KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AW-5005 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ BİNDİRME SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAKLI BAĞLANTI ÖZELLİKLERİNE TAKIM PROFİLİNİN ETKİSİ

ONUR KIRCI

KOCAELİ 2012

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AW-5005 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ BİNDİRME SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAKLI BAĞLANTI ÖZELLİKLERİNE TAKIM PROFİLİNİN ETKİSİ

ONUR KIRCI

Prof.Dr. Erdinç KALUÇ
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Salim ASLANLAR
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Emel TABAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 25.06.2012

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu çalışmada son yıllarda alüminyum alaşımlarının kaynağında endüstride kullanım oranını hızla arttıran sürtünen eleman ile kaynak yönteminin AW-5005 türü alüminyum alaşımlarının kaynağında kare, üçgen ve pimsiz profilli takımların bağlantının mekanik ve mikroyapısı üzerine etkisi araştırılmıştır.

"AW-5005 Alüminyum Alaşımının Bindirme Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Bağlantı Özelliklerine Takım Profilinin Etkisi" konulu tezi öneren, çalışmalarım sırasında sürekli beni desteyken, yönlendiren ve kaynaklı parçaların oluşturulmasında ve deneylerinde beni yalnız bırakmayıp yardım eden değerli tez danışmanım Sn. Prof.Dr. Erdinç KALUÇ' a, mikroyapısal incelemeler ve analizler yapılmasında değerli fikirleriyle yanımda olan Sn. Yrd.Doç.Dr. Emel TABAN' a teşekkür ederim.

Ayrıca deneysel çalışmalarım için kaynaklı parçaların oluşturulmasında fabrikalarında çalışma fırsatı veren ICM Genel Müdürü Sn. Çınar ULUSOY, fabrika müdürü Sn. Devrim DENİZ, kaynaklı parçaların oluşturulmasında ve deney numunelerinin hazırlanmasında yardımcı olan ICM personeli Sn. Şener ŞENYİĞİT, çekme, eğme deneylerinin gerçekleştirilmesi ve SEM görüntüleri için Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuar imkanlarını sağlayan Sn. Prof.Dr. Hatem AKBULUT ve Sn. Prof.Dr. Fatih ÜSTEL, çekme ve eğme deneylerini gerçekleştirmemde yardım eden Sn. Savaş ÖZTÜRK, yorulma deneylerinde yardımlarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi öğretim üyesi Sn. Doç.Dr. Aydın ŞIK, metalografi numunelerinin hazırlanmasında yardımcı olan Sn. Haldun NUMAN' a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatım boyunca beni destekleyen ve bugünlere getiren babam Mehmet KIRCI, annem Bahriye KIRCI, abim Uğur KIRCI ve kardeşim Müge KIRCI' ya sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Tez sonuçlarının tüm ülke endüstrisine, bilim camiasına yararlı olmasını dilerim.

Haziran - 2012 Onur KIRCI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ x
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR xi
ÖZET xiii
ABSTRACT xiv
GİRİŞ 1
1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI 4
1.1. Alüminyumun Elde Edilmesi ve Genel Özellikleri 4
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması, Standart Gösterimleri ve Uygulanan Sertleştirme İşlemlerine Göre Simgelendirilmesi 13
1.2.1. Dövme alüminyum alaşımları 14
1.2.1.1. 1xxx serisi alaşımlar 18
1.2.1.2. 2xxx serisi alaşımlar 18
1.2.1.3. 3xxx serisi alaşımlar 19
1.2.1.4. 4xxx serisi alaşımlar 19
1.2.1.5. 5xxx serisi alaşımlar 20
1.2.1.6. 6xxx serisi alaşımlar 20
1.2.1.7. 7xxx serisi alaşımlar 21
1.2.2. Döküm alüminyum alaşımları 22
1.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Çeşitli Endüstri Kollarında Kullanım Alanları 23
1.3.1. Otomotiv endüstrisi 23
1.3.2. Gemi ve taşımacılık endüstrisi 23
1.3.3. Savunma ve havacılık endüstrisi 24
1.3.4. Eğlence ve spor malzemeleri endüstrisi 24
2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK (FSW) YÖNTEMİ 25
2.1. Yöntemin Tanıtımı 25
2.2. Yöntemin Üstünlük ve Sınırlamaları 31
2.2.1. Yöntemin metalurjik açıdan üstünlükleri 31
2.2.2. Yöntemin enerji ve ekonomik açıdan üstünlükleri 32
2.2.3. Yöntemin çevresel açıdan üstünlükleri 33
2.2.4. Yöntemin sınırlamaları 34
2.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak (FSW) Yönteminin Uygulama Alanları 35
2.3.1. Gemi inşasında ve denizcilik endüstrisindeki uygulamalar 35
2.3.2. Raylı taşıt endüstrisindeki uygulamamalar 39
2.3.3. Otomotiv endüstrisindeki uygulamamalar 42
2.3.4. Havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulamalar 45
2.3.5. Diğer endüstriyel uygulamalar 47
2.4. Yöntem Değişkenlerinin Kaynak Bölgesi Üzerindeki Etkisi 47
2.4.1. Takım geometrisi 48

2.4.1.1. Alışılmış silindirik pimli FSW takımlar 50
2.4.1.2. Whorl™ serisi FSW takımlar 51
2.4.1.3. MX-triflute™ ve flared-triflute™ serisi FSW takımlar 52
2.4.1.4. Makara veya bobin biçimli FSW takımlar 55
2.4.1.5. Skew-Stir™ serisi FSW takımlar 55
2.4.1.6. Trivex™ serisi FSW takımlar 57
2.4.1.7. Pimsiz FSW takımlar 57
2.4.2. Kaynak hızı, takımın dönme hızı ve takım açısı 59
2.4.3. Yöntemin uygulandığı malzeme ve kalınlıklar 61
2.4.4. Yöntemde kullanılan birleştirme türleri 61
2.5. Kaynağın metalurjik yapısı 62
2.6. İşlem Parametrelerinin Kaynak Kusurlarına Etkisi 63
2.7. Alüminyum Dışındaki Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi 66
2.7.1. Bakır alaşımlarının FSW yöntemiyle birleştirilmesi 66
2.7.2. Titanyum alaşımlarının FSW yöntemiyle birleştirilmesi 67
2.7.3. Çelik alaşımlarının FSW yöntemiyle birleştirilmesi 67
2.7.4. Magnezyum alaşımlarının FSW yöntemiyle birleştirilmesi 69
2.7.5. Plastiklerin FSW yöntemiyle birleştirilmesi 69
3. ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLANMASI 70
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 72
4.1. Genel 72
4.2. Deney Malzemesi 72
4.3. Deney Parçalarının Boyutları 73
4.4. Kaynak Öncesi Yapılan İşlemler 75
4.5. FSW (Sürtünme Karıştırma Kaynağı) Yönteminin Uygulanması 75
4.5.1. Yöntemde kullanılan takım 77
4.5.2. Yöntemde kullanılan kaynak parametreleri 80
4.6. Deney Numunelerinin Görsel İncelenmesi 82
4.7. Deney Numunelerinin Hazırlanma Esasları 85
4.7.1. Deney numunelerinin kodlanması 85
4.7.1.1. Kullanılan karıştırıcı pim profilinin kodlanması 85
4.7.1.2. Deney türünün kodlanması 86
4.7.1.3. Numune sayısı 86
4.7.2. Kaynaklı levhalardan deney numunelerinin çıkarılması 87
4.7.2.1. Çekme deney numuneleri 87
4.7.2.2. Eğme deney numuneleri 88
4.7.2.3. Metalografik inceleme ve sertlik taraması nuuneleri 88
4.7.2.4. Yorulma deney numuneleri 89
4.7.2.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) numuneleri 89
4.8. Deneylerin Yapılışı 90
4.8.1. Çekme deneyleri 90
4.8.2. Eğme deneyleri 90
4.8.3. Yorulma deneyleri 91
4.8.4. Metalografi deneyleri 93
4.8.5. Vickers sertlik taraması 93
5. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ 94
5.1. Deney Sonuçları 94
5.1.1. Görsel inceleme sonuçları 94

5.1.2. Çekme deney sonuçları 95
5.1.3. Eğme deneyi sonuçları 99
5.1.4. Yorulma deneyi sonuçları 100
5.1.5. Metalografik inceleme sonuçları 110
5.1.6. Mikrosertlik inceleme sonuçları 116
5.2. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi 118
5.2.1. Görsel inceleme sonuçlarının irdelenmesi 118
5.2.2. Çekme deney sonuçlarının irdelenmesi 119
5.2.3. Eğme deney sonuçlarının irdelenmesi 120
5.2.4. Yorulma deney sonuçlarının irdelenmesi 122
5.2.5. Metalografik inceleme sonuçlarının irdelenmesi 124
5.2.6. Mikrosertlik taraması sonuçlarının irdelenmesi 125
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 127
KAYNAKLAR 129
ÖZGEÇMİŞ 139

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Alüminyum üretim tesisinden bir görüntü 4
Şekil 1.2. Sıvı hale getirilmiş alüminyumun kalıplar dökülmesi 6
Şekil 1.3. Alüminyum elde edilmesinin şematik gösterimi 7
Şekil 1.4. Ergimiş alüminyumun levha, tel ve ekstrüzyon ürünü olarak işlenmesi 8
Şekil 1.5. Alüminyumun üretim çevrimi 8
Şekil 1.6. 2005-2010 yılları arasında günlük-yıllık olarak alüminyum üretim miktarları 9
Şekil 1.7. 2011 yılında üretilen alüminyum miktarının ülkelere göre dağılımı 10
Şekil 1.8. 2010 ve 2020 yıllarında alüminyum üretiminin dünyadaki dağılım öngörüsü 10
Şekil 1.9. Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri 13
Şekil 2.1. Orion uzay gemisinin bölmeleri sürtünen elemen kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir 25
Şekil 2.2. FS kaynak yöntemi uygulamasının şematik gösterimi 27
Şekil 2.3. Bindirme yöntemi kullanılmış sürtünme karıştırma kaynağında pim, omuz, ilerleme ve yığma kenarlarının şematik gösterimi 28
Şekil 2.4. Sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yönteminin prensibi 29
Şekil 2.5. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin işlem sırası 30
Şekil 2.6. FSW yönteminde kaynak ağzında dönerek ilerleyen takımın ısıtarak yumuşattığı malzemeyi karıştırma mekanizması (şematik kesit) 30
Şekil 2.7. a) Karıştırıcı takımın malzemeye dalması (sol) ve ilerlemesi (sağ) b) kaynak bitiş bölgesinin makro görüntüsü 31
Şekil 2.8. Sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yönteminin uygulamasına örnek 33
Şekil 2.9. Pimin kaynak bitiminde yukarı çıkmasıyla oluşan anahtar deliği 34
Şekil 2.10. Avustralya Araştırma Enstitüsü tersanesinde bulunan taşınabilir FSW makinası 35
Şekil 2.11. Çin' de ilk endüstriyel FSW üretim tesisi 36
Şekil 2.12. ABD donanmasına ait Sea Fighter gemisin FSW yöntemi ile üretilmiş güverte panelleri 36
Şekil 2.13. MIG ve FSW yöntemi ile üretilmiş gemi panelleri 37
Şekil 2.14. Çin' de FSW yöntemi kullanılarak alüminyum panellerinin birleştirilmesi ile üretilen bir gemi 37
Şekil 2.15. Gemi yapımında kullanılan alüminyum ekstrüzyon ürünlerinin FSW yöntemi ile üretilen panelleri 38
Şekil 2.16. a) Hyro Marine Alüminyum tarafından üretilmiş "The World" yolcu gemisine ait güverte panelleri b) FSW yöntemi ile üretilmiş güverte panellerine sahip Fosen Mek tarafından yapılmış "The World" yolcu gemisi 38
Şekil 2.17. Hitachi tarafından yapılan, tek taraftan tüm uzunluk boyunca FS kaynağı yapılmış olan bir tren 39

Şekil 2.18. Hitachi tarafından yapılan, çift taraftan tüm uzunluk boyunca FS kaynağı yapılmış olan hızlı bir tren 39
Şekil 2.19. Japonya' da taban panellerinin kaynağının FSW yöntemi ile Sumitomo Hafif Metal firmasında yapılan Shinkansen tipi 700 standart yüksek hızlı bir tren 40
Şekil 2.20. Sumitomo Hafif Metal tarafından Shinkansen trenleri için FSW yöntemi ile üretilmiş taban paneli 40
Şekil 2.21. Tren vagonlarında yan duvar olarak kullanılan çift taraftan kaynaklı alüminyum profiller 40
Şekil 2.22. Çatı panellerinin FS kaynak yöntemi ile üretilmesi ve raylı taşıt endüstrisinde kullanımı 41
Şekil 2.23. a) AMAG firması FSW yöntemiyle geniş çapta tren, gemi ve kamyon panelleri üretmiştir b) Kawasaki firması alüminyum çatı panellerinin üretiminde sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamıştır c) Bombardier firması Londro' da FSW yöntemiyle yedek stok depoları üretmektedir d) Sapa firması geçtiğimiz 10 yılda tren yan kenar paneller üretiminde 2000 km FSW yöntemini kullanmıştır 41
Şekil 2.24. Araç koltukların arka desteklerinde bindirme sürtünme karıştırma kaynağına örnek 42
Şekil 2.25. FSW yöntemi ile Norveç' te üretilmiş otomobil jantı 43
Şekil 2.26. Audi A8 aracının kasa ve şasesinde kullanılan alüminyum alaşımları 44
Şekil 2.27. Amerika' da Ford firması GT modelindeki orta tünel yapısını FSW yöntemi ile üretmektedir 44
Şekil 2.28. a) Prototip SK kaynaklı motor kızağı b) Volvo firmasının arka koltuk üretiminde FSW yöntemi kullanılmaktadır c) Mazdanın RX-8modeli için arka koltuklarında FSSW yöntemi kullanılmaktadır d) Lincoln limuzinlerinin süspansiyon bağlantılarında FSW yöntemi kullanılmaktadır 45
Şekil 2.29. SpaceX fabrikasında Falcon 9 roketinin itici tanklarının boyuna ve çevresel kaynağında SKK kullanılmıştır 46
Şekil 2.30. Eclipse havacılık şirketinin FSW yöntemini alüminyum kabin panel kafes ve kirişlerinin birbirine kaynağında kullanması ve FSW yöntemi ile üretmiş olduğu Eclipse 500 küçük boyutlu uçağı 46
Şekil 2.31. Kaynak takımının parçaya dalma ve ilerleme mekanizması 48
Şekil 2.32. Sürtünme karıştırma aparatı 49
Şekil 2.33. FSW yönteminde kullanılan değişik tipteki takım tasarımları 50
Şekil 2.34. FSW yönteminde kullanılan alışılmış silindirik pimli takımlara örnek a) Küresel ağızlı silindirik pimli takım b) Düz ağızlı silindirik pimli takım 51
Şekil 2.35. FSW yönteminde takımlarda kullanılan omuz profillerine örnekler 51
Şekil 2.36. Çeşitli pim profillerinden üretilen Whorl™ takımlar 52
Şekil 2.37. 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımı kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü 52
Şekil 2.38. MX-Triflute™ piminin esin kaynağı deniz kabuklarıdır, MX-Triflute™ piminin resmi 53

Şekil 2.39. Flared-Triflute™ takım kullanılarak bindirme kaynağının gerçekleştirilmesi ve oluşan kaynak dikiş kesiti 54
Şekil 2.40. TWI tarafından geliştirilen Flared-Triflute™ takımlarının görüntüleri a) Düz (nötr) kanallı b) sol kanallı c) sağ kanallı d) vida dişleri nötr, sağ ve sol olması 54
Şekil 2.41. a) Bobin takımın kaynak prensibi b) Kaynak işleminde kullanılan bobin takımı c) Soldaki resim 300 mm/dk kaynak hızı ile kaynağın makro kesiti, sağdaki resim 500 mm/dk kaynak hızı ile kaynağın makro kesiti 55
Şekil 2.42. Skew-Stir™ takımının çalışma prensibi ve ilk geliştirilen asimetrik Skew-Stir™ takımının görünüşü 56
Şekil 2.43. a) Trivex™, b) MX-Trivex™ türü FSW takımlar 57
Şekil 2.44. a) Profilsiz düz takım, b) kısa yivli takım, c) uzun yivli takım, d) dairesel yivli takım, e) geniş açılı dairesel yivli takım 58
Şekil 2.45. Kaynak merkezinin farklı dönme ve ilerleme hızlarındaki tane yapısı 59
Şekil 2.46. FSW yönteminin şematik gösterimi ve takım açısının değişimi ile takımın dalma derinliği arasındaki ilişki 60
Şekil 2.47. FSW yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirme türleri a) Küt alın birleştirme, b) Birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme, c) Bindirme, d) Çoklu bindirme, e) İki pasolu T köşe birleştirme, f) Tek pasolu T-köşe birleştirme, g) Dış köşe birleştirme, h) iç köşe birleştirme 61
Şekil 2.48. Tipik bir alın kaynağında gerçekleşen kaynak bölgeleri ve kaynak çekirdeğinin kesit görüntüsü 62
Şekil 2.49. FSW yöntemi ile kaynak sonrasında kaynak bölgesinin tipik görünümü ve oluşan yapısal bölgeler 63
Şekil 2.50. Sürtünme karıştırma kaynağında yığma kenarı üzerindeki sıçramış malzeme görüntüsü 64
Şekil 2.51. SK kaynağında karşılaşılabilecek tipik kaynak hataları 65
Şekil 2.52. Bindirme kaynağında karşılaşılan kaynak hatası 66
Şekil 2.53. FSW yönteminin yüksek mukavemetli çeliklere uygulanmasına örnek 68
Şekil 4.1. Kaynak edilecek levhaların boyutları 73
Şekil 4.2. Yukarıdaki şekilde boyutları verilen deney parçalarının pimsiz takım ile kaynaklı durumu 74
Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yönteminde kullanılan üniversal freze tezgahı 75
Şekil 4.4. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde parçaların rijit olarak freze tablasına bağlanması ve kaynak işleminin yapılışı 76
Şekil 4.5. FS kaynağı yapılmış deney parçaları 76
Şekil 4.6. Üçgen profilli karıştırıcı takımın teknik resmi 78
Şekil 4.7. Kare profilli karıştırıcı takımın teknik resmi 78
Şekil 4.8. Üçgen, kare ve pimsiz karıştırıcı takımların resimleri 79
Şekil 4.9. Üçgen profilli takımın kaynak başlangıç bölgesi 82
Şekil 4.10. Üçgen profilli takımın kaynak bitiş bölgesi 83
Şekil 4.11. Pimsiz takımın kaynak bitiş bölgesi 83
Şekil 4.12. Üçgen profilli takımın kaynak dikiş ve kök bölgesinin görüntüsü 84
Şekil 4.13. Kare profilli takımın kaynak dikiş ve kök bölgesinin görüntüsü 84

Şekil 4.14. Pimsiz takımın kaynak dikiş görüntüsü 85
Şekil 4.15. EN 895' e uygun olarak hazırlanmış çekme deney parçalarının boyutları 87
Şekil 4.16. EN 910 standardına göre hazırlanmış eğme deney numunesinin boyutları 88
Şekil 4.17. Yorulma deney numunesinin boyutları 89
Şekil 4.18. Çekme deneyi uygulanmış bir deney numunesinin görüntüsü 90
Şekil 4.19. Kaynak dikişlerine eğme deneyi uygulama prensibi 90
Şekil 4.20. Eğme deneyi uygulanmış bir deney numunesinin görüntüsü 91
Şekil 4.21. Yorulma deneylerinin gerçekleştirildiği cihaz 91
Şekil 4.22. Yorulma deneyi uygulanmış bir deney numunesinin görüntüsü 92
Şekil 4.23. Deney numunelerinin test cihazına bağlanması ve deney sonunda kopan bir numunenin görüntüsü 92
Şekil 4.24. Mikrosertlik taraması yapılmış bir deney numunesinin makro görüntüsü 93
Şekil 5.1. Üçgen ve kare profilli pim ile kaynak yapılmış levhalar 94
Şekil 5.2. a)Üçgen b) Kare c) Pimsiz profilli takımların kaynak dikişlerinin görüntüsü 95
Şekil 5.3. Pimsiz, kare ve üçgen profilli takım ile kaynaklı çekme numunelerinin görüntüsü 97
Şekil 5.4. SK kaynaklı numunelerin esas metale göre mekanik özelliklerinin kıyaslanması 98
Şekil 5.5. SK kaynaklı numunelerin ortalama mukavemet değerlerinin esas metal ortalama mukavemet değeri ile kıyaslanması 98
Şekil 5.6. Üçgen takım ile kaynaklı parçaların kök ve yüz eğme görüntüleri 99
Şekil 5.7. Kare takım ile kaynaklı parçaların kök ve yüz eğme görüntüleri 99
Şekil 5.8. Pimsiz takım ile kaynaklı parçaların kök ve yüz eğme görüntüleri 100
Şekil 5.9. Yorulma deney sonuçlarının gerilme-ömür diyagramı 102
Şekil 5.10. Pimsiz profilli kaynaklı yorulma numunelerinin toplu görünümü 102
Şekil 5.11. Üçgen profilli kaynaklı yorulma numunelerinin toplu görünümü 103
Şekil 5.12. Kare profilli kaynaklı yorulma numunelerinin toplu görünümü 103
Şekil 5.13. Kare profil takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri 104
Şekil 5.14. Üçgen profil takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri 106
Şekil 5.15. Pimsiz takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri 108
Şekil 5.16. Kare profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı 1. levhanın mikroyapı görüntüleri 110
Şekil 5.17. Kare profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı 2. ve 3. levhanın mikroyapı görüntüleri 111
Şekil 5.18. Üçgen profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı 1. levhanın mikroyapı görüntüleri 112
Şekil 5.19. Pimsiz profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı levhaların mikroyapı görüntüleri 114
Şekil 5.20. Kare takımla kaynaklı bağlantının sertlik sonuçları 117

Şekil 5.21. Üçgen takımla kaynaklı bağlantının sertlik sonuçları 117
Şekil 5.22. Pimsiz takımla kaynaklı bağlantının sertlik sonuçları 118
Şekil 5.23. Kaynaklı bağlantıların sertlik sonuçları 118
Şekil 5.24. Pimsiz profil karıştırıcı takımla kaynaklı bağlantının yüzey eğme görüntüsü 121
Şekil 5.25. Kare profil karıştırıcı takımla kaynaklı bağlantının kök eğme görüntüsü 121
Şekil 5.26. Üçgen profil karıştırıcı takımla kaynaklı bağlantının kök eğme görüntüsü 122
Şekil 5.27. Bindirme kaynağında karşılaşılan kaynak hatası 123
Şekil 5.28. Sırası ile pimsiz, kare ve üçgen profil karıştırıcı takımla kaynaklı bağlantıların eğme deneyi sonrası kırlıma yüzey görüntüleri 124

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Alüminyumun genel özellikleri 5
Tablo 1.2. Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve diğer metallerle karşılaştırılması, 20 °C 11
Tablo 1.3. Alüminyum ve alaşımlarında mukavemetlendirme mekanizmalarının etkileri 11
Tablo 1.4. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanlarının malzeme türüne göre sınıflandırılması 12
Tablo 1.5. Alaşım elementlerinin alüminyumun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi 14
Tablo 1.6. Dövme alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi 15
Tablo 1.7. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının temel ısıl (temperleme) işlemlerinin gösterimi 16
Tablo 1.8. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının H (sertleştirme) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi 17
Tablo 1.9. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi 22
Tablo 2.1. 1995-2004 yılları arasında sürtünme karıştırma kaynak yönteminin uygulama alanları 26
Tablo 2.2. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin uygulama alanlarının başlıcaları 47
Tablo 2.3. FS kaynağında pim profilinin kaynak mukavemetine etkisi 49
Tablo 4.1. Deney malzemesinin kimyasal bileşimi 72
Tablo 4.2. Deney malzemesinin mekanik özellikleri 73
Tablo 4.3. Karıştırıcı uç profili, takım dönme ve ilerleme hızları 80
Tablo 4.4. Deneysel çalışmada kullanılan parametrelerin toplu gösterimi 81
Tablo 5.1. FSW bağlantılarının çekme deney sonuçları 96
Tablo 5.2. Yorulma deney sonuçları 101
Tablo 5.3. Vickers sertlik taraması sonuçları 116

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
cal	: Kalori
cm	: Santimetre
E	: Elastik modül
gr	: Gram
j	: Joule
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
m	: Metre
mm	: Milimetre
N	: Newton
R_m	: Maksimum Çekme Mukavemeti
$R_{p0,2}$	: Akma Mukavemeti
sn	: Saniye
μm	: Mikrometre

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AW	: Aluminium Wrought (Dövme Alüminyum)
BM	: Base Metal (Ana Metal)
EM	: Esas Metal
EMC1	: Esas metal 1. çekme deney numunesi
EMC2	: Esas metal 2. çekme deney numunesi
EN	: European Norms (Avrupa Normları)
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
FSSW	: Friction Stir Spot Welding (Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HRC	: Hardness Rockwell C (Rockwell C Sertliği)
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
IEB	: Isıdan Etkilenmiş Bölge
KC1	: Kare takımla kaynaklı 1. çekme deney numunesi
KC2	: Kare takımla kaynaklı 2. çekme deney numunesi
KC3	: Kare takımla kaynaklı 3. çekme deney numunesi
KC4	: Kare takımla kaynaklı 4. çekme deney numunesi
KEK	: Kare takımla kaynaklı kök eğme numunesi
KEY	: Kare takımla kaynaklı yüz eğme numunesi
KM	: Kaynak Metali
KY1	: Kare takımla kaynaklı 1. yorulma deney numunesi
KY2	: Kare takımla kaynaklı 2. yorulma deney numunesi
KY3	: Kare takımla kaynaklı 3. yorulma deney numunesi
KY4	: Kare takımla kaynaklı 4. yorulma deney numunesi

KY5 : Kare takımla kaynaklı 5. yorulma deney numunesi
KY6 : Kare takımla kaynaklı 6. yorulma deney numunesi
KY7 : Kare takımla kaynaklı 7. yorulma deney numunesi
KY8 : Kare takımla kaynaklı 8. yorulma deney numunesi
KY9 : Kare takımla kaynaklı 9. yorulma deney numunesi
KY10 : Kare takımla kaynaklı 10. yorulma deney numunesi
KY11 : Kare takımla kaynaklı 11. yorulma deney numunesi
KY12 : Kare takımla kaynaklı 12. yorulma deney numunesi
KY13 : Kare takımla kaynaklı 13. yorulma deney numunesi
MIG : Metal inert gas (Metal asal gaz)
PC1 : Pimsiz takımla kaynaklı 1. çekme deney numunesi
PC2 : Pimsiz takımla kaynaklı 2. çekme deney numunesi
PC3 : Pimsiz takımla kaynaklı 3. çekme deney numunesi
PEK : Pimsiz takımla kaynaklı kök eğme numunesi
PEY : Pimsiz takımla kaynaklı yüz eğme numunesi
PY1 : Pimsiz takımla kaynaklı 1. yorulma deney numunesi
PY2 : Pimsiz takımla kaynaklı 2. yorulma deney numunesi
PY3 : Pimsiz takımla kaynaklı 3. yorulma deney numunesi
PY4 : Pimsiz takımla kaynaklı 4. yorulma deney numunesi
PY5 : Pimsiz takımla kaynaklı 5. yorulma deney numunesi
PY6 : Pimsiz takımla kaynaklı 6. yorulma deney numunesi
RPM : Revolutions per minute (Dakikada dönme sayısı)
SKK : Sürtünme karıştırma kaynağı
TIG : Tungsten inert gas (Tungsten asal gaz)
TWI : The Welding Institute (İngiliz Kaynak Enstitüsü)
UC1 : Üçgen takımla kaynaklı 1. çekme deney numunesi
UC2 : Üçgen takımla kaynaklı 2. çekme deney numunesi
UC3 : Üçgen takımla kaynaklı 3. çekme deney numunesi
UC4 : Üçgen takımla kaynaklı 4. çekme deney numunesi
UEK : Üçgen takımla kaynaklı kök eğme numunesi
UEY : Üçgen takımla kaynaklı yüz eğme numunesi
UY1 : Üçgen takımla kaynaklı 1. yorulma deney numunesi
UY2 : Üçgen takımla kaynaklı 2. yorulma deney numunesi
UY3 : Üçgen takımla kaynaklı 3. yorulma deney numunesi
UY4 : Üçgen takımla kaynaklı 4. yorulma deney numunesi
UY5 : Üçgen takımla kaynaklı 5. yorulma deney numunesi
UY6 : Üçgen takımla kaynaklı 6. yorulma deney numunesi
UY7 : Üçgen takımla kaynaklı 7. yorulma deney numunesi
UY8 : Üçgen takımla kaynaklı 8. yorulma deney numunesi
UY9 : Üçgen takımla kaynaklı 9. yorulma deney numunesi
UY10 : Üçgen takımla kaynaklı 10. yorulma deney numunesi
UY11 : Üçgen takımla kaynaklı 11. yorulma deney numunesi
UY12 : Üçgen takımla kaynaklı 12. yorulma deney numunesi
UY13 : Üçgen takımla kaynaklı 13. yorulma deney numunesi
WM : Weld Metal (Kaynak Metali)
YMK : Yüzey merkezli kübik

AW-5005 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ BİNDİRME SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAKLI BAĞLANTI ÖZELLİKLERİNE TAKIM PROFİLİNİN ETKİSİ

ÖZET

Yeryüzünde en fazla bulunan ikinci element olan alüminyum, 19. yüzyılın sonlarına doğru mühendislik uygulamalarında ekonomik rekabetçi konumuna gelmiştir. Alüminyum alaşımlarının ergitme esaslı kaynak yöntemleriyle birleştirilmelerine karşın bağlantının mekanik özelliklerinde azalmalar araştırmacıları farklı arayışlara itmiştir. Bu amaçla, alüminyum ve alaşımlarının kaynağı için ergitme olmaksızın gerçekleştirilebilecek bir yöntem arayışı sonucu 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü' nde Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW) bulunmuştur. Sürtünme karıştırma kaynağı, ergimeyen dönen takım kullanarak kaynak bölgesinde sürtünme ısısını ve plastik deformasyonu üreten son tekniktir ve böylece malzeme katı haldeyken bağlantının oluşmasını sağlar.

