 6061 (altta) - Al 6061 (üstte) ve Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonlarının tipik mikro sertlik dağılımı gösterdiğini tespit etmişlerdir (Şekil 2.31). Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta) numune kombinasyonunda termomekanik olarak etkilenen bölgenin karıştırma bölgesinden büyük olması nedeniyle mikro sertlik dağılımının diğer numune kombinasyonlarına göre oldukça farklı sonuç verdiğini belirtmişlerdir. En yüksek kesme makaslama mukavemet değerinin Al 5052 (üstte) - Al 5052 (altta) numune kombinasyonunda oluştuğunu, en düşük kesme makaslama mukavemet değerinin ise Al 6061 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonunda oluştuğunu saptamışlardır.

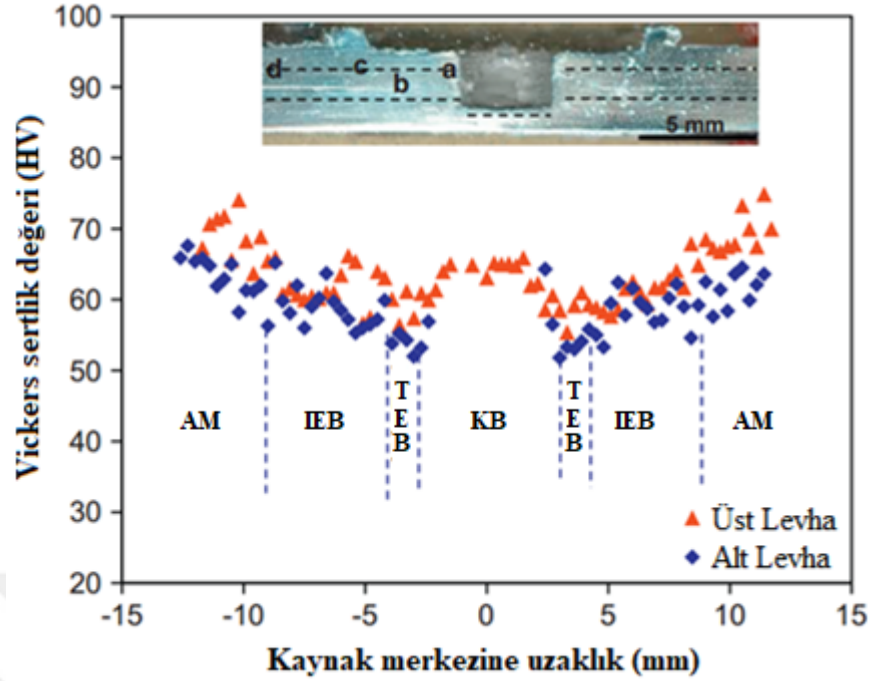


Şekil 2.30. (a) Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta) ve (b) Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonlarının karıştırma bölgesindeki magnezyum dağılımları (Jeon ve ark. 2012'den alınmıştır)



Şekil 2.31. (a) Al 5052 (üstte) - Al 5052 (altta), (b) Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta), (c) Al 6061 (altta) - Al 6061 (üstte) ve (d) Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonlarının Vickers sertlik dağılımı (Jeon ve ark. 2012'den alınmıştır)

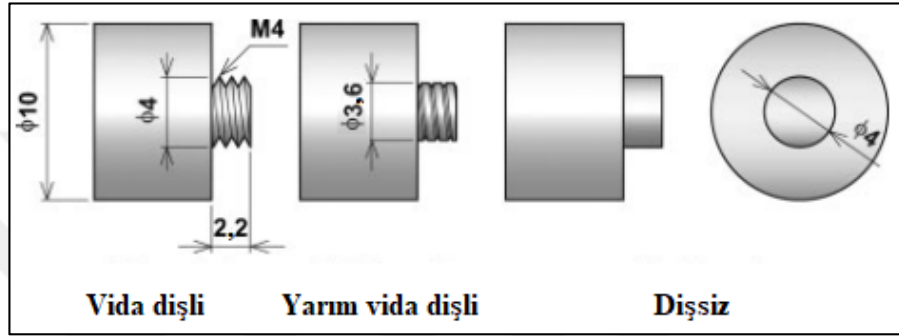
Chowdhury ve ark. (2012) 'Lap Shear Strength and Fatigue Life of Friction Stir Spot Welded AZ31 Magnesium and 5754 Aluminum Alloys' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-H24 (kalınlık 2 mm) ve Mg AZ31B-H24 (kalınlık 2 mm) levha numunelerini göreceli konumlandırarak kaynaklamışlardır. Al-Al, Mg-Mg ve Al (üstte) - Mg (altta) olmak üzere üç kaynaklama pozisyonu için kesme makaslama mukavemetini ve yorulma özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, Mg-Mg numune kombinasyonunda anahtar deliğinin etrafında nugget şeklinde eş eksenli yeniden kristalleşmiş taneler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Mg-Mg numune kombinasyonunun sertlik profilinin W-şeklinde olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 2.32). Hem Al-Al kaynaklarında hem de Al-Mg kaynaklarında daha düşük sertlik değerlerini; termomekanik olarak etkilenen bölgede ve ısıdan etkilenen bölgede tespit etmişlerdir. Hem Al-Al kaynaklarının hem de Mg-Mg kaynaklarının, Al-Mg kaynaklarına göre kesme makaslama mukavemetinin, kırılma enerjisinin ve yorulma ömrünün daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Al-Al kaynaklarının, Mg-Mg kaynaklarından biraz daha düşük bir kesme makaslama mukavemeti göstermiş olmasına karşın, Al-Al kaynaklarının daha yüksek kırılma enerjisine ve yorulma ömrüne sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Üç tip kırılma modu gözlemlemişlerdir. Al-Al kaynaklarında ve Mg-Mg kaynaklarında; yüksek devirli yüklerde çekme nugget kırılması ve düşük devirli yüklerde yüklemeye yönüne dik olarak yorulma kırılması meydana geldiği gözlemişlerdir. Al/Mg kaynaklarında ise nugget ayrılma kırılması oluştuğunu belirtmişlerdir.



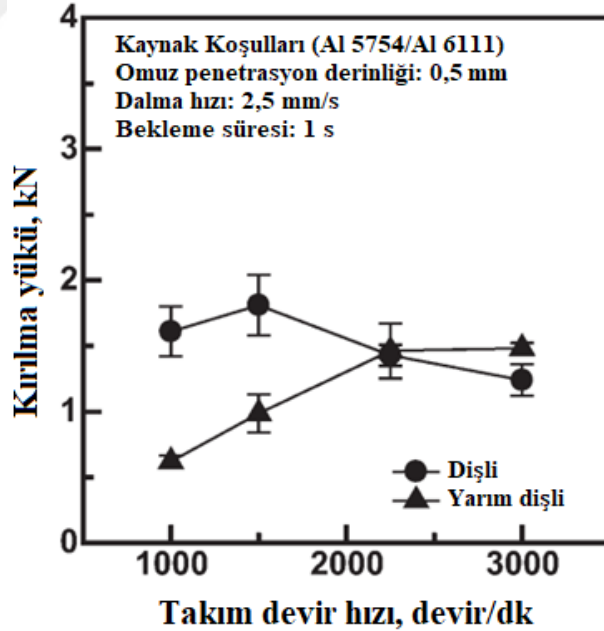
Şekil 2.32. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynaklanmış Mg (üstte) - Mg (altta) levha numunlerinin kaynak hattı boyunca tipik mikrosertlik profili ((a) Karıştırma bölgesi (KB), (b) Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB), (c) Isıdan etkilenen bölge (IEB) ve (d) Ana metal (AM)) (Chowdhury ve ark. 2012’den değiştirilerek alınmıştır)

Ikuta ve ark. (2012) ‘Influence of Tool Thread on Mechanical Properties of Dissimilar Al Alloy Friction Stir Spot Welds’ konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-H12 (kalınlık 1,6 mm) - Al 6111-T4 (kalınlık 1,5 mm) ve Al 5052-H34 (kalınlık 1,5 mm veya 3 mm) - Al 6061-T651(kalınlık 3 mm) levha numuneleri kaynaklamışlardır ve kaynakların mekanik özellikleri araştırmışlardır. Kaynak işlemi için; takım geometrisini (vida dişli, yarım vida dişli ve dişsiz (Şekil 2.33)) ve takım devir hızını değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak düşük takım devir hızı ve vida dişli takım kullanarak yaptıkları Al 5754/Al 6111 kaynaklarındaki kırılma yüklerinin, yarım dişli takım kullanarak yaptıkları kaynaklardan daha yüksek olduğunu saptamışlardır (Şekil 2.34). Vida dişli takım kullanarak yaptıkları Al 5754/Al 6111 kaynaklarındaki en yüksek kırılma yüklerinin düşük takım devir hızında üretildiğini tespit etmişlerdir (Şekil 2.34). Yarım vida dişli takım kullanarak yaptıkları Al 5754/Al 6111 kaynaklarındaki kırılma yüklerinin, takım devir hızı arttıkça doğrusal olarak arttığını belirtmişlerdir (Şekil 2.34). Vida dişli takım kullanarak yaptıkları Al 5754/Al 6111 kaynaklarındaki düşük takım devir hızında yüksek mukavemete sahip olduğunu

saptamışlardır (Şekil 2.34). Yarım vida dişli takım kullanarak yaptıkları Al 5754/Al 6111 kaynaklarındaki düşük takım devir hızında düşük mukavemete sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 2.34). Vida dişli takım ve yarım vida dişli takım kullanarak Al 5052/Al 6061 kaynaklarındaki, bağlanmış kesitteki karıştırma alanı ve kırılma yüzeyindeki esas bağlanmış bölge ile uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu nedenle takım geometrisinin; vida dişli, yarım vida dişli ve dişsiz olmasının, kaynakların mekanik özellikleri üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.33. Farklı takım tasarımları (Ikuta ve ark. 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

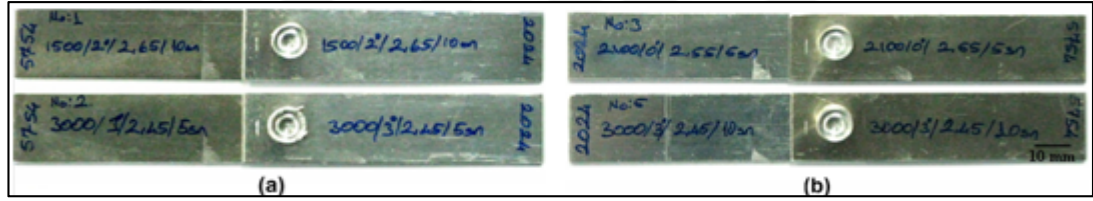


Şekil 2.34. Al 5754/Al 6111 bindirmeli bağlantılarda kırılma yükü özellikleri ile takım dönme hızı arasındaki ilişki (Ikuta ve ark. 2012'den değiştirilerek alınmıştır)

Pathak ve ark. (2013) ‘Microstructure and Mechanical Performance of Friction Stir Spot-Welded Aluminum-5754 Sheets’ konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynaklamış oldukları Al 5754 (kalınlık 1,6 mm) levha numuneleri için; takım devir hızını, takım dalma derinliğini, takım bekleme süresini, dairesel ve konik takım profillerini kaynak işlemi için değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Takım tasarımı ve proses parametrelerinin; takım ve alüminyum levha arasındaki sıcaklık dağılımı, kaynak mikroyapısı, kaynak mukavemeti ve kırılma modları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, araştırmacılar kaynak bölgesindeki takım ve alüminyum levha arasındaki sıcaklık dağılımında simetrik sıcaklık profilleri gözlemlemişlerdir. Konik takım profiline kıyasla dairesel takım profili ile yapılan kaynakta, maksimum sıcaklığın daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Kaynaklı numunelerin kesme makaslama mukavemet testlerini; takım devir hızı, takım dalma derinliği ve takım bekleme süresi parametrelerinde araştırmışlardır. Dairesel takım profili için en yüksek kesme makaslama mukavemet değerinin; takım devir hızı 2000 devir/dk, takım dalma derinliği 2,4 mm ve takım bekleme süresi 12 s parametrelerinde 4,8 kN olduğunu tespit etmişlerdir. Konik takım profili için en yüksek kesme makaslama mukavemet değerinin; takım devir hızı 1400 devir/dk, takım dalma derinliği 1,8 mm ve takım bekleme süresi 4 s parametrelerinde 2,4 kN olduğunu saptamışlardır. Kaynak bölgelerini, kesitsel mikrograf analizi ve taramalı elektron mikroskobu fractograph analizi ile incelemişler ve üç farklı kırılma modu (kesme kırılması, karışık kesme makaslama kırılması ve çekme kırılması) gözlemlemişlerdir.

Bozkurt ve Bilici (2013) ‘Application Of Taguchi Approach to Optimize of FSSW Parameters on Joint Properties of Dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 Aluminum Alloys’ konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-H22 (kalınlık 1,5 mm) ve Al 2024-T3 (kalınlık 1,6 mm) levha numunelerinin göreceli konumlandırılması ile kaynaklamışlardır ve kaynakların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Al 5754 (altta) - Al 2024 (üstte) (durum 1) ve Al 5754 (üstte) - Al 2024 (altta) (durum 2) olmak üzere iki kaynaklama pozisyonu (Şekil 2.35) için takım devir hızını, takım bekleme süresini, takım dalma derinliğini ve takım eğim açısını kaynak işlemi için değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. İşlem parametrelerini, Taguchi’nin L9 ortogonal dizisine dayanan Taguchi tekniği ile optimize etmişlerdir.

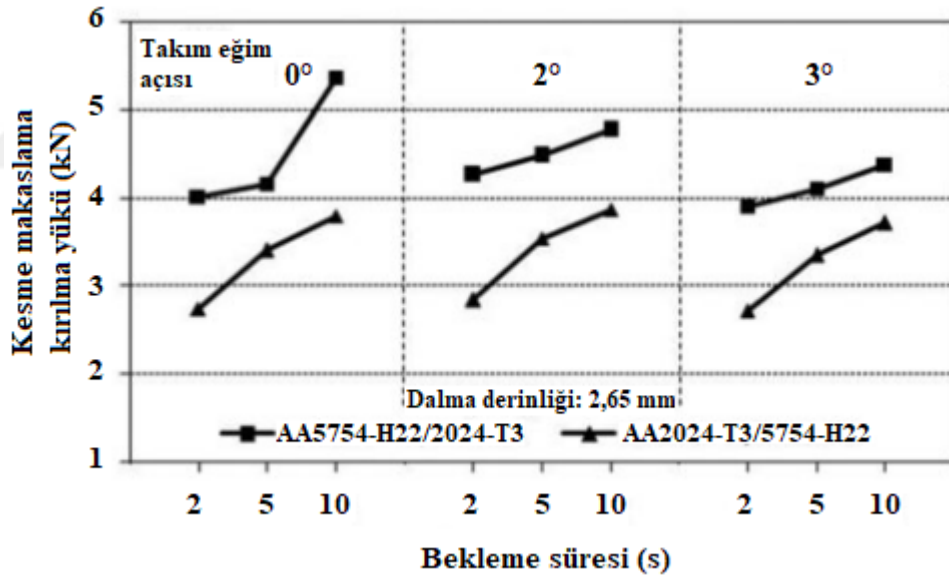
Sonuç olarak; kaynak işlem parametrelerinin kesme makaslama mukavemet değerine, katkı yüzdelerini incelemiştir. En yüksek kesme makaslama mukavemet değerini durum 1’de; takım devir hızı 1500 devir/dk, takım bekleme süresi 2 s, takım dalma derinliği 2,65 mm ve takım eğim açısı 10° işlem parametrelerinde tespit etmişlerdir (katkı yüzdeleri: takım devir hızı % 53,66, takım eğim açısı % 23,74, takım dalma derinliği % 12,54 ve takım bekleme süresi % 5,45). Takım devir hızı parametresinin hem durum 1 hem de durum 2 için mekanik özellikler üzerinde önemli parametre olduğunu tespit etmişlerdir. Durum 1 için: takım bekleme süresi parametresinin ve durum 2 için: takım dalma derinliği parametresinin, mekanik özellikler üzerinde etkili parametreler olmadığını gözlemlemiştir. Kesme makaslama testlerinde, durum 1 ve durum 2 için iki farklı kırık morfolojisi (maksimum çekme nugget kırılması, minimum çapraz nugget kırılması) gözlemlemiştir. Kesme makaslama mukavemet değerinin, optimum kaynak parametreleri ile ilk kaynak parametreleri karşılaştırıldığında; durum 1 için % 47 ve durum 2 için ise % 1,1 iyileştğini tespit etmişlerdir.



Şekil 2.35. Deney numunelerinin kaynaklama pozisyonları: (a) Al 5754 (altta) - Al 2024 (üstte) (durum 1) ve (b) Al 5754 (üstte) - Al 2024 (altta) (durum 2) (Bozkurt ve Bilici 2013’den değiştirilerek alınmıştır)

Bozkurt ve ark. (2013) ‘Effect of Welding Parameters on Lap Shear Tensile Properties of Dissimilar Friction Stir Spot Welded AA 5754-H22 and 2024-T3 Joints’ konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-H22 (kalınlık 1,5 mm) ve Al 2024-T3 (kalınlık 1,6 mm) levha numunelerini göreceli konumlandırarak kaynaklamışlardır ve kaynakların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Al 5754 (altta) - Al 2024 (üstte) ve Al 5754 (üstte) - Al 2024 (altta) olmak üzere iki kaynaklama pozisyonu için takım bekleme süresini, takım dalma derinliğini ve takım eğim açısını kaynak işlemi için değişken parametreler olarak belirlemiştir. Sonuç olarak, levha numunelerinin konumlandırılmasının kaynak mukavemeti üzerinde önemli bir rol oynadığını gözlemlemiştir. Maksimum kesme makaslama mukavemet değerini, Al 5754 (üstte) -

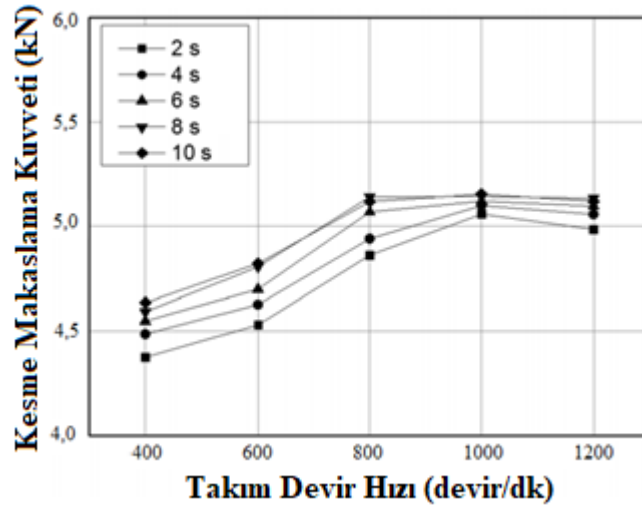
Al 2024 (altta) numune kombinasyonunda; takım dalma derinliğinin 2,65 mm, takım bekleme süresinin 10 s ve takım eğim açısının 0° olduğu kaynak işlem parametrelerinde elde etmişlerdir (Şekil 2.36). Hem Al 5754 (altta) - Al 2024 (üstte) hem de Al 5754 (üstte) - Al 2024 (altta) numune kombinasyonları için kesme makaslama mukavemet testlerinde; çapraz nugget kırılması ve çekme nugget kırılması gözlemlenmiştir. Düşük kesme makaslama mukavemet değerleri gösteren kaynakların, çapraz nugget kırılması nedeniyle kırıldığını belirtmişlerdir; buna mukabil daha yüksek kesme makaslama mukavemet değerleri gösteren kaynakların ise çekme nugget kırılması nedeniyle kırıldığını saptamışlardır. Kesme makaslama mukavemet değerinin artışı ile kaynak ağzı genişliğinin arttığını tespit etmişlerdir. Takım bekleme süresinin 2 saniyeden 10 saniye kadar artışıyla kaynak mukavemetinin ve kaynak ağzı genişliğinin arttığını saptamışlardır. Al 5754 (üstte) - Al 2024 (altta) numune kombinasyonları için optimum takım eğim açısının 0° ve 2° olduğunu tespit etmişlerdir.



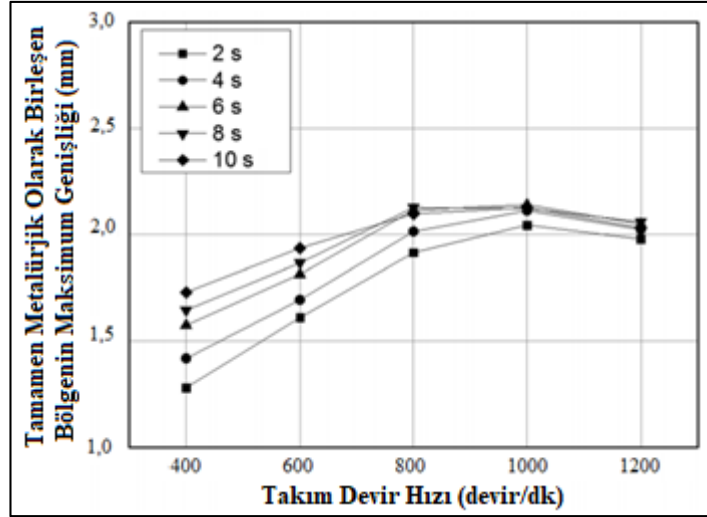
Şekil 2.36. Takım eğim açısı ve bekleme süresinin, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile kaynaklanan birbirine benzemeyen bağlantıların kesme makaslama kırılma yükü üzerindeki etkisi (Takım dalma derinliği 2,65 mm) (Bozkurt ve ark. 2013'den değiştirilerek alınmıştır)

Mahmoud ve Khalifa (2014) 'Microstructural and Mechanical Characteristics of Aluminum Alloy AA5754 Friction Stir Spot Welds' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754 (kalınlık 3 mm) levha numunelerini

kaynaklamışlardır. Takım devir hızı ve takım bekleme süresi kaynak işlem parametrelerinin; kaynak yapısı ve statik mukavemet üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Tamamen metalürjik olarak birleşen bölgenin kesme makaslama mukavemet değerlerinin, belirli seviyelere kadar; takım devir hızı ve/veya takım bekleme süresi arttıkça arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Maksimum kesme makaslama kuvvet değerinin 5,14 kN olduğunu; takım devir hızı 800 devir/dak ve takım bekleme süresi 8 s kaynak işlem parametrelerinde tespit etmişlerdir (Şekil 2.37). Kaynak bölgesinin, kaynak levha numunesinden daha yüksek mikrosertlik sergilediğini belirtmişlerdir. Metalürjik olarak birleşen bölgenin genişliğinin, belirli seviyelere kadar; takım devir hızı ve/veya takım bekleme süresi arttıkça arttığını saptamışlardır. Tamamen metalürjik olarak birleşen bölgenin maksimum genişliğinin 2,14 mm olduğunu; takım devir hızı 1000 devir/dak ve takım bekleme süresi 6 s kaynak işlem parametrelerinde tespit etmişlerdir (Şekil 2.38). Kaynak bölgesindeki alüminyum tane büyüklüğünün takım devir hızı ve/veya takım bekleme süresi arttıkça arttığını belirtmişlerdir.



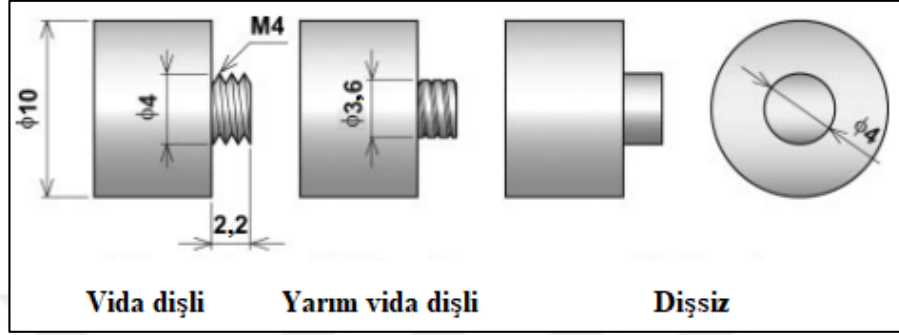
Şekil 2.37. Birçok bekleme süresinde, takım devir hızı ile maksimum kuvvetin değişimi (Mahmoud ve Khalifa 2014'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.38. Farklı bekleme süresinde, takım devir hızı ile tamamen metalürjik olarak birleşen bölgenin maksimum genişliğinin değişimi (Mahmoud ve Khalifa 2014'den değiştirilerek alınmıştır)

Ikuta ve ark. (2015) 'Influence of Tool Thread on the Mechanical Properties of Dissimilar Al Alloy Friction Stir Spot Welds' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754-H12 (kalınlık 1,6 mm) - Al 6111-T4 (kalınlık 1,5 mm) ve Al 5052-H34 (kalınlık 1,5 mm veya 3 mm) - Al 6061-T651 (kalınlık 3 mm) levha numunelerini kaynaklanmışlardır ve kaynakların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Kaynak işlemi için; takım geometrisini (vida dişli, yarım vida dişli ve dişsiz (Şekil 2.39) ve takım devir hızını değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak; yarım vida dişli takım kullanarak yaptıkları Al 5754/Al 6111 kaynaklarındaki kırılma yüklerinin, takım devir hızı 1000 devir/dk, 1500 devir/dk ve 2250 devir/dk değerlerinde çok düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Takım devir hızının 3000 devir/dk olduğu durumda yarım vida dişli takım kullanarak yaptıkları Al 5754/Al 6111 kaynaklarındaki kırılma yükleri, dişli takım kullanarak yaptıkları kaynaktan daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Benzer kırılma yüklerini Al 5052/Al 6061 kaynaklarında takım geometrisinin vida dişli, yarım vida dişli, dişsiz olması ve takım devir hızının 1000 devir/dk olduğu durumda tespit etmişlerdir. Vida dişli takım kullanarak yaptıkları A5754/A6111 kaynaklarındaki kesme makaslama mukavemet değerinin, takım devir hızının 1500 devir/dk olduğunda 1,8 kN ve takım devir hızının 3000 devir/dk olduğunda ise 1,2 kN olarak saptamışlardır. Yarım dişli takım kullanarak yaptıkları A5754/A6111 kaynaklarındaki en yüksek kesme makaslama mukavemet değeri, takım devir hızı 3000

devir/dk olduğunda 1,5 kN olarak tespit etmişlerdir. Al 5052/Al 6061 kaynaklarında takım geometrisinin vida dişli, yarım vida dişli, dişsiz olması ve takım devir hızının 1000 devir/dk olduğu durumda kesme makaslama mukavemet değerinin 2,1 kN ile 2,3 kN değerleri arasında olduğunu belirtmişlerdir.

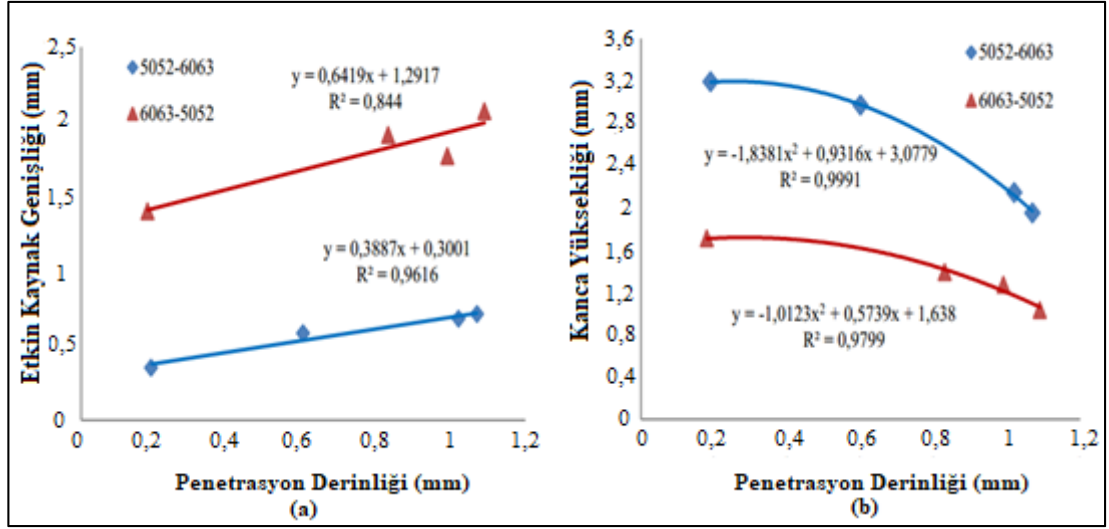


Şekil 2.39. Farklı takım tasarımları (Ikuta ve ark. 2015'den değiştirilerek alınmıştır)

Klobčar ve ark. (2015) 'Parametric Study of FSSW of Aluminium Alloy 5754 Using A Pinless Tool' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5754 (üst levha 1,6 mm ve alt levha 2 mm kalınlığında) levha numunelerini, kıvrım omuz geometrili pimsiz takım kullanılarak kaynaklamışlardır ve parametrik çalışmasını araştırmışlardır. Yanıt yüzey metodolojisine göre; takım devir hızı 988 dev/dk - 3511 dev/dk, takım dalma hızı 24,4 mm/dk - 150 mm/dk ve takım bekleme süresi 1 s - 3,5 s parametrelerini değişken işlem parametreleri olarak belirlemişlerdir. Kaynak esnasında, eksenel kuvveti ve torku bir dinamometre kullanılarak izlemişlerdir. Kaynaklı numune çiftlerini kesme makaslama mukavemet testine tabi tutmuşlardır ve kırılmış numuneleri görsel olarak incelemişlerdir. Kaynak birleşme çizgisini ve mikroyapısını optik mikroskop kullanılarak polarize ışık altında analiz etmişlerdir ve kırılmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskopisi yöntemiyle incelemişlerdir. Kaynak parametreleri, kaynak mukavemeti, eksenel kuvvet ve tork arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Sonuç olarak kaynak işlemi esnasına dinamometre ile ölçtükleri değerlerin; eksenel kuvvet için 12 kN - 16 kN ve tork için 19 Nm - 58 Nm olduğunu gözlemlemişlerdir. En yüksek kaynak mukavemet değerinin elde edildiği kaynak işlem parametrelerini, optimum kaynak parametreleri olarak kabul etmişlerdir. Bu durumu; takım devir hızının 3000 devir/dk, takım dalma hızının 50 mm/dk ve takım bekleme süresinin 3 s olduğu kaynak işlem parametrelerinde saptamışlardır. Optimum kaynak

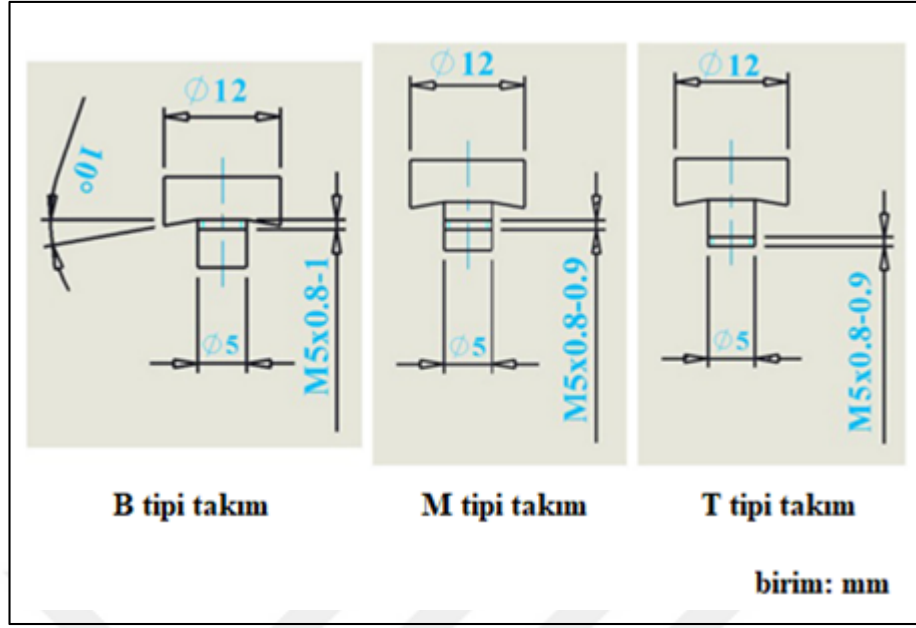
parametrelerinde, en yüksek kesme makaslama mukavemet değerinin 8,6 kN olduğunu tespit etmişlerdir.

Piccini ve Svoboda (2015) 'Effect Of The Tool Penetration Depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Dissimilar Aluminum Alloys' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5052-H32 (kalınlık 3 mm) ve Al 6063-T6(kalınlık 2 mm) levha numunelerini göreceli konumlandırarak kaynaklamışlardır. Al 5052 (üstte) - Al 6063 (altta) ve Al 5052 (altta) - Al 6063 (üstte) olmak üzere iki kaynaklama pozisyonu için 0,05 mm ile 1,25 mm arasındaki takım penetrasyon dalma derinliği değerlerinde farklı koşullarda gerçekleştirdikleri analizlerde makroyapısal ve boyut karakterizasyonu, mikro sertlik profilleri ve sıyırma testlerini yapmışlardır. Sonuç olarak, kaynak işleminde malzeme konumlandırılmasının Al 6063'ün Al 5052'nin üstünde konumlandırıldığı koşullarda kaynak yaptıklarında, etkin kaynak genişliği, hem takım penetrasyon derinliği arttıkça hem de kanca yüksekliği azaldıkça arttığını belirtmişlerdir (Şekil 2.40). Bir önceki malzeme konumlandırılmasına göre, Al 5052'nin Al 6063'ün üstünde konumlandırıldığı koşullarda; etkin kaynak genişliğinin daha düşük ve kanca yüksekliğinin daha yüksek oluştuğunu; fakat takım penetrasyon derinliğinin aynı eğilimi gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır (Şekil 2.40). Al 6063'ün Al 5052'nin üstünde konumlandırıldığı konfigürasyon için; en yüksek kaynak mukavemet değerinin (5500 N), 1 mm takım penetrasyon dalma derinliği değerinde oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Al 5052'nin Al 6063'ün üstünde konumlandırıldığı konfigürasyon için; en yüksek kaynak mukavemet değerinin (3000 N), 1,25 mm takım penetrasyon dalma derinliği değerinde oluştuğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.40. Her iki konfigürasyon için penetrasyon derinliğinin: (a) etkin kaynak kaynak genişliği ve (b) kanca yüksekliği üzerindeki etkileri (Piccini ve Svoboda 2015’den değiştirilerek alınmıştır)

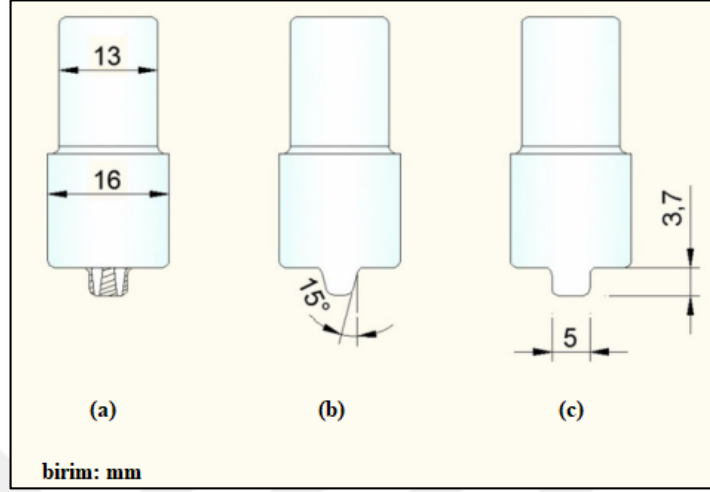
Lin ve Chen (2015) ‘Influence of Process Parameters on Friction Stir Spot Welded Aluminum Joints by Various Threaded Tools’ konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5052-H32 (kalınlık 1,6 mm) ve Al 6061-T6 (kalınlık 1,6 mm) levha numunelerini kaynaklamışlardır. Takım devir hızını ve takım profilini değişken parametre olarak belirlemişlerdir ve kaynak bölgesindeki malzeme akışı ve kaynak mukavemetini araştırmışlardır. Takım profili üzerinde farklı noktalara konumlandıkları M5 sağ yön vida dişleri ile B, M ve T olmak üzere 3 tip silindirik takım pim profili belirlemişlerdir (Şekil 2.41). Sonuç olarak, takımlardaki vida dişleri konumlarının, kaynak bölgesindeki karıştırma bölgesinin gelişimini önemli ölçüde etkilediğini ve değişken dalma derinliklerinde çeşitli derecelerde malzemelerin karışmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Kuvvet ölçümleri ile en yüksek tork değerini, 900 devir/dk takım devir hızında tespit etmişlerdir. Maksimum kaynak mukavemet değerini 6,5 kN olarak; takım devir hızı 900 devir/dk, takım bekleme zamanı 9 s, takım dalma derinliği 2,8 mm işlem parametrelerinde tespit etmişlerdir.