Bu çalışmada 1,5 mm kalınlığında EN AW-5005 alüminyum alaşımı levhaların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemek üzere FSW yöntemiyle kaynak yapılmıştır. Her bir kaynaklı levhadan alınan numunelere çekme, eğme ve yorulma deneyleri uygulanmış, metalografik incelemeler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları, EN AW-5005, Mikroyapısal Özellikler, Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK), Yorulma

THE EFFECT OF TOOL PROFILE ON THE JOINT PROPERTIES IN LAP FRICTION STIR WELDED OF AW-5005 ALUMINIUM ALLOY

ABSTRACT

Aluminum, the second most plentiful metallic element on earth, became an economic competitor in engineering applications as recently as the end of the 19th century. Fusion welding processes, used for joining of aluminum and aluminum alloys leading to some problems such as decreases in mechanical properties pushed the investigators for new welding technique. Consequently, the most significant solid state process for the welding of aluminum alloys to be developed is the friction stir welding (FSW) process that was invented at the Welding Institute (TWI) in 1991. Friction stir welding (FSW) is a fairly recent technique that utilizes a nonconsumable rotating welding tool to generate frictional heat and plastic deformation at the welding location, thereby providing the formation of a joint while the material is in the solid state.

In this study 1.5 mm thick EN AW-5005 aluminum alloy plates were welded using FS welding process in order to investigate mechanical and microstructural properties respectively. Tensile, bend, fatigue tests and metallurgical investigations were applied to specimens from each welded joints and the results discussed.

Keywords: Aluminum and Aluminum Alloys, EN AW-5005, Microstructural Properties, Friction Stir Welding (FSW), Fatigue

GİRİŞ

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının üretimi ve endüstride kullanımı günümüz dünyasında büyük öneme sahiptir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının sahip olduğu üstün özellikler bu metali diğer metaller arasında farklı bir konuma yükseltmiştir.

Alüminyum yerkabuğunda bol miktarda (%7,5 - 8,1) bulunmasına rağmen serbest halde çok nadir bulunur ve bu nedenle bir zamanlar altından bile daha kıymetli görülmüştür. Alüminyumun ticari olarak üretim tarihi 100 yıldan biraz fazladır.

Alüminyumun endüstriyel çapta elde edilmesi ancak 1886' da, ABD' de Charles Martin Hall ve Fransa' da Paul L. T. Heroult tarafından birbirinden habersiz ve hemen hemen aynı zamanlarda patenti alınan özel elektroliz yöntemi ile (Hall-Heroult Yöntemi) olanaklı hale getirilmiştir.

Alüminyumun hurdalardan geri kazanımı, günümüz alüminyum endüstrisinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Geri kazanım işlemi, metalin basitçe tekrar ergitilmesi esasına dayanır ki bu yöntem metalin cevherinden üretimine nazaran çok daha ekonomiktir. Alüminyum rafinasyonu çok yüksek miktarlarda elektrik enerjisi gerektirir, buna karşılık geri kazanım işlemi, üretiminde kullanılan enerjinin %5' ini harcar. Geri kazanım işlemi 1900' lü yılların başlarından beri uygulanmakta olup yeni değildir. 1960' lı yılların sonlarına kadar düşük profilli bir faaliyet olarak devam eden geri kazanım olgusu, bu tarihte içecek kutularının alüminyumdan yapılmaya başlanması ile gündeme daha yoğun şekilde gelmiştir. Diğer geri dönüşüm uygulanan alüminyum kaynakları arasında otomobil parçaları, pencere ve kapılar, cihazlar ve konteynerler sayılabilir.

Alüminyumun en önemli özellikleri arasında; iyi elektriksel ve ısıl iletkenliğinin yanında yüksek ısı ve ışık yansıması, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kolaylığı,

sünek ve yumuşak olması ve bazı alaşımlarının çökelme yoluyla sertleştirilebilmesi özellikleri sayılabilir. Bugün bütün dünyada alüminyum ve alaşımları, büyük ticari değeri olan ve büyük miktarlarda üretilen malzeme grubu haline gelmiştir. Alüminyumun uçak ve otomotiv sanayinde önemli rol oynaması, tüm dünya ülkelerinde "stratejik" bir metal olarak görülmesine neden olmuştur.

Günümüzde alüminyum ve alaşımlarının kaynağında TIG, MIG ve plazma ark kaynakları kullanılmaktadır. Ancak ergitme esaslı olan bu kaynak yöntemleri ile alüminyum ve alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde malzeme iç yapısına bağlı olarak kaynak metalinin iki yanında oluşan ısıdan etkilenmiş bölgede (IEB) oluşan metalurjik dönüşümler kaynak bağlantılarının kullanımı sırasında bazı problemlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Örneğin gözeneklik, oksit filmi, sıcak çatlama ve bağlantının hem kaynak metalinde hem de ısıdan etkilenmiş bölgede mukavemet azalması gibi oluşumlar alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kullanımlarını büyük ölçüde düşürmüştür. Bu gibi nedenler neticesinde ergitme esaslı kaynak yöntemleri dışında katı faz kaynak yöntemi ile daha az sorunla karşılaşılacağı düşünülerek araştırmacılar sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı yada sürtünme karıştırma kaynağını (FSW) keşfetmişlerdir (Taban, 2004).

Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı aparatın iş parçasına dalması ve sürtünmesi sonucunda bölgesel olarak ısı girdisi oluşmaktadır. Sürtünme karıştırma aparatı ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden dolayı kaynak bölgesindeki malzeme yumuşamakta ve plastik şekil değişimi gerçekleşmektedir. Karıştırıcı aparatın iki temel fonksiyonu vardır, birincisi karıştırıcı ucun iş parçasına sürtünmesi ile birleşme için gerekli ısı girdisinin sağlanması, ikincisi ise yumuşayan malzemenin birleştirme bölgesinde karıştırılarak plastik deformasyonunun sağlanmasıdır.

Sonuçta alüminyum ve alüminyum alaşımları için geliştirilmiş bu yöntem sağladığı avantajlar ve edinilen bilgi, tecrübe sayesinde diğer metallere de uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Günümüzde sürtünme karıştırma kaynağının endüstrideki kullanımı, geliştirilen karıştırıcı takımlar ve kaynak makinaları sayesinde giderek artmaktadır.

Bu çalışmada 1,5 mm kalınlığındaki EN AW-5005 (EN AW-AlMg1) alaşımı bindirme pozisyonunda FSW yöntemiyle birleştirilmiştir. Yapılan literatür

araştırmaları sonucunda yöntem ile ilgili araştırmalar genellikle alın kaynağı pozisyonunda ve daha kalın malzemelere uygulanmaktadır. Ayrıca son zamanlarda malzemelerin nokta kaynağı için geliştirilen pimsiz takım ile bindirme bağlantısı yapılarak üçgen ve kare profilli karıştırıcı takıma göre kaynaklı parçaların mukavemet kıyaslamaları yapılmış ve ilginç sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kare, üçgen ve pimsiz karıştırıcı takımla kaynak yapılan levhaların mekanik özelliklerini incelemek üzere çekme, eğme ve yorulma deneylerine tabi tutulmuş, kaynaklı bölgelerin metalografik ve sertlik incelemeleri yapılmış, yorulma deneyinde kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiştir. Sonuç olarak yöntemlerin birbiri ile mukayesesi yapılarak ileride yapılacak olan çalışmalara ışık tutması amaçlanmıştır.

1. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

1.1. Alüminyumun Elde Edilmesi ve Genel Özellikleri

Alüminyum metal sektöründe demir-çelikten sonra ikinci sırayı almaktadır ve bu metalin endüstrideki hızlı büyümesi sahip olduğu eşsiz özelliklerden ileri gelmektedir. Bu özellikler alüminyumu çok yönlü yapı ve mühendislik malzemelerinden biri yapmaktadır. Alüminyum ağırlıkça hafiftir ve alaşımları yapı çeliklerinden daha fazla mukavemetlendirilmiştir. Alüminyum iyi elektriksel ve ısıl iletkenliğin yanında yüksek ısı ve ışık yansıması özelliklerine de sahiptir. Pek çok hizmet şartlarında korozyon direnci oldukça iyi ve zehirsizdir. Alüminyum dökülebilir, pek çok şekle getirilebilir ve iyi yüzey kalitesi verir. Alüminyumun bu üstün özellikleriyle mühendislik malzemesi olarak büyük önem kazanması şaşırtıcı değildir (Smith, 2001).



Şekil 1.1. Alüminyum üretim tesisinden bir görüntü (URL-19)

Tablo 1.1. Alüminyumun genel özellikleri (Öksüz, 1996)

Sembol	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 gr/mol
Kristal Yapısı	YMK
Erime Noktası	660 ^{o}C
Yoğunluğu (Oda sıcaklığında)	2,7 gr/cm^{3}
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-320 ^{o}C
Buharlaşma Noktası	2450 ^{o}C
Isıl Genleşme Katsayısı	23,5 μm m^{-1}K^{-1}
Özgül Isısı	0,224 cal/gr (100 ^{o}C de)
Gizli Ergime Isısı	94 cal/gr
Çekme Mukavemeti	40-100 N/mm^{2}
Akma Mukavemeti	10-30 N/mm^{2}
Elastisite Modülü	72 x 10^{3} N/cm^{2}
Kayma Modülü	27 x 10^{5} N/cm^{2}
% Uzama	45
% Kopma Uzaması	30-40
Sertlik	20 (HV)
Çentik Darbe Tokluğu	100 J/cm^{2}
Elektrik İletkenliği	% 59,5 IACS
Elektrik Direnci	2,65 x 10^{-8} ohm metre
Katılaşma Esnasında Kendini Çekme	% 6,7
Yansıtıcılık	Tungsten flamadan gelen beyaz ışık için% 90

Alüminyum üzerine çalışmalar ilk defa 18. yüzyılın sonları ile 19. yüzyılın başlarında yapılmıştır. Berzelius, Dalton, Davy, Lavoiser ve Oersted gibi ünlü bilim adamları alüminyum bileşikleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır. 1807' de Sir Humprey Davy, bu bileşiklerin içerisinde bir metal bağlı olduğunu ileri sürmüş ve buna latince "Alumen" adını vermiştir. 1821' de Fransa, Les Bauz' ta alüminyum üretiminin temel hammaddesi olan cevheri bulmuş ve buna boksit adını vermiştir. Daha sonra 1825' te Hans Cristian Oersted, metal alüminyum üretimi için önemli bir bileşik olan alüminyum klorür bileşiğini hazırlamayı başarmıştır. Bundan iki yıl sonra 1827' de Friedrich Wöhler, bu bileşiğin potasyum ile reaksiyonu sonucu ilk

metal alüminyumu kimyasal yollarla elde etmeyi başarmıştır. 19. yüzyılın ikinci yarısında alüminyum üretimi için değişik kimyasal yöntemler geliştirilmiş; aynı yüzyılın sonunda da alüminyumu sulu çözeltilerinden elektroliz ile elde etmek için yapılan girişimler başarısızlıkla sonuçlanmıştır (Sarsılmaz, 2008).

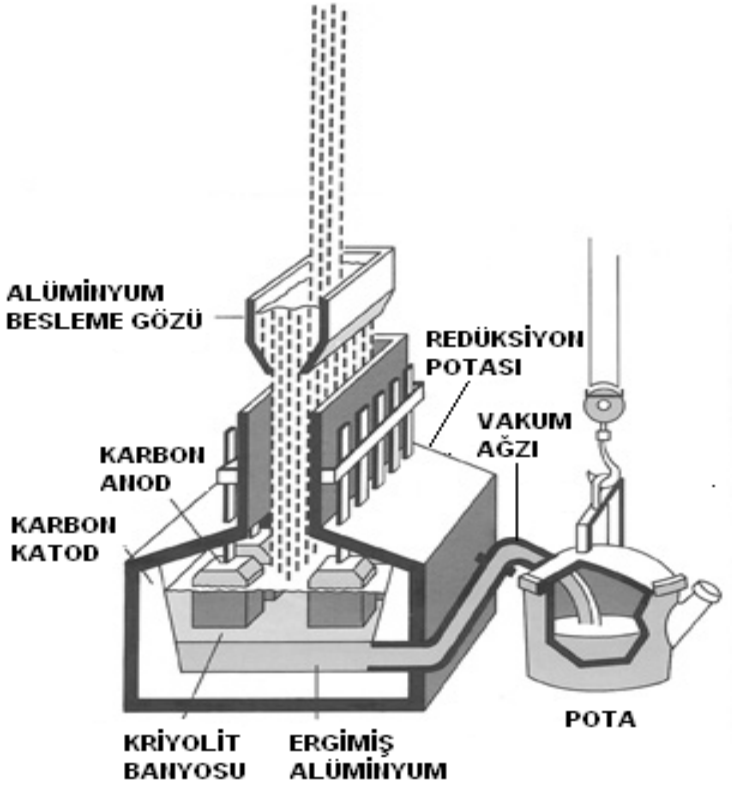
Alüminyumun endüstriyel çapta elde edilmesi ancak 1886' da, ABD' de Charles Martin Hall ve Fransa' da Paul L. T. Heroult tarafından birbirinden habersiz ve hemen hemen aynı zamanlarda patenti alınan özel elektroliz yöntemi ile (Hall-Heroult Yöntemi) olanaklı hale getirilmiştir (Taban, 2004).



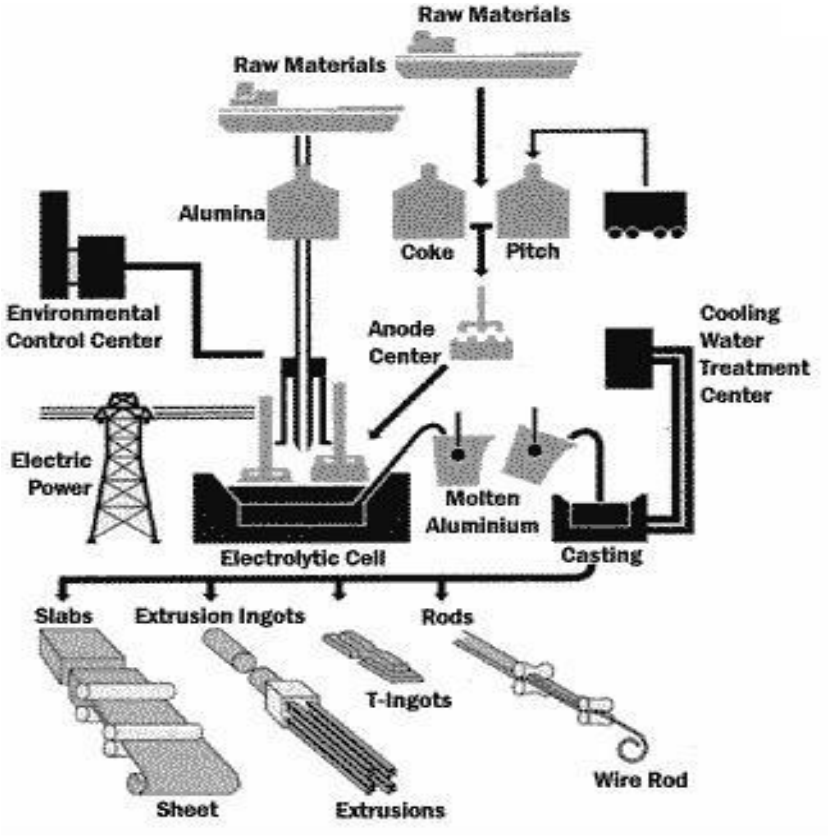
Şekil 1.2. Sıvı hale getirilmiş alüminyumun kalıplara dökülmesi (URL-20)

Doğada birçok tür alüminyum cevheri bulunmasına karşın, alüminyum elde edilmesinde günümüzde %55-65 Al_2O_3 içeren ve boksit adı verilen bir cevher kullanılmaktadır. Bu cevher önce yabancı madde olarak içerdiği Fe_2O_3 ve SiO_2' den arındırılır. Bunun için cevher kızgın NaOH buharıyla tepkimeye sokulur ve alüminyum oksit suda çözünebilen $NaAlO_2$' a dönüşür ve bir filtrasyon veya flotasyon işlemi ile demir ve silisyum bileşikleri cevherden temizlenir. Elde edilen çözelti içinde alüminyum, alüminyum hidroksit durumunda kristalize edilir ve sonra suyu uçurularak saf alümina (Al_2O_3) elde edilir (Taban, 2004).

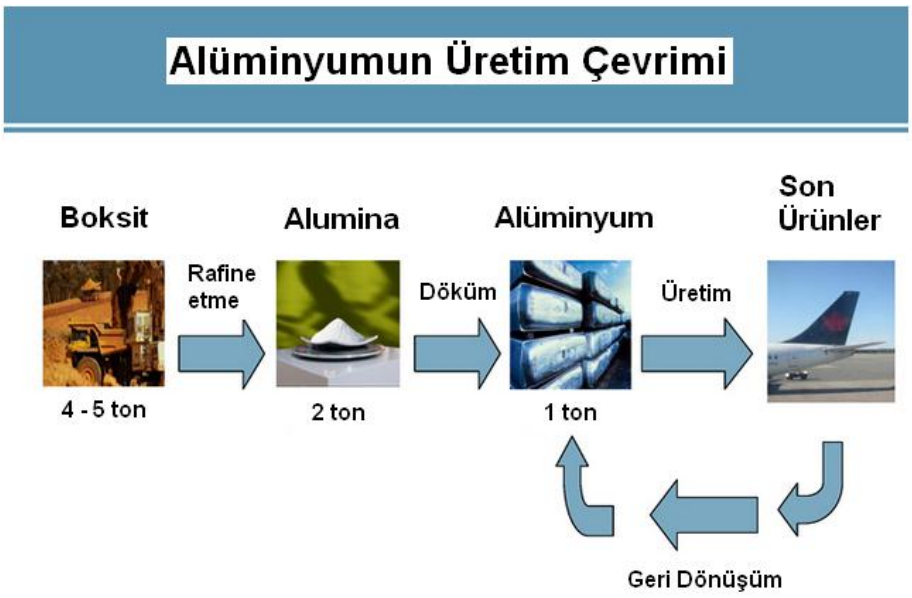
Alüminyumun, oksijene olan ilgisi, karbonunkinden daha büyük olduğundan burada demir cevherleri durumunda olduğu gibi karbonla redükleme yapılamaz. Bunun için elektroliz uygulanır. Elektrolizi gerçekleştirebilmek için bu oksitin ergitilmesi veya çözelti konumuna getirilmesi gereklidir. Alümina 2050 °C' de ergir, bu nedenle ergitme yöntemi kullanılamaz. Alümina bir başka alüminyum cevheri olan "kriyolit" içinde çözünebilmektedir ve kriyolit de 950 °C civarında sıvı duruma geçmekte ve alüminayı çözebilmektedir. Karbon astarlı özel elektroliz fırını içinde kriyolit ergitilir ve sonra alümina eklenerek çözelti elde edilir ve karbon anodlar kullanılarak elektroliz gerçekleştirilir. 5 V' luk bir gerilim uygulandığında Al_2O_3 parçalanırken, kriyolit değişime uğramaz, alüminyum katod olarak kullanılan banyonun dibinde birikir, buradan dışarı alınır ve banyoya sürekli alümina eklenir. Bu yöntemde enerji sarfiyatı 1 kg alüminyum için 17 kWh gibi oldukça yüksektir. Bu durum alüminyumun fiyatını etkilemektedir (Taban, 2004).



Şekil 1.3. Alüminyum elde edilmesinin şematik gösterimi (URL-14)



Şekil 1.4. Ergimiş alüminyumun levha, tel ve ekstrüzyon ürünü olarak işlenmesi (URL-15)



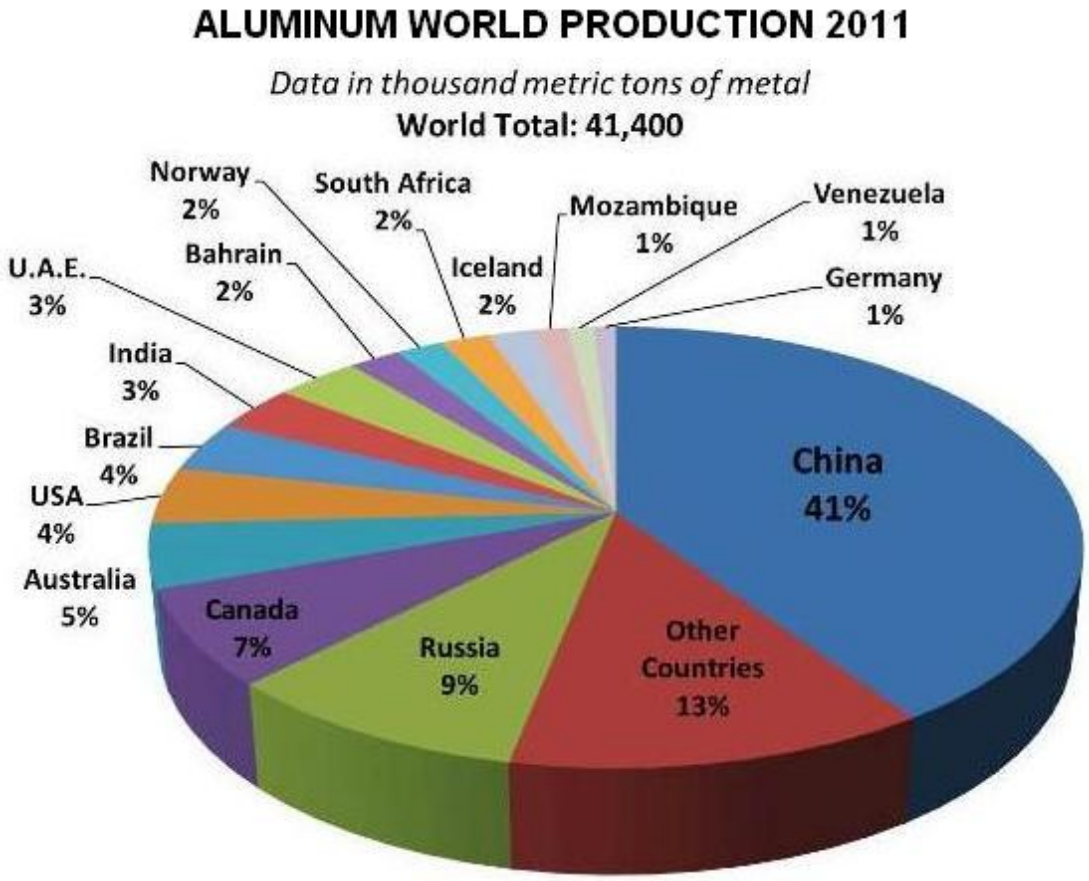
Şekil 1.5. Alüminyumun üretim çevrimi (URL-3)

1900' lü yılların başlarında, endüstri alanındaki hızlı gelişme, alüminyum metalini ve alaşımlarını, üstün mekanik özelliklerinden dolayı demir-çelik alaşımlarından sonra

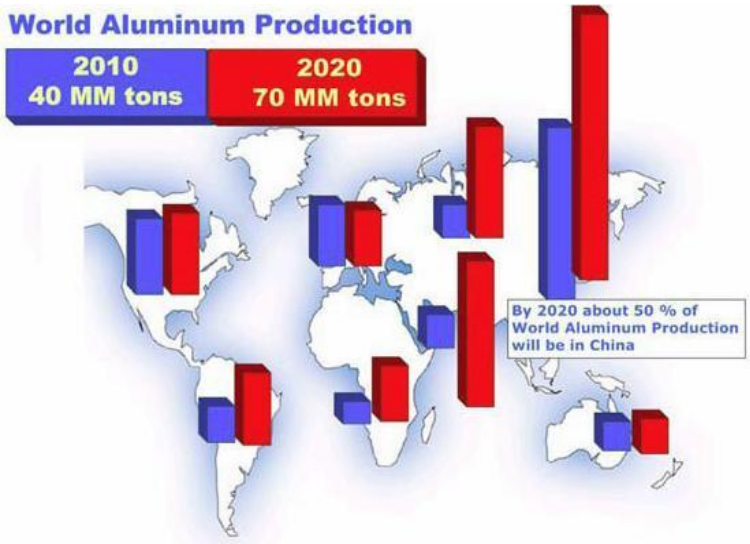
ikinci sıraya çıkarmıştır. Bu yılların başlarında doğal filizlerden elde edilen alüminyum üretimi yılda 172.000 ton iken, 1977'de 14 milyon tona, 1980'lerde 17,5 milyon tona ve 2006 yılında 32 milyon tona ulaşmıştır. Alüminyum endüstrisindeki hızlı büyüme, bu metalin mükemmel karakteristiklere sahip olmasından ileri gelmektedir. Bu karakteristikler alüminyumu çok yönlü yapı ve mühendislik malzemelerinden biri haline getirmektedir. Alüminyum ağırlıkça çelik ile kıyaslandığında daha hafiftir. Alüminyumun yoğunluğu 2,7 gr/cm³ olup, çelik (7,83 gr/cm³) ve bakır (8,93 gr/cm³) gibi metallerin yoğunluğunun yaklaşık üçte biri kadardır. Mukavemeti çelikten düşük olsa da, kesit artırılarak çeliğe eşdeğer mukavemet sağlanmaktadır. Birçok konstrüksiyonda alüminyum alaşımlarının kullanılması ağırlıkta azalma meydana getirdiği için avantaj sağlamaktadır. Doğru yapılan bir yapı tasarımında alaşımsız çelik yerine alüminyum kullanmak konstrüksiyon üzerine %50' den fazla hafiflik sağlamaktadır (Sarsılmaz, 2008).



Şekil 1.6. 2005-2010 yılları arasında günlük-yıllık olarak alüminyum üretim miktarları (URL-9)



Şekil 1.7. 2011 yılında üretilen alüminyum miktarının ülkelere göre dağılımı (URL-5)



Şekil 1.8. 2010 ve 2020 yıllarında alüminyum üretiminin dünyadaki dağılım öngörüsü (URL-18)

Alüminyumun en önemli özellikleri arasında; iyi elektriksel ve ısıl iletkenliğinin yanında yüksek ısı ve ışık yansıması, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kolaylığı, sünek ve yumuşak olması ve bazı alaşımlarının çökelme yoluyla sertleştirilebilmesi özellikleri sayılabilir. Bugün bütün dünyada alüminyum ve alaşımları, büyük ticari değeri olan ve büyük miktarlarda üretilen malzeme grubu haline gelmiştir. Alüminyumun uçak ve otomotiv sanayinde önemli rol oynaması, tüm dünya ülkelerinde "stratejik" bir metal olarak görülmesine neden olmuştur (Tülbentçi, 1990).