Şekil 2.41. Takımların geometrisi ve vida dişleri konumu (Lin ve Chen 2015'den değiştirilerek kullanılmıştır)

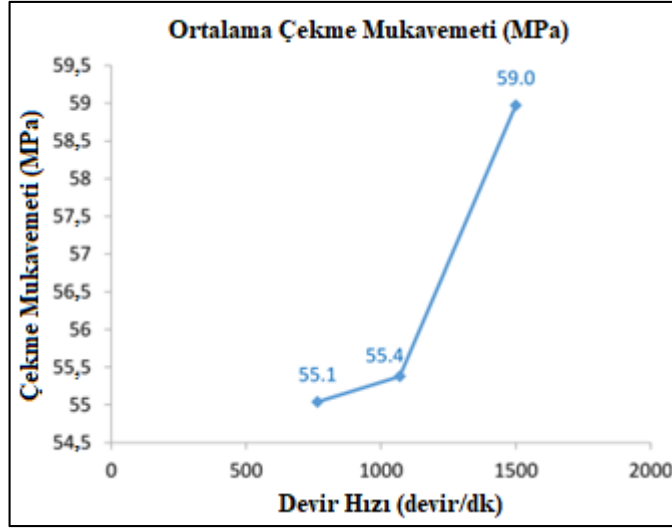
Abbass ve ark. (2016) 'Optimization of Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Joints for Dissimilar Aluminum Alloys (AA2024-T3 and AA 5754-H114)' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 2024-T3 (kalınlık 2 mm) ve Al 5754-H114 (kalınlık 2 mm) levha numunelerini kaynaklamışlardır. Al 2024 üstte ve Al 5754 altta olduğu kaynaklama pozisyonu için; takım devir hızını (800 devir/dk, 1000 devir/dk ve 1250 devir/dk), takım dalma süresini (30 s, 60 s ve 90 s) ve takım pim profilini (vida dişli oluklu silindirik, konik silindirik ve düz silindirik (Şekil 2.42) kaynak işlemi için değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Kaynak işlem parametrelerini 'Taguchi-Deney Tasarımı' tekniği kullanılarak optimize etmişlerdir. Sonuç olarak, aynı takım pim profili için: takım devir hızı arttıkça, takım dalma süresinin 60 s olduğu ana kadar kesme makaslama mukavemet değerinin arttığını ve sonrasında azaldığını tespit etmişlerdir. Taguchi tekniğini kullanarak tespit ettikleri optimum işlem parametreleri; takım devir hızı 800 devir/dk, takım dalma süresi 60 s ve takım pim profili konik silindiridir. Taguchi tekniği ile tespit ettikleri parametrelere karşılık gelen maksimum kesme makaslama kuvvetinin 2860 N olduğunu saptamışlardır. Optimum işlem parametrelerini 'MiniTab-Yanıt Optimizasyon Analizi' tekniğini kullanarak tespit etmişlerdir. Bu parametreler; takım devir hızı 1250 devir/dk, takım dalma süresi 60 dk ve takım pim profili konik silindiridir. İşlem parametrelerinin katkı yüzdelerinin; takım pim

profili % 61,5, takım devir hızı % 20,1 ve takım dalma süresi % 18,4 olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.42. SKNK takım profili ve pim boyutu: (a) vida dişli oluklu silindirik, (b) konik silindirik ve (c) düz silindirik (Abbass ve ark. 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)

Patel ve ark. (2016) 'Effect of Tool Rotation Speed on Friction Stir Spot Welded AA5052-H32 and AA6082-T6 Dissimilar Aluminum Alloys' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5052-H32 (kalınlık 1,5 mm) ve Al 6086-T6 (kalınlık 1,5 mm) levha numunelerini kaynaklamışlardır. Kaynak işlemi için levha numunelerini, Al 5052-H32 üstte ve Al 6086-T6 allta olacak şekilde konumlandırmışlardır. Takım devir hızı değerlerini; 765 devir/dk, 1070 devir/dk ve 1500 devir/dk olarak belirlemişlerdir. Takım devir hızının etkisini inceleyebilmek için; takım tasarımı, takım eğim açısı, takım dalma derinliği, takım bekleme süresi ve eksenel kuvvet gibi diğer işlem parametrelerini sabit tutmuşlardır. Kaynak bölgesinin özelliklerini değerlendirmek amacıyla mikroyapısal karakterizasyon ve mekanik testler yapmışlardır. Sonuç olarak, kesme makaslama mukavemet değerinin takım devir hızı arttıkça arttığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.43). Mikro çentik sertlik değerinin takım devir hızı arttıkça arttığını saptamışlardır. Mikroyapı testleri ile kaynaklanmış alüminyum levha numunelerinin kaynak bölgesinde kanca bağlantısı oluştuğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2.43. Devir hızının maksimum çekme mukavemeti üzerine etkisi (Patel ve ark. 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)

Bilici ve ark. (2016) 'Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Tekniği ile Birleştirilen Farklı Alüminyum Levhaların Taguchi Analizi' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemini kullanarak Al 2024-T3 (kalınlık 1,6 mm) ve Al 5754-H22 (kalınlık 1,5 mm) levha numunelerinin kaynaklanmasını 'Taguchi Analizi' ile incelemişlerdir. Takım devir hızını, takım bekleme süresini, takım dalma derinliğini ve takım eğim açısını kaynak işlemi için değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Kaynak parametrelerinin kopma kuvvetine etkisini, kesme makaslama testleriyle araştırmışlardır. Optimum kaynak parametrelerini 'Varyans Analizi' kullanılarak elde etmişlerdir. Sonuç olarak; çekme makaslama testleri neticesinde iki çeşit kırılma tipi; çapraz nugget kırılması ve çekme nugget kırılmasının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kaynak kopma mukavemetine etki eden en önemli parametrelerin; takım dönme hızı (% 44,74) ve takım bekleme süresi (% 31,60) olduğunu tespit etmişlerdir. Taguchi analizi sonucunda yaptıkları karşılaştırma deneylerinde kaynak kopma mukavemetinin başlangıç parametresine göre % 42 oranında arttığını belirtmişlerdir.

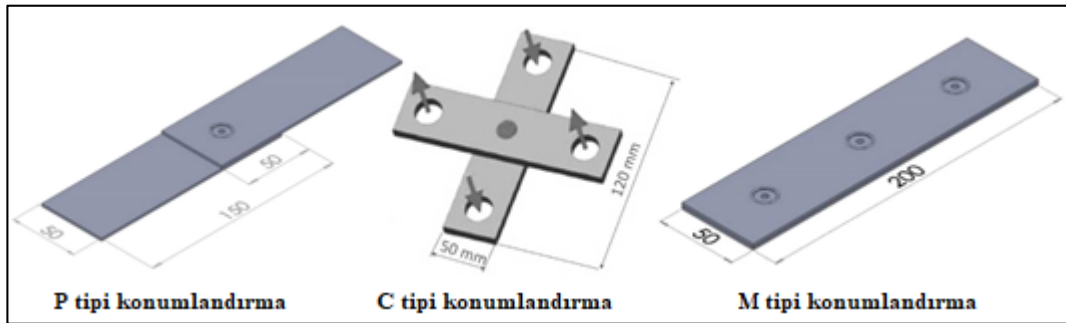
Siddharth ve Senthilkumar (2016) 'Optimization of Friction Stir Spot Welding Process Parameters of Dissimilar Al 5083 and C 10100 Joints Using Response Surface Methodology' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al

5083-H111 (kalınlık 1,5 mm) alüminyum ve C 10100 bakır levha numunelerini kaynaklamışlardır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağının işlem parametrelerinin optimum değerlerini tepki yüzeyi metodolojisini kullanarak araştırmışlardır. Takım devir hızını, takım dalma derinliğini ve takım bekleme süresini değişken parametreler olarak belirlemişlerdir. Kaynaklı numunelerin kesme makaslama mukavemetlerini ve ara yüzey sertliklerini araştırmışlardır. Ana parametreler ve etkileşim süreci parametrelerini varyans analizi ile değerlendirmişlerdir. Ampirik bağlantıların geliştirilmesi için 'Regresyon Analizini' kullanmışlardır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlem parametrelerini, kontur çizgileri ve yanıt grafiklerini kullanarak 'Design Expert' yazılımı aracılığı ile optimize etmişlerdir. Maksimum kesme makaslama mukavemet değerini (2,60 kN) ve arayüzdeki minimum sertlik değerini (70,45 HV); takım devir hızının 1250 devir/dak, takım bekleme zamanının 12,5 s ve takım dalma derinliğinin 1,9 mm olduğunu kaynak işlem parametrelerinde tespit etmişlerdir. Geliştirdikleri optimizasyon modeli aracılığıyla tahmin ettikleri değer ile gerçek değer arasındaki hatanın % 4,5'ten düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Kim ve ark. (2017) 'Effect of Tool Geometry and Process Parameters on Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Dissimilar Aluminum Alloys' konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5052-H32 (kalınlık 2 mm) ve Al 6061-T6 (kalınlık 2 mm) levha numunelerini göreceli konumlandırarak kaynaklamışlardır ve kaynakların mekanik özellikleri araştırmışlardır. Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta) ve Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) olmak üzere iki kaynaklama pozisyonu için takım omuz profilini ve takım devir hızını değişken parametre olarak belirlemişlerdir. Takım omuz profili için; konkav ve konvex takım omuz profilleri belirlemişlerdir. Takım devir hızı için; 900 devir/dk, 1025 devir/dk 1150 devir/dk ve 1400 devir/dk olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada araştırmacıların seçmiş oldukları maksimum ısı girişinin, hem malzeme kombinasyonları hem de takım omuz geometrileri için maksimum kaynak mukavemetine sebep olmadığını tespit etmişlerdir. Bu durumun sebebi olarak; aşırı ısı girişi ve malzemelerin birbirine aşırı tutunmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Al 5052 (üstte) - Al 6061 (altta) ve Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonları için maksimum kaynak mukavemetinin konkav ve konvex takım omuz profillerinde aynı parametre setinde (takım devir hızı: 1025 devir/dak ve takım dalma hızı: 40 mm/dak)

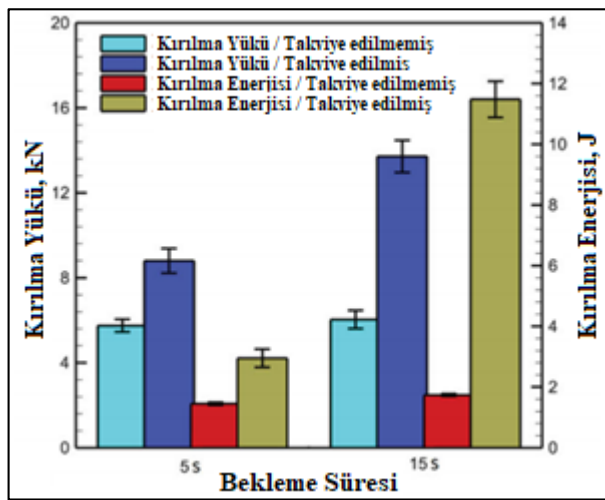
oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Konkav takım omuz profili için, maksimum kaynak mukavemeti değerinin Al 5052 (altta) - Al 6061 (üstte) numune kombinasyonunda, diğer kombinasyonlarının minimum kaynak mukavemeti değerinden % 43 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Piccini ve Svoboda (2017) ‘Tool Geometry Optimization in Friction Stir Spot Welding of Al-Steel Joints’ konulu makale çalışmalarında, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile Al 5052-H32 (kalınlık 1mm) ve düşük karbonlu çelik (kalınlık 0,65 mm) levha numunelerini kaynaklamışlardır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için takım geometrisi ve penetrasyon derinliği parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Takım profili olarak; A, B ve C olmak üzere üç farklı takım profili tasarlamışlardır. A tipi takım profilini: konik tasarımlı pim, pim yüksekliği 0,3 mm, pim çapı 5 mm, B tipi takım profilini: pimsiz, C tipi takım profilini: konik tasarımlı pim, pim yüksekliği 0,4 mm, pim çapı 9,6 mm olarak tasarlamışlardır. Levha numunelerinin kaynaklama konumlandırılması P tipi, C tipi ve M tipi olmak üzere üç farklı konumlama şekli belirlemişlerdir (Şekil 2.44). Kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini; mikrosertlik profillerini ve ‘Peel ve Cross’ gerilme testleri ile incelemişlerdir. Sonuç olarak, C tipi takım profili ile yapılan kaynakların; 5 µm’lik en kalın intermetalik tabakaya ve sürekliliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Takım penetrasyon derinliği arttıkça, kırılma yüklerinin arttığını gözlemlemişlerdir. C tipi takım profili ile kaynaklanmış oldukları levha numunelerinin kırılma yükünü 2 saniyelik takım bekleme zamanı ile optimize etmişlerdir.



Şekil 2.44. Levha numunelerinin kaynaklama konumlandırılması: P tipi, C tipi ve M tipi (Piccini ve Svoboda 2017’den değiştirilerek alınmıştır)

Fereiduni ve ark. (2018) ‘Ultrahigh-Strength Friction Stir Spot Welds of Aluminium Alloy Obtained by Fe₃O₄ Nanoparticles’ konulu makale çalışmalarında, Fe₃O₄ nanopartikülleri ile takviye ettikleri sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla Al 5083 levha numunelerini kaynaklamışlardır. Kaynakların mukavemetinin ve kırılma enerjisinin aynı anda artmasını araştırmışlardır. Fe₃O₄ nanopartiküllerinin, kaynak işlemi sırasında oluşan küçük boyut ve ısı nedeniyle Al-Fe intermetaliklere dönüştüğünü saptamışlardır. Takviye edilmiş kaynakların karıştırma bölgesinde üç farklı tanecik yapısının oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu tanecik yapıları arasında en iyi yapının, alüminyum matriste iyi dağılmış takviye parçacıkları içeren kompozit yapılar olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, Fe₃O₄ nanopartiküllerinin kaynak bölgesine eklenmesinin, kaynakların mukavemet ve kırılma enerjisini eşzamanlı olarak iyileşmesinde başarılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Şekil 2.45). Takviye edilmemiş kaynaklara kıyasla, takviye edilmiş kaynakların kırılma yükünün % 115'e ve kırılma enerjisinin % 560'a yükseldiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmalarında Fe₃O₄ nanopartikülleri ile takviye edilmiş kaynaklar için maksimum kırılma yük değerini 700 N/mm² olduğunu saptamışlardır. Fe₃O₄ nanopartikülleri ile takviye edilmiş kaynaklar için takım bekleme süresini 5 saniyeden 15 saniyeye arttırdıklarında nanopartiküllerin karıştırma bölgesindeki dağılımını arttırdığı ve daha yüksek miktarda Fe₃O₄ nanopartikülün matris ile reaksiyona girmesine neden olduğunu saptamışlardır. Bu nedenle kaynakların sertlik, kırılma yükü ve kırılma enerjisinin arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.45. Kırılma yükü ve kırılma enerjisi sonuçları (Fereiduni ve ark. 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deney Malzemesi ve Özellikleri

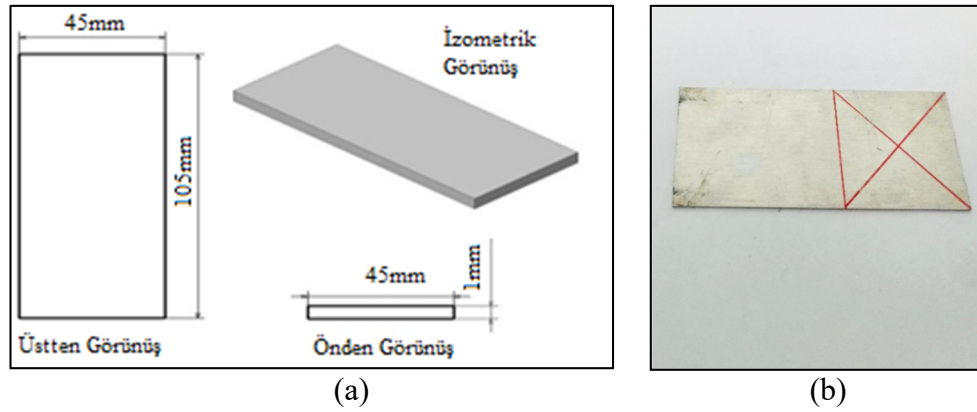
Bu çalışmada, 1 mm kalınlığına sahip alüminyum 5754 alaşım levhalar kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Deney numuneleri BS EN ISO 14273:2016 standardı çerçevesinde 1 mm × 45 mm × 105 mm boyutlarında, lazer kesme işlemi ile hazırlanmıştır (Şekil 3.1).

Çizelge 3.1. Alüminyum 5754 alaşımının kimyasal bileşimi

	Cu	Si	Fe	Cr	Mg	Ti	Mn	Zn	Diğer Elementler	Al
Kimyasal Bileşim (%)	0,024	0,09	0,3	0,05	3,12	0,01	0,35	0,04	0,116	95,9

Çizelge 3.2. Alüminyum 5754 alaşımının mekanik özellikleri

Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
117	207	21	75,22



Şekil 3.1. Deney numunesinin (a) boyutları ve (b) fotoğrafı

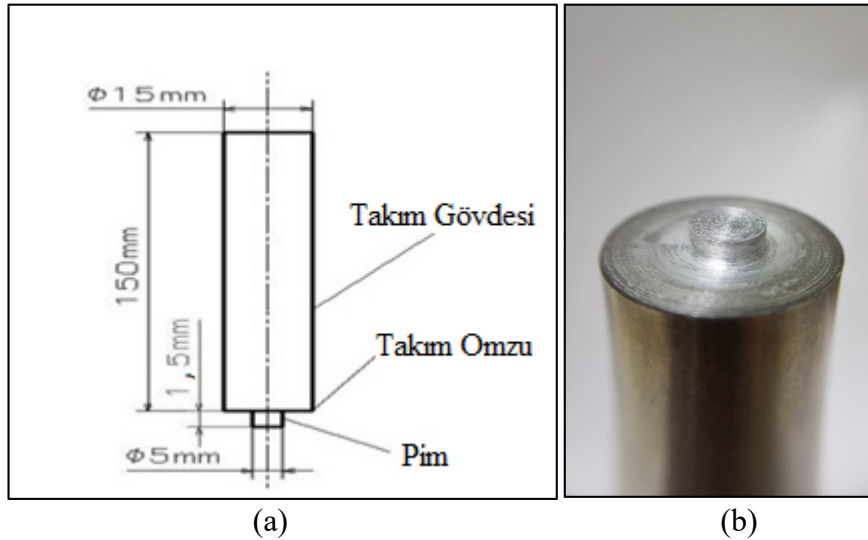
3.2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Kullanılan Kaynak Takımı ve Özellikleri

SKNK işlemi için ISO 4957:2018 standardı çerçevesinde üretilmiş olan X153CrMoV12 (1.2379) takım çeliği kullanılmıştır. Takım çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 3.3’de verilmiştir.

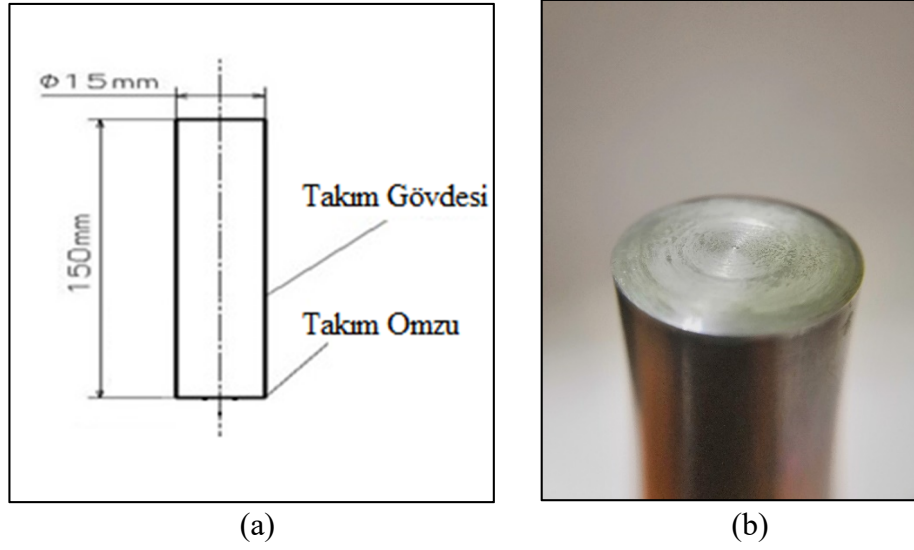
Çizelge 3.3. Takım çeliğinin kimyasal bileşimi (ISO 4957:2018 standardından alınmıştır)

	Mn	Si	V	Cr	C	Mo
Kimyasal Bileşim (%)	0,2–0,6	0.1–0,6	0,7–1,0	11–13	1,45–1,6	0,7–1,0

Bu çalışmada, SKNK işlemi için; A tipi ve B tipi olmak üzere iki tip takım imal edilmiş ve kullanılmıştır. A tipi takımın boyutları ve fotoğrafı Şekil 3.2’de ve B tipi takımın ise Şekil 3.3’de verilmiştir. A tipi takım; vida dişsiz dairesel pime sahiptir, B tipi takım ise pimsizdir. Bu iki tip takım geometrisi literatürde Al 5754 malzemesi için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Kahraman 2009, Klobčar ve ark. 2015, Bozkurt ve Bilici 2013). Takım çeliğine ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası takım çeliğinin sertliği 52-54 HRC değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.2. A tipi takımın (a) boyutları ve (b) fotoğrafı



Şekil 3.3. B tipi takımın (a) boyutları ve (b) fotoğrafı

3.3. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Kullanılan Kaynak Parametreleri

Sürtünme karıştırma noktası kaynak işlemi; değişken ve sabit parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Değişken parametreler: takım geometrisi ve takım devir hızıdır. Takım geometrisi için: A tipi takım ve B tipi takım belirlenmiştir. Takım devir hızı için; 1350 devir/dk, 1850 devir/dk ve 2530 devir/dk olmak üzere üç farklı değer belirlenmiştir. Literatür verilerine göre, bu takım devir hızları Al 5754 malzemesinin sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi için kullanılmamıştır. Değişken kaynak işlem parametrelerine ek olarak diğer işlem parametreleri; dalma derinliği, omuz penetrasyon derinliği, eğim açısı ve bekleme süresi sabit tutulmuştur. Sabit parametrelerin detayları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Deneyle sırasında kullanılan sabit ve değişken parametreler Çizelge 3.4'te ve deneylelerin konfigürasyon detayları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. SKNK işlem parametreleri

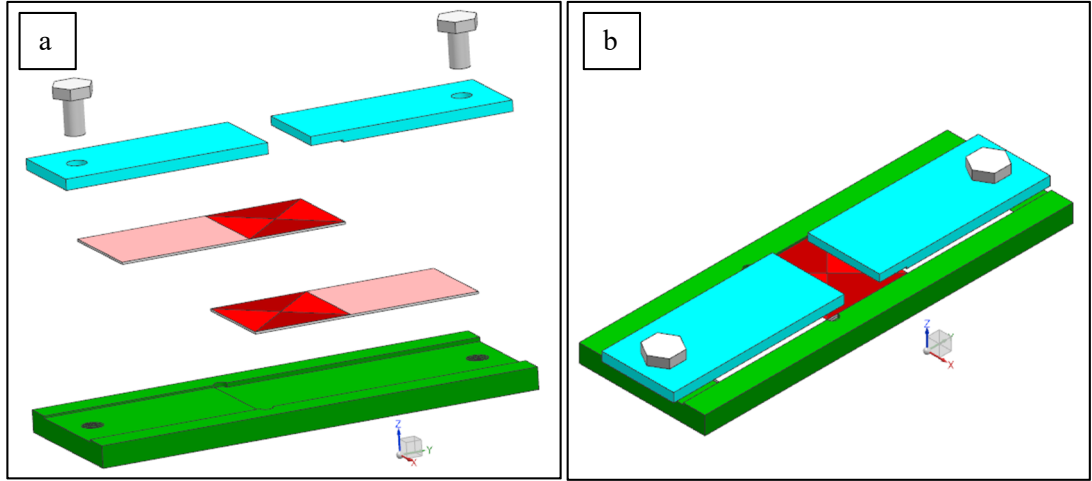
Parametreler	Değer
Takım devir hızı	1350 devir/dk, 1850 devir/dk ve 2530 devir/dk
Kaynak takım geometrisi	Vida dişsiz dairesel pimli takım (A tipi takım) ve Pimsiz takım (B tipi takım)
Dalma derinliği	1,6 mm
Omuz penetrasyon derinliği (A tipi takım için)	0,1 mm
Eğim açısı	0°
Bekleme süresi	6 s

Çizelge 3.5. SKNK işleminin deney konfigürasyonları

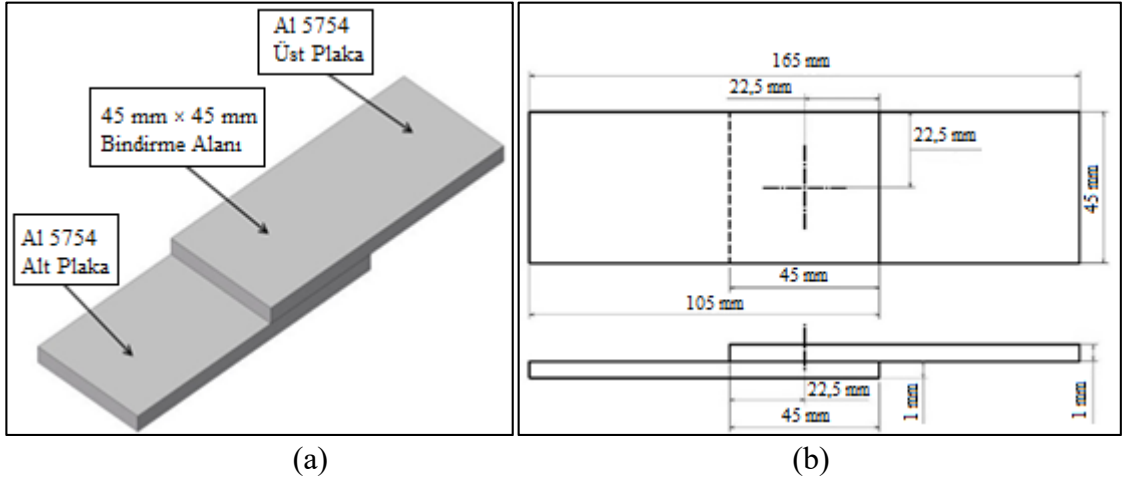
Sıra No	Deney Konfigürasyonları	SKNK işleminde kullanılan kaynak takım tipi	Takım Devir Hızı (devir/dk)
1	P1350	A tipi takım	1350
2	P1850	A tipi takım	1850
3	P2530	A tipi takım	2530
4	D1350	B tipi takım	1350
5	D1850	B tipi takım	1850
6	D2530	B tipi takım	2530

3.4. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Uygulaması

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi için öncelikle Şekil 3.4’de gösterilen kaynak aparatı tasarlanmıştır ve freze ile üretilmiştir. Kaynak aparatı, ‘Universal Freze Tezgâhı’ üzerinde sabitlenmiştir. Üretilmiş olan alüminyum levhalar Şekil 3.5(a)’da şematik olarak gösterilen şekilde birbirlerinin üstünde konumlandırılmıştır (üst üste bindirme alanı 45 mm × 45 mm). Ardından, alüminyum levhalar kaynak aparatına yerleştirilmiştir ve sıkıca bağlanmıştır. Son olarak, imal edilmiş olan kaynak takımları frezeye bağlanmıştır ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi, belirlenmiş olan kaynak parametreleri kullanılarak levhaların üst üste bindirme alanının merkezine (Şekil 3.5 b) uygulanmıştır.



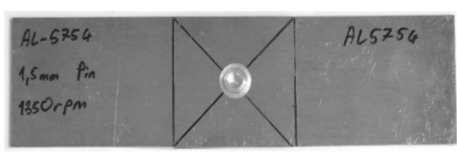
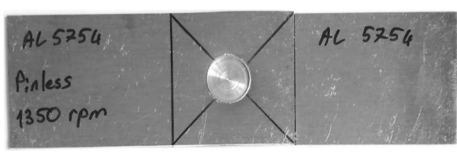
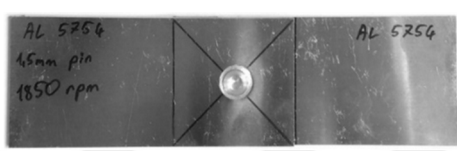
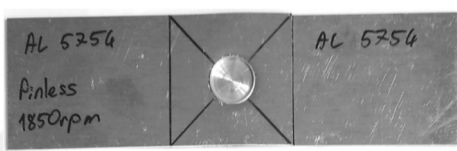
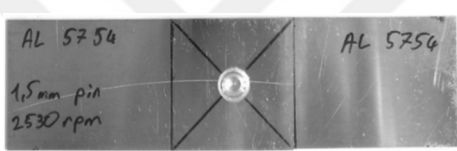
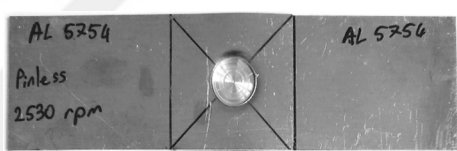
Şekil 3.4. Kaynak aparatı (a, b) şematik gösterimi ve (c) fotoğrafı



Şekil 3.5. Numunelerin kaynak konumunun (a) izometrik görünüşü, (b) üstten görünüşü ve yandan görünüşü

Belirlenmiş olan her deney konfigürasyonu için beş adet numune imal edilmiştir (Çizelge 3.6) ve kesme makaslama testi için beş numunenin dördü kullanılmıştır. Son numune ise mikro sertlik ölçümü için kullanılmıştır.

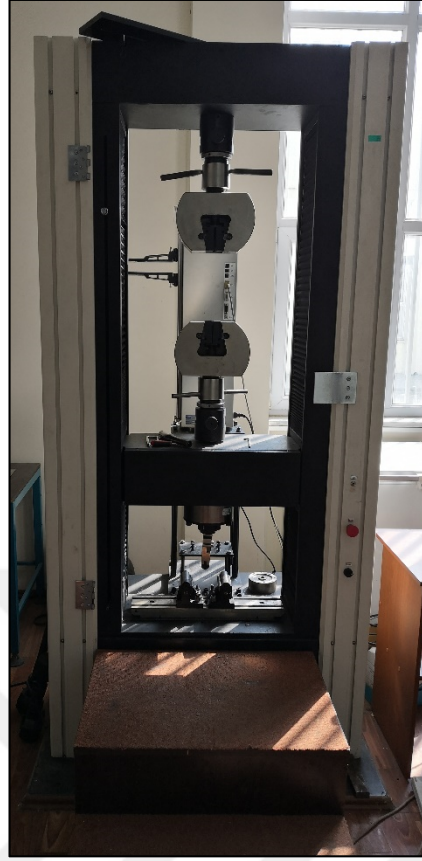
Çizelge 3.6. Deney konfigürasyonları için imal edilmiş numuneler

P1350		D1350	
P1850		D1850	
P2530		D2530	

3.5. Mekanik Testlerin Yapılışı

3.5.1. Kesme Makaslama Testi ve Uzama Ölçümlerinin Yapılışı

Her deney konfigürasyonu için imal edilmiş olan beş adet numuneden dört tanesine, kesme makaslama yükleri ve uzama değerlerini saptamak için kesme makaslama testi uygulanmıştır. Deneyleri gerçekleştirmek için 250 kN yük kapasitesi olan ‘UTEST markalı Çekme Basma Test Cihazı (Şekil 3.6 a)’ kullanılmıştır. Testler oda sıcaklığında ve 5 mm/dk çene hareket hızı parametrelerinde yapılmıştır. Numunelerin uzama değerleri, kesme makaslama testi sırasında ekstansometre (Şekil 3.6 b) ile ölçülmüştür.



(a)

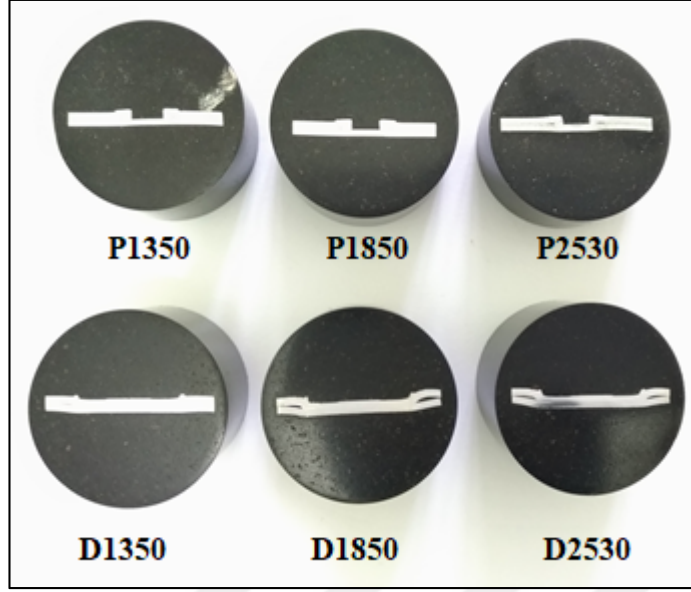


(b)

Şekil 3.6. (a) UTEST markalı çekme basma test cihazı, (b) ekstansometre

3.5.2. Mikro Sertlik Testinin Yapılışı

Yerel akma mukavemet değerlerini belirlemek için kaynak bölgeleri üzerinde mikro sertlik testleri yapılmıştır (Dedeoğlu ve Güler 2019). Numuneleri mikro sertlik testine hazırlamak için, hassas kesme cihazı kullanılarak kaynak kesitinden kesilmiştir ve bakalite alınmıştır. Ardından, bakalitli numuneler (Şekil 3.7) zımparalama işlemine tabii tutularak parlatılmıştır. Parlatma işlemi esnasında numunenin üst ve alt yüzeylerinin paralel kalmasına dikkat edilmiştir. Sertlik ölçümleri 'Metkon markalı Vickers Mikro Sertlik Test Cihazı (Şekil 3.8)' ile gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik testleri; test cihazının 100g yük ve 10 s yükleme süresi parametrelerinde ve 1 mm'lik ölçüm aralıklarında gerçekleştirilmiştir.

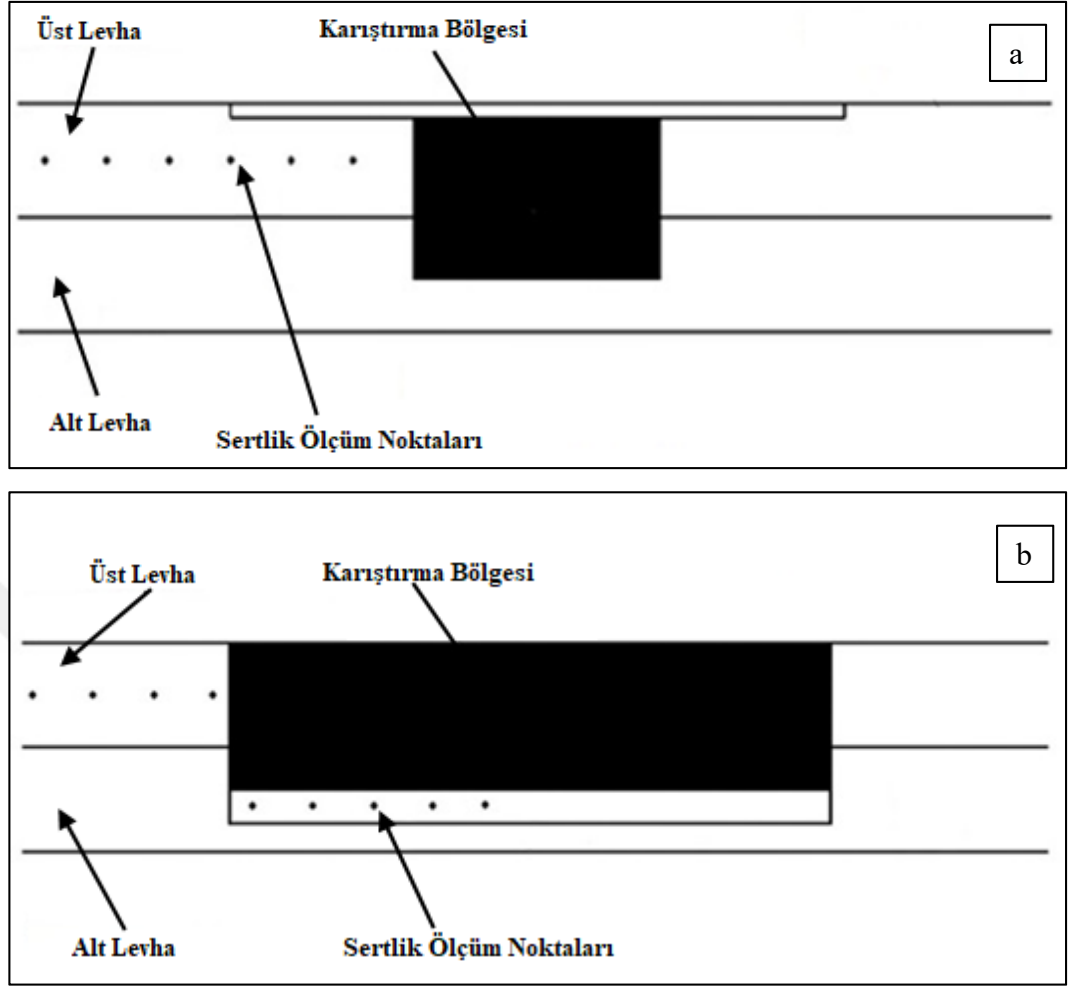


Şekil 3.7. Bakalitli numunelerin fotoğrafları



Şekil 3.8. Metkon markalı Vickers mikro sertlik test cihazı

Birleştirilen numunenin mikro sertlik ölçümleri, üst levhanın sol tarafındaki kaynak alanının kesit merkez çizgisi boyunca (Şekil 3.9 a, b) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Numunenin mikro sertlik ölçüm noktaları; (a) A tipi kaynak takımı ile yapılan kaynaklar ve (b) B tipi kaynak takımı ile yapılan kaynaklar (Kulekci ve ark. 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

3.6. Kırılma Morfoloji Analizlerinin Yapılışı

Kesme makaslama testleri sonrasında, kırılma yüzeylerinin kırılma morfolojileri makroskobik ve mikroskobik olarak incelenmiştir.

3.6.1. Makroyapı Analizlerinin Yapılışı

Kırılma yüzeylerinin makroyapı analizleri görsel olarak incelenmiştir. Makroskobik analiz, nitel gözlem görsel incelemesine dayalı olarak yapılmıştır ve kaynakların kırılma yüzeylerinin makroyapısı araştırılmıştır. Bu inceleme, kesme makaslama testinde kullanılan tüm numuneler için yapılmıştır.

3.6.2. Mikroyapı Analizlerinin Yapılışı

Kırılma yüzeylerinin mikroyapı analizleri taramalı elektron mikroskobu yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 'ZEISS EVO 40' markalı taramalı elektron mikroskobu (Şekil 3.10) kullanılmıştır. A tipi ve B tipi kaynak takımı ile birleştirilmiş olan numunelerin, en yüksek kesme makaslama mukavemetine sahip olan birer adet numuneleri için bu analizler yapılmıştır. Analizler hem alt levha hem de üst levha için yapılmış olup toplamda dört tanedir. Test cihazının boyut sınırlamaları nedeniyle numuneler, kaynak bölgesinin etrafından hassas kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir ve test cihazının içinde konumlandırılmıştır. Numunelerin taramalı elektron mikroskobu analizi, kaynak kırılma yüzeyinin bir ucundan diğer ucuna kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, numune üzerindeki diğer bölgelerdeki kırıklar da incelenmiştir.



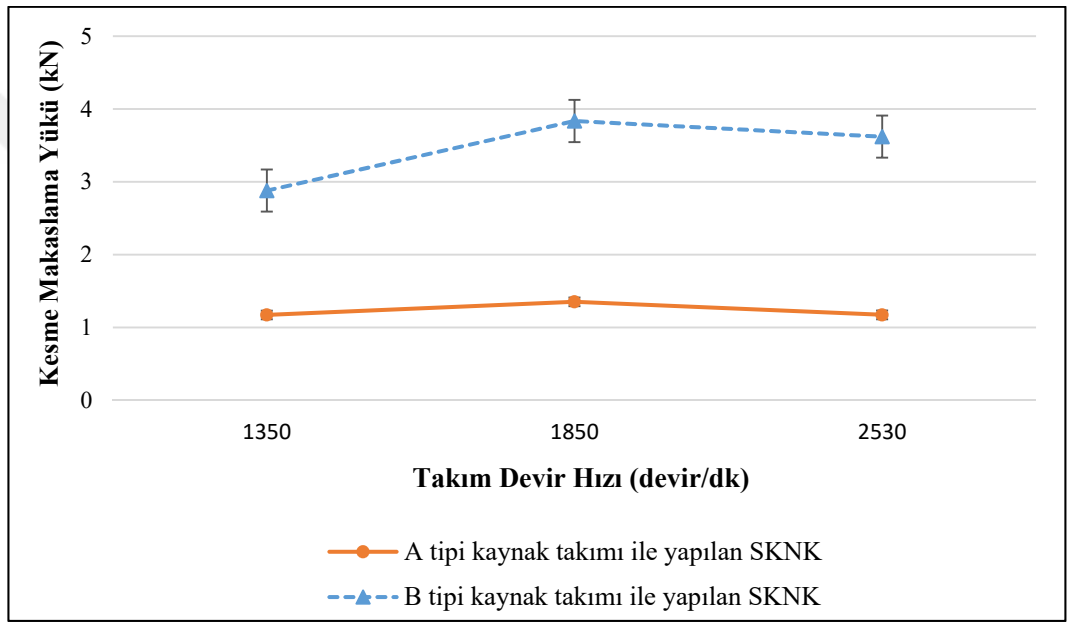
Şekil 3.10. ZEISS EVO 40 markalı taramalı elektron mikroskobu

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Mekanik Testler

4.1.1. Kesme Makaslama Testi

Kesme makaslama testleri ile bütün deney konfigürasyonları için kesme makaslama yükleri elde edilmiştir ve elde edilen değerlerin ortalamaları hesaplanmıştır. Ortalama kesme makaslama yükleri, Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bütün deney konfigürasyonları için elde edilen kesme makaslama yükleri

A tipi kaynak takımı kullanılarak kaynaklanan deney grupları için elde edilen kesme makaslama yük değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. 1350 devir/dk ve 2530 devir/dk takım devir hızında kesme makaslama yük değerleri birbirine oldukça yakındır. Maksimum ve minimum kesme makaslama yük değerleri sırasıyla; 1850 devir/dk'da 1,35 kN ve 1350 devir/dk'da 1,1725 kN'dur. Takım devir hızı 1350 devir/dk'dan 1850 devir/dk'ya yükseltildiğinde kesme makaslama yük değeri % 15,38 artmıştır. Diğer taraftan, devir hızı 1850 devir/dk'dan 2530 devir/dk'ya yükseltildiğinde kesme makaslama yük değerleri % 13,33 azalmıştır.