Tablo 1.2. Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve diğer metallerle karşılaştırılması, 20 °C (Mathers, 2002)

Özellik	Alüminyum	Demir	Nikel	Bakır	Titanyum
Kristal Kafes Yapısı	YMK	HMK	YMK	YMK	SPH
Yoğunluğu (gr/cm^3)	2,7	7,85	8,9	8,93	4,5
Ergime Derecesi (°C)	660	1536	1455	1083	1670
Özgül Isısı (J/kgK)	930	448	440	385	470
Isıl İletkenliği (W/mK)	235	79,6	92,1	389,4	15,5
Isıl Genleşme Katsayısı ($\Delta l/1°C$)	$33,9 \times 10^{-6}$	12×10^{-6}	10^{-6}	$16,5 \times 10^{-6}$	$8,2 \times 10^{-6}$
Elektrik Direnci ($\mu\Omega cm$)	2,65	9,7	6,8	1,67	55
Elastise Modülü E (N/mm^2)	$6,7 \times 10^4$	21×10^4	21×10^4	$12,4 \times 10^4$	$10,8 \times 10^4$
Maksimum Çekme Mukavemeti (N/mm^2)	65	235	300	210	245

Tablo 1.3. Alüminyum ve alaşımlarında mukavemetlendirme mekanizmalarının etkileri (Askeland, 1998)

Malzeme	Çekme Day. (MPa)	Akma Day. (MPa)	% Uzama	(Alaşımın Akma Dayanımı) / (Saf Metalin Akma Dayanımı)
Saf tavlanmış Al (% 99,99 Al)	44,83	17,24	60	-
Ticari Saf Al (Tavlanmış %99 Al)	89,67	34,48	45	2
Katı eriyik mukavemetlendirilmiş (%1,2 Mn)	110,34	41,38	35	2,4
%75 Soğuk şekillendirilmiş saf Al	165,52	151,72	15	8,8
Dağılım mukavemetlendirilmiş (%5 Mg)	289,66	151,72	35	8,8
Yaşlandırılmış (%5,62 Zn % 2,5 Mg)	572,41	503,54	11	29,2

Diğer taraftan, alüminyum genellikle yorulma zorlanması altında yorulma dayanım sınırı göstermez ve bu nedenle kırılma oldukça düşük gerilmede oluşur. Ergime sıcaklığının düşük olmasından dolayı alüminyumun yüksek sıcaklıklardaki performansı iyi değildir. Alüminyum düşük sertliğinden dolayı zayıf aşınma direncine sahiptir (Askeland, 1998).

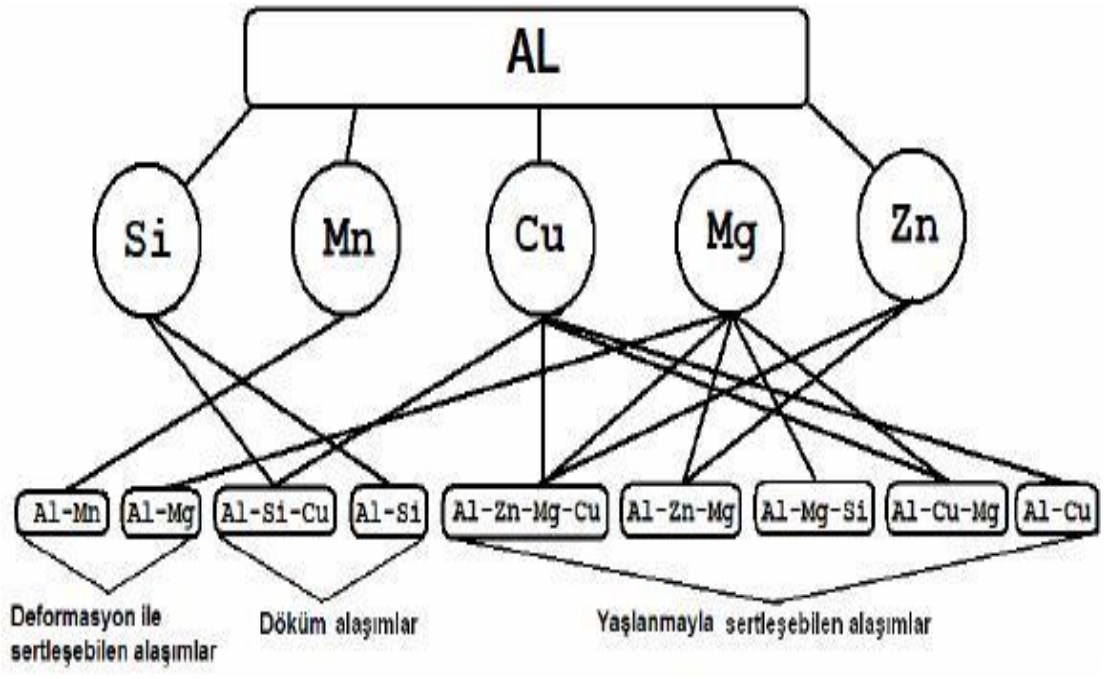
Tablo 1.4. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanlarının malzeme türüne göre sınıflandırılması (Mathers, 2002)

Alüminyum Alaşımı	Ürün Biçimi	Uygulama Alanı
Saf alüminyum	Folyo, haddelenmiş levha, ekstrüzyon ürünleri.	Ambalaj malzemesi ve folyo, çatı kaplama,zırhlama, düşük mukavemetli korozyona dirençli kazan ve depolama tankları yapımı.
2000 serisi (Al-Cu alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Çok yüksek zorlanmaya maruz parçalar, havacılık ve uzay araçlarında kullanılan yapısal elemanlar, ağır dövme parçalar, taşıt tekerlek jantları, silindir kafaları, pistonlar.
3000 serisi (Al-Mn alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Ambalaj malzemesi, çatı kaplama ve zırhlama, kimyasal madde varilleri ve tankları, kimyasal madde ve gıda tasıma ekipmanları.
4000 serisi (Al-Si alaşımları)	Tel, döküm parçalar.	Kaynak telleri, silindir kafaları, motor blokları, supap gövdeleri, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
5000 serisi (Al-Mg alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi bos elemanlar ve borular.	Zırhlama, kazan ana yapı levhaları, güçlü yapı elemanları, yapısal elemanlar, kazanlar ve depolama tankları, otomobil, tren vagonu, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
6000 serisi (Al-Si- Mg alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi bos elemanlar ve borular.	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, otomobil, tren vagonu, deniz taşıtları ve deniz üstü yapı elemanları, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
7000 serisi (Al-Mg- Zn alaşımları)	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, Uçaklarda kullanılan kalın kesitli dövme parçalar, askeri köprüler, zırh levhaları, ağır taşıt ve vagonlarda kullanılan ekstrüzyon ürünleri.

1.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması, Standart Gösterimleri ve Uygulanan Sertleştirme İşlemlerine Göre Simgelendirilmesi

Alüminyum alaşımları, alaşım elementlerinin çok farklı etkileri dolayısı ile birbirinden çok farklı özelliklere sahiptirler ve bunlar dövme ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Bu da imal usullerinin farklı ihtiyaçları olduğunu gösterir. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımlar, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve bileşimlere sahiptirler. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem yapılabilir ve yapılamaz alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılabilirler. Isıl işlem yapılabilir alaşımlar, yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilirken, ısıl işlem yapılamayan alaşımlar ise katı eriyik sertleşmesi, pekleşme ve dağılım (dispersiyon) sertleştirmesi ile mukavemetlendirilirler.



Şekil 1.9. Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri (Öksüz, 1996)

Tablo 1.5. Alaşım elementlerinin alüminyumun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi (Büyükarslan, 2006)

Nitelikler	Cu	Si	Mg	Zn	Ni	Co	Ti	Mn	Fe	Cr
Kopma Mukavemeti	++	+	+	++	+	+	+			-
Elastiki Sınır	++	+	-	+	-					
Sertlik	++		-	-	+			+	+	
Isıya Dayanıklık	++		++		+				+	
Kaynak Kabiliyeti	-	++	+	-	-		+	+		+
Talaş Kaldırma ile İşlenebilirlik	++	-	+	+	+		++	+	++	+
Elastikiyet Modulü	+	++	-	+	+	++		+	-	
Döküm Kabiliyeti	+	++	-	+			+	-	-	
Süneklik	-	--	+				+		--	
Korozyon Direnci	-	+	++	+				-	--	++
Anodizasyona Elverişsizlik	-	+	++	+				-		
++: Çok İyi	+: İyi			-: Ortanın Altında			--: Zararlı			

1.2.1 Dövme alüminyum alaşımları

Bu türe giren alaşımlar Cu, Mg, Mn, Si ve Ni gibi elementler içerirler; çoğu kez önce sürekli döküm yöntemi ile blok biçiminde elde edildikten sonra, homojenleştirme tavı uygulanır, haddeleme veya ekstrüzyon ile biçimlendirilirler. Döküm yapısındayken tane sınırlarında oluşan sürekli gevrek fazlar, şekillendirme sırasında parçalanır ve ana kütleye dağılır ve böylece alaşım soğuk şekillendirmeye uygun duruma geçer (Kahraman, 2009).

Dövme alaşımların dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarını dökülmüş ve dökümhane ingotu şeklinde tanıtmada kullanılır. İlk basamak alaşım grubunu gösterir. Bir kesir işaretiyle diğerlerinden ayrılan son basamak ürünün biçimini, örneğin dökümler veya ingotu gösterir. Orijinal alaşım veya empurite sınırlarının bir modifikasyonu sayısal tasarımdan önce bir seri harfle gösterilir. Harf "x" deneysel alaşımlar için kullanılır. Döküm alüminyum alaşımları Tablo 1.6.' da belirtilen numara sistemi ile tanımlanmaktadır (Askeland, 1998).

Tablo 1.6. Dövme alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi (Askeland, 1998)

Dövme Alaşımlar	
1xxx Ticari Saflıkta Al (>%99 Al)	Yaşlandırılamaz
2xxx Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xxx Al-Mn	Yaşlandırılamaz
4xxx Al-Si ve Al-Mg-S	Eğer magnezyum varsa yaşlandırılabilir
5xxx Al-Mg	Yaşlandırılamaz
6xxx Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir

lxxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımlarına ısıl işlem uygulanamaz ve sadece şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. 2xxx, 6xx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ise ısıl işleme tabi tutulabilirler. 4xxx serisi hem ısıl işleme tabi tutulabilir hem de ısıl işleme tabi tutulamaz alaşımlar içerir.

Isıl işleme tabi tutulabilir alaşımlar, en yüksek mekanik özelliklerini en genel olarak çözeltiye alma ısıl işlemi veya yapay yaşlandırma ısıl işlemleri ile kazanırlar. Çözeltiye alma ısıl işleminde alaşım, çözelti içine alaşım elementleri veya bileşik katmak için yaklaşık 532 °C' ye kadar ısıtılır, arkasından hızlı soğutma gelir, bu

işlem; oda sıcaklığında aşırı doymuş çözelti sağlamak için genelde su içinde yapılır. Genellikle bunu, yaşlandırma ısıl işlemi takip eder.

Yaşlandırma; istenen akma özellikleri için, aşırı doymuş çözeltiden bir miktar element veya bileşiğin çökeltilmesidir. İki yaşlandırma yöntemi vardır; ilki; oda sıcaklığında yapılan doğal yaşlandırma olarak adlandırılan yöntem, diğeri ise; yüksek sıcaklıklarda yapılan yapay yaşlandırmadır. Yapay yaşlandırma sıcaklıkları genel olarak yaklaşık 160 °C' dir. Çözeltiye alma ısıl işlemi ve yapay yaşlandırma koşulları içinde, birçok ısıl işleme tabi tutulabilir alüminyum alaşımları kaynaklı üretim için kullanılır. Isıl işleme tabi tutulamayan alaşımlar en yüksek mekanik özelliklerini, soğuk şekillendirme yoluyla mukavemeti artırma yöntemi olan şekil değiştirme sertleştirmesi ile kazanırlar.

6061-T6, 6063-T4, 5052-H32 alaşımlarının gösteriminde olduğu gibi alaşım, numaralama sistemini ısıl işlemle bir tire ile birleştiren, serilerin harflerini alaşım gösterim numarasının takip ettiği sistemdir ve bu gösterim tüm standartlarda aynıdır (Kaluç ve Taban, 2007a).

Tablo 1.7. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının temel ısıl (temperleme) işlemlerinin gösterimi (Kaluç ve Taban, 2007a)

Harf	Anlamı
F	Üretim- Ürünlerde hiç bir özel ısıl kontrol veya sertleştirme koşulları kullanılmayan şekillendirme sistemi
O	Tavlama- Uygulanan tav, en düşük mukavemet koşullarını, süneklik ve boyutsal kararlılığı sağlamak için uygulanır
H	Şekil değiştirme sertleştirmesi- soğuk şekillendirme ile üretilen ürünlere uygulanır. Şekil değiştirme sertleşmesini, mukavemeti bir miktar düşüren ek ısıl işlem uygulanması takip eder. H' ı genelde iki veya daha çok sayı takip eder
W	Çözeltiye alma ısıl işlemi- kararlı olmayan alaşımlara yalnızca çözeltiye alma tavlamasından sonra oda sıcaklığında kendiliğinden yaşlanmayı sağlayan tav uygulanır
T	Isıl işlem- F, 0, H' dan daha kararlı tav sağlamak içindir. Ürünlere tav uygulaması bazen sabit sertlik derecesi sağlamak için şekil değiştirme sertleştirmesiyle birlikte uygulanır

Tablo 1.8. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının H (sertleştirme) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi (Kaluç ve Taban, 2007a)

H' dan sonraki ilk rakam temel işlemi tanımlar.
H1— Sadece şekil değiştirme sertleştirmesi
H2— Şekil değiştirme sertleştirmesi ve yapay yeniden kristalleştirme
H3— Şekil değiştirme sertleştirmesi ve yapı dengelemesi
H4— Şekil değiştirme sertleştirmesi ve parlatma veya boyama
H' dan sonraki ikinci harf şekil değiştirme sertliğinin derecesini tanımlar.
HX2— Dörtte bir
HX4— Yarım Sert
HX6— Üç-çeyrek Sert
HX8— Tam Sert
HX9— Çok Sert

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının T (ısıl işlem) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi aşağıdaki gibidir,

T1- Ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekil verilmiş parçalar soğutulduktan sonraki doğal yaşlandırma

T2- Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaşlandırma

T3- Çözeltiye alma ısıl işlemi, soğuk şekillendirme ve doğal yaşlandırma

T4- Çözeltiye alma ısıl işlemi ve doğal yaşlandırma

T5- Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra yapay yaşlandırma

T6- Çözeltiye alma ısıl işlemi ve yapay yaşlandırma

T7- Çözeltiye alma ısıl işlemi ve stabilizasyon (aşırı yaslandırma)

T8- Çözeltiye alma ısıl işlemi, soğuk şekillendirme ve yapay yaşlandırma

T9- Çözeltiye alma ısıl işlemi, yapay yaşlandırma ve soğuk şekillendirme

T10- Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve sonra yapay yaşlandırma

Eklenen numaralar gerilme gidermeleri tanımlar.

Örnek:

TX51 veya TXX51- Çekme ile gerilim giderme

TX52 veya TXX52- Basma ile gerilim giderme

Dövme alüminyum alaşım türleri aşağıda alt başlıklar halinde incelenmiştir.

1.2.1.1. 1xxx serisi alaşımlar

% 99 veya daha yüksek saflıktaki alüminyum özellikle elektrik ve kimyasal alanda geniş bir kullanıma sahiptir. Bu çeşit alüminyum mükemmel korozyon direnci, yüksek termal ve elektriksel özellikler, düşük mekanik özellikler ile mükemmel bir işlenebilirliğe sahiptir. Deformasyon sertleşmesi ile orta derecede mukavemet artışı sağlanabilir. Demir ve silisyum çoğunlukta olan empuritelerdir. Bu gruptaki alüminyumun uygulama alanları kimyasal ekipmanlar, reflektörler, ısı değiştirgeçleri, elektriksel iletkenler ve kapasitörler, paketleme folyoları, mimari uygulamalar ve dekoratif şekillerdir (Toktaş, 2006).

1.2.1.2. 2xxx serisi alaşımlar

2xxx serisi Al-Cu alaşımlarının temel alaşım elementi bakırdır. 2024 alaşımı bu gruba ait alaşımlar arasında mekanik mukavemeti en yüksek olandır. Bileşiminde % 4.5 Cu yanında % 1.5 Mg içerir. Bu alaşımın kullananım bulduğu en önemli alan uçak ve uzay yapılarıdır. Başlıca otomotiv, vagon, uçak, mühimmat sanayisinde, dişli ve bağlantı elemanlarında, voltaj yükselticilerinde, süspansiyon parçalarında, perçinlerde, vida mekanizmalarında yüksek dayanım ve hafifliğin gerekli olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Al-Cu alaşımları 490 °C' den hızla soğutularak çökeltme sertleşmesi işlemine tabi tutulurlar. Daha sonra oda sıcaklığında doğal yaşlanmaya maruz bırakılabildikleri gibi, mekanik mukavemetin daha da artırılması için 120 °C’

de tavlanarak yapay yaşlanmaya uğratılırlar (Öksüz, 1996). Yaşlanma ısıl işlemi sonunda bu alaşımlarda, alaşımsız çelik mukavemetinin üzerinde bir mukavemet değeri elde edilmektedir. Sertleştirilen alaşımın çekme dayanımıyla beraber işlenme kabiliyeti de artar, fakat sünekliği azalır. Yaşlanan malzemelerde elektrik iletkenliği de azalmaktadır. Bu malzemelerin bakır ilavesi nedeniyle korozyon direnci azdır.

1.2.1.3. 3xxx serisi alaşımlar

Bu ısıl işleme tabi tutulamayan seri, 110-283 N/mm$^{2'}$ lik çekme mukavemetine sahiptir. Bunlar alüminyum / mangan alaşımlarıdır (toplam mangan oranı %0,05' ten %1,8' e kadardır). Bu alaşımlar iyi korozyon dirençli ve yüksek sıcaklıkta kullanım için uygunlukla birlikte orta mukavemetlidir. Bu alaşımların bazı kullanım alanları tencere ve tava yapımıdır, bugün arabalardaki ısı eşanjörleri ve güç üniteleri için temel bileşen bu alaşımlardır. Orta mukavemetleri genellikle mukavemetli uygulamalar için kullanımlarına engel olmaktadır. Bu esas metaller, kimyasal bileşimleri, çalışma isteklerine bağlı olarak lxxx, 4xxx ve 5xxx serisi ek kaynak metalleri ile kaynak edilebilir (Taban, 2004).

1.2.1.4. 4xxx serisi alaşımlar

Yalnızca bu seri hem ısıl işleme tabi tutulabilir hem ısıl işleme tabi tutulamayan alaşımlar içermektedir. Bu alaşımlar 172-379 N/mm$^{2'}$ lik çekme mukavemetine sahiptir. Bunlar alüminyum, silisyum alaşımlarıdır (toplam silisyum oranı %0,6'dan %21,5'e kadardır). Silisyum alüminyuma eklendiğinde ergime sıcaklığını yükseltir ve ergimiş durumdaki akışkanlığını iyileştirmiş olur. Bu karakteristikler, tüm ergitme kaynakları ve lehimlemenin her ikisi içinde kullanılan ek kaynak metalleri için istenir. Bundan dolayı bu seriler, çoğunlukla ek kaynak metali olarak kullanılırlar. Alüminyum içindeki serbest silisyum ısıl işleme tabi tutulamaz, bunun yanında silisyum alaşımlarının bazıları onlara ısıl işleme tabi tutulabilme yeteneği sağlayan magnezyumla veya bakırla birlikte bulundurulur. Örneğin, bu ısıl işlem uygulanabilir ek kaynak metalleri yalnızca kaynak sonrasındaki ısı uygulamalarına bağlı olarak seçilerek kullanılırlar.

1.2.1.5. 5xxx serisi alaşımlar

5xxx grubu alüminyumda ana alaşım elemanı çok etkili ve geniş oranda kullanılan magnezyumdur. Magnezyum ana alaşım elemanı olarak veya mangan ile birlikte kullanıldığında ortaya çıkan alaşım orta-yüksek dayanımlı ısıl işlem uygulanamayan alaşımdır. Magnezyum mangandan daha etkili bir sertleştiricidir. %0.8 civarında magnezyum ilavesi ile elde edilen sertlik değeri yaklaşık %1.25 mangan ilavesi ile sağlanabilir. Bu gruptaki Al alaşımları iyi kaynak özelliklerinin yanında deniz ortamında iyi bir korozyon direncine sahiptirler. Bununla birlikte, gerilmeli korozyon çatlamasını engellemek için yüksek magnezyumlu alaşımlarda müsaade edilen güvenli işlem sıcaklıklarında (yaklaşık %3.5 üzerinde magnezyum içeren alaşımlarda 65°C' nin üzerindeki işlem sıcaklıklarında) ve soğuk deformasyon miktarında belirli kısıtlamalar yapılmalıdır. Bu seri alaşımlar, mimari uygulamalarda, dekoratif ve süsleme amaçlı uygulamalarda, gemilerde ve ev aletlerinde kullanılmaktadırlar (ASM Handbook, 1990).

1.2.1.6. 6xxx serisi alaşımlar

6xxx serisi alaşımlar, iç yapılarında magnezyum silikat (Mg_2Si) oluşturacak oranlarda Mg ve Si içeren ısıl işlem uygulanabilen alaşımlardır. 2xxx ve 7xxx serisi alaşımları kadar dayanıklı olmasalar da, 6xxx serisi alaşımlar şekillendirilebilir, kaynaklanabilir, işlenebilir ve korozyon dirençli orta dayanımlı alaşımlardır. Isıl işlem uygulanabilen bu gruptaki alaşımlara çözeltiye alma işleminden sonra yapay yaşlandırma işlemi (T6 işlemi) uygulandığında alaşımların dayanımları önemli ölçüde arttırılabilir. Mimari uygulamalar, ulaşım endüstrisi, köprüler ve kaynaklı yapılar bu alaşımların uygulama alanlarıdır (ASM Handbook, 1990).

6xxx serisi Al alaşımları genellikle ekstrüzyon edilmiş halde kullanılırlar. Bileşimlerinde bulunan Si ve Mg alaşım elemanları, kısmen α-Al matrikste ayrışmış (çözünmüş) olarak ve kısmen intermetalik faz olarak bulunurlar. Alaşımın bileşimine ve katılaşma koşullarına bağlı olarak katılaşma esnasında değişik intermetalik fazlar oluşabilir. Bütün ticari alaşımlarda Fe, empurite olarak bulunur ve katılaşma esnasında Al-Fe ve Al-Fe-Si gibi intermetalik fazları oluşturur. α-Al matrikste veya Al-Fe-Si intermetalik fazında Si, Mg ile birleşerek katılaşma işleminin ileriki safhasında Mg_2Si partiküllerini oluşturur. Alaşımın mekanik özelliklerinin

belirlenmesinde intermetalik partiküllerin çeşidi, boyutu, morfolojisi ve dağılımı önemli bir yer tutar.

6xxx serisinde Mg ve Si sertleşme fazı olan Mg_2Si' yi oluşturmak için birleşirler. Mg_2Si' yi oluşturmak için gerekenden fazla Si, sertleşmeye önemli ölçüde katkıda bulunur. Bu alaşımlar kolaylıkla ekstrüze edilebilir ve soğutma hızına karşı nispeten düşük hassasiyetlerinden dolayı pres sonrası soğutma ile orta derecede dayanım kazanırlar. Bu nedenle alaşımlar ayrı bir çözeltiye alma ısıl işlemine gerek duymazlar.

6xxx serisi alaşımların üretim özelliklerini etkileyen faktörler bileşim, ingot döküm uygulaması, homojenleştirme işlemi, biyet ön ısıtma ve ekstrüzyon sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, preslerin soğutma şartları ve çökelme ısıl işlemidir. Alaşım solvüs sıcaklığından soğuduğunda Mg_2Si partikülleri çökelebilir. Partiküllerin miktar ve büyüklükleri sıcaklık-zaman bağımlıdır. Yavaş soğutma büyük partiküllerin oluşmasını sağlar, özellikle üst sıcaklık bölgesinden soğutma esnasında solvüs sıcaklığının üzerinden oda sıcaklığına hızla soğutma Mg ve Si elementlerini çözeltide tutar ve aşırı doymuş katı çözelti elde edilir. 204 °C' nin altında yapılan yapay yaşlandırma işlemi ile matrikste mikroskop altı büyüklükte partiküller oluşur ve çökelme sertleşmesi etkisi yer alır. AA–6063 alaşımı önemini bu durumdan alır (Toktaş, 2006).

1.2.1.7. 7xxx serisi alaşımlar

Isıl işleme tabi tutulabilir, 221- 607 N/mm^2 çekme mukavemetli bu alüminyum - çinko alaşımları (toplam çinko oranı %0,8' den %12' ye kadardır) alüminyum alaşımları içinde en yüksek mukavemet değerine sahip olanlardır. Bu alaşımlar genellikle havacılık, uzay ve spor malzemeleri gibi yüksek performans istenen uygulamalarda kullanılır. 2xxx serisi gibi bu seri de, diğerleri gibi genelde başarıyla kaynak edilirken ark kaynağı için uygun olmayan bazı alaşımlar içermektedir. Genellikle bu serideki 7005 gibi kaynak edilebilir alaşımlar çoğunlukla 5xxx serisi ek kaynak metali kullanımıyla kaynak edilirler.

1.2.2. Döküm alüminyum alaşımları

Döküm alaşımlar; genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak üretilirler. Bu alaşımlar son derece yüksek fiziksel özellikler gösterir ve işlenmeye elverişlidirler. Döküm alaşımlar kaynak edilebilirler. Isıl işlem çok yaygın olarak dövme alüminyum alaşımlarına uygulanmakla birlikte, döküm alaşımların bir kısmına da başarıyla uygulanabilmektedir. Bu özelliklerin yanında, mukavemet ve korozyon özellikleri iyidir. Bu nedenle döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri dövme alaşımlarından oldukça farklı olup silisyum %5-12 oran ile en önemli alaşım elementidir. Silisyum ötektik reaksiyon veren bir element olduğundan ilavesiyle alaşımın akıcılığı ve besleme kabiliyeti artarken, aynı zamanda malzeme mukavemeti de artar. Magnezyum elementi %0.3-1 arasında ısıl işlem uygulanabilir alaşımlara eklenir ve çökelme (Mg_2Si) ile malzeme mukavemetinin artışı sağlanır. Bakır, yüksek sıcaklık direncini arttırmak amacıyla %1-4 arasında kullanılır ve $CuAl_2$ bileşiği şeklinde çökelme fazı oluşturur. Çinko elementi de aynı şekilde yaşlanma amaçlı olarak malzemeye ilave edilir ve $MgZn_2$ çökeltisi oluşturur. Bor (B) ve titanyum (Ti) döküm alüminyum alaşımlarına tane küçültücü olarak ilave edilirken, sodyum (Na) ve stronsiyum (Sr) elementleri ötektik yapıyı modifiye edici olarak eklenir. Diğer özellikleri de kontrol amacı ile kalay (Sn) ve krom (Cr) gibi elementler kullanılabilir (Öksüz, 1996).

Tablo 1.9. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi (Askeland, 1998)

Döküm Alaşımlar	
1xxx Ticari Saflıkta Al	Yaşlandırılamaz
2xxx Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xxx Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Biraz yaşlandırılabilir
4xxx Al-Si	Yaşlandırılamaz
5xxx Al-Mg	Yaşlandırılamaz
7xxx Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx Al-Sn	Yaşlandırılabilir

Bu alaşım grubunun özellikleri her ne kadar hafif bir döküm alaşımı yapısı sergiliyorsa da, özellikle otomotiv sanayisinde çok geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar. Döküm alüminyum alaşımları genellikle iki fazlıdır. Bazı bileşim özellikleri ısıl işlemle veya ergimiş metali kalıba dökmeden önce döküm yapısında bir iyileştirme işlemi vasıtasıyla düzeltilebilir (Oysu, 1996)

1.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Çeşitli Endüstri Kollarında Kullanım Alanları

1.3.1. Otomotiv endüstrisi

Günümüzde, alüminyumun kaynak edilerek birleştirilmesinde en dinamik ilerleme, otomotiv endüstrisinde olmaktadır. Otomobilde görülen birçok bileşen alüminyumdan yapılmakta ve korozyon direnci, artırılmış yakıt verimi, yeniden dönüştürülebilmesi ve kullanımı gibi çevresel konulardan dolayı uygulamalar artmaktadır. Motor blokları, ön ve arka süspansiyon elemanları, şaft ve tekerlek jantları gibi ana yapısal bileşenlerin tamamen alüminyumdan üretilmesi; ısı eşanjörleri, radyatör ve klima birimleri gibi daha geleneksel, yapısal olmayan bileşenleri bütünlemektedir (Taban, 2004).