B tipi kaynak takımı ile yapılan deney konfigürasyonları için elde edilen bulgular Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Maksimum kesme makaslama yük değeri 1850 devir/dk takım devir hızında 3,835 kN'dur ve minimum kesme makaslama yük değeri ise 1350 devir/dk'da 2,88 kN'dur. Takım devir hızı 1350 devir/dk'dan 1850 devir/dk'ya yükseltildiğinde kesme makaslama yük değeri % 33,33 artmıştır. Buna karşın, devir hızı 1850 devir/dk'dan 2530 devir/dk'ya yükseltildiğinde kesme makaslama yük değerleri % 5,73 azalmıştır.

Çizelge 4.1. Bütün deney konfigürasyonları için kesme makaslama yük değerleri

SKNK işleminde kullanılan kaynak takım tipi	Deney Konfigürasyonları	Takım Devir Hızı (devir/dk)	Kesme Makaslama Yüğü (kN)
A tipi kaynak takımı	P1350	1350	1,1725
	P1850	1850	1,3525
	P2530	2530	1,1733
B tipi kaynak takımı	D1350	1350	2,8800
	D1850	1850	3,8350
	D2530	2530	3,6200

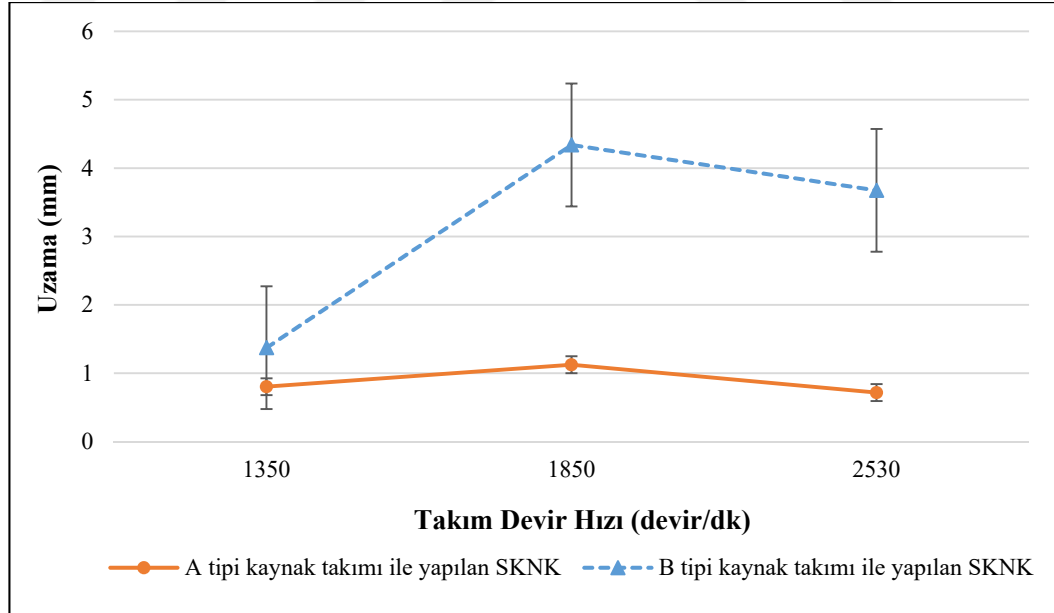
Bütün deney grupları karşılaştırıldıklarında, maksimum ve minimum kesme makaslama yüğü sırasıyla; D1850 deney konfigürasyonunda 3,84 kN ve P1350 deney konfigürasyonunda 1,1725 kN olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, takım devir hızının kesme makaslama mukavemeti için önemli bir faktör olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

Bütün deney gruplarının kesme makaslama yüğü, takım devir hızının 1350 devir/dk'dan 1850 devir/dk'ya yükseltilmesiyle artmıştır. Güler (2015) kesme makaslama yükündeki artışı, karıştırma yerindeki ısı oluşumuna bağlı mikroyapısal değişikliklerle açıklanabileceğini bildirmiştir. Diğer taraftan, takımın devir hızı 1850 devir/dk'dan 2530 devir/dk'ya yükseltildiğinde kesme makaslama yüğü bütün deney gruplarında azalmıştır. Bu durum, takım devir hızının artırılmasına bağlı olarak daha fazla sürtünme enerjisi açığa çıkarılmış ve karıştırma bölgesinde bulunan plastikleştirilmiş malzemenin akışkanlığının artırılmış olması nedeniyle açıklanabileceği Ojo (2016) tarafından rapor edilmiştir.

B tipi kaynak takımı ile kaynaklanan numunelerin kesme makaslama yük değerleri, A tipi takım ile kaynaklananlardan daha yüksektir. Karıştırılan malzemenin miktarı büyük olduğunda, kaynaklanan bölgenin büyüklüğünün arttığı ve daha yüksek kesme makaslama yüküyle sonuçlandığı gözlemlenmiştir, elde edilen bu bulguyu Güler'in (2015) çalışması desteklemektedir. Pimsiz kaynak takımı kullanılarak yapılan SKNK işleminde kaynaklanmış bölgenin daha büyük olması nedeniyle yüksek kaynak mukavemeti veya yükü meydana geldiği Ojo (2016) tarafından da rapor edilmiştir. Pimsiz kaynak takımı ile yapılan birleştirmelerde daha büyük temas bölgesi oluşması veya yüksek sürtünmeli ısı sebebiyle daha büyük kaynaklanmış bölgenin ortaya çıkmasının kolaylaştığı Ojo (2016) tarafından bildirilmiştir.

4.1.2. Uzama Ölçümleri

Deney gruplarının tamamının uzama değerleri, kesme makaslama testi esnasında ekstansometre kullanılarak ölçülmüştür ve maksimum uzamaların ortalaması hesaplanmıştır. Şekil 4.2'de ortalama uzamalar sunulmuştur.



Şekil 4.2. Bütün deney grupları için elde edilen uzamalar

Pimli kaynak takımı kullanılarak birleştirilen test grupları için elde edilen uzama değerleri Çizelge 4.2'da gösterilmiştir. P1350 ve P2530 test konfigürasyonlarının uzama

değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu saptanmıştır. Uzama değerinin maksimum (1,1230 mm) ve minimum (0,7160 mm) olduğu takım devir hızları sırasıyla; 1850 devir/dk ve 2530 devir/dk'dır. Uzama değeri, takım devir hızı 1350 devir/dk'dan 1850 devir/dk'ya yükseltildiğinde % 40 oranında artmıştır; fakat devir hızı 1850 devir/dk'dan 2530 devir/dk'ya yükseltildiğinde % 35,72 azalmıştır.

Çizelge 4.2'de, pimsiz kaynak takımı ile kaynaklanan deney grupları için elde edilen veriler verilmiştir. Maksimum ve minimum uzama değeri sırasıyla; 1850 devir/dk'da 4,3385 mm ve 1350 devir/dk'da 1,3738 mm'dir. Takım devir hızı 1350 devir/dk'dan 1850 devir/dk'ya yükseltildiğinde uzama değeri % 216,78 artmıştır; ancak devir hızı 1850 devir/dk'dan 2530 devir/dk'ya yükseltildiğinde % 15,44 azalmıştır.

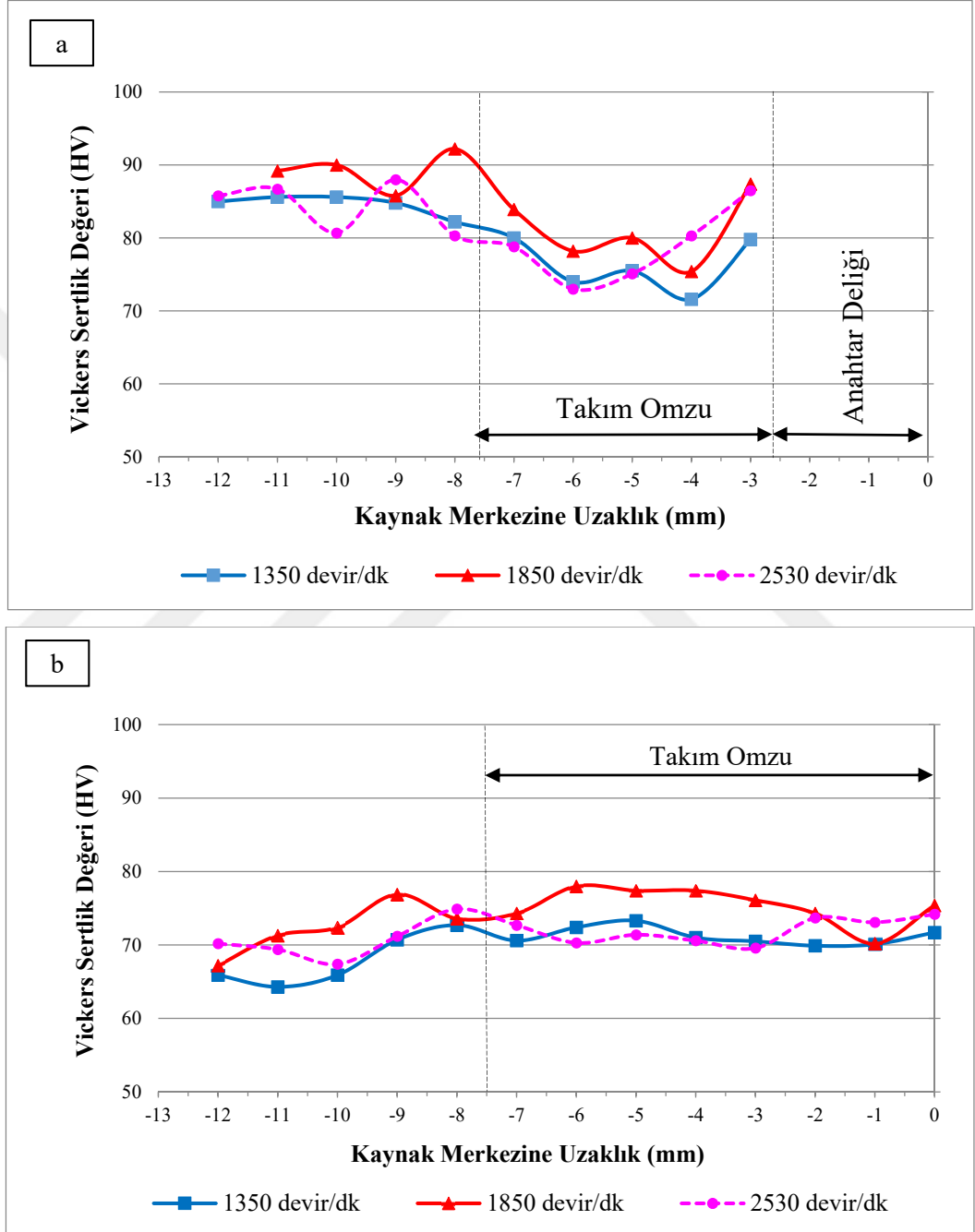
Çizelge 4.2. Bütün test grupları için uzama değerleri

SKNK işleminde kullanılan kaynak takım tipi	Deney Konfigürasyonları	Takım Devir Hızı (devir/dk)	Uzama (mm)
A tipi kaynak takımı	P1350	1350	0,8018
	P1850	1850	1,1230
	P2530	2530	0,7160
B tipi kaynak takımı	D1350	1350	1,3738
	D1850	1850	4,3385
	D2530	2530	3,6753

Bütün test grupları bir arada değerlendirildiğinde, maksimum ve minimum uzama değeri sırasıyla; D1850 deney konfigürasyonunda 4,3385 mm ve P1350 deney konfigürasyonunda 0,7160 mm olarak saptanmıştır. B tipi kaynak takımı ile birleştirilen test konfigürasyonlarının uzama değerleri, A tipi kaynak takımı kullanılanlardan daha yüksektir.

4.1.3. Mikro Sertlik Testi

Bütün test konfigürasyonları için elde edilen Vickers sertlik değerleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Vickers sertlik değerleri; (a) A tipi kaynak takımı ile yapılan kaynaklar ve (b) B tipi kaynak takımı ile yapılan kaynaklar

A tipi kaynak takımı ile kaynaklanan test gruplarında maksimum ve minimum sertlik değerleri sırasıyla; P1850 deney konfigürasyonunda 92,2 HV ve P1350 deney konfigürasyonunda 71,6 HV elde edilmiştir, sertlik değerlerinin tamamı Çizelge 4.3’de verilmiştir. Kaynakların anahtar deliği bölgesinde yüksek sertlik değerleri saptanmıştır. Bu durumu, Güler (2014) kaynak işlemindeki plastik deformasyonun, sertlik artışının ana nedeni olan gerilme sertleşmesine neden olduğuyla açıklamıştır. Kaynak işlemi sırasında, dinamik yeniden kristalleşmelerden oluşan ince taneler bu durumun nedenidir. P1350, P1850 ve P2530 deney grupları için sertlik profilleri arasında büyük fark yoktur. Benzer sertlik profilleri araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Wang ve Lee 2007, Zhang ve ark. 2011, Piccini ve Svoboda 2015,2017).

B tipi kaynak takımı kullanılarak birleştirilen deney gruplarında maksimum ve minimum sertlik değerleri sırasıyla; 1850 devir/dk’da 78,0 HV ve 1350 devir/dk’da 64,3 HV olarak elde edilmiştir, Çizelge 4.3’de bütün sertlik değerleri gösterilmiştir. Kaynakların sertlik değerleri, omuz bölgesinde yüksektir. Bu durumun nedeni Piccini ve Svoboda’ya (2017) göre, bu bölgenin içinde plastik deformasyon ve yüksek sıcaklık nedeniyle ince bir tane yapısı oluşturan dinamik yeniden kristalleşme bulunmasıdır. Sertlik artışı, dislokasyon yığılmasına bağlı pekleşme oluşması ile meydana gelmiştir. D1350, D1850 ve D2530 test gruplarının sertlik profilleri benzerdir. Ayrıca, Kahraman da (2009) benzer sertlik profilini rapor etmiştir.

Çizelge 4.3. Bütün deney konfigürasyonları için maksimum ve minimum sertlik değerleri

SKNK işleminde kullanılan kaynak takım tipi	Deney Konfigürasyonları	Takım Devir Hızı (devir/dk)	Minimum Sertlik (HV)	Maksimum Sertlik (HV)
A tipi kaynak takımı	P1350	1350	71,6	85,6
	P1850	1850	75,4	92,2
	P2530	2530	73,0	86,7
B tipi kaynak takımı	D1350	1350	64,3	73,3
	D1850	1850	67,2	78,0
	D2530	2530	67,4	74,9

Bütün deney konfigürasyonları karşılaştırıldıklarında, sertlik değerleri; takım devir hızı 1350 devir/dk'dan 1850 devir/dk'ya yükseltildiğinde artmıştır; ancak devir hızı 1850 devir/dk'dan 2530 devir/dk'ya yükseltildiğinde ise düşmüştür. Kesme makaslama testinin bir sonucu olarak, maksimum mukavemet değerlerine sahip test gruplarının, maksimum sertlik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Plastik deformasyon, sertlikte ve mukavemette bir artışa neden olur ve Güler (2014) dinamik yeniden kristalleşmeye bağlı olarak her ikisinin de birlikte arttığını rapor etmiştir.

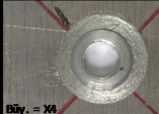
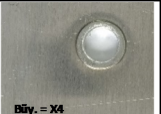
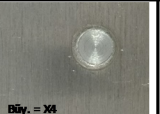
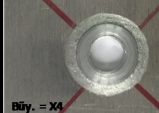
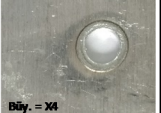
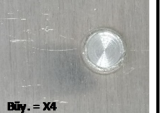
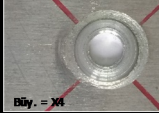

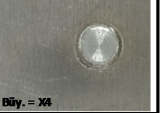
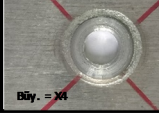
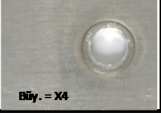
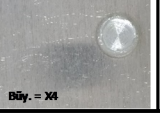
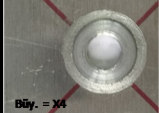

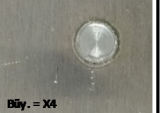
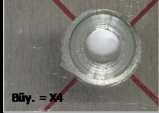


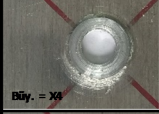

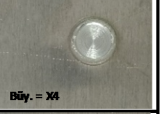
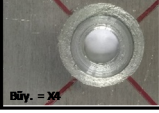


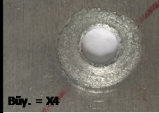

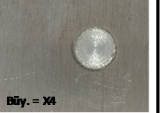
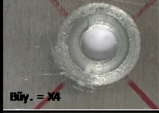


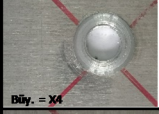


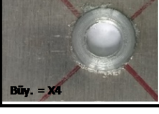

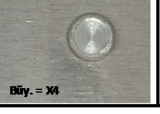
4.2. Kırılma Morfoloji Analizi

Kırılma yüzeylerinin kırılma morfolojileri makroskobik ve mikroskobik olarak, kesme makaslama testleri sonrasında incelenmiştir. Kesme makaslama testlerine tabii tutulan bütün numunelere makroskobik analiz yapılmıştır olup mikroskobik analiz ise pimli ve pimsiz takımla kaynaklanan numunelerin en yüksek kesme makaslama mukavemet değerlerine sahip olan P1850 ve D1850 deney konfigürasyonlarına uygulanmıştır.


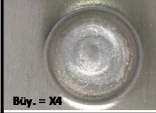

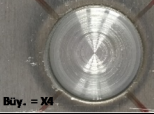
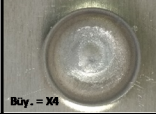
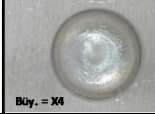
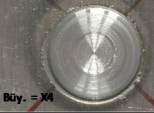
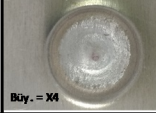
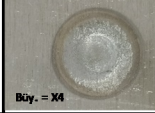


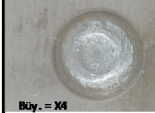
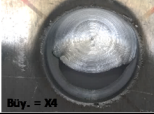


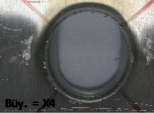
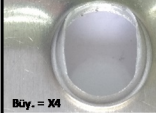

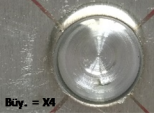
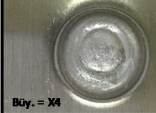
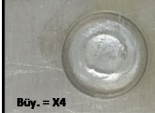
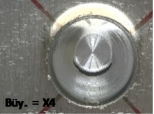

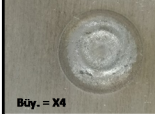



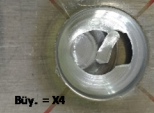
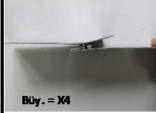

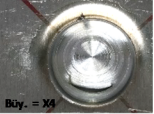

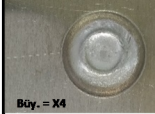

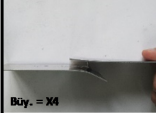
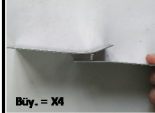
4.2.1. Makroyapı Analizi

Literatürde, genel olarak, kesme testinden sonra SKNK proses bağlantılarında üç kırılma modu gözlemlenebilir. Bunlar, mod 1 (kesme kırılması): kırılma, düzlemdeki lehvalar arasındaki bağlantı hattını takip eder (levha kalınlığı > 2 mm); mod 2 (karma klivaj kırılması): Düşük mukavemet kırığı ile klivaj başlar ve iki levha yüzeyi arasındaki oksit kalıntılarını takip eder; ve mode 3 (nugget çekme kırılması): kaynak, birleşme arayüzünden kırılmaz ve üst levhanın alt levhadan ayrıldığı bağlantı bölgesinin kenarlarından kopma meydana gelir. Bu mod ayrıca, omuz daldırması nedeniyle, takım omzunun kenarındaki üst tabakanın incilmesi ile de desteklenir Güler (2014).

Bütün test numuneleri nitel görsel muayeneye dayalı olarak incelenmiştir. Tüm kırılmış kaynak bağlantılarının kırılma modları Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Ayrıca, üst levha üst görünüş, üst levha arka görünüş, alt levha üst görünüş ve ortalama kesme makaslama mukavemet değerleri Şekil 4.4'de verilmiştir.

Test Grubu	Test Kodu	Üst Levha - Üst Görünüş	Üst Levha - Arka Görünüş	Alt Levha - Üst Görünüş	Ort. Kesme Makaslama Yüğü (kN)	Kırılma Tipi
P1350	P1350 - 1	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4	1,1725	C
	P1350 - 2	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C
	P1350 - 3	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C
	P1350 - 4	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C
P1850	P1850 - 1	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4	1,3525	C
	P1850 - 2	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C
	P1850 - 3	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C
	P1850 - 4	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C
P2530	P2530 - 1	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4	1,1733	C
	P2530 - 2	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C
	P2530 - 3	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C
	P2530 - 4	 Büy. = X4	 Büy. = X4	 Büy. = X4		C

Şekil 4.4. Kırılmış kaynak bağlantılarının kırılma modları (A: Mod 1 (Kesme Kırılması), B: Mode 2 (Karma Klivaj Kırılması), C: Mode 3 (Nugget Çekme Kırılması))

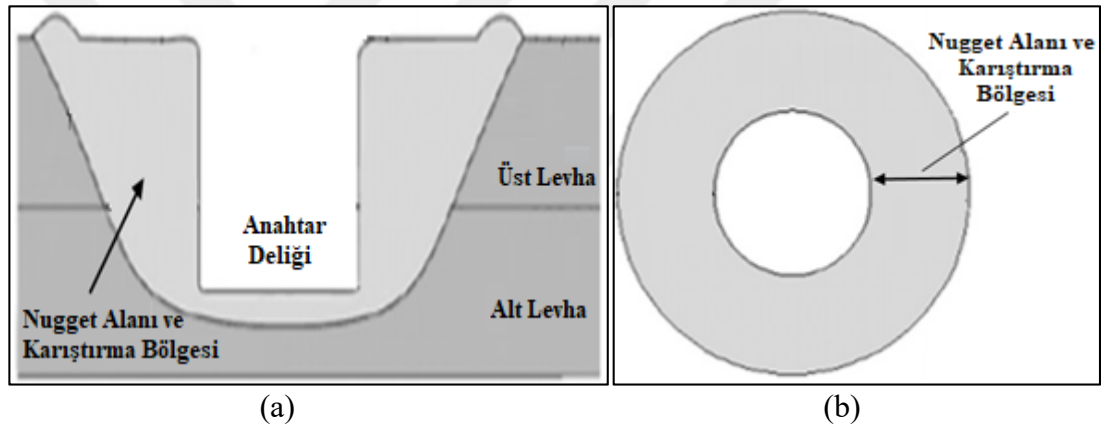
D1350	D1350 - 1				2,88	A
	D1350 - 2					A
	D1350 - 3					A
	D1350 - 4					A
D1850	D1850 - 1				3,835	B
	D1850 - 2					C
	D1850 - 3					A
	D1850 - 4					A - B
D2530	D2530 - 1				3,62	A
	D2530 - 2					B - C
	D2530 - 3					A - B
	D2530 - 4					B - C

Şekil 4.4. Kırılmış kaynak bağlantılarının kırılma modları (A: Mode 1 (Kesme Kırılması), B: Mode 2 (Karma Klivaj Kırılması), C: Mode 3 (Nugget Çekme Kırılması)) (devam)

Pimli kaynak takımı ile birleştirilen test gruplarının kırılma modları incelendiğinde, bütün konfigürasyonlarda tek tip kırılma deseni (nugget çekme kırılması) gözlemlenmiştir ve

takım devir hızının 1350 devir/dk'dan 2530 devir/dk'ya yükseltilmesi kırılma desenini etkilememiştir.

Takım pimi uzunluğu etrafındaki nugget alanı, SKNK işlemi esnasında plastikleşmiş malzemenin birbirine karışması ile oluşmuştur. Nugget alanı Şekil 4.5(a, b)'de verilmiştir. Nugget alanı, kaynak işleminin fiziksel olayı nedeniyle alt ve üst levha malzemelerini içerir. Kesme makaslama testi sırasında oluşan kırılma, kaynak bölgesinin dış tarafında meydana gelir ve kaynaklanmış bölümün etrafından ilerler. Kırılma, alt ve üst levhalar birbirinden ayrılana kadar -üst levhanın yüzeyine paralel şekilde- ilerlemeye devam eder. Bu nedenle bu tip kırılma 'nugget çekme kırılması' olarak adlandırılmıştır ve bu bulgu mevcut literatür verileri tarafından desteklenmektedir.

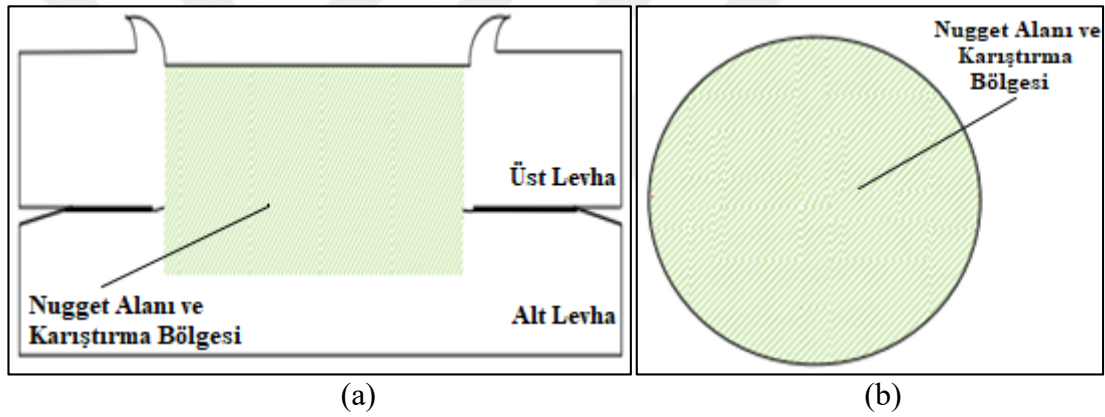


Şekil 4.5. Pimli kaynak takımı ile yapılan SKNK işleminin (a) enine kesit görünüşü ve (b) nugget alanı ve karıştırma bölgesinin üstten görünüşü (Dedeoğlu ve Güler 2019'dan değiştirilerek alınmıştır)

Pimsiz kaynak takımı kullanılarak kaynaklanan deney konfigürasyonlarının kırılma modları incelendiğinde üç tip kırılma deseni (kesme kırılması, karma klivaj kırılması ve nugget çekme kırılması) gözlemlenmiştir. D1350 test grubunda sadece kesme kırılması bulunmaktayken, D1850 ve D2530 test gruplarında ise; mod 1, mod 2 ve mod 3 kırılma modları bulunmaktadır. Ayrıca, D2530 deney gruplarında çoklu kırılma modları saptanmıştır.

Pimsiz kaynak takımı ile gerçekleştirilen SKNK işlemi esnasında takım omuzunun altında plastikleşmiş malzemenin birbirine karışması ile nugget alanı oluşmuştur. Şekil

4.6(a, b)'de Nugget alanı gösterilmiştir. SKNK işleminin fiziksel olayı nedeniyle nugget alanı, hem alt levha malzemesini hem de üst levha malzemesini içerir. Kesme makaslama testi sırasında oluşan kırılma, kaynak bölgesinin dış tarafında meydana gelir. Meydana gelen kırılma, lehvaların birleşme arayüzünden levhalar birbirinden ayrılana kadar -üst levhanın yüzeyine paralel şekilde ilerlemeye devam etmişse; bu tip kırılma 'kesme kırılması' olarak adlandırılmıştır. Şayet kırılma ilerlerken üst levhada kısmi yırtılmalar oluşmuş; fakat bu yırtılan parçacıklar alt levhaya -levhalar birbirinden ayrılana kadar yapışmamışsa; bu tip kırılma 'karma klivaj kırılması' olarak adlandırılmıştır. Eğerki kırılma, alt ve üst levha birbirinden ayrılana kadar kaynaklanmış bölümün etrafından ilerlemişse; bu tip kırılma 'nugget çekme kırılması' olarak adlandırılmıştır. Bu bulgular mevcut literatür verileri tarafından desteklenmektedir.



Şekil 4.6. Pimsiz kaynak takımı ile yapılan SKNK işleminin (a) enine kesit görünüşü ve (b) nugget alanı ve karıştırma bölgesinin üstten görünüşü (Ojo 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)

Pimli ve pimsiz kaynak takımı kullanılan deney grupları kendi içlerinde değerlendirildiğinde, mod 3 kırılma moduna sahip numunelerin kesme makaslama mukavemet değerlerinin genellikle diğer kırılma modlarından daha yüksek olduğu saptanmıştır. Ayrıca, mod 1 kırılma moduna sahip numunelerde, mod 2 ve mod 3 kırılma modlarından daha düşük mukavemet değerleri gözlemlenmiştir.

4.2.2. Mikroyapı Analizi

Çatlak büyümesi sona erdiğinde veya gövde iki ya da daha fazla parçaya tam bir kırılma gerçekleştiği zaman, kırık oluşumu sona ermiştir. Tipik fenomenlere göre, tüm kırılma olayı farklı tiplerde sınıflandırılır. Sünek kırılma, kırılma süreci esnasında ve (veya) öncesinde meydana gelen büyük plastik deformasyonlarla karakterizedir. Tek eksenli gerilime altındaki çatlama metal numunenin elastik olmayan deformasyonları % 10'dan fazla olabilir. Çatlaklı gövdelerde, bu gerilmeler genellikle sadece çatlak ucunun veya kırılma yüzeyinin yakın çevresinde yoğunlaşmazlar. Metallerde ilgili mikroskobik kırılma mekanizması, boşlukçuk çekirdeklenmesi ve birleşmeye eşlik eden plastik akıştır (Gross ve Seelig 2011).

Sünek kırılma, çatlağın oluşumunda ve büyümesinde kalıcı bir şekil değişikliği gözlemlendiği bir kırılma şeklidir. Çatlak, boşlukların oluşması ve birleşmesi sonucunda oluşur. Çatlağın ilerleme hızı yavaştır. Kırılma yüzeyinin görünümü lifli ve mattır (<http://web.itu.edu.tr/gulmezt/MekanikD/KIRILMA.pdf>, erişim tarihi: 03.2019).

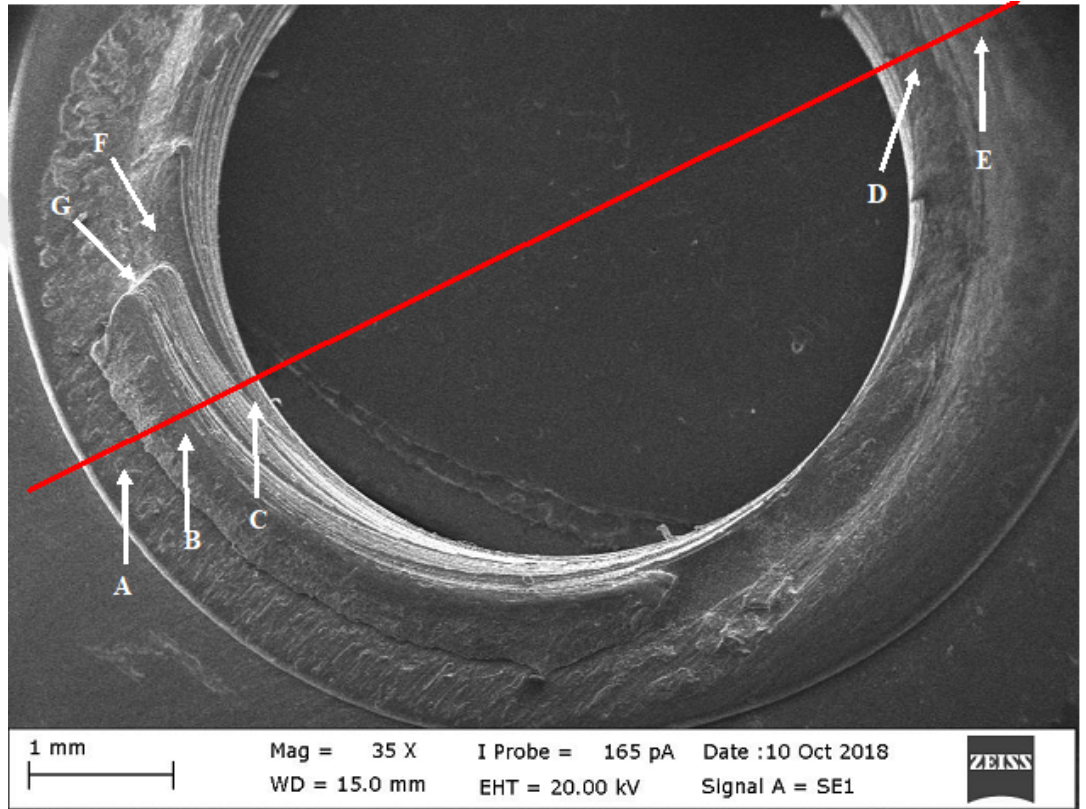
Makroskobik olarak çok az miktarda elastik deformasyon meydana geldiğinde, kırılma olayı 'gevrek' olarak adlandırılır. Bu durumda, ani kırılmaya meyil eden gerinme altındaki çatlama numunedeki plastik gerinim % 2-10'dan daha azdır. Çatlak komponentlerdeki elastik olmayan gerinmeler, çatlak ucunun veya kırılma yüzeyinin yakınıyla sınırlıdır. Metallerdeki kırılma mekanizması ya boşlukçuk büyümesi ile birlikte kapalı plastik akıştır ya da klivajdır (Gross ve Seelig 2011).

Gevrek kırılmada çatlağın oluşması kolay değildir; fakat ilerlemesi çok kolaydır. Kırılma yüzeyleri parlaktır ve kristalin görünümündedir. Gevrek kırılma; düşük sıcaklık, ani zorlama ve çok eksenli gerilmeler ile oluşur (<http://web.itu.edu.tr/gulmezt/MekanikD/KIRILMA.pdf>, erişim tarihi: 03.2019).

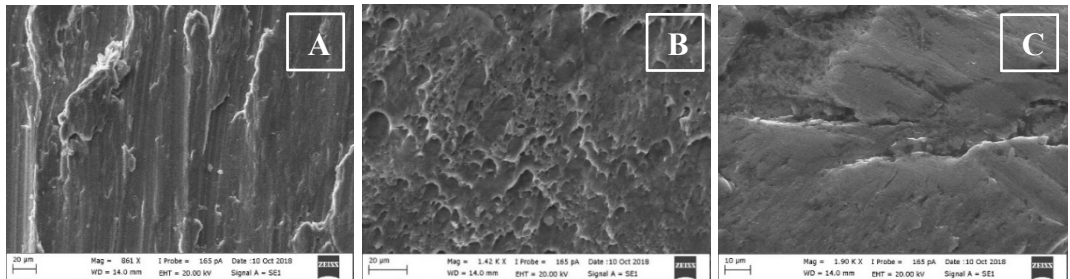
Bu çalışmada, önceden belirlenmiş olan P1850 ve D1850 test numunelerinin taramalı elektron mikroskobu yöntemi ile mikroskobik analizleri yapılmıştır. Analizler, üst levhanın arka yüzeyinde ve alt levhanın üst yüzeyinde yapılmıştır.

P1850 test numunesi için üst levha arka yüzeyinden elde edilen mikrograflar, Şekil 4.7(a, b)'de gösterilmektedir. İncelemeler, simetri düzlemi boyunca beş farklı noktada ve diğer bölgelerde bulunan iki farklı konumda yapılmıştır ve Şekil 4.7(b)'de bu noktaların mikrografları gösterilmiştir. Bu noktalar, Şekil 4.7(a)'da A, B, C, D, E, F ve G olarak işaretlenmiştir.