Yakıt verimi sağlamasının dışında alüminyumun kullanımıyla ilgili bir diğer etken de emniyettir. Alüminyumun temel fiziksel karakteristikleri, otomobil tasarımında; yalnızca çarpışmalarda daha iyi performans göstermekte kalmaz, kazaların tümünü önlemeye de yardım eder. Alüminyumun mukavemet-ağırlık oranı, daha üstün enerji absorbsiyonu için daha büyük araç parçaları tasarımına olanak sağlamaktadır. Çelikle aynı enerjiyi absorbe edebilmek için, ağırlığın sadece %55' inde alüminyum yapılar tasarlanabilir. Bu ağırlık tasarrufu; bir çarpışmada daha az kinetik enerji absorbe gereksinimini getirir.

1.3.2. Gemi ve taşımacılık endüstrisi

Deniz taşımacılığındaki yeni gelişmelerde, alüminyumun gemi yapımında kullanımıyla hızlı feribot projelerinde ilerlemeler ortaya çıkmıştır. Kar amacıyla, nakliye firmaları; hızlı, verimli ve az tamir bakım gerektiren alüminyum gövdeli yüksek hızlı feribotların yapımını araştırmaktadırlar. Hızlı feribotlar terimi, büyük

yolcu yükü ve kargoyu yüksek hızlarda taşımak için yapılan küçük gemiler, dalgakıran sallar ve tek veya çok bölmeli gemileri ifade etmektedir. Alüminyumun düşük ağırlık / yüksek mukavemet oranı ve korozyona dirençli olması, yüksek hızlı deniz taşıtı uygulamalarının gelişimini olanaklı yapmaktadır.

Otomotiv endüstrisindeki nedenlere benzer olarak taşıma araçları daha çok alüminyum içerecek tasarımlarda üretilmektedirler. Isıtma sistemi demiryolu vagonları ve buhar hatlarında, mukavemet ve yüksek sıcaklık özelliğinden dolayı 5454 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. Sıfıraltı sıcaklıklarda kullanılan depolama tankları, düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet için 5183 ek kaynak metali ile kaynak edilmiş 5083 alüminyum alaşımından üretilirler.

1.3.3. Savunma ve havacılık endüstrisi

Bu endüstri dalları, bazı uygulamalar için, ısıl işlem yapılamayan, yüksek mukavemetli 5xxx serisini kullanmakta, ancak bazı özel tür, üstün mekanik özellikler veren, ısıl işlem yapılabilen alüminyum alaşımlarını da tercih etmektedirler. Darbe mukavemeti ve mukavemet/ağırlık oranı için alüminyum zırh kaplama yapılmaktadır. Mermiler; 2019' dan ve 2219 alaşımlarından üretilmektedir. Geniş bir sıcaklık spektrumunda iyi mukavemet özellikleri veren alüminyum alaşımları havacılıkta kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlar 2219, 2014, 2090, 2024 ve 7075' i içermektedir. Bu esas malzemeler, özel olarak yüksek performans uygulamalarında kullanılmaktadır (Taban, 2004).

1.3.4. Eğlence ve spor malzemeleri endüstrisi

İleri teknoloji spor malzemelerindeki ilerleme ve 7xxx serisi gibi yüksek mukavemetli ısıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarının kullanımındaki artış, endüstride tamamen değişmiştir. Son tasarımlar; hafif, yüksek performanslı alüminyum malzemeleri içermektedir. Bisiklet iskeletleri, beyzbol sopaları, golf raketleri, kızaklar ve motorlu kızaklar alüminyum alaşımının kullanıldığı bazı ürünlerdir. Bu endüstride özel ısıl işlemlere cevap veren ek kaynak metal tasarımlarının kullanımı ve geliştirilmesi, esas metal mukavemetine uyumlu kaynak teknikleri ve ekipmanlarının geliştirilmesini ortaya çıkarmıştır (Taban, 2004).

2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK (FSW) YÖNTEMİ

2.1. Yöntemin Tanıtımı

Bu kaynak yöntemi yabancı literatürde Friction Stir Welding (FSW), Türkçe literatürde ise Sürtünme Karıştırma Kaynağı olarak adlandırılan bir katı faz kaynak yöntemidir.

Yöntem 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü' nde (TWI) çalışan M. W. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith ve C. J. Daves tarafından bulunmuş, ilk patenti alınmış ve daha sonra yöntemin tam tanımını ve adını yasallaştıran patentler de O. T. Midling, E. J. Morley ve A. Sandvik tarafından W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, P. Temple-Smith, S. W. K. W. Kallee ve C. J. Daves tarafından alınmış olup halen gelişme süreci devam eden bir ileri kaynak yöntemi konumundadır. Yöntem öncelikle ve özellikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının dövme ve döküm türlerinin birleştirilmesinde karşılaşılan metalurjik ve mekanik özellik sorunlarını gidermek amacıyla geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Kaluç, 2007).

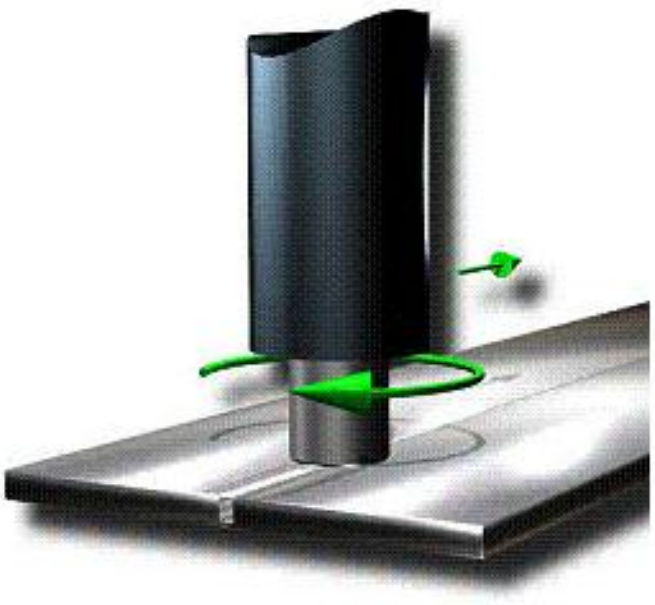


Şekil 2.1. Orion uzay gemisinin bölmeleri sürtünen elemen kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir (URL-6)

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi alüminyum ve diğer düşük ergime derecesine sahip metallerin birleştirilmesinde büyük üstünlüğe sahiptir. Son zamanlarda sürtünme karıştırma kaynak yöntemi lider uçak üreticileri tarafından uçak gövde ve kanat üretiminde perçinlemenin yerini alacak "anahtar teknoloji" olarak görülmektedir. Bu yöntemin çelikler ve paslanmaz çeliklere uygulanmasının başlıca sınırı uygun takım malzemesinin yetersizliğidir (Thurlby, 2009).

Tablo 2.1. 1995-2004 yılları arasında sürtünme karıştırma kaynak yöntemin uygulama alanları

YIL	UYGULAMA	ŞİRKET
1995	Boşluklu ısı değiştirgeçleri	Marine Alüminyum, Norweç
1996	Ticari gemi imalatı	Marine Alüminyum, Norweç
1998	Delta II roketleri	Boeing, ABD
1999	Ticari gemi imalatı	SAPA, İsveç
2000	Otomotiv parçaları	SAPA, İsveç
2000	Laser sistem gövdeleri	General Tool, ABD
2001	Motor gövdeleri	Marine Alüminyum, Norweç
2001	Otomotiv parçaları	Shova, Japonya
2001	Tren şaseleri	Hitachi, Japonya
2002	Otomotiv parçaları	Tower Otomotiv, ABD
2003	Uçak yapıları	Eclipse, ABD
2003	Ticari gemi imalatı	Advenced Joining Technologies, ABD
2004	Uzay mekikleri dış tankları	Lockheed Martin, ABD
2004	Yiyecek sandıkları	Rıftec, Almanya



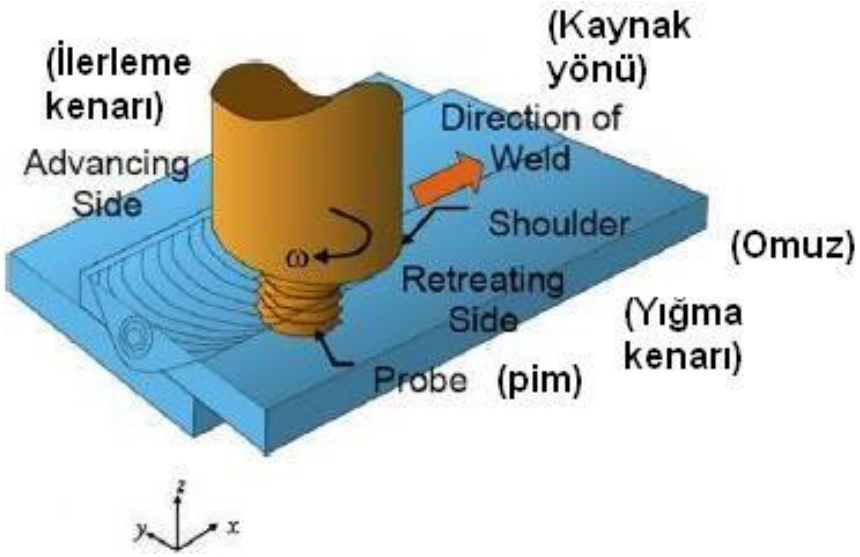
Şekil 2.2. FS kaynak yöntemi uygulamasının şematik gösterimi (URL-2)

Yöntem üzerine yapılan araştırmalar devam etmekle birlikte, günümüzde alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yanı sıra bakır ve bakır alaşımları, magnezyum ve magnezyum alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları, karbonlu az alaşımlı çelikler, nikel ve nikel alaşımları, çinko alaşımları, kurşun alaşımları, az alaşımlı çelikler, metal matrisli kompozitler ve bazı tür paslanmaz çeliklerin ya da bazı tür termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde de kullanılmaktadır. Ancak burada belirtilmesinde yarar olan önemli konulardan birisi de yöntemin birçok malzemeye uygulanabilirliğinin yanında, bu yeni yöntemin yukarıda sıralanan malzemelere alışılmış kaynak yönteminin uygulanması ile karşılaştırıldığında ne derece üstünlük ya da sınırlamalar getirdiği konusunda dikkate alınarak ilgili malzemelerin kaynağında bu yeni kaynak yönteminin kullanılabilirlik ölçüsünün teknolojik ve ekonomik anlamda değerlendirilmesidir. Zira, bazı tür malzemelerin kaynağında alışılmış kaynak yöntemlerinin kullanımı çok daha ekonomik ve verimli olmaktadır.

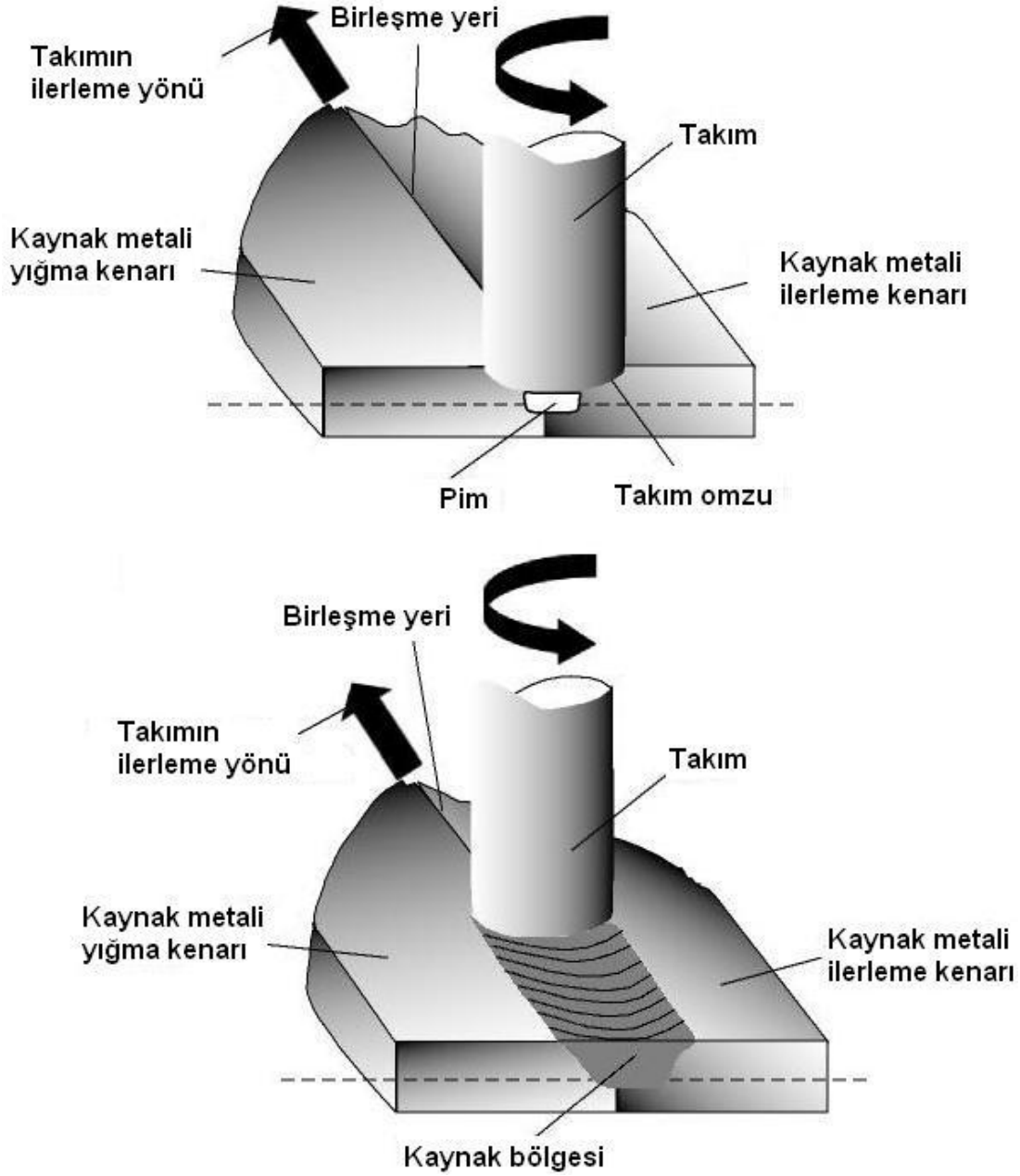
Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı aparatın iş parçasına dalması ve sürtünmesi sonucunda bölgesel olarak ısı girdisi oluşmaktadır. Sürtünme karıştırma aparatı ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden dolayı kaynak bölgesindeki malzeme yumuşamakta ve plastik şekil değişimi gerçekleşmektedir. Karıştırıcı aparatın iki temel fonksiyonu vardır, birincisi karıştırıcı ucun iş parçasına sürtünmesi

ile birleşme için gerekli ısı girdisinin sağlanması, ikincisi ise yumuşayan malzemenin birleştirme bölgesinde karıştırılarak plastik deformasyonunun sağlanmasıdır.

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı iki farklı şekilde olabilir. Kaynakla birleştirilecek olan parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olabilir. Karıştırıcı uç kaynak yapılacak iş parçasına daldırılarak kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilir. Pim malzemeye temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin etkisi ile hızla artar ve malzemenin plastik şekil değişimine neden olur. Karıştırılan malzeme, hidrostatik basınç altında soğuyarak katılaşır ve birleşme olayı gerçekleşir.



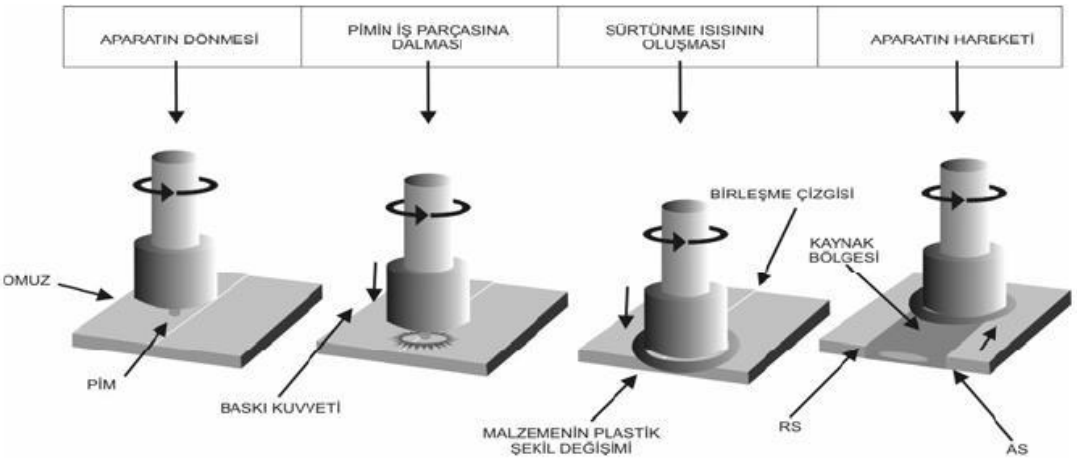
Şekil 2.3. Bindirme yöntemi kullanılmış sürtünme karıştırma kaynağında pim, omuz, ilerleme ve yığma kenarlarının şematik gösterimi (Pirondi, 2008)



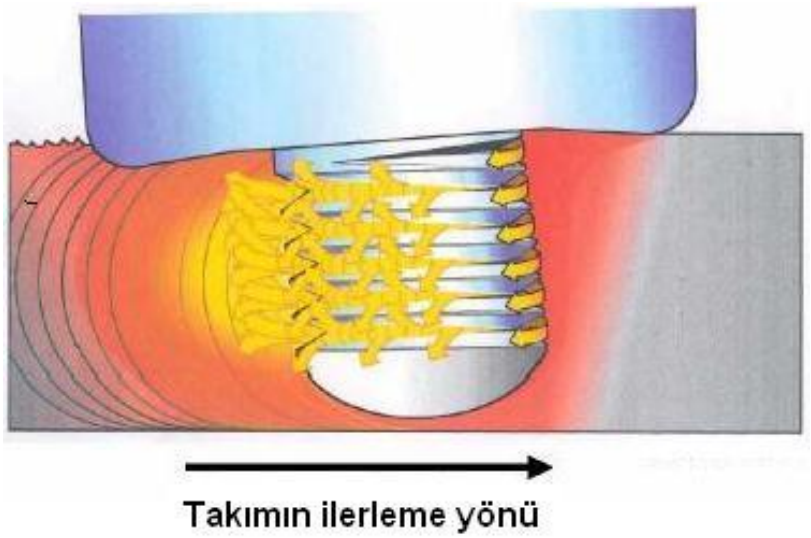
Şekil 2.4. Sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yönteminin prensibi (URL-7)

Yöntemin uygulanması esnasında gerçekleştirilen basamaklar aşağıdaki gibidir. FS kaynağı için üretilmiş pim, omuz kısmı ve ana gövdeden oluşan karıştırıcı takım belli bir devir sayısında döndürülür. Karıştırıcı takımın pimi kaynak edilecek malzemelerin birleşme çizgisiyle eş eksende olacak şekilde ağızlandıktan sonra aşağı yönde hareket ettirilir ve kaynak malzemesi ile teması sonucunda sürtünmenin etkisi ile kaynak bölgesinde ısı artışı sağlanır. Karıştırıcı takıma dik eksende uygulanan baskı kuvveti ile karıştırıcı uç istenilen kaynak derinliğe indiğinde ve malzemenin şekil değiştirmesi için yeterli sıcaklık sağlandığında karıştırıcı takım belli bir hızda

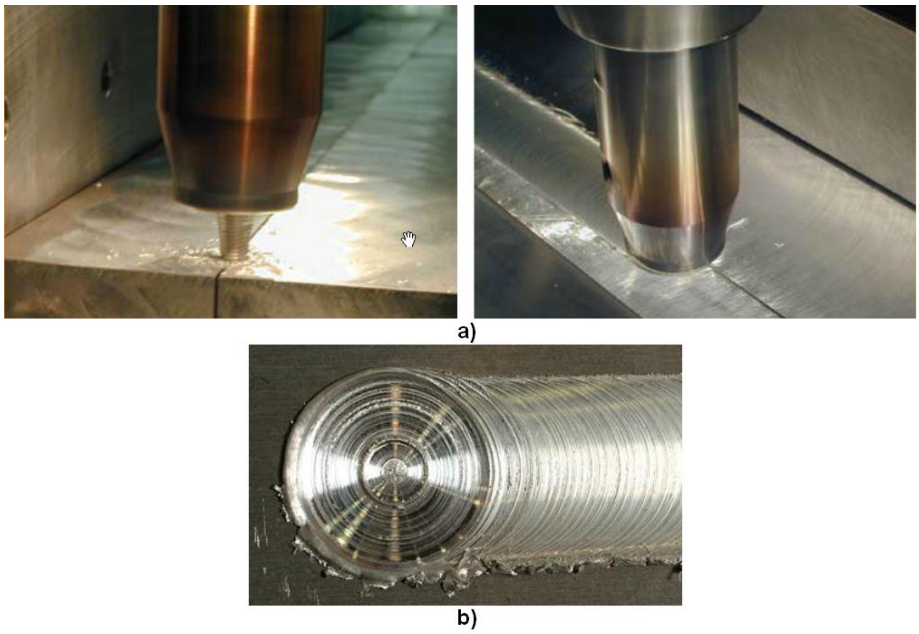
kaynak yönünde hareket ettirilerek (bazı uygulamalarda takım sabitken malzemenin bağlı olduğu tabla da hareket ettirilebilmektedir) kaynak yapılır. Karıştırıcı ucun malzeme ile teması sonucunda ısı yükseldiği için ısınan malzemenin mekanik şekil değiştirme kabiliyeti artar ve kendi ekseninde dönme hareketi ile birlikte önünde bulunan malzemeyi arka tarafa iterek iki malzemenin kaynak işlemini sağlar. Takım diğer uçtan çıktıktan sonra da kaynak işlemi tamamlanmış olur.



Şekil 2.5. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin işlem sırası (Sayer, 2007)



Şekil 2.6. FSW yönteminde kaynak ağzında dönerek ilerleyen takımın ısıtarak yumuşattığı malzemeyi karıştırma mekanizması (şematik kesit)



Şekil 2.7. a) Karıştırıcı takımın malzemeye dalması (sol) ve ilerlemesi (sağ) b) kaynak bitiş bölgesinin makro görüntüsü

2.2. Yöntemin Üstünlük ve Sınırlamaları

Yöntemin diğer yöntemlere göre üstünlük ve sınırlamaları aşağıda metalurjik, enerji ve ekonomik açıdan ve çevresel açıdan ele alınmıştır (Kaluç, Taban, 2007)

2.2.1. Yöntemin metalurjik açıdan üstünlükleri

Yöntem, katı faz kaynak yöntemi olduğundan kaynak bölgesinde bağlantı mukavemetini büyük ölçüde değiştirecek metalurjik dönüşümler oluşmaz.

Açısal çarpılma tehlikesi, ergitme esaslı kaynak yöntemlerine göre oldukça az olmakla birlikte yöntem sayesinde boyutsal kararlılık sağlanması daha kolaydır.

Alaşımın ergime noktası aşılmadığından alaşım elementi yanması yoluyla element kaybı oluşmaz.

Kaynak ağızlarında bulunan oksitin kaynak kalitesini etkileyecek biçimde ortadan kaldırabilme özelliğine sahiptir.

Ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmede kaynak metalinde IEB' de çatlama hassasiyeti yüksek olan alüminyum ve diğer metal alaşımlarına rahatlıkla uygulanabilir.

Yüksek bağlantı mukavemeti ön tav gereksinimi olmadan elde edilebildiği gibi kaynak sonrası ısıl işlem yapılarak malzeme mukavemeti yükseltilebilir.

Kaynak, ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme tehlikesi yoktur.

Alüminyumun ergime sıcaklığına hiçbir zaman ulaşılmadığı için gözenek ve çatlak oluşma tehlikesi azdır.

Farklı metallerin kaynağına yatkındır.

Ekstrüzyon ürünü veya döküm ile üretilen parçaların çoğu bu yöntemle kaynak edilebilir.

Son geliştirilen teknikler ile 0,5 mm' den 75 mm' ye kadar alüminyum malzeme kalınlıklarında tek pasolu kaynak yapılabilir.

15-50 mm kalınlıkları arasındaki parçalar istenirse her iki taraftan da kaynak edilebilir.

Arttırılan kaynak hızları sayesinde ince levhaların kaynağında sürtünme karıştırma kaynak yöntemi laser ışın kaynağına alternatif bir yöntem konumuna gelmiştir.

Direnç nokta ve direnç dikiş kaynağının uygulamalarının yüksek olduğu otomobil endüstrisinde daha hızlı ve seri üretime yatkındır.

Kaynağı özel metaller ve alaşımlar ile ince taneli yüksek mukavemetli çeliklere ekonomik olarak uygulanabilir.

Bağlantıların çekme, eğme ve yorulma mukavemeti alışılmış kaynak yöntemlerine göre daha üstün özellikler sağlamaktadır.

2.2.2. Yöntemin enerji ve ekonomik açıdan üstünlükleri

Koruyucu gaz ve metale gerek yoktur.

Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek yoktur.

Yöntem tamamen mekaniktir ve nispeten az bakım gerektiren tezgahlar ile gerçekleştirilebilir.

Kaynak parametreleri takım tezgahının ayarları ile kontrol edilebilir**,** bilgisayar kontrollü durumu getirilebilir ve otomasyonu sağlanabilir.

Yüksek kaynak dikiş kalitesine sahiptir ve sıçrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir. Kaynak sonrasındaki dikiş taşkınlıklarını temizleme gibi işçilik giderleri yüksek olan işlemlere gerek duyulmaz.

Yöntem için geliştirilen özelliklerden biri, bağlantının her iki taraftan eş zamanlı olarak kaynak yapılabilmesi olmuştur. Bu sayede altlık gereksinimi ortadan kalkmakta ve içi boş kalın profillerin kaynağı da kolaylaşmaktadır.

Operatör gereksinimi daha azdır.

Lazer ile yapılan kaynak işleminde gereken enerjinin yalnızca % 2,5' i FSW için yeterli olmaktadır.

Kaynak işlemi, tüm pozisyonlarda tek veya çift taraftan yapılabilir. Verim yüksektir.

2.2.3. Yöntemin çevresel açıdan üstünlükleri

Koruyucu gaz ve ek metale gerek yoktur.

Yöntemde UV yayınımı ve elektromanyetik radyasyon oluşmaz.

Işıksız, dumansız ve ozon oluşumu olmadan çevreye zararsız bir yöntemdir.



Şekil 2.8. Sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yönteminin uygulamasına örnek (URL-12)

2.2.4. Yöntemin sınırlamaları

Bazı alaşımların tek paso kaynağında kaynak hızı, diğer mekanize ark kaynağı yöntemlerinden daha düşüktür.

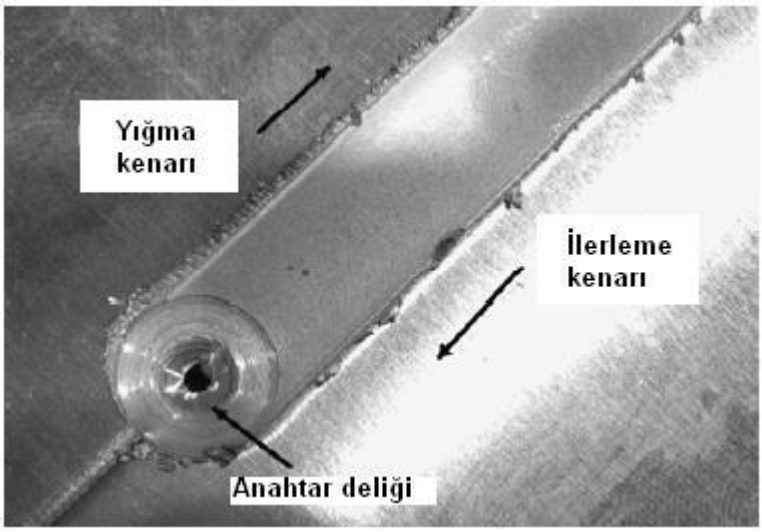
Parçaların rijit olarak çok iyi bir biçimde bağlanmaları gereklidir. Bu rijit bağlama durumu, malzemelerde artık gerilmeler oluşturmaktadır.