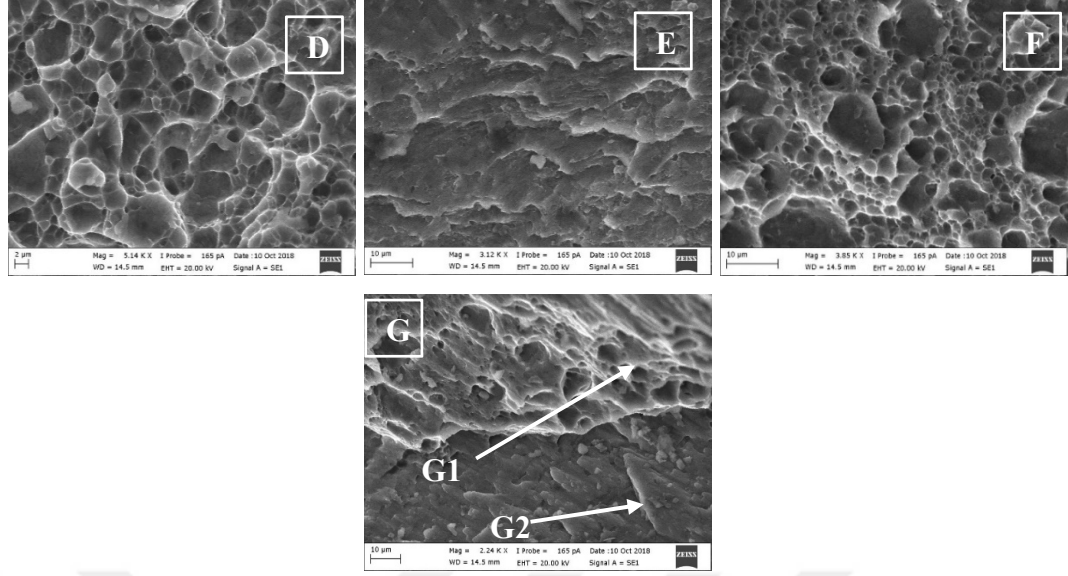
(a)



(b)



Şekil 4.7. P1850 test numunesinin (a) üst levha arka yüzeyinin ve (b) A, B, C, D, E, F ve G noktalarının mikrografları

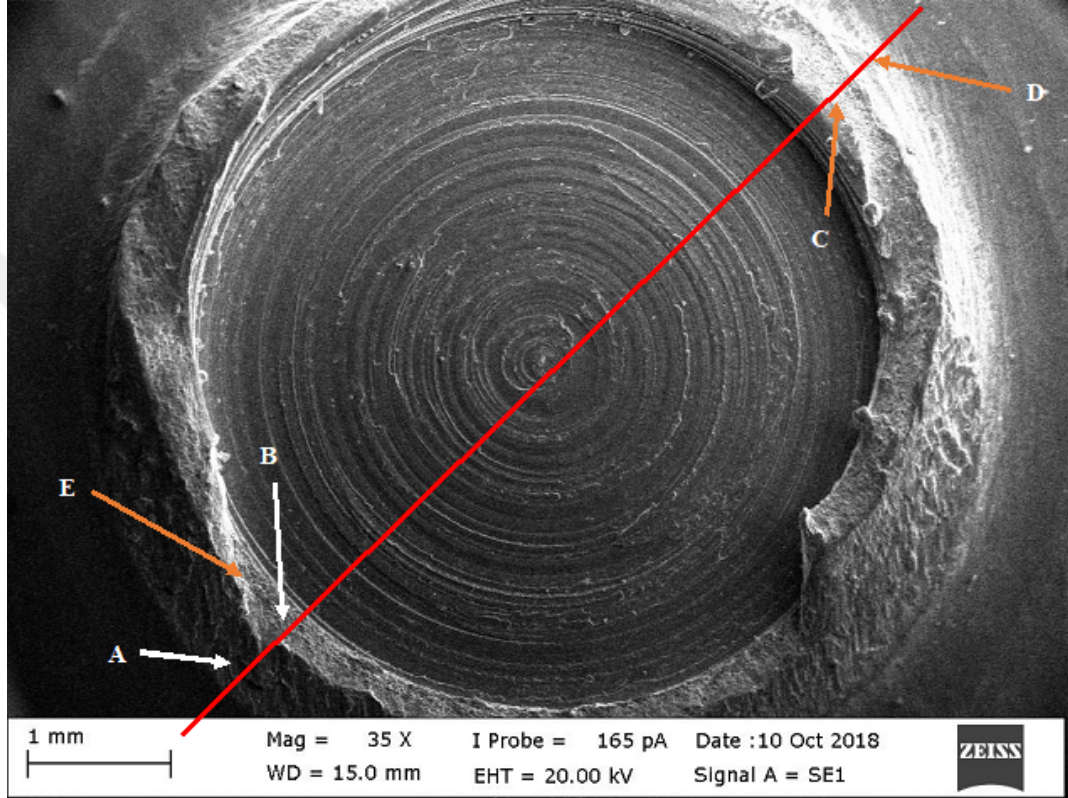


Şekil 4.7. P1850 test numunesinin (a) üst levha arka yüzeyinin ve (b) A, B, C, D, E, F ve G noktalarının mikrografları (devam)

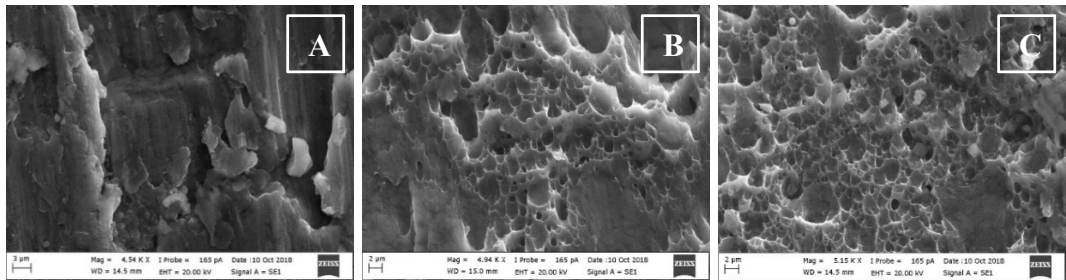
A bölgesinde, kaynak bölgesinin dış çevresine yakın uzatılmış çukurlar mevcuttur; bunlar kesme kırılmasının meydana geldiğini göstermektedir, Mahmoud ve Khalifa'nın (2014) çalışması bunu desteklemektedir. B bölgesinin kırılma yüzeylerinde uzatılmış çukurlar ve taneler arası kırılma modu vardır, Pathak ve ark.'nin (2013) çalışmasında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Numunenin C bölgesi için kırılma esnasında diğer yüzeyin C bölgesi üzerinden kayması nedeniyle, çukursuz yüzey oluşmuştur, Pathak ve ark. de (2013) bu neticeyi rapor etmiştir. D bölgesinin kırılma yüzeylerinde gerçekleşen kırılmanın sünek kırılma olduğunu gösteren çukurlar bulunmaktadır, elde edilen bu bulguyu Fereiduni ve ark.'nin (2018) çalışması desteklemektedir. E ve G(G2) bölgelerinin kırılma yüzeyindeki birçok uzun çukur, kesme kırılmasının oluştuğunu göstermektedir; Zhang ve ark. de (2011) çalışmalarında benzer neticeler elde etmişlerdir. F ve G(G1) bölgelerinin kırılma yüzeylerindeki eşekslenli çukurların karakteristiğini göstermektedir, bu durumu Lin ve Chen de (2015) elde ettikleri bulgularda rapor etmişlerdir. Ayrıca, A, E ve G(G2) bölgelerinde gevrek kırılma meydana gelmiştir. Bunun nedeni, kırılma yüzeyindeki düz hatlı kırılma izleridir. D, F ve G(G1) bölgelerinin kırılma yüzeyinde oluşan dairesel çizgiler, oluşan kırığın sünek bir kırılma olduğunu göstermektedir.

Taramalı elektron mikroskobu yöntemi, P1850 deney numunesinin alt levha üst yüzeyine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 4.8(a, b)'de gösterilmiştir. İncelemeleri yapılan noktaların mikrografları Şekil 4.8(b)'de gösterilmiştir. Şekil 4.8(a)'da bu noktalar A, B, C, D ve E olarak işaretlenmiştir.

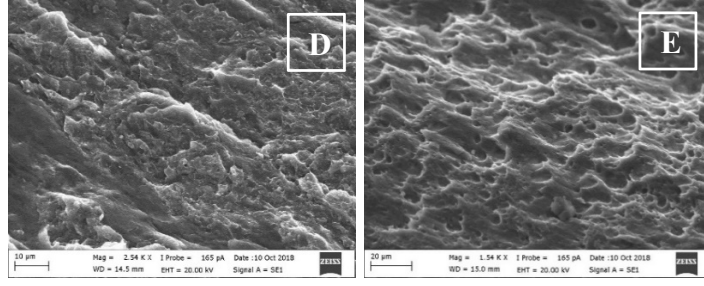
(a)



(b)



Şekil 4.8. P1850 test numunesinin (a) alt levha üst yüzeyinin ve (b) A, B, C, D ve E noktalarının mikrografları

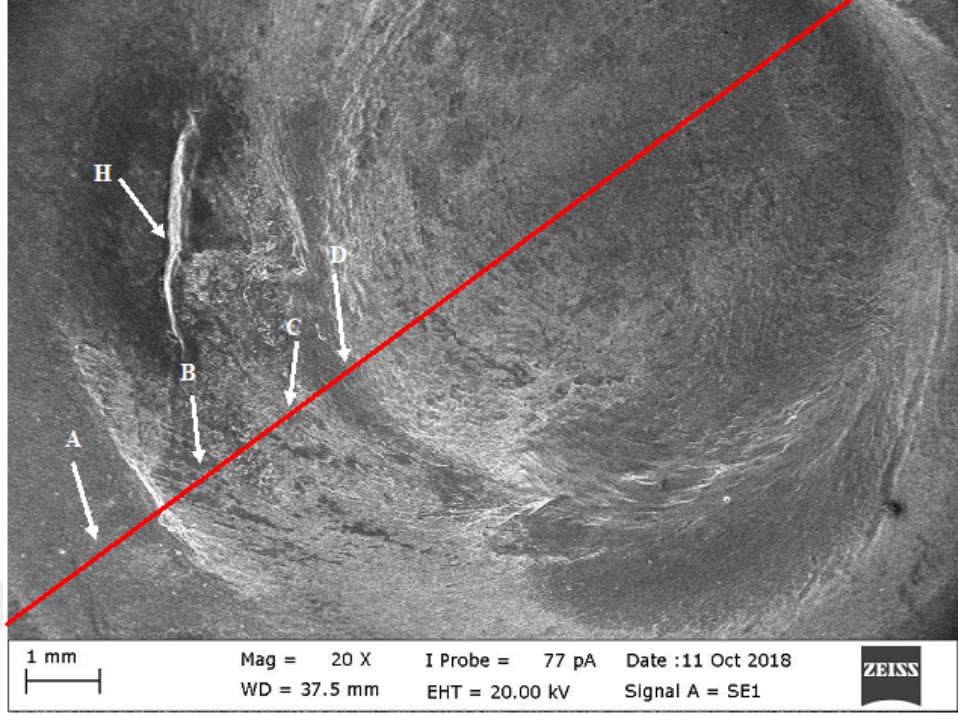


Şekil 4.8. P1850 test numunesinin (a) alt levha üst yüzeyinin ve (b) A, B, C, D ve E noktalarının mikrografları (devam)

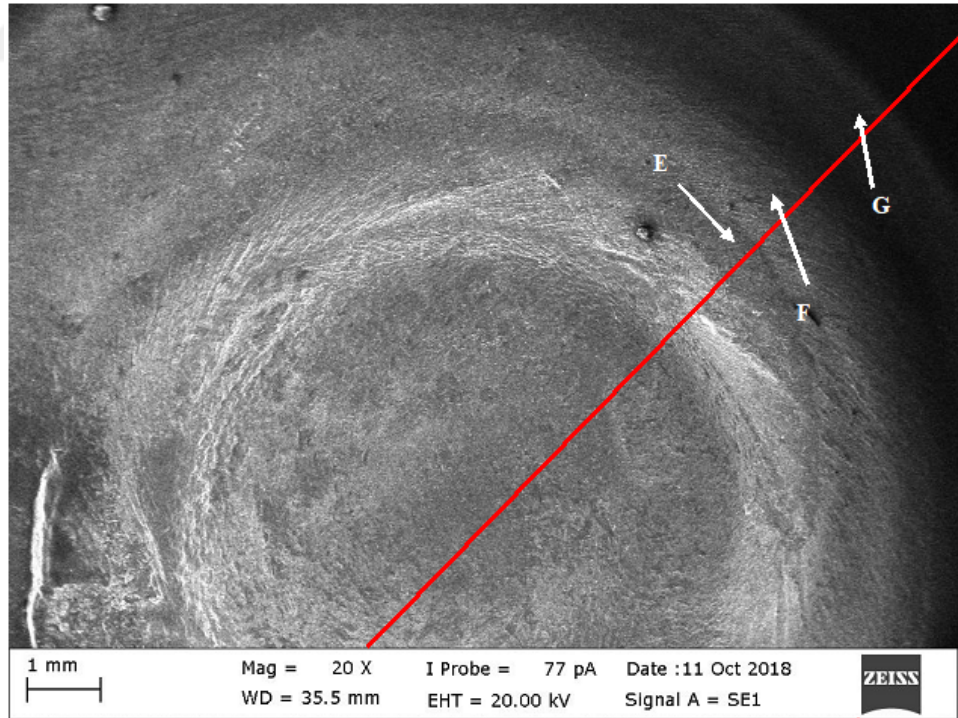
A bölgesinde; kaynak bölgesinin dış çevresinde oluşan uzun çukurlar, kesme kırılmasının meydana geldiğini göstermektedir; elde edilen bulguyu Mahmoud ve Khalifa'nın (2014) çalışması desteklemektedir. Deforme olmuş çukurlar B ve C bölgesinde görülmüştür. Bu çukurların morfolojileri incelendiğinde; kesme ve çekme hata modlarının bir kombinasyonunun bulunduğu tespit edilmiştir, bu durumu Lin ve Chen de (2015) elde ettikleri bulgularda rapor etmişlerdir. D bölgesinde kırılma yüzeyinde oluşan uzun çukurların sayısı çok fazladır ve bu, kesme kırılmasının meydana geldiğini göstermektedir; Zhang ve ark. de (2011) çalışmalarında benzer neticeler elde etmişlerdir. Farklı ebatlarda uzatılmış, sıg ve küçük çukurlar E bölgesinde bulunmaktadır ve kırılma yüzeyindeki çıkıntılı yüzeyler ortak yüzey morfolojisine sahiptir, Pathak ve ark.'nin (2013) çalışmasında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda, A ve D bölgesinin kırılma yüzeylerinde oluşan düz hatlı kırılma izleri gevrek kırılmanın meydana geldiğini göstermektedir.

Şekil 4.9(a, b, c)'de D1850 test numunesinin üst levha arka yüzeyinin mikrografları gösterilmektedir. Taramalı elektron mikroskobu yöntemi ile analizleri yapılan noktaların mikrografları Şekil 4.9(c)'de gösterilmiştir. Şekil 4.9(a, b)'de, bu noktalar A, B, C, D, E, F, G ve H olarak işaretlenmiştir.

(a)

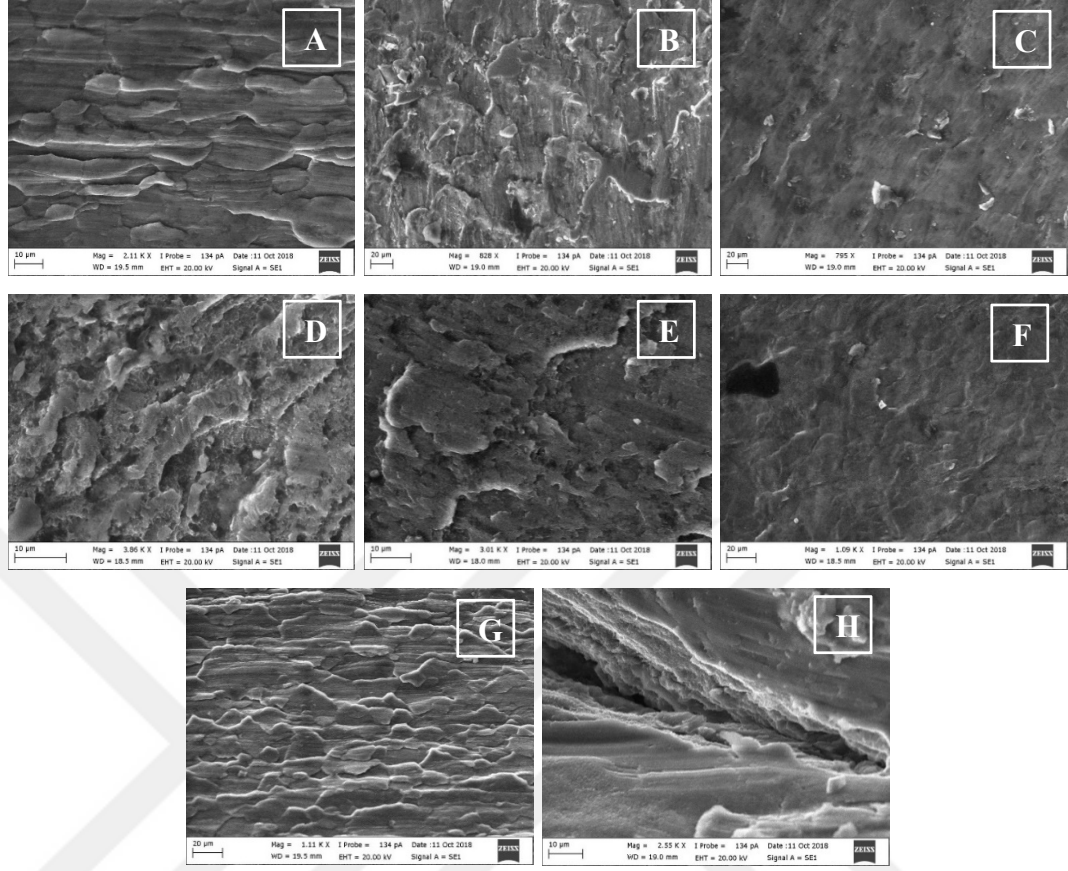


(b)



Şekil 4.9. D1850 test numunesinin (a, b) üst levha arka yüzeyinin ve (c) A, B, C, D, E, F, G ve H noktalarının mikroagrafları

(c)

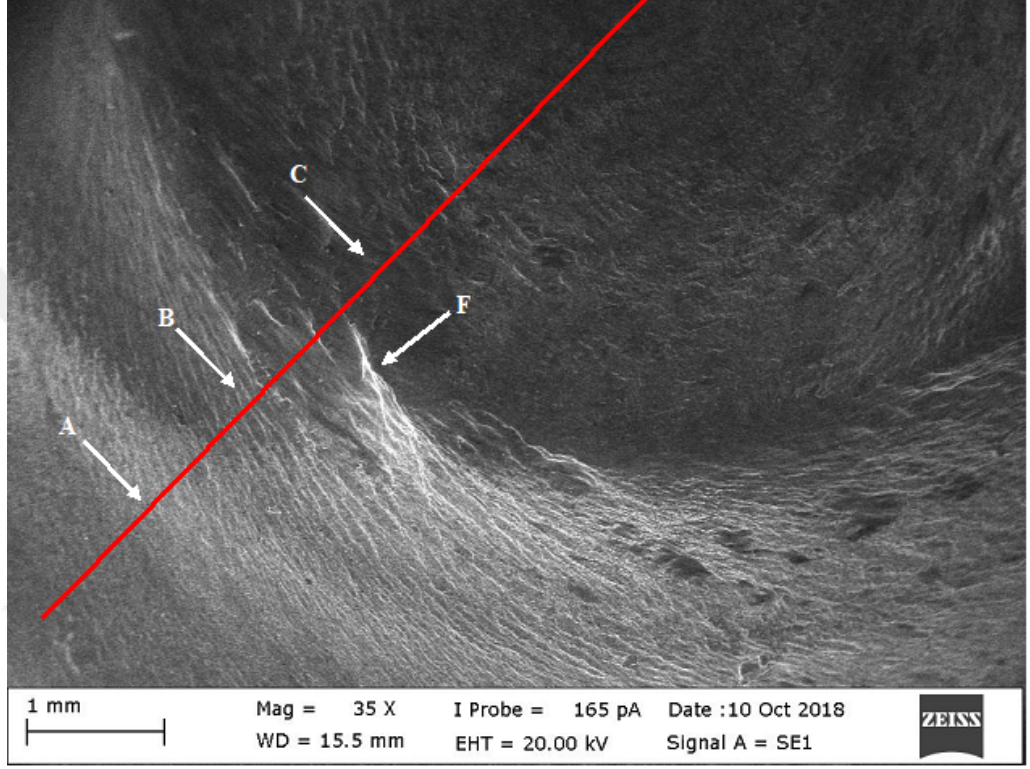


Şekil 4.9. D1850 test numunesinin (a, b) üst levha arka yüzeyinin ve (c) A, B, C, D, E, F, G ve H noktalarının mikrografları (devam)

A ve G bölgelerinin mikrograflarına göre, kaynak bölgesinin dış çevresinde meydana gelen uzatılmış çukurlar, kesme kırılmasının oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu durumu, Mahmoud ve Khalifa da (2014) elde ettikleri bulgularda rapor etmişlerdir. B bölgesinde çıkıntılı yüzeyler dışındaki yüzeylerin morfolojisi benzerdir ve bir kesme kırılması bulunmaktadır, Pathak ve ark.'nin (2013) çalışmasında da elde edilen benzer sonuçlar bu neticeyi desteklemektedir. C ve F bölgelerinin kırılma yüzeylerinde çukursuz yüzey oluşumu gözlemlenmiştir, Pathak ve ark.'nin (2013) çalışmasında da bu durum rapor edilmiştir. D, E ve H bölgelerinde kesme kırılmasının oluştuğunu gösteren çok sayıda uzatılmış çukurlar bulunmaktadır, Zhang ve ark. de (2011) çalışmalarında benzer neticeler elde etmişlerdir. Ayrıca, A, D, E, G ve H bölgesinin kırılma yüzeylerinde düz hatlı kırılma izleri bulunması nedeniyle meydana gelen kırılma gevrek kırılmadır.

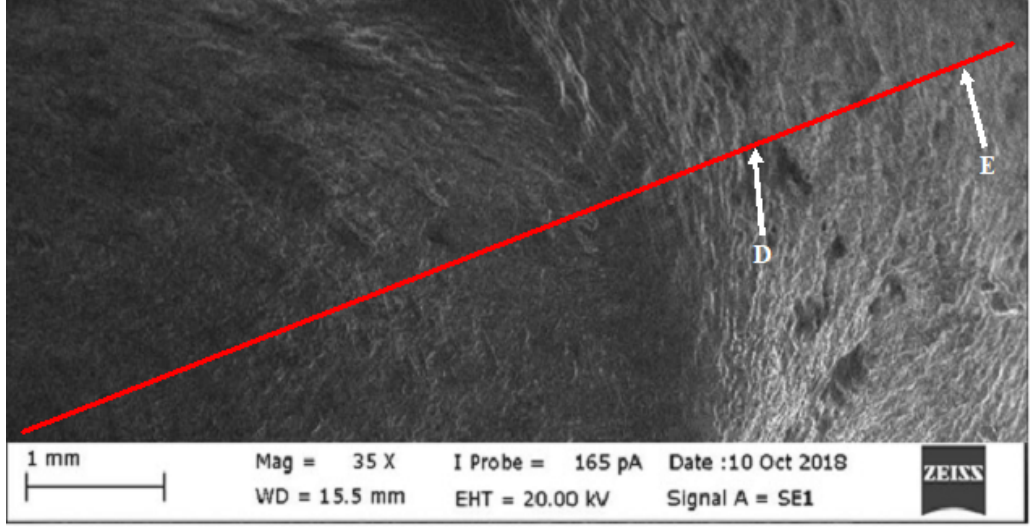
D1850 test numunesinin alt levha üst yüzeyi için taramalı elektron mikroskobu yöntemi ile elde edilen bulgular, Şekil 4.10(a, b, c)'de gösterilmiş ve ayrıntılı olarak incelenmiştir. Şekil 4.10(c)'de incelemeler için belirlenen noktaların mikrografları verilmiştir. Bu noktalar, Şekil 4.10(a, b)'de A, B, C, D, E ve F olarak işaretlenmiştir.

(a)

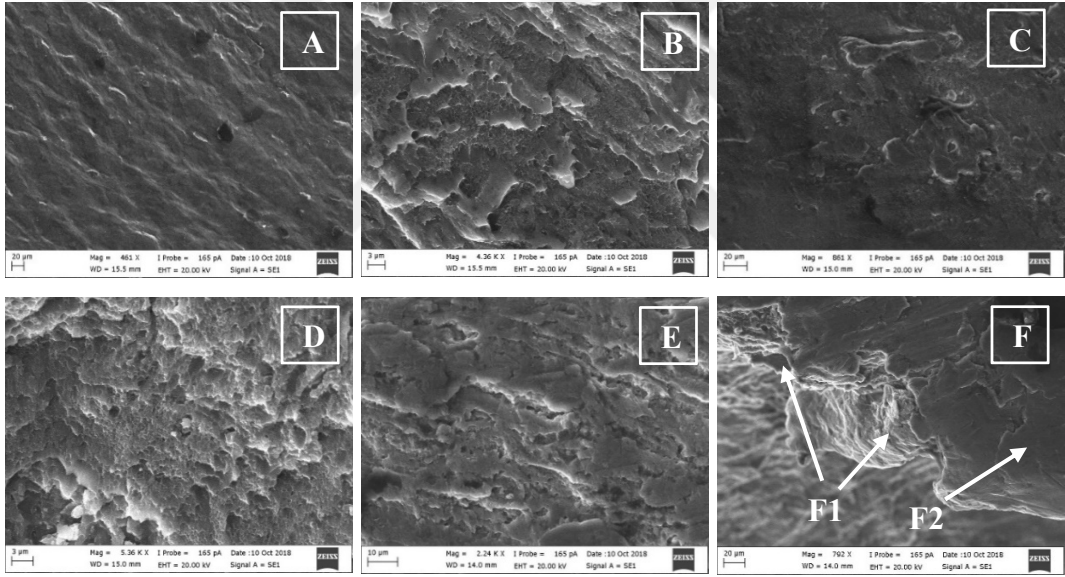


Şekil 4.10. D1850 test numunesinin (a, b) alt levha üst yüzeyinin ve (c) A, B, C, D, E ve F noktalarının mikrografları

(b)



(c)



Şekil 4.10. D1850 test numunesinin (a, b) alt levha üst yüzeyinin ve (c) A, B, C, D, E ve F noktalarının mikrografları (devam)

A, C ve F(F2) bölgelerinin kırılma yüzeylerinde çukursuz yüzey gözlemlenmiştir, elde edilen bu bulguyu Pathak ve ark.'nin (2013) çalışması desteklemektedir. Test numunesinin B ve F(F1) bölgelerinde oluşan çok sayıda uzatılmış çukur, kesme kırığının meydana geldiğini gösterir. Bu durumu Zhang ve ark. de (2011) elde ettikleri bulgularda rapor etmişlerdir. D bölgesinin mikrograflarına göre, farklı boyutlarda sığ, uzun ve küçük çukurlar bulunmaktadır. Ayrıca, çıkıntılı yüzeylerde ortak yüzey morfolojisi vardır.

Pathak ve ark.'nin (2013) çalışmasında da elde edilen benzer sonuçlar bu neticeyi desteklemektedir. Test numunesinin E bölgesi kesme kırılması bulunmaktadır ve çıkıntılı yüzeyler dışındaki yüzeylerin morfolojisi hemen hemen aynıdır, Pathak ve ark.'nin (2013) çalışmasında da bu durum rapor edilmiştir. B ve F(F1) bölgelerinde, kırılma yüzeyinde oluşan düz hatlı kırılma izleri gevrek kırılmanın meydana geldiğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular neticesinde P1850 ve D1850 numunelerinde genel itibariyle sünek kırılma olduğu gözlemlenmiştir. Numunenin yüzeyinde oluşan dairesel çukurlar kırığın sünek bir kırılma olduğunu kanıtlar. Ayrıca, bazı bölgelerde gevrek kırılma da tespit edilmiştir. Birbirine benzer mikrograf görüntüleri numunelerde farklı bölgelerde gözlemlenmiştir; ancak bazı bölgelerde farklı mikrograflar da bulunmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Al 5754 malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağının mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerindeki takım devir hızı ve takım geometrisi parametrelerinin etkileri, kesme makaslama mukavemet değerleri, sertlik değerleri ve kırılma morfolojileri açısından incelenmiştir. Deney konfigürasyonları için; üç farklı takım devir hızı (1350 devir/dk, 1850 devir/dk ve 2530 devir/dk) ve iki farklı kaynak takımı geometrisi (vida dişsiz dairesel takım ve pimsiz takım) belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar:

- 1- Kesme makaslama yükleri, sertlik değerleri ve uzama değerleri takım devir hızının 1350 devir/dk'dan 1850 devir/dk'ya yükseltilmesi ile artış gerçekleşmiştir; fakat takım devir hızı 2530 devir/dk'ya yükseltildiğinde azalma meydana gelmiştir.
- 2- Maksimum mukavemet değerlerine sahip deney konfigürasyonlarının, maksimum sertlik ve uzama değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kesme makaslama mukavemetinin, sertliğin ve uzamanın maksimum değerleri -aynı zamanda en iyi değerleri- 1850 dev/dk takım devir hızında gözlemlenmiştir.
- 3- En iyi mekanik özellikleri gösteren numunelerin aynı kırılma stiline sahip olduğu saptanmıştır.
- 4- Pimsiz kaynak takımı kullanılarak birleştirilen numunelerin mekanik özelliklerinin kaynak işleminde pimli takım kullanılanlara göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

5- Makroskobik incelemelerde elde edilen bulgular:

- Pimli kaynak takımı ile birleştirilen test gruplarında tek tip kırılma deseni (nugget çekme kırılması) gözlemlenmiştir ve takım devir hızının 1350 devir/dk'dan 2530 devir/dk'ya yükseltilmesi kırılma desenini etkilememiştir.
- Pimsiz kaynak takımı kullanılarak kaynaklanan deney konfigürasyonlarında üç tip kırılma deseni (kesme kırılması, karma klivaj kırılması ve nugget çekme kırılması) gözlemlenmiştir. Ayrıca, D1350 test grubunda sadece kesme kırılması bulunmaktayken, D1850 ve D2530 test gruplarında ise; mod 1, mod 2 ve mod 3 kırılma modları bulunmaktadır.
- Pimli ve pimsiz kaynak takımı kullanılan deney grupları kendi içlerinde değerlendirildiğinde, mod 3 kırılma moduna sahip numunelerin kesme makaslama mukavemet değerlerinin genellikle diğer kırılma modlarından daha yüksek olduğu saptanmıştır.

6- Mikroskobik incelemelerde elde edilen bulgular:

- Test numunelerinde genellikle sünek kırılma gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerin bazı bölgelerinde gevrek kırılma da tespit edilmiştir.
- Birbirine benzer mikrograf görüntüleri numunelerde farklı bölgelerde gözlemlenmiştir; ancak bazı bölgelerde farklı mikrograflar da bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abbass, M.K., Hussein, S.K., Khudhair, K.K. 2016.** Optimization of Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Joints for Dissimilar Aluminum Alloys (AA2024-T3 and AA 5754-H114). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(11): 4563-4572.
- Al-Zubaidy, B.M.M. 2016.** Material Interactions in a Novel Refill Friction Stir Spot Welding Approach to Joining Al-Al and Al-Mg Automotive Sheets. *Doktora Tezi*, Manchester Üniversitesi Fen ve Mühendislik Fakültesi, Birleşik Kırallık.
- Badarinarayan, H., Shi, Y., Li, X., Okamoto, K. 2009.** Effect of Tool Geometry on Hook Formation and Static Strength of Friction Stir Spot Welded Aluminum 5754-O Sheets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(11): 814-823.
- Bilici, M.K., Bakır, B., Bozkurt, Y., Çalış, İ. 2016.** Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Tekniği ile Birleştirilen Farklı Alüminyum Levhaların Taguchi Analizi. *Pamukkale Üniv. Müh Bilim Dergisi*, 22(1): 17-23.
- Bozkurt, Y., Bilici, M.K. 2013.** Application Of Taguchi Approach to Optimize of FSSW Parameters on Joint Properties of Dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 Aluminum Alloys. *Materials and Design*, 51: 513–521.
- Bozkurt, Y., Salman, S., Çam, G. 2013.** Effect of Welding Parameters on Lap Shear Tensile Properties of Dissimilar Friction Stir Spot Welded AA 5754-H22 and 2024-T3 Joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(4): 337-345.
- BS EN ISO 14273:2016** standardı. Resistance welding. Destructive testing of welds. Specimen dimensions and procedure for tensile shear testing resistance spot and embossed projection welds. <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030266453>, (Erişim Tarihi: 01.2019).
- Cao, X., Garnier, C., Wanjara, P. 2012.** Tensile Strength of Friction Stir Spot Welded Dissimilar AA5754-to-AZ31B Alloys. Proceedings of the 9 th International Conference on Trends in Welding Research, 4-8 Haziran 2012, ASM International, A. B. D.
- Chowdhury, S.H., Chen D.L., Bhole, S.D., Cao, X., Wanjara P. 2012.** Lap Shear Strength and Fatigue Life of Friction Stir Spot Welded AZ31 Magnesium and 5754 Aluminum Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 556: 500-509.
- Dedeoğlu, O., Güler Özgül, H. 2019.** The Joint Properties of 5754 Aluminium Alloy by Friction Stir Spot Welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(1): 8.
- Er, O. 2010.** Elektrik Direnç ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynaklı Alüminyum Alaşımı Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Figner, G., Vallant, R., Weinberger, T., Schröttner, H., Pasic, H., Enzinger N. 2009.** Friction Stir Spot Welds Between Aluminium and Steel Automotive Sheets: Influence of Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructural. *Welding in the World*, 53(1-2): 13-23.
- Fereiduni, E., Movahedi M., Baghdadchi, A. 2018.** Ultrahigh-strength friction stir spot welds of aluminium alloy obtained by Fe₃O₄ nanoparticles. *Science and Technology of Welding and Joining*, 23(1): 63-70.
- Gross, D., Seelig, T. 2011.** Fracture Mechanics with an Introduction to Micromechanics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 336 s.
- Güler, H. 2014.** The Mechanical Behavior of Friction-Stir Spot Welded Aluminum Alloys. *JOM*, 66(10): 2156-2160.

- Güler, H. 2015.** Influence of the Tool Geometry and Process Parameters on the Static Strength and Hardness of Friction-Stir Spot-Welded Aluminium-Alloy Sheets. *Mater. and Technol.*, 49(3): 457-460.
<http://web.itu.edu.tr/gulmezt/MekanikD/KIRILMA.pdf>, (Erişim Tarihi: 03.2019).
- Ikuta, A., Yin, Y., North, T.H. 2012.** Influence of Tool Thread on Mechanical Properties of Dissimilar Al Alloy Friction Stir Spot Welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 17(8): 622-629.
- Ikuta, A., Yin, Y., North, T.H. 2015.** Influence of Tool Thread on the Mechanical Properties of Dissimilar Al Alloy Friction Stir Spot Welds. *Welding International*, 29(1): 1-9.
- ISO 4957:2018** Takım çelikleri standardı. <https://www.iso.org/standard/70646.html>, (Erişim Tarihi: 01.2019).
- Jeon, C. -S., Hong, S. -T., Kwon, Y. -J., Cho, H. -H., Han, H.N. 2012.** Material Properties of Friction Stir Spot Welded Joints of Dissimilar Aluminum Alloys. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22: 605-613.
- Kaçar, R., Emre, H.E., Demir, H., Gündüz S. 2011.** Al-Cu-Al Malzeme Çiftinin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Kabiliyeti. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 26(2): 349-357.
- Kahraman, B. 2009.** Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alaşımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı (RSW) ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (FSSW) Yöntemleri ile Birleştirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kim, J. -R., Ahn, E. -Y., Das, H., Jeong, Y. -H., Hong, S. -T., Miles, M., Lee, K. -J. 2017.** Effect of Tool Geometry and Process Parameters on Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Dissimilar Aluminum Alloys. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(3): 445-452.
- Klobčar, D., Tušek, J., Smolej, A., Simončič, S., 2015.** Parametric study of FSSW of aluminium alloy 5754 using a pinless tool. *Welding in the World*, 59(2): 269-281.
- Kulekci, M.K., Esme, U., Er, O. 2011.** Experimental Comparison of Resistance Spot Welding And Friction-Stir Spot Welding Processes for The En Aw 5005 Aluminum Alloy. *Materials and Technology*, 45(5): 395-399.
- Küleki, M.K., Er, O. 2012.** Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynaklı En Aw - 5005 (Al Mg1) Alüminyum Alaşımı için Optimum Kaynak Parametre Seviyelerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 27(3): 537-545.
- Lin, Y. -C., Chen, J. -N. 2015.** Influence of Process Parameters on Friction Stir Spot Welded Aluminum Joints by Various Threaded Tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 225: 347-356.
- Mahmoud, T.S., Khalifa T.A. 2014.** Microstructural and Mechanical Characteristics of Aluminum Alloy AA5754 Friction Stir Spot Welds. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(3): 898-905.
- Messler, R.W. 2004.** Principles of Welding - Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy. John Wiley and Sons, Singapore, 662 s.
- Mishra, R.S., Ma, Z.Y. 2005.** Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1-2): 1-70.
- Ojo, O.O. 2016.** 2219 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynaklı Bağlantılarının Özellikleri ve Deneysel Tasarımla Optimizasyonu. *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- Panteli, A. 2012.** Friction Joining of Aluminium-to-Magnesium for Lightweight Automotive Applications. *Doktora Tezi*, Manchester Üniversitesi Mühendislik ve Fiziksel Bilimler Fakültesi, Birleşik Krallık.
- Patel, V.V., Sejani, D.J., Patel, N.J., Vora, J.J., Gadhvi, B.J., Padodara, N.R., Vamja, C.D. 2016.** Effect of Tool Rotation Speed on Friction Stir Spot Welded AA5052-H32 and AA6082-T6 Dissimilar Aluminum Alloys. *Metallogr. Microstruct. Anal.*, 5(2): 142–148.
- Pathak, N., Bandyopadhyay, K., Sarangi, M., Panda, S.K. 2013.** Microstructure and Mechanical Performance of Friction Stir Spot-Welded Aluminum-5754 Sheets. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(1): 131–144.
- Piccini, J.M., Svoboda, H.G. 2015.** Effect of the Tool Penetration Depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Dissimilar Aluminum Alloys. *Procedia Mater. Sci.*, 8: 868-877.
- Piccini, J.M., Svoboda, H.G. 2017.** Tool geometry optimization in friction stir spot welding of Al-steel joints. *J. Manuf. Process.*, 26: 142-154.
- Siddharth, S., Senthilkumar, T. 2016.** Optimization of Friction Stir Spot Welding Process Parameters of Dissimilar Al 5083 and C 10100 Joints Using Response Surface Methodology. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 57(5): 456-466.
- Song, Z., Fengbin, Q., Lijie, G. 2012.** Friction Stir Spot Welding Technology and its Application in Aerospace Industry. *Applied Mechanics and Materials*, 232: 200-204.
- Su, P., Gerlich, A., North, T.H., Bendzsak, G.J. 2006.** Material Flow During Friction Stir Spot Welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(1): 61-71.
- Su, P., Gerlich, A., North, T.H., Bendzsak, G.J. 2007.** Intermixing in Dissimilar Friction Stir Spot Welds. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 38(3): 584-595.
- Sudağ, M. 2011.** Alüminyum Alaşımı Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Dayanım Özelliklerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Threadgill, P.L., Leonard, A.J., Shercliff, H.R., Withers, P.J. 2009.** Friction stir welding of Aluminium Alloys. *International Materials Reviews*, 54(2): 49-93.
- Tran, V. -X., Pan, J., Pan, T. 2009.** Effects Of Processing Time on Strengths and Failure Modes of Dissimilar Spot Friction Welds Between Aluminum 5754-O and 7075-T6 Sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8): 3724-3739.
- Tran, V. -X., Pan, J. 2010.** Failure Modes of Friction Stir Spot Welds in Cross Tension Specimens of Dissimilar Aluminium Sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(4): 286-292.
- Tunçel, O. 2015.** Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı İle Birleştirilen Aa6082-T6 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Wang, D. -A., Lee, S. -C. 2007.** Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets. *J. Mater. Process. Technol.*, 186(1-3): 291-297.
- Yuan, W. 2008.** Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys. *Yüksek Lisans Tezi*, Missouri Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, A.B.D.
- Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G., Xu, X., Zou, B. 2011.** Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials and Design*, 32(8-9): 4461-4470.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Orhan DEDEOĞLU
Doğum Yeri ve Tarihi : Osmangazi/BURSA 21.04.1990
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)
Lise : Bursa Çınar Anadolu Lisesi, 2008
Lisans : Bülent Ecevit Üniversitesi, 2012
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, 2019

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Ermetal Şirketler Grubu – Bürosit Büro
Donanımları A.Ş. – Araştırma Geliştirme
Mühendisi/Proje Mühendisi, 2013-2016

İletişim (e-posta) : orhandedeoglu16@gmail.com

Yayımlar :

Dedeoğlu, O., Güler Özgül, H. 2019. The Joint Properties of 5754 Aluminium Alloy by Friction Stir Spot Welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(1): 8.