Başlama ve bitiş plakaları kaynak işlemlerinde başlangıçta oluşan kalitesiz dikiş görünümü ile kaynak işleminin bitiminde pimin yukarı çıkması ile oluşan anahtar deliği oluşumu vardır. Ancak bu deliğin yeniden tamiri söz konusudur. Bu durumun ortadan kaldırılması geliştirilen hidrolik olarak geri çekilebilen takımlar ile olanaklı olup uygulama hala pahalı ekipman gerektirmektedir.

İş parçaları tablaya bağlandığı için ekipmanların taşınması zordur.

Yöntemin kullanımı genellikle doğrusal ve uzun dikişler halinde ekonomik olup, dairesel hareketler yapmak zordur ancak bu sorunun günümüzde çözümü robotlara takılan ekipman ile pahalıya mal olmaktadır.

%100 nüfuziyet isteniyorsa parçaların ters çevrilip arka tarafından da kaynak yapılması gereklidir.



Şekil 2.9. Pimin kaynak bitiminde yukarı çıkmasıyla oluşan anahtar deliği (Nandan ve diğ., 2008)

2.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak (FSW) Yönteminin Uygulama Alanları

2.3.1. Gemi inşasında ve denizcilik endüstrisindeki uygulamalar

Ticari amaç güdülerek yöntemin uygulandığı ilk önemli endüstriyel sektörler gemi inşaatı ve denizcilik endüstrisidir. Bu alanlarda yöntem, aşağıdaki uygulamalar için uygundur;

- Güverte, kenar, bölme ve döşeme panelleri,
- Alüminyum ekstrüzyonları,
- Teknelerin güverte ve üst yapı elemanları,
- Helikopter iniş platformu,
- Deniz üstü yapılar,
- Denizcilik ve taşımacılık yapıları
- Yelkenli direklerinin imalatında,
- Soğutma tesisleri.



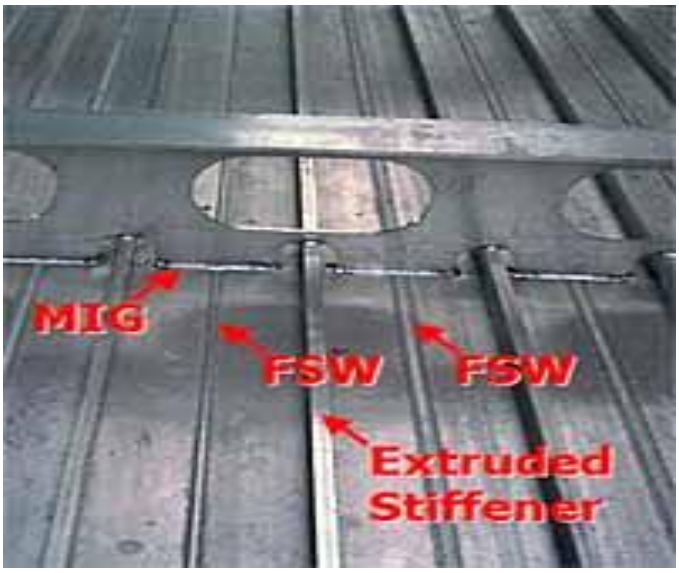
Şekil 2.10. Avustralya Araştırma Enstitüsü tersanesinde bulunan taşınabilir FSW makinası (URL-30)



Şekil 2.11. Çin' de ilk endüstriyel FSW üretim tesisi (Luan, 2008)



Şekil 2.12. ABD donanmasına ait Sea Fighter gemisin FSW yöntemi ile üretilmiş güverte panelleri (URL-33)



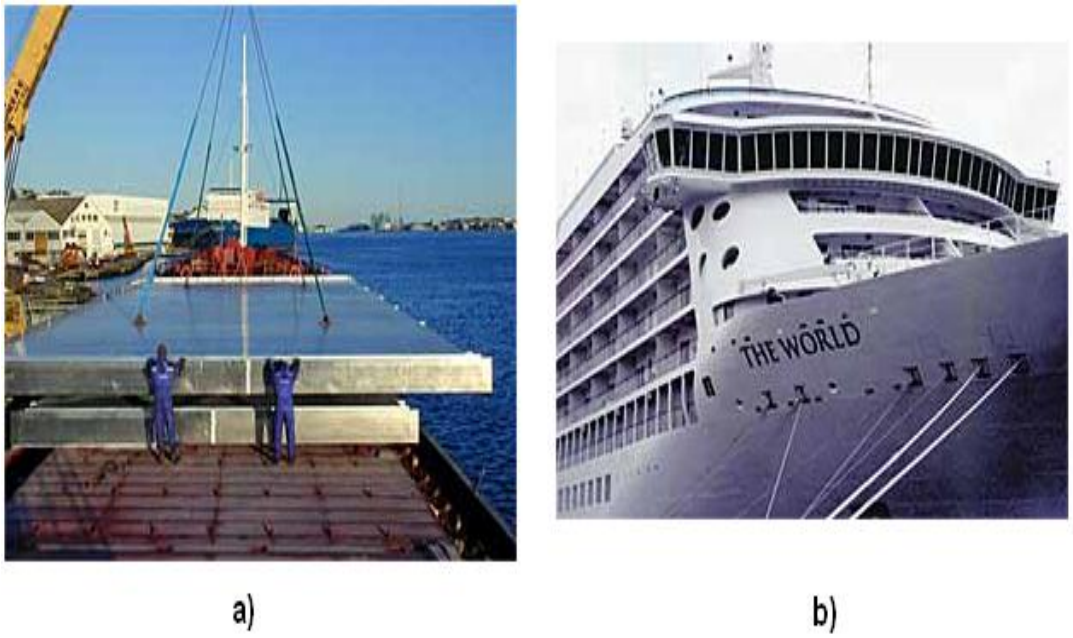
Şekil 2.13. MIG ve FSW yöntemi ile üretilmiş gemi panelleri (URL-34)



Şekil 2.14. Çin' de FSW yöntemi kullanılarak alüminyum panellerinin birleştirilmesi ile üretilen bir gemi (URL-35)



Şekil 2.15. Gemi yapımında kullanılan alüminyum ekstrüzyon ürünlerinin FSW yöntemi ile üretilen panelleri (URL-31)



Şekil 2.16. a) Hyro Marine Alüminyum tarafından üretilmiş "The World" yolcu gemisine ait güverte panelleri b) FSW yöntemi ile üretilmiş güverte panellerine sahip Fosen Mek tarafından yapılmış "The World" yolcu gemisi (URL-32)

2.3.2. Raylı taşıt endüstrisindeki uygulamamalar

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun Al-ekstrüzyonlar aralarına sıkılık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir. Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanım artırılmaktadır. Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli Al alaşımlarında IEB bölgesinde aşırı mukavemet kaybına sebep olduğu için, son yıllarda Almanya ve İngiltere' de meydana gelen hızlı tren kazalarında daha dayanıklı kaynaklara ihtiyaç duyulduğu gerçeği ortaya çıktı. Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak bölgesinde daha düşük seviyelerde mukavemet kaybına neden olduğundan cazip bir alternatif oluşturduğu için son yıllarda Avrupa ve Japonya' da hızlı tren vagonlarının üretiminde bu kaynak teknolojisi ile imal edilen Al-alaşımı petek paneller kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2.20) (Çam, 2003a).



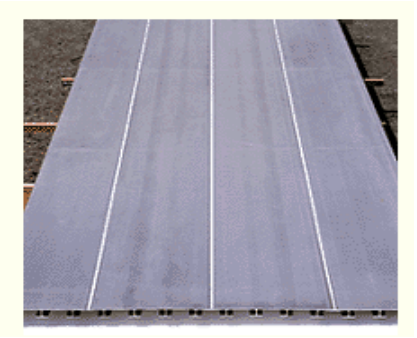
Şekil 2.17. Hitachi tarafından yapılan, tek taraftan tüm uzunluk boyunca FS kaynağı yapılmış olan bir tren



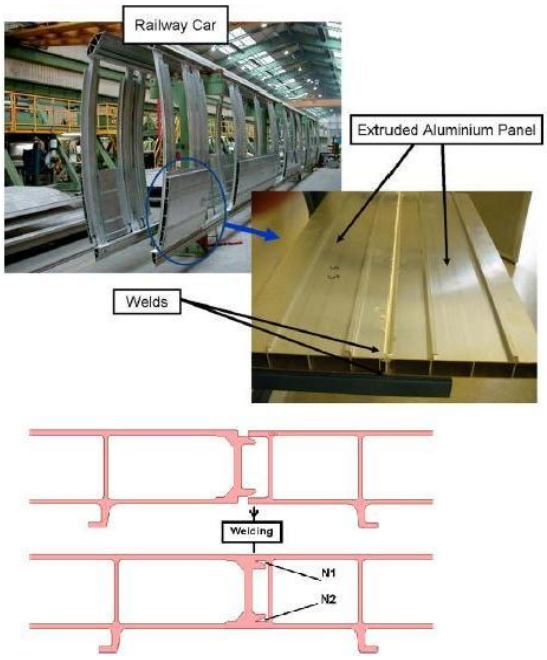
Şekil 2.18. Hitachi tarafından yapılan, çift taraftan tüm uzunluk boyunca FS kaynağı yapılmış olan hızlı bir tren



Şekil 2.19. Japonya' da taban panellerinin kaynağının FSW yöntemi ile Sumitomo Hafif Metal firmasında yapılan Shinkansen tipi 700 standart yüksek hızlı bir tren



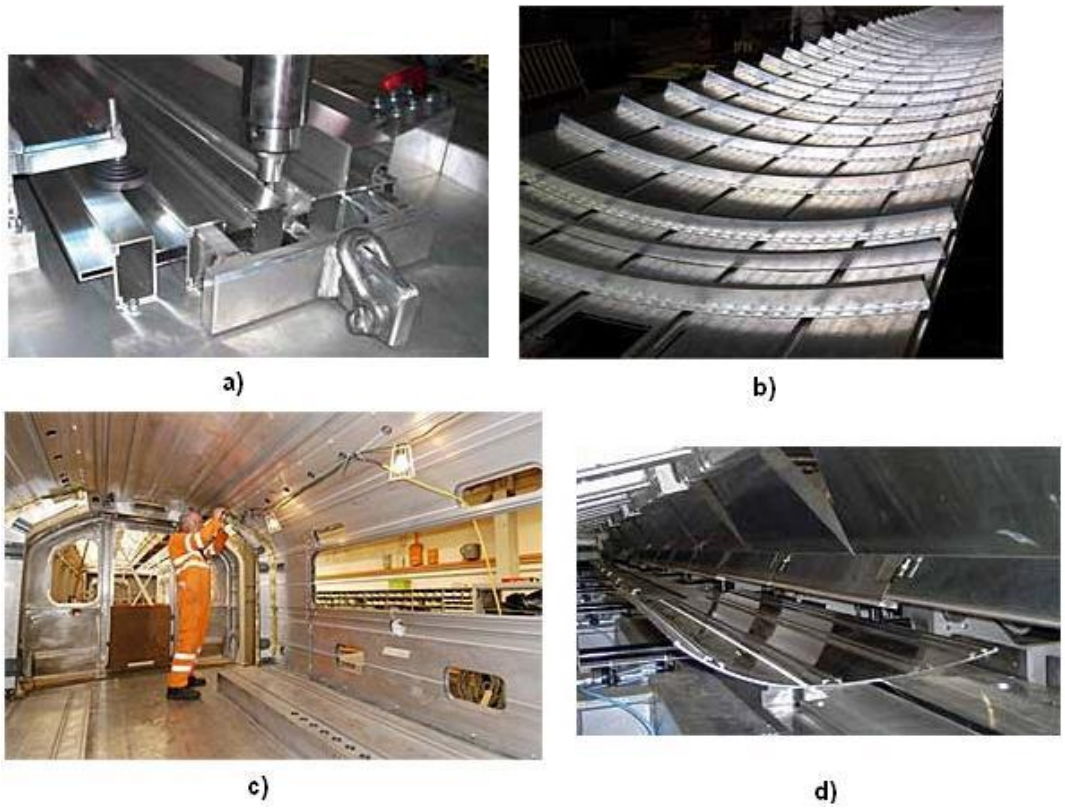
Şekil 2.20. Sumitomo Hafif Metal tarafından Shinkansen trenleri için FSW yöntemi ile üretilmiş taban paneli



Şekil 2.21. Tren vagonlarında yan duvar olarak kullanılan çift taraftan kaynaklı alüminyum profiller (Shahri, 2010)



Şekil 2.22. Çatı panellerinin FS kaynak yöntemi ile üretilmesi ve raylı taşıt endüstrisinde kullanımı (URL-25)



Şekil 2.23. a) AMAG firması FSW yöntemiyle geniş çapta tren, gemi ve kamyon panelleri üretmiştir b) Kawasaki firması alüminyum çatı panellerinin üretiminde sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamıştır c) Bombardier firması Londro' da FSW yöntemiyle yedek stok depoları üretmektedir d) Sapa firması geçtiğimiz 10 yılda tren yan kenar paneller üretiminde 2000 km FSW yöntemini kullanmıştır (URL-23)

2.3.3. Otomotiv endüstrisindeki uygulamamalar

Sürtünme karıştırma kaynağının otomotiv endüstrisine getireceği bazı faydalar şunlardır;

• Kaynak bölgesinde nispeten yüksek mukavemet

• Minimum distorsiyon ve kalıntı gerilmeler

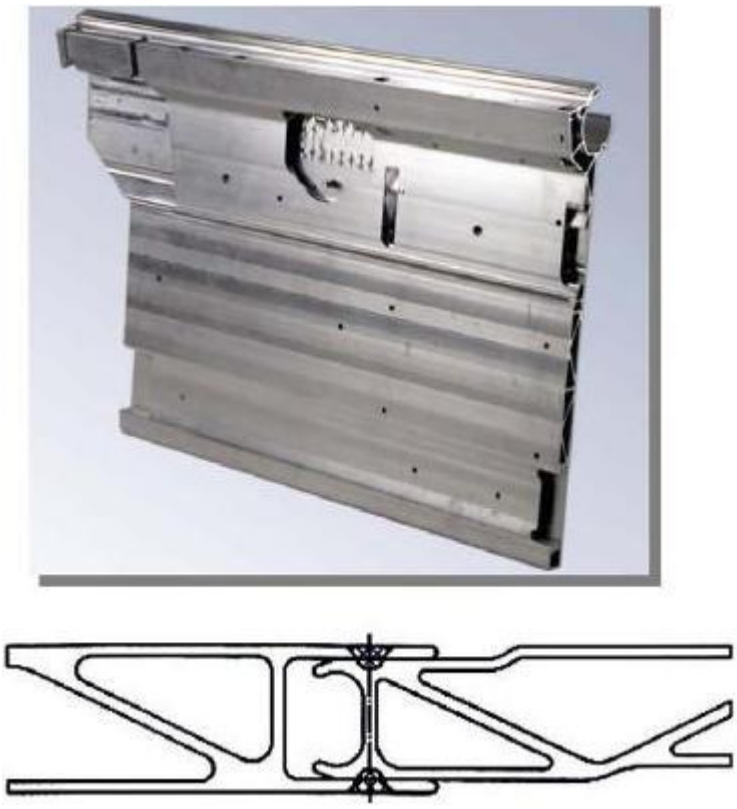
• Kaynak dumanını olmayışı, dolayısıyla çevreci bir kaynak tekniği olması

• İlave tel ve koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaması

• Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek olmaması

• Otomasyona çok uygun oluşu

• Çeşitli metaller ve alüminyumların (Al-ekstrüzyon ve Al-döküm) birçok pozisyonda birleştirilebilmesi



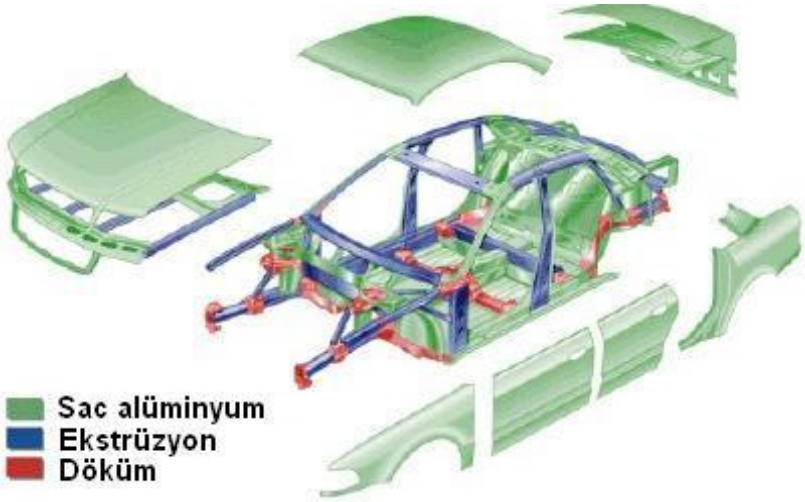
Şekil 2.24. Araç koltukların arka desteklerinde bindirme sürtünme karıştırma kaynağına örnek (Ericsson, 2007)

Halen, otomotiv endüstrisindeki yüksek üretim oranları, rekabetçi üretim ortamları ve düşük maliyet gereksinmeleri geleneksel olan diğer birleştirme tekniklerinin uygulanmasına neden olmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı otomotiv parçalarında, alüminyum birleştirmelerde kayda değer bir potansiyel artışı sağlamakla beraber otomotiv sektöründe kullanılabilirliği sınırlıdır. Otomotiv endüstrisindeki yoğun üretim nedeniyle, bu yeni teknolojiyi uygulamaya geçirmek için bir hayli zamana ihtiyaç duyulması beklenmektedir. Kaynak teknolojisindeki gelişme hızlandığında artırılmış üretim için büyük potansiyel, özel parçaların büyük oranda üretiminin sağlanması sonucunda açığa çıkacaktır. Yüksek kalite ve yükseltilmiş kaynak mukavemeti, ağırlık azaltımını mümkün hale getirecektir. Özellikle Mg alaşımlarının otomotiv sektöründe bu yeni kaynak teknolojisi sayesinde kullanımı ile ağırlıktan tasarruf daha da artırılabilir (Çam, 2003).

Otomotiv sektöründe alüminyum kullanımının hızla artması yakıt ve ağırlık tasarrufunda daha etkili araçların üretilmesine yol açmıştır. Süspansiyon kolları gibi küçük çaptaki parçalar bu yöntem ile Japonya' da üretilmektedir. Bunun yanı sıra Norveç' te tekerlek jantlarının bu yöntem kullanılarak yapımı da gerçekleşmektedir (Külekçi, Şık, 2003).



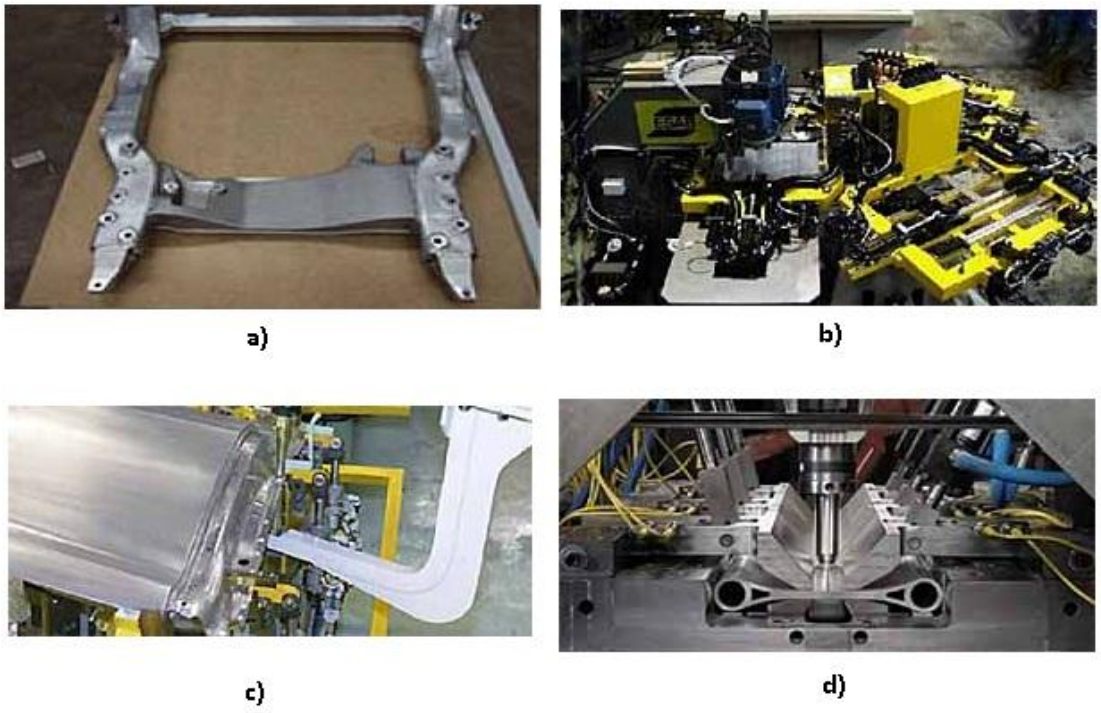
Şekil 2.25. FSW yöntemi ile Norveç' te üretilmiş otomobil jantı (Kaluç, Taban, 2007)



Şekil 2.26. Audi A8 aracının kasa ve şasesinde kullanılan alüminyum alaşımları (Attallah, 2007)



Şekil 2.27. Amerika' da Ford firması GT modelindeki orta tünel yapısını FSW yöntemi ile üretmektedir (Kaluç, Taban, 2007)



Şekil 2.28. a) Prototip SK kaynaklı motor kızağı b) Volvo firmasının arka koltuk üretiminde FSW yöntemi kullanılmaktadır c) Mazdanın RX-8 modeli için arka koltuklarında FSSW yöntemi kullanılmaktadır d) Lincoln limuzinlerinin süspansiyon bağlantılarında FSW yöntemi kullanılmaktadır (URL-36)

2.3.4. Havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulamalar

Günümüzde havacılık endüstrisi FSW yöntemini prototip ve üretilen parçaların kaynağında kullanmaktadır. Bu endüstride kaynaklı parçalar askeri ve sivil uçakların imalatında, yüzeyleri kafes ve kiriş sistemlerine bağlamada kullanılmaktadır. Eclipse 500 uçağının üretiminde FSW yöntemi perçinli bölgelerin %60' lık kısmının yerini almıştır. Bu sayede uçağın üretiminde üretim maliyeti ve hafiflik açısında önemli gelişmeler elde edilmiştir. Günümüzde uzay araçları için üretilen alüminyum yakıt tanklarının uzunlamasına alın kaynağında FSW yöntemi başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Yöntemin bu endüstride kullanım alanlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Uçakların kanat, gövde ve kuyruk takımları,
- Taşıtlar için yakıt tanklarını soğutma ünitesi,
- Uçuş yakıt tankları,

- Askeri uçakların yan bölümlerinde yer alan yakıt tankları,
- Askeri ve araştırma roketleri,
- Hatalı MIG kaynaklarının tamiri.



Şekil 2.29. SpaceX fabrikasında Falcon 9 roketinin itici tanklarının boyuna ve çevresel kaynağında SKK kullanılmıştır (URL-8)



Şekil 2.30. Eclipse havacılık şirketinin FSW yöntemini alüminyum kabin panel kafes ve kirişlerinin birbirine kaynağında kullanması ve FSW yöntemi ile üretmiş olduğu Eclipse 500 küçük boyutlu uçağı (URL-29)

2.3.5. Diğer endüstriyel uygulamalar

FSW yöntemi zaman içinde alüminyum alaşımlarından üretilmiş hoperlör gövdeleri ve elektronik aletlerin çeşitli parçalarında kullanılmaktadır.

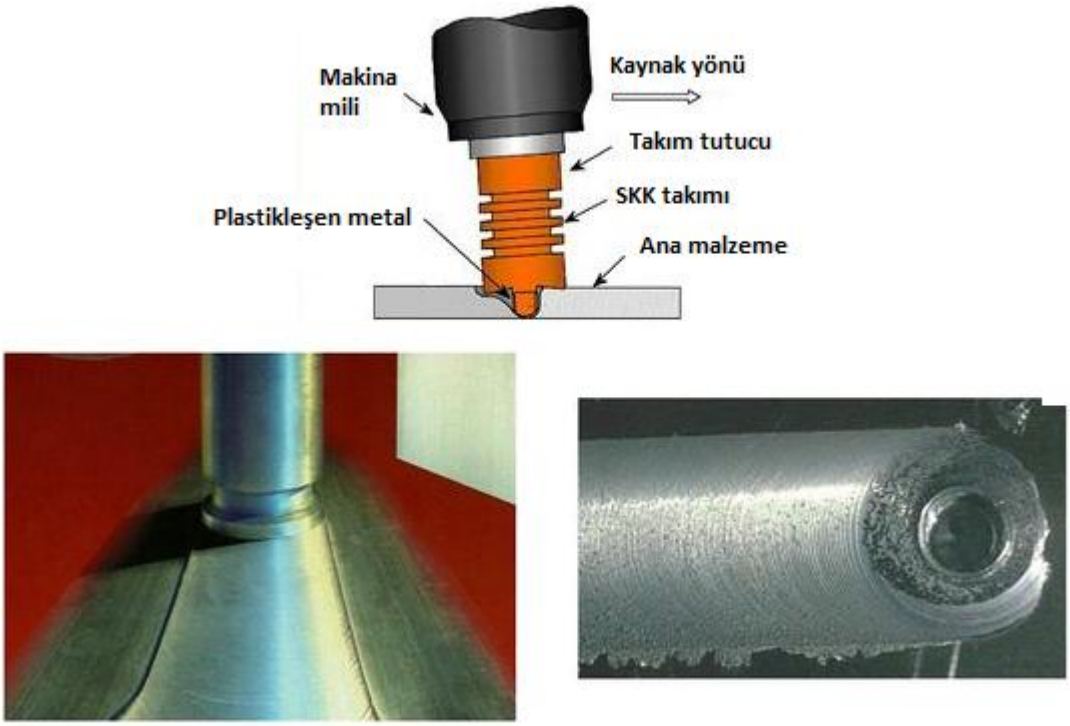
Ayrıca radyatörlerde, soğutuculara ve ısı değiştiricilerde kullanılan alüminyum plakaların üretiminde, nükleer endüstride kullanılan yüksek seviyede radyoaktivite içeren atıkların depolanmasında kullanılmaktadır (Kaluç, Taban, 2007)

Tablo 2.2. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin uygulama alanlarının başlıcaları (Taban, 2004)

Endüstri Kolu	Uygulama Alanları
Uzay ve Havacılık	Yakıt tankları, uzay aracı omurga parçaları, kanatlar, gövdeler ve kuyruk takımları, uçak yakıt tankları, askeri ve özel roketler, helikopter iniş platformları, özel alaşımlı gövde yüzey destekleri, hatalı MIG ve plazma kaynağı yapılan yerlerin onarımı
Zırhlı Taşıt Yapımı	Zırhlı taşıt alüminyum yan panellerinin kaynağı
Alüminyum Parça Üretimi	Büyük boyutlu ekstrüzyon elemanlar, dikişli alüminyum boru üretimi
Otomotiv	Otobüs ve kamyon şaseleri, jantlar, tanker depoları
Konstrüksiyon	Köprüler, denizüstü petrol platfomlarının elemanlar, pencere çerçeveleri, fabrika bacaları
Gıda	Alüminyum bira varilleri
Raylı Taşıt Yapımı	Lokomotif ve vagon şaseleri, yüksek hızlı trenlerin yüzey sacları ve diğer biçimlendirilmiş parçaları
Soğutma	Sıfıraltı sıcaklıklarda çalışan borular ve ısı eşanjör parçaları
Gemi Yapımı	Gemi yan panelleri, güverte elemanları, ağırlıktan tasarruf için üretilmiş hafif yapı elemanlarının kaynağı
Basınçlı Kap ve Kazan Üretimi	Sıvılaştırılmış gaz taşıma tanları ve, alüminyum reaktör parçaları

2.4. Yöntem Değişkenlerinin Kaynak Bölgesi Üzerindeki Etkisi

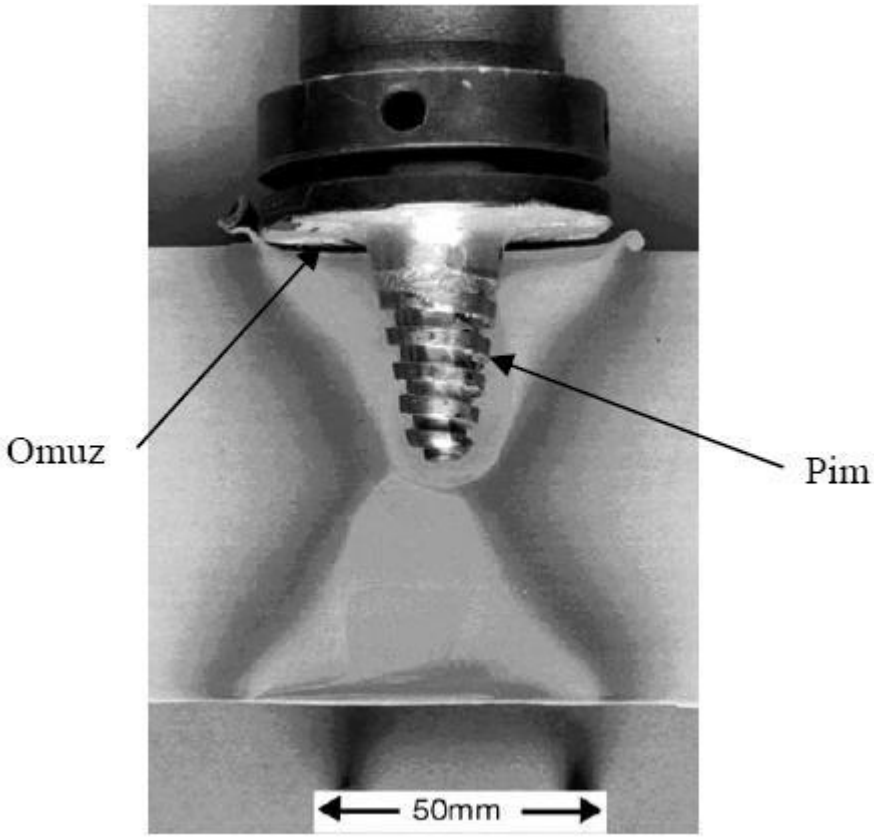
Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin kalitesi diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi kaynak değişkenlerine oldukça bağlıdır. Kullanılan takımın geometrisi plastik deformasyon sonucunda malzeme akışını, takımın dönme ve ilerleme hızı kaynak bölgesindeki ısı değişimlerini etkileyeceği ve malzeme kalınlığı ile takımda kullanılan pimin malzemeye dalma derinliği gibi faktörler yöntemin kalitesi açısında oldukça öneme sahiptir.



Şekil 2.31. Kaynak takımının parçaya dalma ve ilerleme mekanizması (URL-16)

2.4.1. Takım geometrisi

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinin mikroyapısına ve mekanik mukavemetine etki eden en önemli parametrelerden biri, karıştırıcı ucun yapısı ve tasarımıdır. Karıştırıcı uç omuz ve pim olarak adlandırılan iki kısımdan oluşmaktadır. Karıştırıcı aparatında omuz, SKK için gerekli olan ısı girdisinin bölgesel olarak oluşmasını sağlamaktadır. Karıştırıcı aparat pimi ise, ısı etkisi ile plastikleşen malzemenin kaynak bölgesinde karıştırılmasını ve birleştirilmesini sağlamaktadır. Kaynak tipine ve birleştirilecek olan malzemeye bağlı olarak birçok karıştırıcı aparat geliştirilmiştir. Şekil 2.32' de İngiliz Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma aparatı, 75mm kalınlığındaki AA 6082 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirilmesinde kullanılmıştır (Sayer, 2007).



Şekil 2.32. Sürtünme karıştırma aparatı (URL-28)

Karıştırıcı pim üzerindeki vida yapısının sürtünme karıştırma kaynağıma olan etkisi Peel ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada malzeme olarak 3 mm alınlığındaki AA 5083 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Karıştırıcı uç omuz yapısı sabit tutularak, ince (M5x0,8) ve kaba (M6x1) dişli pimin kaynak mukavemetine etkisi incelenmiştir. Araştırma sonuçları; düşük kaynak hızlarında ince dişli pim profilinin, yüksek kaynak hızlarında ise kaba dişli pim profilinin kaynaklı bölgenin mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Peel ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma Tablo 2.3' te gösterilmiştir (Peel ve diğ., 2003).

Tablo 2.3. FS kaynağında pim profilinin kaynak mukavemetine etkisi

Omuz Çapı (mm)	Pim Profili	Kaynak Hızı (mm/dak)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak Mukavemeti (%)
18	M5x0,8	100	304	67
18	M5x0,8	150	216	47
18	M5x0,8	200	186	41
18	M6x1,0	200	259	57

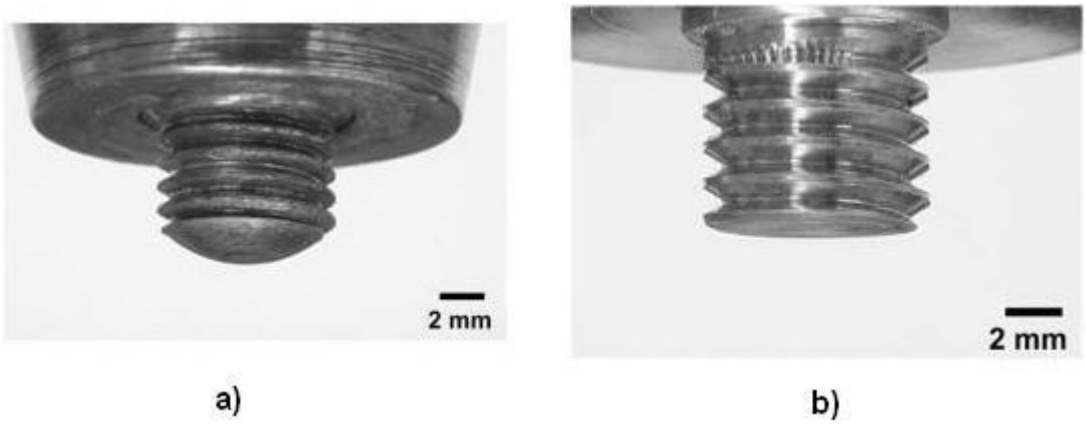


Şekil 2.33. FSW yönteminde kullanılan değişik tipteki takım tasarımları

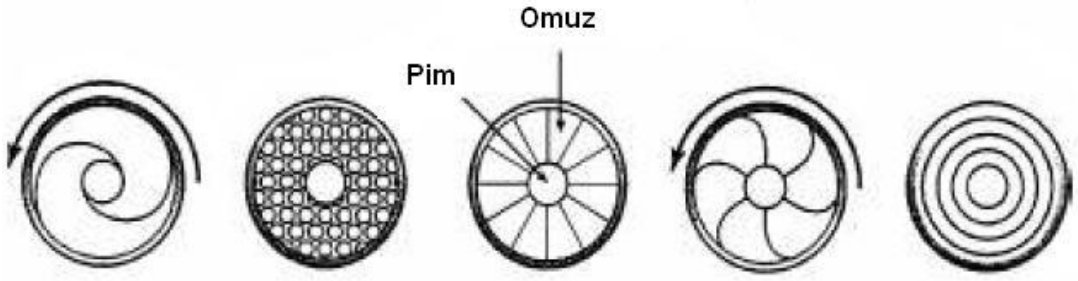
Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda pim çapı ile omuz çapı arasındaki bağlantı incelendiğinde en iyi mukavemet değerlerinin omuz çapının pim çapından 3 kat büyük olması ile sağlandığı gözlemlenmiştir. Bunun dışında pim yapı ve çapının sabit tutularak omuz bölgesine değişik tiplerde profil açılıp bağlantıların mukavemet değerleri de incelenmektedir. Omuz kısmında geliştirilen değişik profiller sayesinde kaynak sırasında plastik şekil değiştiren malzemeyi aşağıya doğru iterek bağlantının mukavemeti üzerine etkisi oldukça yüksektir.

2.4.1.1. Alışılmış silindirik pimli FSW takımlar

Takım kaynak edilecek malzemenin türüne, kalınlığına bağlı olarak tasarlanır ve özellikle kaynak dikişinin nüfuziyetinin yanı sıra kaynak dikiş genişliğini belirleyici bir geometriye sahiptir. Silindirik pimlere vida dişleri açılarak kaynak esnasında sürtünme ile malzemenin plastik şekil değiştirmesi sağlanarak parçalar kaynak yapılır. Pimin dairesel ve kaynak yönünde hareketi ile ön tarafından aldığı malzemeyi yığma bölgesine taşıyarak kaynak işleminin devamlılığını sağlar. Omuz kısmı ise uyguladığı basınç ile yumuşamış malzemeyi aşağı yönde iterek düzgün bir kaynak dikişi elde edilmesini sağlar (Kaluç, Taban, 2007)



Şekil 2.34. FSW yönteminde kullanılan alışılmış silindirik pimli takımlara örnek a) Küresel ağızlı silindirik pimli takım b) Düz ağızlı silindirik pimli takım (Mishra, 2005)

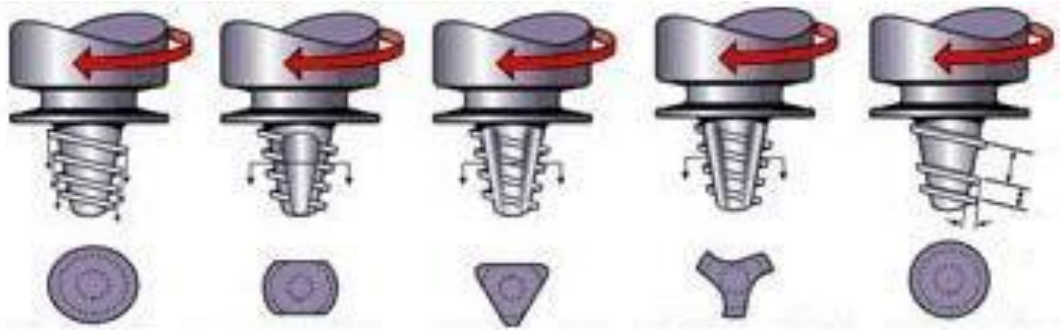


Şekil 2.35. FSW yönteminde takımlarda kullanılan omuz profillerine örnekler (Mishra, Ma, 2005)

FSW uygulamalarında alışılmış vidalı pim bulunan ve omuzda kanal açılmamış takımların kullanımı durumunda takım parçaya girerken düşeyle 1 ile 3° arasında açı verilip eğilerek parçalaya daldırılması ile ilerletilmesi esas alınır. Omuzun kanallı olması durumunda ise takımın eğilmeden tam dik konumda kullanımına olanak sağlanmıştır.

2.4.1.2. Whorl^{TM} serisi FSW takımlar

1.5 ve 12 mm kalınlığındaki alüminyum levhaların kaynağında ucunda vidalı pim bulunan alışılmış takımlarla iyi sonuçlar alınmasına karşın, malzeme kalınlığı arttıkça daha fazla ısıya gerek duyulmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar İngiliz Kaynak Enstitüsünde Whorl^{TM} serisi takımları geliştirmiştir.



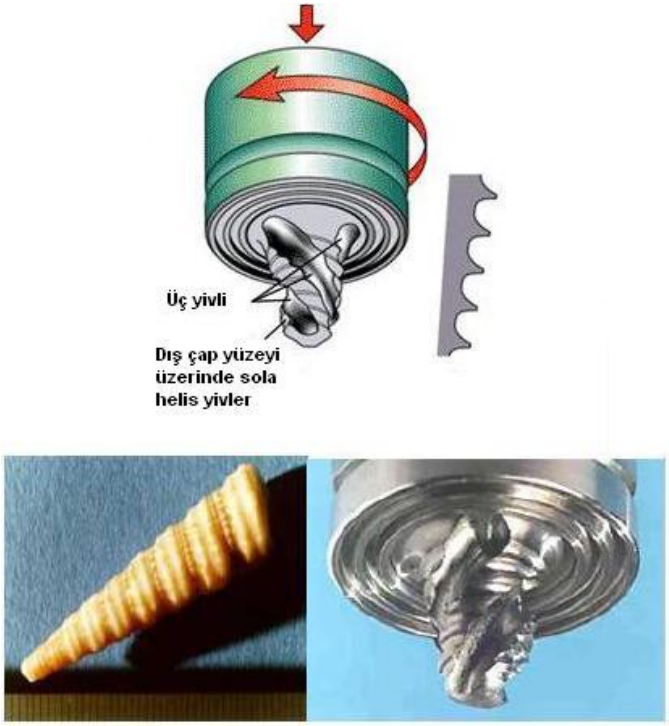
Şekil 2.36. Çeşitli pim profillerinden üretilen Whorl™ takımlar (URL-37)



Şekil 2.37. 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımı kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü (URL-21)

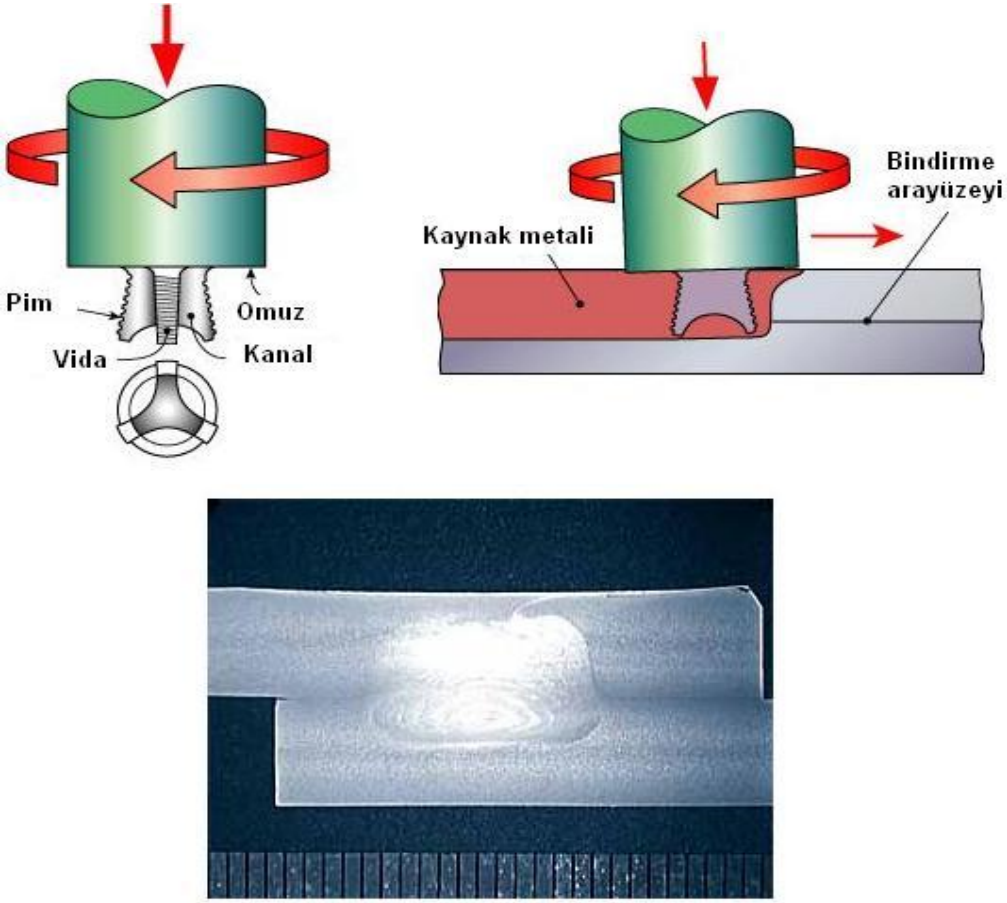
2.4.1.3. MX-triflute™ ve flared-triflute™ serisi FSW takımlar

Yapılan araştırmalar sonucunda bu tür takımların aynı çaptaki alışılmış vida profilli silindirik bir takıma göre daha fazla malzemeyi yer değiştirdiği belirtilmiştir. Whorl™ türü takımda yer değiştiren malzeme hacmi %60, MX-Triflute™ takımda ise %70 oranında artmaktadır. Bu durumda bu tür takımların basma kuvvetini azalttığına, malzeme hareketini kolaylaştırdığına, ayrıca pim ve plastikleşerek yumuşamış malzeme ara yüzeyinde ısı oluşumunu arttırdığı belirtilmektedir.

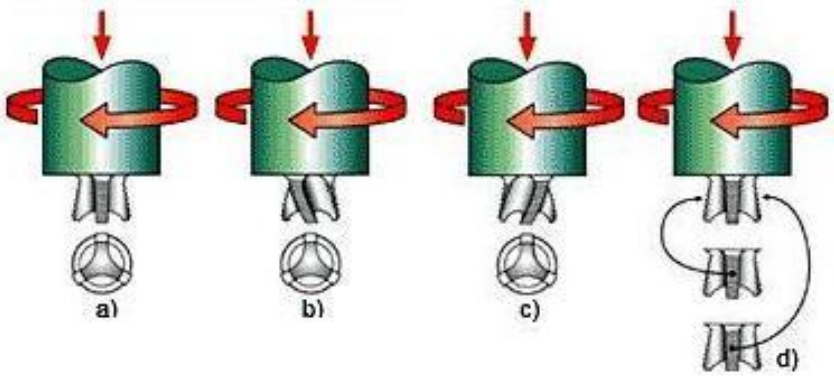


Şekil 2.38. MX-Triflute^{TM} piminin esin kaynağı deniz kabuklarıdır, MX-Triflute^{TM} piminin resmi (URL-26)

Bindirme kaynağında ise uç, daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzeylerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek maksadıyla daha farklı tasarlanmıştır (Şekil 2.39). Bindirme kaynağında pim yüzeyi kaynak ara yüzeyine zorunlu olarak diktir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst yüzeyden mesafesi ve ucun girintilerinin kaynağın kenarıyla kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır. Ucun karakteristiği, süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki farkın artırmasıyla ucun etrafındaki ve aşağısındaki akış yolunun büyümesidir.



Şekil 2.39. Flared-Triflute^{TM} takım kullanılarak bindirme kaynağının gerçekleştirilmesi ve oluşan kaynak dikiş kesiti (URL-22)



Şekil 2.40. TWI tarafından geliştirilen Flared-Triflute^{TM} takımlarının görüntüleri a) Düz (nötr) kanallı b) sol kanallı c) sağ kanallı d) vida dişleri nötr, sağ ve sol olması (URL-38)

Bu tür takımların geliştirilmesi aşağıdaki avantajları getirmiştir;

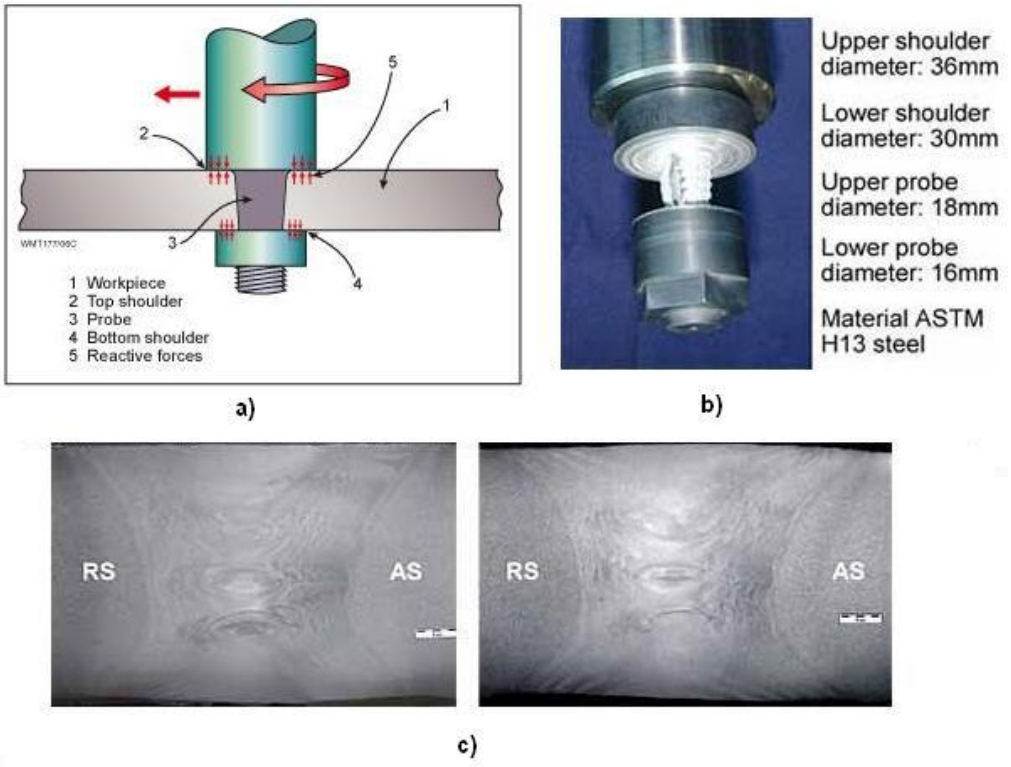
- Kaynak kuvvetinin azalması,
- Plastik hale gelen malzeme akışının kolaylaşması,

- Aşağıya doğru delme işinin kolaylaşması,

- Uç ile yumuşamış duruma gelen malzeme arasındaki ara yüzeyin artması.

2.4.1.4. Makara veya bobin biçimli FSW takımlar

FSW yönteminde üstten parçaya bastırılan takımın plastikleşmiş malzemeyi aşağıya doğru, birleştirmenin kök kısmına sıkışmasından dolayı, kökün düzgün biçimlenmesi için kullanılan altlık levhalar gerekli reaksiyon kuvvetini sağlayamamaları durumunda yöntemin esnek uygulamasını sınırlar. Bu nedenle altlık kullanımını ortadan kaldıracak olan özel bir takım geliştirilmiş ve bobin veya makara görünümüne benzediği için bu ad verilmiştir.

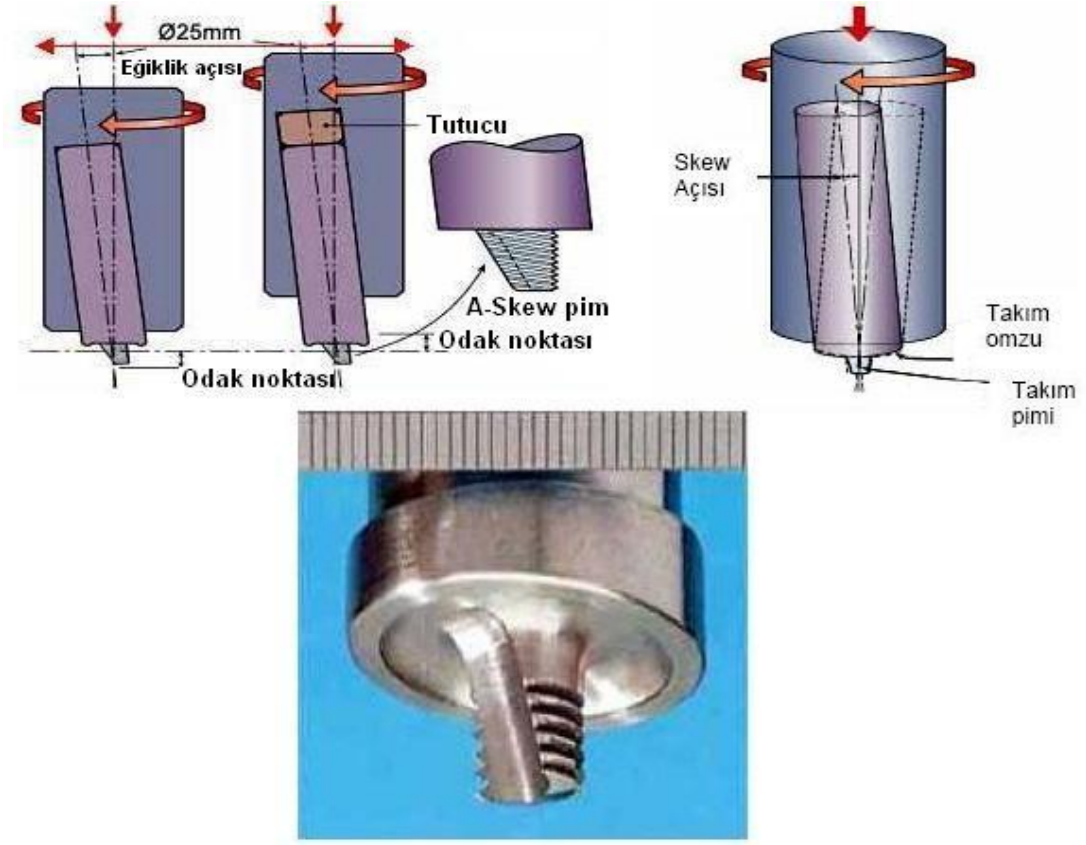


Şekil 2.41. a) Bobin takımın kaynak prensibi b) Kaynak işleminde kullanılan bobin takımı c) Soldaki resim 300 mm/dk kaynak hızı ile kaynağın makro kesiti, sağdaki resim 500 mm/dk kaynak hızı ile kaynağın makro kesiti

2.4.1.5. Skew-Stir^{TM} serisi FSW takımlar

SKK için geliştirilen Skew-Stir^{TM} biçimli pimler Şekil 2.42' de gösterildiği gibi makine miline biraz eğik olarak montajı yapılarak uygulaması geleneksel metottan farklıdır.

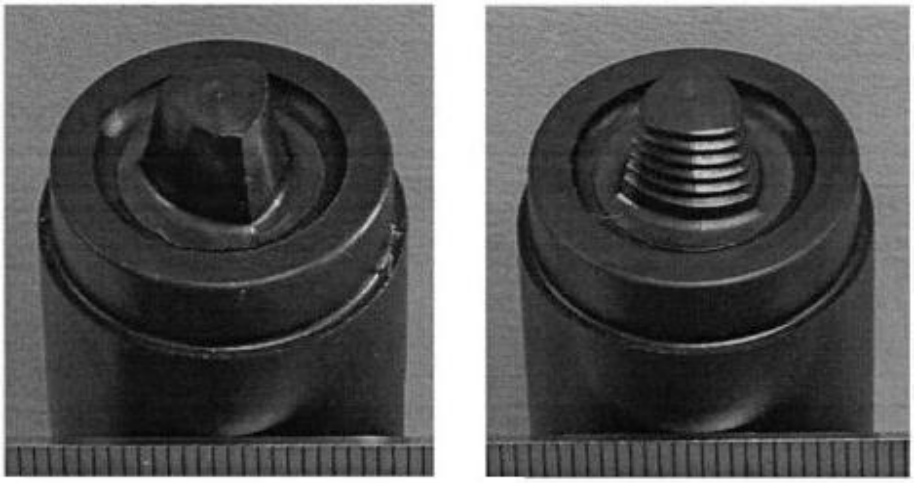
Skew-Stir™ serisi pimler, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı pimin eğik hareketi ile artırabilmektedirler. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür (Çam, 2003).



Şekil 2.42. Skew-Stir™ takımının çalışma prensibi ve ilk geliştirilen asimetrik Skew-Stir™ takımının görünüşü (URL-24)

Şekil 2.42' de görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım ekseniyle belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi eksen dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır (Çam, 2003).

2.4.1.6. Trivex™ serisi FSW takımlar



Şekil 2.43. a) Trivex™, b) MX-Trivex™ türü FSW takımlar (URL-27)

TWI tarafından yapılan araştırmalar neticesinde Triflute™ ve MX- Triflute™ türü takımlarda karşılaşılan yanal kuvvet zorlanmalarının azaltılması amaçlanarak Trivex™, MX-Trivex™ türü takımlar geliştirilmiştir. bu takımlar ile yapılan bağlantıların mukavemet değerleri incelendiğinde Triflute™ ve MX- Triflute™ serisi takımlar ile karşılaştırılabilir olduğu tespit edilmiştir (Kaluç, Taban, 2007).

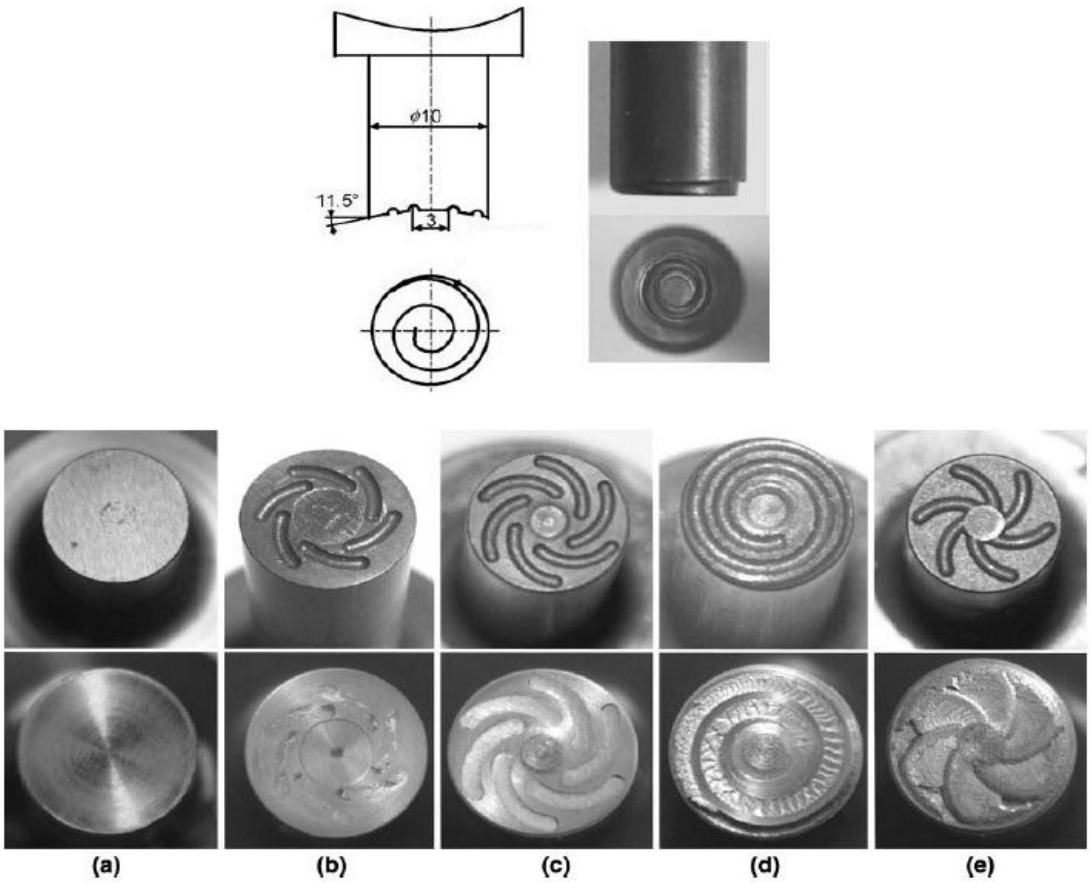
2.4.1.7. Pimsiz FSW takımlar

Otomotiv endüstrisinde yakıt tüketiminin azaltılması isteği üreticileri hafif metalleri daha fazla kullanmaları konusunda teşvik etmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) direnç nokta kaynağına nazaran sağladığı enerji verimliliği nedeniyle otomotiv endüstrisinde gelecekte kullanımı açısından yüksek potansiyele sahiptir. Günümüzde Mazda firması araçlarının üretiminde FSSW yöntemini kullanarak direnç nokta kaynağına göre %90 enerji tasarrufu ve %40 yatırım maliyetlerinde azalma sağlamıştır.

Pimli sürtünme karıştırma nokta kaynağında, belli bir devirde dönen pimli takım bindirme pozisyonundaki levhalara alt levhaya temas edecek şekilde dalarak üstten uygulanan basınç kuvveti ile bağlantıyı gerçekleştirir. Sürtünme sonucu oluşan ısı ve pim sayesinde malzeme plastik şekil değiştirerek kaynak işlemi tamamlanır. Fakat yöntemin dezavantajı direnç nokta kaynağına göre çevrim zamanının fazlalığıdır.

Yapılan araştırmalar sonucu sürtünme karıştırma nokta kaynağında en iyi mukavemet değerlerinin pimin dalma derinliği olarak üst levha kalınlığına ek olarak alt levha kalınlığının %25' ine kadar derinliğe inilerek sağlandığı görülmüştür.

Son yapılan çalışmalar sonucunda 1mm kalınlığındaki alüminyum levhaların bindirme pozisyonunda pimsiz takım (omuz bölgesine profil açılmış) kullanarak kaynak edilebildiği kanıtlanmıştır. 1 mm kalınlığındaki 6111-T4 alüminyum malzemesi farklı omuz profilini sahip pimsiz takımlar ile 0.2 mm dalma derinliğinde kaynak edilmiştir. Omuz çapı olarak 10 mm seçilirken takımın dalma hızı 2.5 mm/sn, takım dönme hızı 2000 rpm olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda pimsiz takımlı FSW yönteminin FSSW yöntemine göre çevrim zamanının kısaltılması ve sağladığı mukavemet değerleri yönünden üstünlüğü kanıtlanmıştır. Ayrıca pim kullanılmaması nedeniyle pimli takımlarda karşılaşılan yanal kuvvet azaltılmakta ve kaynak sonunda oluşan anahtar deliği gibi görsel kusurlar ortadan kaldırılmıştır (Bakavos ve diğ., 2011).

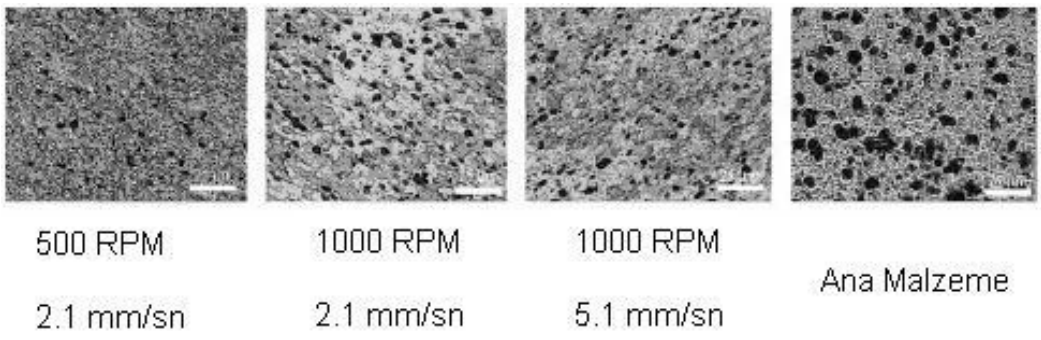


Şekil 2.44. a) Profilsiz düz takım, b) kısa yivli takım, c) uzun yivli takım, d) dairesel yivli takım, e) geniş açılı dairesel yivli takım (Bakavos ve diğ., 2011)

Yapmış olduğum deneysel çalışmalarda üçgen ve kare profilli takımlar ile AW-5005 serisi alüminyum alaşımını FSW yöntemiyle kaynak yaparken aynı zamanda pimsiz takım kullanılarak da kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Pimsiz takımla yapılan kaynaklı bağlantıların mukavemet değerleri üçgen ve kare profilli takımlara nazaran düşükken pimsiz takımlı bağlantıların yorulma mukavemeti diğer profilli takımlara göre daha yüksektir.

2.4.2. Kaynak hızı, takımın dönme hızı ve takım açısı

Bu yöntemde uygulanacak olan kaynak hızı ve takımın dönme hızı kaynak edilecek malzemenin alaşım türüne ve kalınlığına oldukça bağlıdır. Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı ucun dönme ve ilerleme hızı kaynak bölgesindeki mikroyapının oluşumunda oldukça etkilidir. Karıştırıcı ucun dönme hızı artıkça sürtünme artacağından kaynak bölgesindeki ısı girdisi de artacaktır. Aşırı ısı girdisi, birleştirme bölgesinde tane yapısının büyümesine ve kaynak mukavemetini olumsuz olarak etkilemektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek olan her malzemede maksimum kaynak mukavemeti ve proses verimini sağlamak için proses parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir.

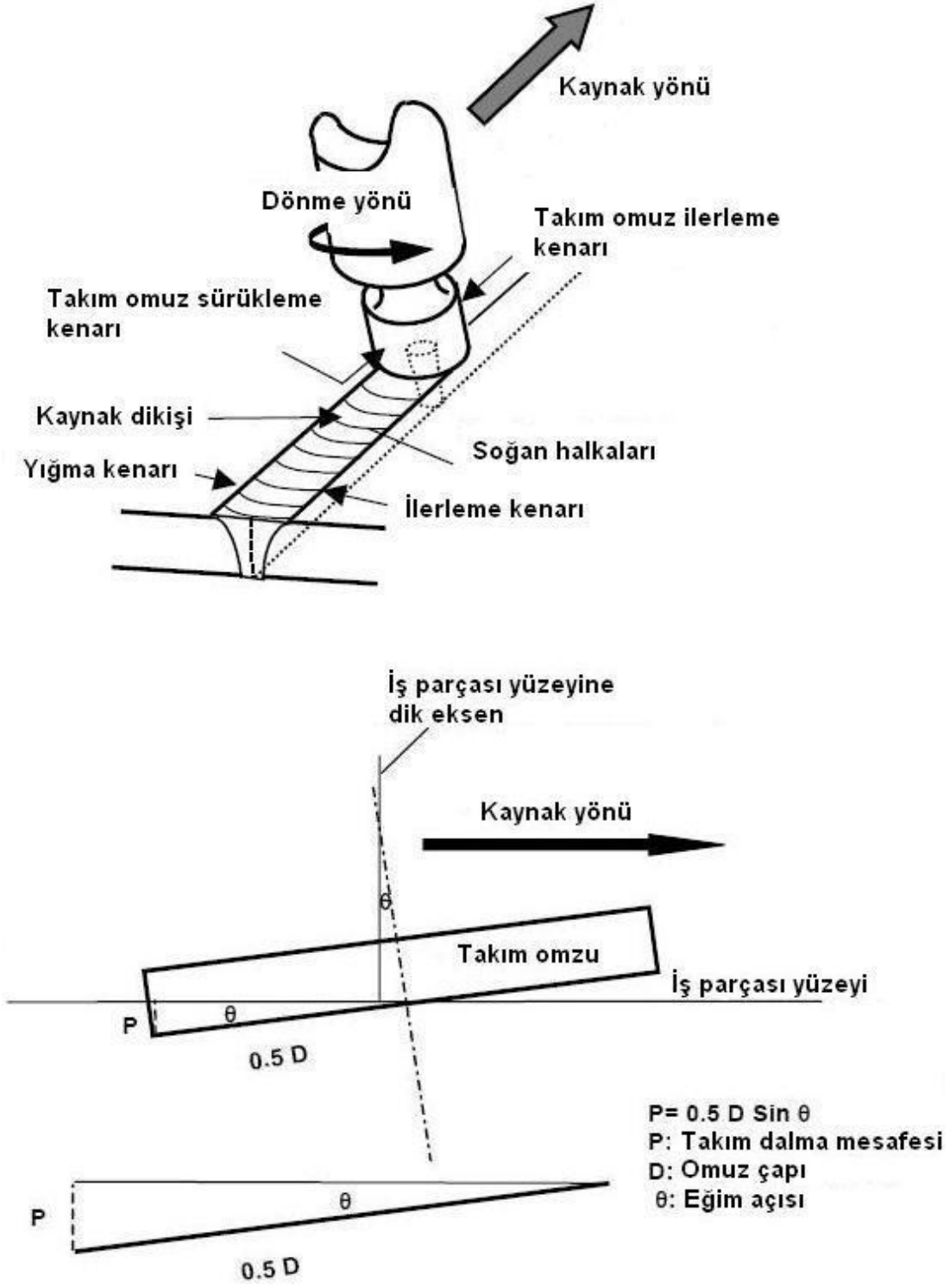


Şekil 2.45. Kaynak merkezinin farklı dönme ve ilerleme hızlarındaki tane yapısı

Şekil 2.45' te görüleceği üzere aynı kaynak hızlarında devir sayısının arttırılması malzemedeki tane yapısının büyümesi, aynı devir hızlarında ise kaynak hızının arttırılarak malzemeye ısı girdisinin düşürülmesi tane boyutunun küçülmesine neden olmaktadır.

Ayrıca Şekil 2.46' da görüleceği üzere takıma verilen eğim açısı, takım omzunun malzemeye dalma derinliğini ve takım omzunun kaynak metali ile temas eden yüzey alanını değiştireceği için önemlidir. Takım açısının arttırılması omuzun kaynak

malzemesine dalma derinliğini arttırırken, pimin dalma derinliği ve pimin kaynak bölgesindeki nüfuziyetini azaltacaktır.



Şekil 2.46. FSW yönteminin şematik gösterimi ve takım açısının değişimi ile takımın dalma derinliği arasındaki ilişki (Khaled, 2005)

2.4.3. Yöntemin uygulandığı malzeme ve kalınlıklar

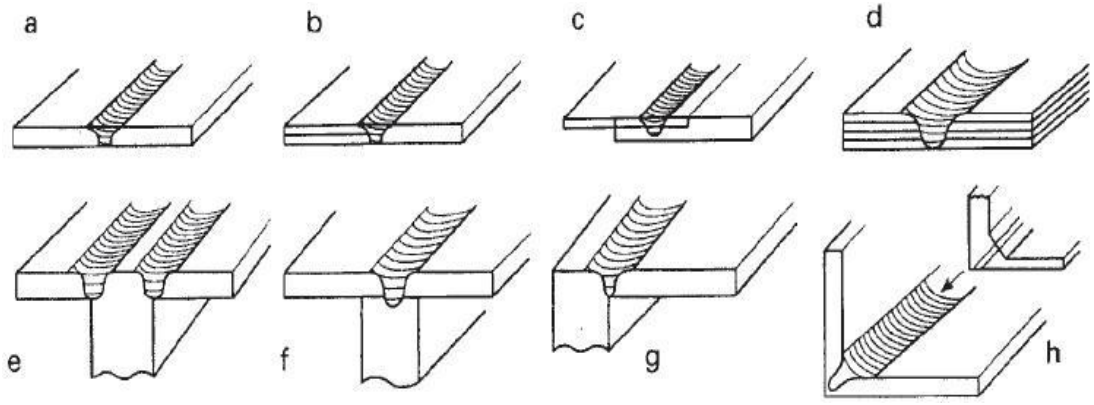
Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi kullanılarak birçok malzeme türü ve bunların kombinasyonları kaynak edilebilir. Özellikler 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxxx ve 8xxx serisi alüminyum dövme alaşımları kolaylık birleştirilebileceği gibi günümüzde döküm alaşımlarının kaynağında da başarı elde edilmiştir.

Bu yöntem uygulanarak alüminyum dövme alaşım levhalarının tek taraftan bir pasoda kaynak hazırlığına gerek olmaksızın 1,2 mm' den 50 mm' ye kadar kalınlıklarda kayna edilebilirliğine ulaşılmışken 100 mm' yi aşan kalınlıklarda çift taraflı kaynak gerçekleştirilir (Taban, 2004).

2.4.4. Yöntemde kullanılan birleştirme türleri

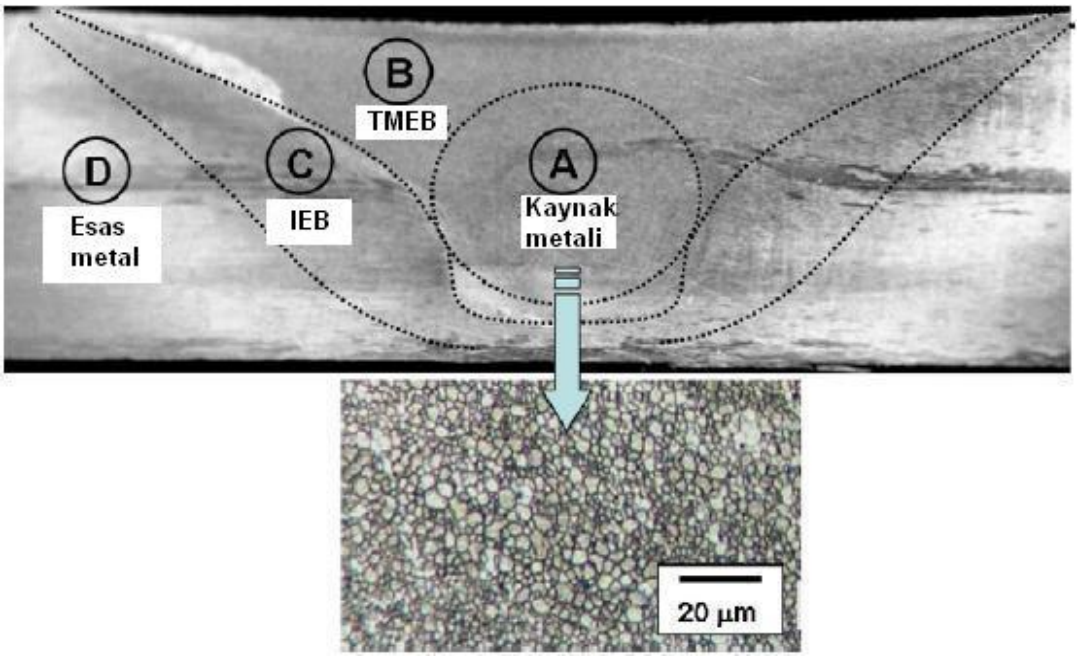
Sürtünme karıştırma kaynağında uygulanabilir birleştirme türleri; küt alın, bindirme, T-köşe, dış ve iç köşe, boyuna ve çevresel birleştirmelerdir. Şekil 2.47' de bahsedilen birleştirme çeşitleri gösterilmiştir.

Ayrıca sürtünme karıştırma kaynağı bir katı faz kaynak yöntemi olduğu için yer çekiminin zararlı etkisi olduğu tavan ve korniş tipi kaynak pozisyonlarından rahatlıkla kaynak yapılabilmektedir.



Şekil 2.47. FSW yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirme türleri a) Küt alın birleştirme, b) Birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme, c) Bindirme, d) Çoklu bindirme, e) İki pasolu T köşe birleştirme, f) Tek pasolu T-köşe birleştirme, g) Dış köşe birleştirme, h) iç köşe birleştirme (Kaluç, Taban, 2007)

2.5. Kaynağın Metalurjik Yapısı



Şekil 2.48. Tipik bir alın kaynağında gerçekleşen kaynak bölgeleri ve kaynak çekirdeğinin kesit görüntüsü (Buffa ve diğ., 2009)

Sürtünme karıştırma kaynağı daha önce bahsedildiği gibi ilk önce alüminyum ve alaşımlarının kaynağı için ortaya çıkmış bir yöntemdir. Yapılan araştırmalar sonucunda kaynak bölgesinin metalurjik yapısı incelendiğinde kaynak bölgesinde esas metal hariç üç farklı bölgeye rastlanmıştır. Yukarıdaki Şekil 2.48' te görüleceği üzere en dış kısımda "D" harfi ile belirtilen bölge esas metal,"B" harfi ile belirtilen bölge ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) , "C+D" bölgesi termomekanik etkilenmiş bölge ve son olarak "D" bölgesi kaynak metali olmak üzere kaynak bölgesi bölümlere ayrılmıştır. Aşağıda kaynak bölgeleri ile ilgili açıklamalar yer almaktadır.

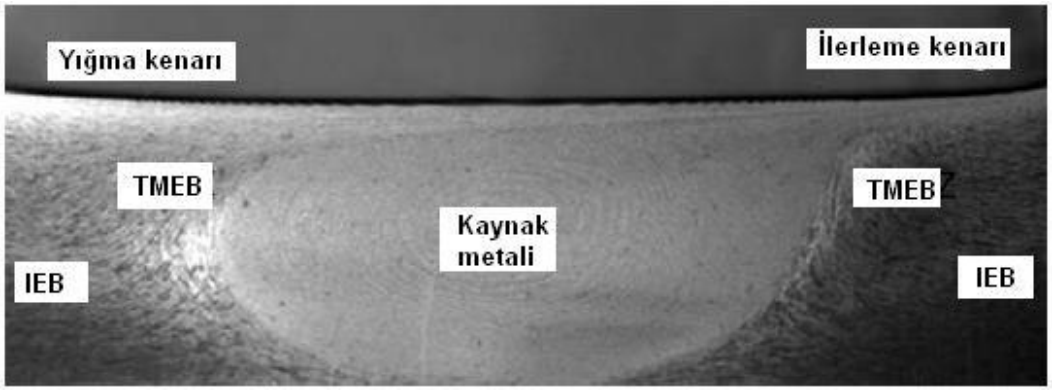
Esas Metal (EM): Bu bölgede malzeme mikroyapı özelliklerinde herhangi bir değişme veya dönüşüm meydana gelmemektedir. Bu bölge kaynak metalinden oldukça uzakta olduğundan ve çok düşük sıcaklıklara maruz kaldığından karıştırma esnasında oluşan yüksek ısıdan ve plastik deformasyondan etkilenmemektedir.

Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB): Kaynak metaline daha yakın, ısıdan etkilenmeyen ana metale komşu olan bölgedir. Bu bölgedeki malzeme karıştırma esnasında meydana gelen ısıdan etkilenir ve malzemenin yapı ve özelliklerinde kısmi değişimler ortaya çıkar. Bölgede plastik deformasyon meydana gelmez. Bölge optik

mikroskop ile incelendiğinde ergitme esaslı kaynak yöntemlerinin aksine esas metalden farklı görülmemektedir.

Termomekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB): Bu bölge, yeniden kristalleşen kaynak çekirdeğini çevreleyen nispeten ince bir bölgedir. Bu bölge kaynak çekirdeği ile benzer bir ısıl işleme fakat daha az plastik deformasyona maruz kalır. Deformasyon enerjisinin miktarı yeniden kristalleşmeyi başlatacak kadar yüksek değildir ve kaynak sonrasında bu bölgede kısmen deforme olmuş, homojen olmayan tane yapısı oluşur. Termomekanik etki altındaki bölgenin dış sınırı (kaynak çekirdeğinden uzak olan kısım) çoğunlukla malzemenin en zayıf bölgesidir. Bunun nedeni muhtemelen çökeltilerin sağladığı sertleşme kaybı ile birlikte dislokasyon yoğunluğundaki azalmadır (Ericson, 2007)

Kaynak Metali (KM): Kaynak metali, TMEB içinde yeniden kristalleşmiş bölge olup ince tanelidir. Kaynak metalinde kaynak bölgelerinin kesit görüntülerine bakıldığında keskin hatlarla çizgileri bellidir. Yöntem değişkenleri, takım geometrisi, iş parçasının sıcaklığı ve malzemenin ısı iletkenliğine bağlı olarak değişik biçimlerde kaynak metal yapıları gözlemlenmektedir.

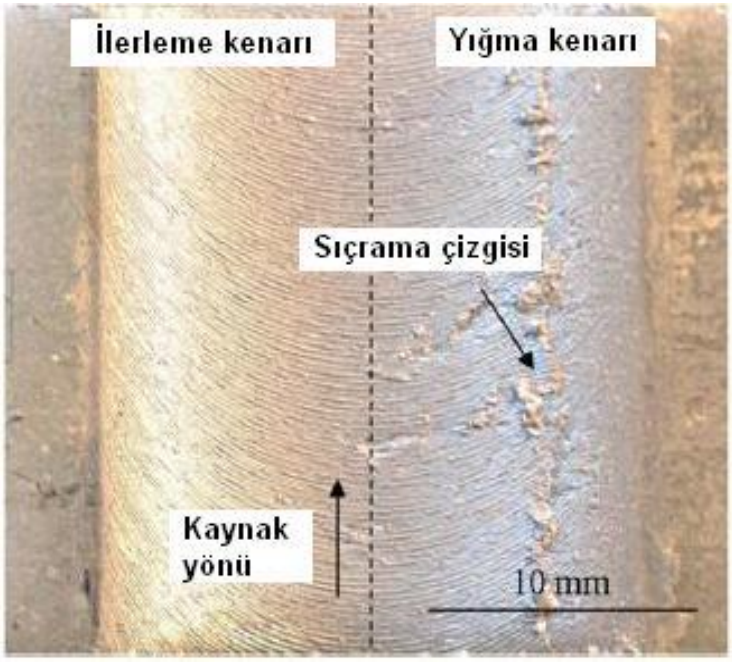


Şekil 2.49. FSW yöntemi ile kaynak sonrasında kaynak bölgesinin tipik görünümü ve oluşan yapısal bölgeler (Mishra, Ma, 2005)

2.6. İşlem Parametrelerinin Kaynak Kusurlarına Etkisi

Daha önce kaynak parametrelerinin kaynak edilecek malzemenin türüne, kalınlığına göre değişkenlik gösterebileceğinden bahsedilmişti. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde kaynak parametrelerinin kaynak yapısına etkileri oldukça fazladır ve

optimum değerler dışında parametreler ile kaynak yapılması kaynak kusurlarını arttıracaktır.



Şekil 2.50. Sürtünme karıştırma kaynağında yığma kenarı üzerindeki sıçramış malzeme görüntüsü (Hamilton ve diğ., 2008)

Kaynağın oluşumu büyük oranda seçilen takım boyutuna göre değişir. Eğer takım basıncı çok düşük ise, yeterli enerji oluşturulamaz (kuru sürtünme). Bu durum birleşmenin olmamasına veya kaynakların kusurlu olmasına neden olacaktır. Benzer olarak, yüksek hızlarda kaynak yapıldığında kaynağın altında küçük kaynaklanmamış olukların oluşma riski vardır. Eğer takım basıncı çok yüksek ise mekanik çarpılma meydana gelebilir. Takım omuz basıncı, takım devri ve kaynak (ilerleme) hızının bir fonksiyonudur. Malzeme kalınlığına bağlı olan ucun batma derinliği kaynak kökünde (altında) yeterli plastik deformasyon sağlamak için önemlidir. Eğer batma derinliği çok küçük ise, bu durum kaynak kökünde birleşmeyen bölge oluşturur ve çekme veya eğme esnasında bu bölgeden erken bir kırılma oluşur.

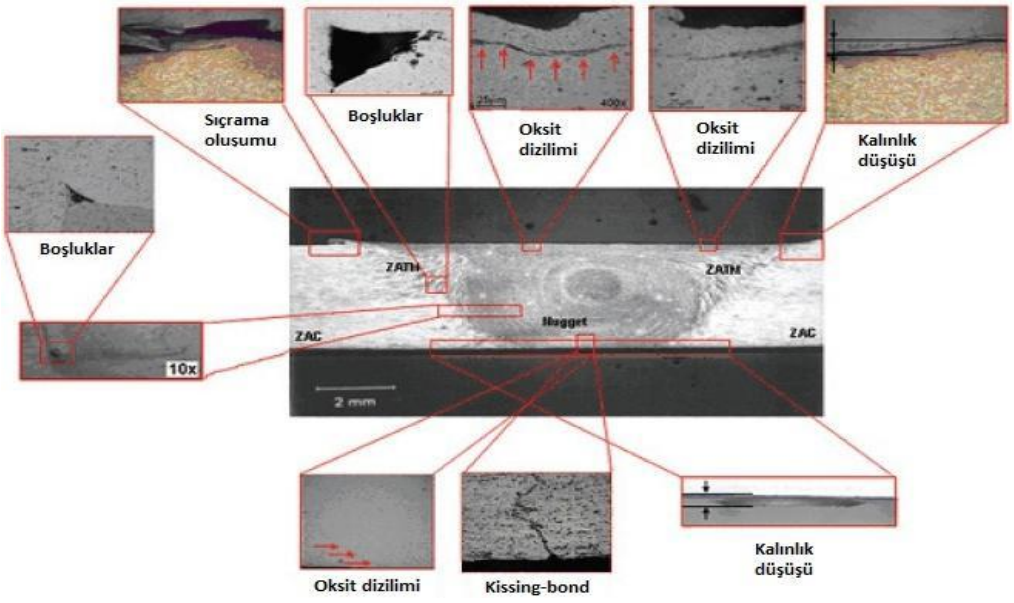
Aşağıda sürtünme karıştırma kaynağında optimum işlem parametreleri sağlanmadığında oluşabilecek genel kusur çeşitleri sıralanmış olup, bu kusurlar Şekil 2.51 ve 2.52' de verilmiştir.

Boşluklar; yüzeyin altında oluşan hacimsel ve malzeme içermeyen kusurlardır.

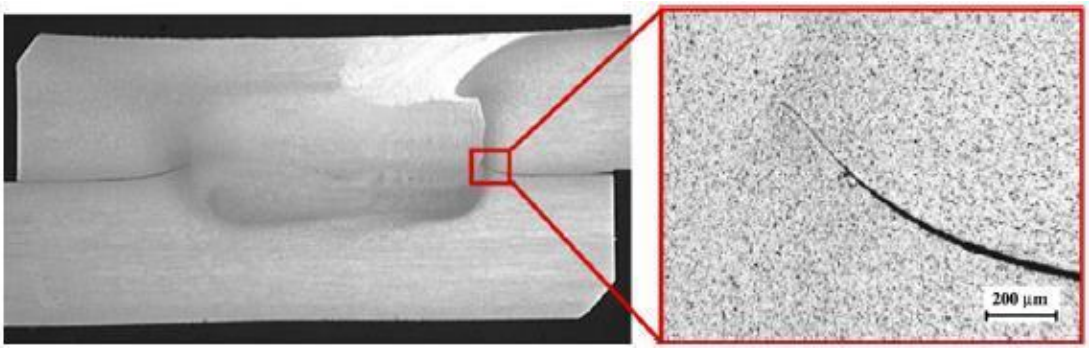
Nüfuziyetsizlik; alın kaynağındaki bu kusur deforme olmayan malzeme kalınlığı ile karakterize edilir. Yetersiz dalma derinliği, kısa takım ucu veya birleşme çizgisi ile takımın zayıf hizası bu kusura neden olabilirler.

Temas yüzeyi kusuru; kaynak üst yüzeyinin altındaki küçük boşluklardır ve kaynak yüzeyinin hafif talaşlı işlenmesi ile kaldırılabilirler.

Entrapped oksitler; "kissing-bonds" veya "lazy S" diye adlandırılan bu kusurlar yanlış bir şekilde kırılan ve karıştırılan yüzeylerden başlarlar, kaynakta yarı sürekli oksit tabakaları bırakırlar. Çok az mekanik dayanım sağlarlar. Yüzeyler tamamen moleküler bir seviyede temasta olduğundan, bu çeşit kusurların ortaya çıkarılması çok zordur. "Kissing-bond" katı hal birleştirmelerinde karşılaşılan özel tipte bir kaynak kusurudur. Bu kusur, malzemenin daha önceden ayrı veya ayrılmış olan iki bölgesinde çok az veya hiç metalik birleşmenin olmaması ile oluşur. "Kissing-bond" genellikle malzemenin statik yük taşıma kapasitesini hafifçe düşürür, fakat darbe dayanımını ve yorulma ömrünü önemli ölçüde azaltır. Sürtünme karıştırma kaynağında malzemenin sürtünme ile uç üzerine yapışmasından ziyade, ucun ilerlemesi esnasında malzemenin yetersiz uzaması "kissing-bond" kusurunun ana sebebidir (Oosterkamp ve diğ., 2004).



Şekil 2.51. SK kaynağında karşılaşılabilecek tipik kaynak hataları (Santos ve diğ., 2008)



Şekil 2.52. Bindirme kaynağında karşılaşılan kaynak hatası (Fersini ve diğ., 2008)

İşlem parametreleri, verilen tolerans sınırları arasında tutulduğunda, sürtünme karıştırma kaynağı çok az kaynak kusuru oluşturur. Cüruf oluşumu, porozite ve sıcak çatlama gibi ergime kaynağında görülen problemler sürtünme karıştırma kaynağında görülmez fakat boşluklar gibi geleneksel kaynak hataları görülebilir.

Özellikle "kissing-bond" diye adlandırılan kusurların belirlenmesinde güvenli tahribatsız deney metotlarının olmaması bir problem olarak düşünülebilir. TWI tarafından yapılan bir araştırmada, 2014 Al alaşımında kusurların bazı kaynak parametrelerinin değişimi ile oluştuğu belirlenmiştir. Bu parametreler; kaynak hızı, kaynak kuvveti, takım uç yüksekliği ve yüzey oksit kalınlığıdır.

2.7. Alüminyum Dışındaki Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi

Sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili ilk araştırmalar Al alaşımları üzerinde yoğunlaşmıştır. Al alaşımları dışında, Cu, Ti, Mg, çelik alaşımları ve termoplastik malzemelerin SKK ile birleştirilmesi konusundaki araştırmalar devam etmektedir. Bu konuda yapılan bazı araştırma sonuçları şu şekildedir.

2.7.1. Bakır alaşımlarının FSW yöntemiyle birleştirilmesi

Bakırın ısı iletim katsayısı büyük olduğu için, konvansiyonel ergitme kaynak teknikleri ile birleştirmek oldukça zordur. Sürtünme karıştırma kaynağının bir katı faz kaynağı olması bakır ve alaşımlarının bu yöntemle birleştirilmesini cazip hale getirmiştir. Saf bakır ve pirinç alaşımları (60/40) ile yapılan SKK araştırma sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

- SKK yöntemi ile 1,5 – 50 mm kalınlığındaki bakır alaşımlı plakalar başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.

- Karıştırıcı aparat geometrisi ve malzemesi kaynakla birleştirilecek olan plaka kalınlığına uygun olmalıdır. Yapılan araştırmalarda 3 mm plaka kalınlığına kadar karıştırıcı aparat malzemesi olarak sıcak iş takım çeliğinin uygun olacağı, 10mm üzerindeki et kalınlıklarında ise tungsten bazlı sinter metal malzemelerin kullanılmasının daha etkili olduğu belirtilmiştir (Mishra ve diğ., 2005).

- Kaynak parametrelerinin kaynak kalitesini oldukça etkilediği görülmüştür. Sabit dönme hızında (500dev/dak) kaynak ilerleme hızı arttıkça, kaynak bölgesindeki gözenek oluşumunun arttığı gözlenmiştir.

- Karıştırıcı aparat omuz çapı küçüldükçe kaynak mukavemetinin arttığı görülmüştür.

- TIG ve SKK ile birleştirilen bakır alaşımlarında benzer mekanik özellikler elde edilmiştir. Her iki proses ile birleştirilen kaynaklı numunelerin elektriksel iletkenlik değerlerinde %5 oranında azalma olmuştur (Sayer, 2007).

2.7.2. Titanyum alaşımlarının FSW yöntemiyle birleştirilmesi

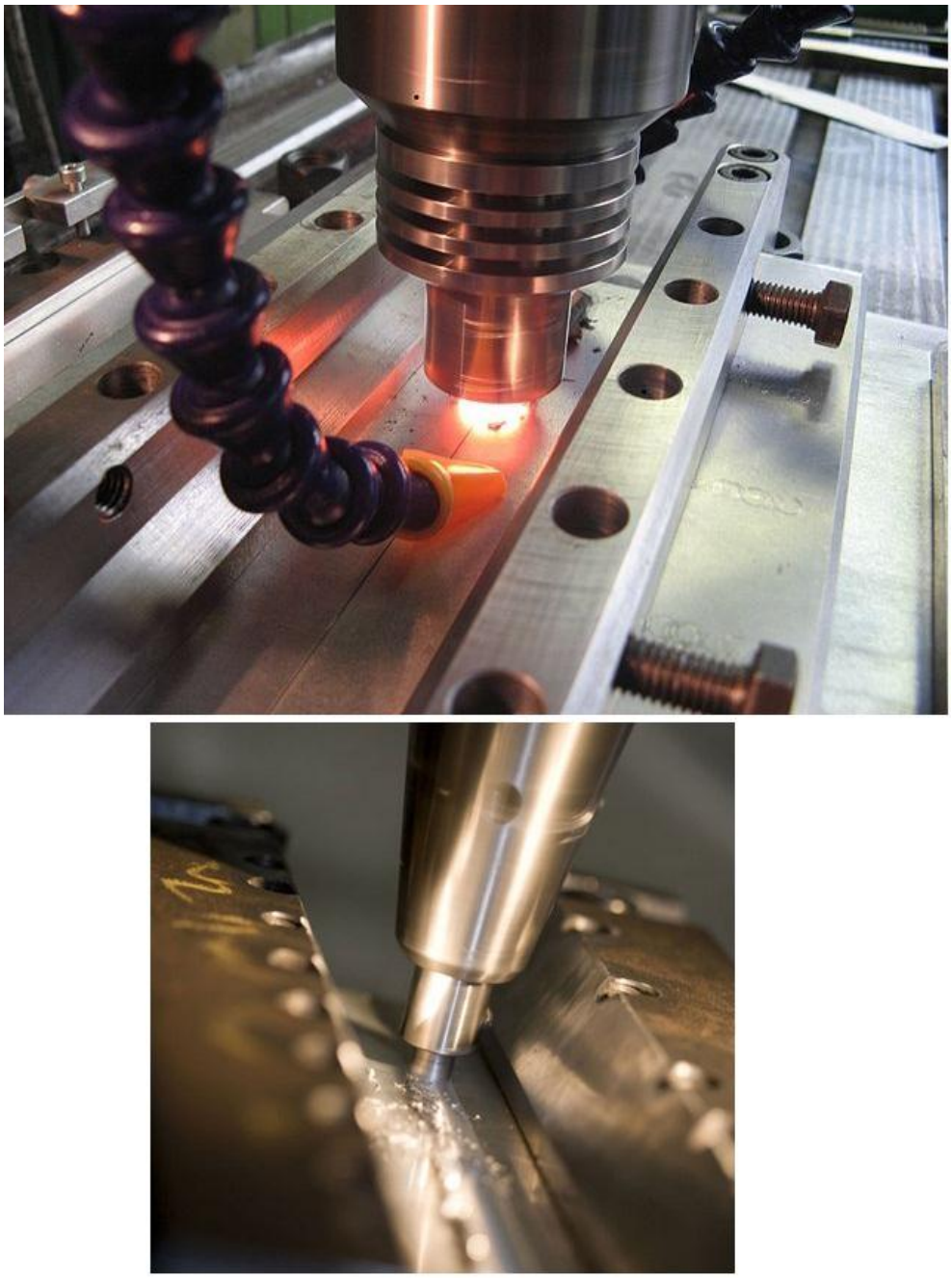
Her ne kadar birçok titanyum alaşımları gaz tungsten ark kaynağı gibi geleneksel ergitme prosesleri ile kaynak yapılabilse de kaynak sonrası ısıl ilsem gerektirebilmektedir. Bu ilave işlem üretim maliyetini arttırmaktadır. Bir katı hal kaynak prosesi olan SKK yönteminin kaynak sonrası ısıl işleme olan ihtiyacı ortadan kaldırması beklenmektedir. Ne yazık ki titanyum alaşımlarının SKK ile ilgili bilgiler su an için yetersizdir. İlk araştırmalar SKK yöntemiyle titanyum alaşımlarının birleştirilmesinde etkili bir kaynak yöntemi olduğunu gösterse de yöntemin uygulanması sırasında mikroyapısal gelişimin anlaşılabilmesi için daha çok araştırma yapılması gerekmektedir (Mishra, 2005).

2.7.3. Çelik alaşımlarının FSW yöntemiyle birleştirilmesi

Ergitme kaynağı proseslerine göre FS kaynağındaki düşük ısı girdisinin IEB' de daha az metalurjik değişiklik yapması ve kalın kesitli birleşmelerin kaynağında çok

önemli olan çeliklerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmeyi minimize etmesi beklenmektedir.

Ayrıca çeliklerdeki hidrojen çatlağı problemi ile, SKK prosesinin katı hal kaynağı oluşu sebebiyle karşılaşılmaz. Ek olarak katı hal SKK prosesinde, kaynakla ortaya çıkan kokulu gazlar da oluşmaz. Bu avantajlar SKK yönteminin çeliğin birleştirilmesinde birçok uygulama için avantajlı hale getirmektedir.



Şekil 2.53. FSW yönteminin yüksek mukavemetli çeliklere uygulanmasına örnek

SKK' nın çeliklerde uygulanabilirliği üzerine yapılan araştırmalar yöntemin farklı çelik tiplerinin birleştirilmesi uygulamalarında kullanılabilirliği açısından ümit vericidir. Bunların yanında çeliklerin SKK' ında kullanılan uygun takım malzemelerinin seçimi kritik bir konudur. Yöntem için temel gereksinim takım ve iş parçası malzemesi arasında sertlik ve yüksek sıcaklık özellikleri arasındaki uygun farkı korumaktır. Çünkü çelikler çok yüksek sertliğe ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptir. Takım malzemesinin 1000 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda iyi aşınma direnci ve tokluk göstermesi önemlidir (Mishra, 2005).

2.7.4. Magnezyum alaşımlarının FSW yöntemiyle birleştirilmesi

Magnezyum alaşımlarının düşük şekillendirilebilme özelliklerinden dolayı endüstriyel kullanımlarda parçalar döküm yöntemi ile üretilmektedir. Bu yöntemle üretilen Mg alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde gözenek oluşmaktadır. Ayrıca malzemenin yüksek genleşme katsayısı kaynaklı birleştirme sonrasında parçaların çarpılmasına neden olmaktadır. SKK yukarıda belirtilen olumsuzlukların ortaya çıkmaması için iyi bir seçimdir (Sayer, 2007).

2.7.5. Plastiklerin FSW yöntemiyle birleştirilmesi

Plastikler birçok uygulamada kullanılmaktadır ve verimli bir şekilde birleştirilmeleri önemlidir. Plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı basit birkaç adımda yapılmaktadır. Dönen bir takım sıkıca bağlanmış iki iş parçasının arasına dalmaktadır. Pim ve iş parçası arasındaki sürtünme malzemenin ısısının yükselmesine sebep olur ve takım birleşme hattı boyunca hareket eder. Malzeme takım etrafında hareket ederken kaynak bölgesinde karışır. Proses süresince birincil ısı üretimi takım ve iş parçası arasındaki sürtünme ile olur. Bununla beraber polimerler, artan sıcaklıkla kendiliğinden yağlanma eğilimindedir, bu nedenle sık sık dış ısı ilavesi gerekir.

Kaynaklı parça soğurken tüm kaynak boyunca uniform soğuma hızının sağlanması çok önemlidir. Eğer dışarıdaki malzeme içeridekine göre daha hızlı soğursa katı bir kabuk oluşur. İçerdeki tabakalar daha geç soğuduğu için malzeme büzülür ve kabuktan ayrılır.

3. ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLANMASI

Alüminyum ve alaşımlarının sahip olduğu üstünlükler ve getirdiği avantajlar sayesinde günümüz endüstrisinde önemi oldukça fazladır. Alüminyumum yıllar içindeki üretim miktarları incelendiğinde endüstrideki kullanım alanlarının artması ile her geçen yıl dünya genelinde üretim miktarını arttırmış, sanayi alanında dünyada sözü geçen ülkeler arasında önemini giderek arttırmıştır. Alüminyumun geçmişten gelen bu trendi incelendiğinde sürtünme karıştırma kaynak yöntemi gibi yeni nesil yöntemlerle kaynak edilebilmesi sonucunda gelecekte sahip olduğu önemi koruyup arttıracağı aşikardır.

Alüminyumun MIG, TIG ve plazma ark gibi ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile kaynağı daha önce de bahsedildiği üzere bağlantı mukavemetinde olumsuz sonuçlara yol açması araştırmacıları katı faz kaynak yöntemlerine yöneltmiş ve 1990' lı yılların başlarında sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem sağlamış olduğu avantajlar sayesinde alüminyum gibi stratejik öneme sahip metallerin kaynağında büyük üstünlük sağlamış ve günümüzde yapılan çalışmalar sayesinde endüstrideki kullanım alanını yaygınlaştıracak yenilikler bulunmaktadır.

Yapılan literatür araştırmaları sonucu yöntemin genellikle alın kaynağı uygulamalarında kullanıldığı görülmektedir. Çünkü yöntemin doğası gereği bindirme pozisyonunda bir takım kaynak kusurları içerme olasılığı fazladır. Bu nedenle deneysel çalışma planlanırken literatüre ışık tutması açısından bindirme pozisyonunda kaynak yapılarak neticeleri paylaşılmıştır. Ayrıca kaynak malzemesi olarak EN AW-5005 malzemesi seçilerek daha önce yapılan araştırmalarda kullanılmayan bir malzeme üzerinde araştırma yapılmıştır. Bunun dışında yöntem üçgen, kare profilli takımların dışında daha önce sadece nokta kaynağı uygulamalarında araştırılması yapılan pimsiz takım kullanarak gerçekleştirilmiş ve ilginç sonuçlara ulaşılmıştır. Son olarak yapılan testler sonucunda optimum kaynak parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen bağlantıların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması için çekme, eğme ve yorulma mukavemetleri tespit edilmiştir.

Bunun dışında bağlantılarda EM-TMEB-KM-TMEB-EM' in ışık mikroskobu altında makroskobik görüntüleri incelenerek sertlik taramaları gerçekleştirilmiş, yorulma deneyi sonrası deney parçalarının kırılma yüzeyleri elektron mikroskobu ile incelenmiş, elde edilen sonuçların nedenleri, farklı pim veya pimsiz takımların kaynak metali ve diğer bölgeler üzerindeki etkileri araştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Genel

Bu çalışmada deney malzemesi olarak EN AW-5005 (EN AW-AlMg1) dövme alaşımı levhalar kullanılmıştır. Deney malzemesi temin edilip kaynak işlemi için giyotin makasta uygun boyutlara getirildikten sonra uygun kaynak parametreleri kullanılarak üçgen, kare ve pimsiz karıştırıcı takımlar ile bindirme kaynağı gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminden sonra parçalar görsel kontrol ile incelenmiş, çekme, eğme, yorulma, metalografik incelemeleri ve sertlik taramaları yapılmış, kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.2. Deney Malzemesi

Bu çalışmada kullanılan 1,5 mm kalınlığındaki EN AW-5005 serisi alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırası ile Tablo 4.1 ve Tablo 4.2‘ de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deney malzemesinin kimyasal bileşimi

Alaşım		Kimyasal Bileşim (ağırlıkça %)									
Numerik	Kimyasal Sembol	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al (minimum)
EN AW-5005[(1)]	EN AW-AlMg1	0,105	0,289	0,008	0,039	0,753	0,003	0.,002	0,033	0,001	98,730
EN AW-5005[(2)]	EN AW-AlMg1	0,30	0,70	0,20	0,20	0,50 -1,1	0,10	-	0,25	-	Kalan

[(1)] KOSGEB İkitelli Şubesi tarafından yapılan spektral analiz sonuçları
[(2)] ASM Metals Handbook verilerine göre

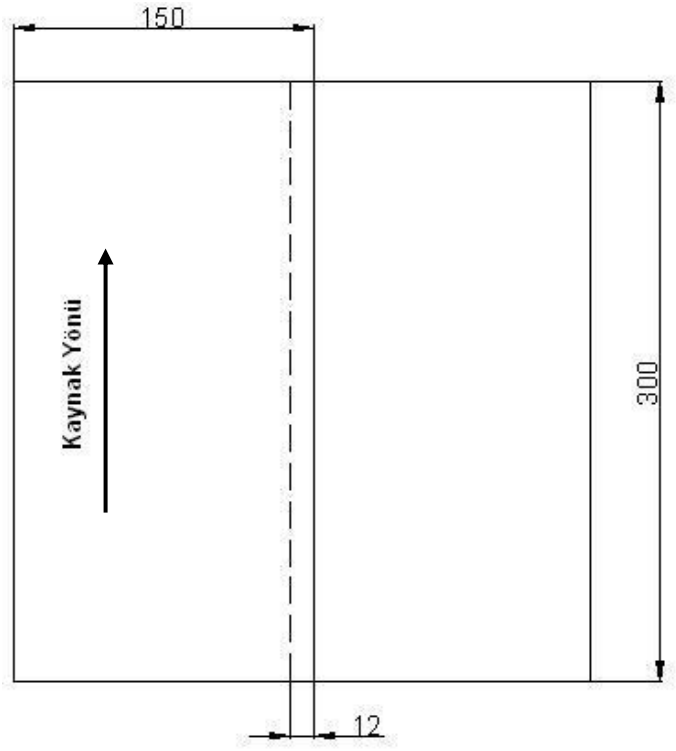
Tablo 4.2. Deney malzemesinin mekanik özellikleri

Alaşım		Akma Mukavemeti ($Rp_{0.2}$) MPa (min.)	Çekme Mukavemeti (Rm) MPa
Numerik	Kimyasal Sembol		
EN AW-5005 H14[(1)]	EN AW-AlMg1	115	145-185
EN AW-5005 H14[(2)]	EN AW-AlMg1	150	160

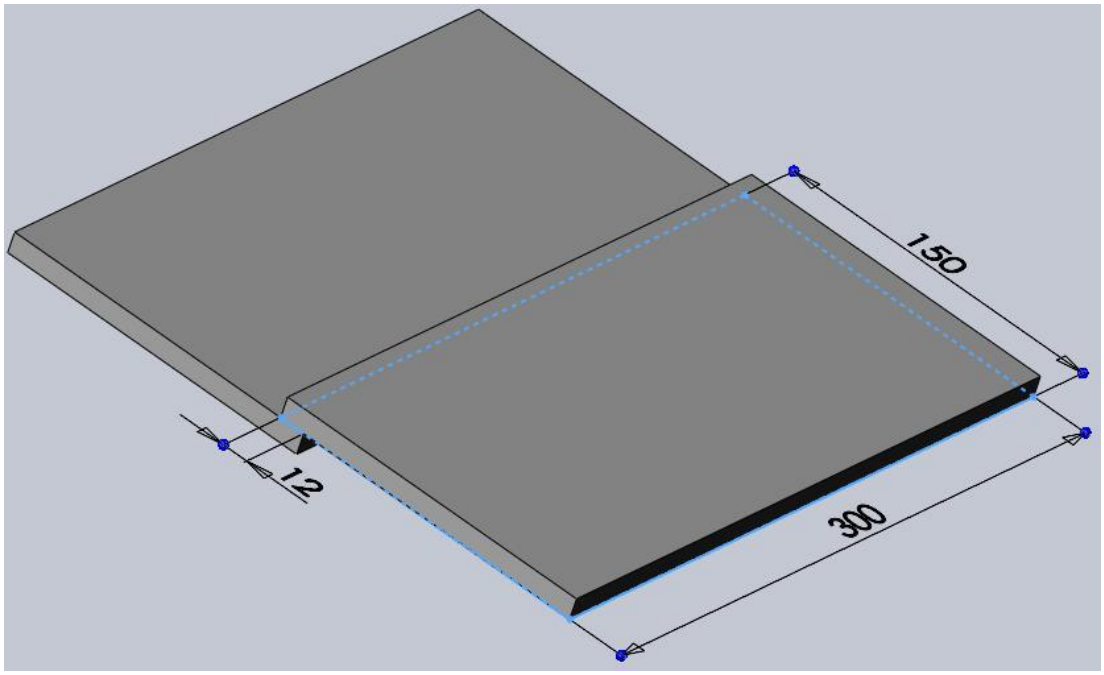
[(1)] ASM Metals Handbook verilerine göre
[(2)] Deneysel olarak bulunan değer

4.3. Deney Parçalarının Boyutları

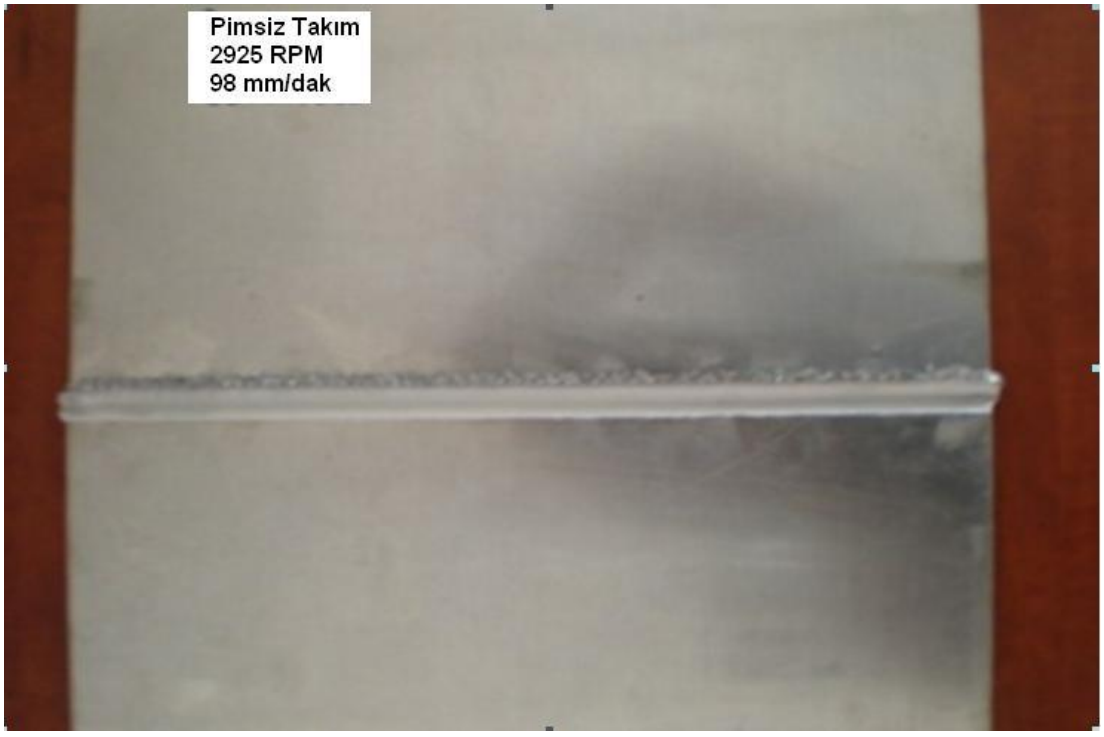
Deneysel çalışma için temin edilen levha üzerinde kaynak edilecek parçalar giyotin makas ile 150 x 300 mm' lik plakalar halinde kesilmiştir. Şekil 4.1' de kaynak edilecek parçaların boyutları verilmiştir. Kesim işlemi tamamlandıktan sonra parçaların bindirme pozisyonunda manuel freze tezgahında kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Kaynak edilecek levhaların boyutları



Şekil 4.1. Kaynak edilecek levhaların boyutları (Devam)



Şekil 4.2. Yukarıdaki şekilde boyutları verilen deney parçalarının pimsiz takım ile kaynaklı durumu

4.4. Kaynak Öncesi Yapılan İşlemler

Deney parçaları kaynak işlemi için istenilen boyutlarda kesildikten sonra kaynak işleminden önce yüzeyinde bulunabilecek yağ ve kir tabakasını ortadan kaldırmak için alkol ile silinip temizlenmiştir. Ayrıca kesim yerlerinde çapak bulunan bölgeler giderilmiştir.

4.5. FSW (Sürtünme Karıştırma Kaynağı) Yönteminin Uygulanması

Hazırlanmış olan alüminyum levhalar geleneksel freze tezgahı tablasına rijit bir şekilde bağlandıktan sonra literatür araştırmaları sonucunda belirlenen kaynak parametreleri ile kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bindirme kaynağı yapılırken literatür araştırmaları sonucunda takımın dönme yönüne göre hangi levhanın üst yada altta kalacağı bağlantının mukavemet özelliklerine etki ettiği için büyük önem arz etmektedir. Kaynak parametreleri bölümünde bu konuyla ilgili açıklama yapılacaktır. Ayrıca kaynak edilecek levhaların kalınlığı 1,5 mm olduğu için parçaların tablaya rijit bir şekilde bağlanması ve bağlantı papuçları arasına lamalar konularak kaynak esnasında ısıdan dolayı oluşabilecek çarpılmalarının kısmen önüne geçilmiştir.



Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynak (FSW) yönteminde kullanılan üniversal freze tezgahı



Şekil 4.4. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde parçaların rijit olarak freze tablasına bağlanması ve kaynak işleminin yapılışı



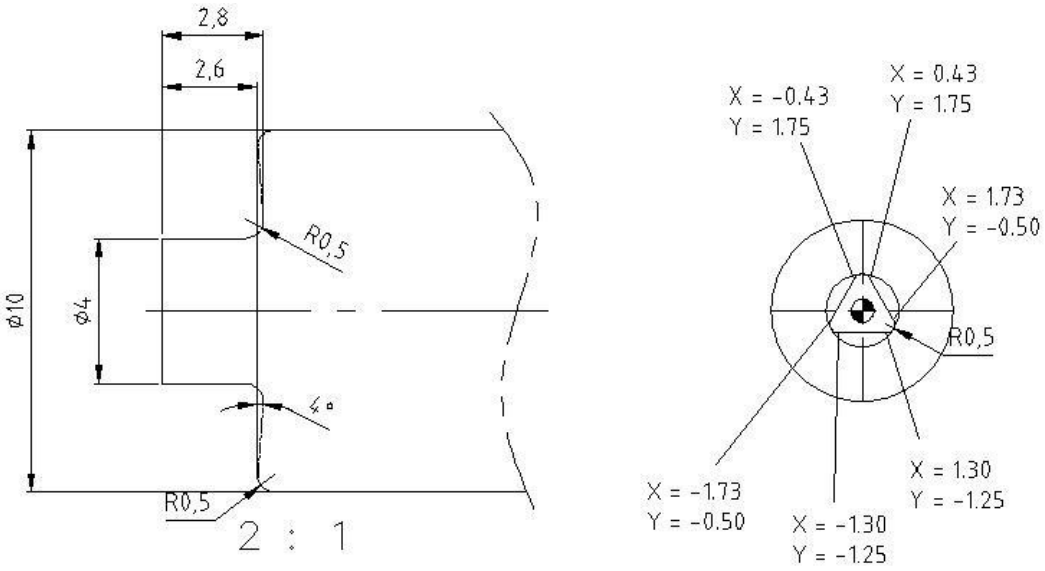
Şekil 4.5. FS kaynağı yapılmış deney parçaları

4.5.1. Yöntemde kullanılan takım

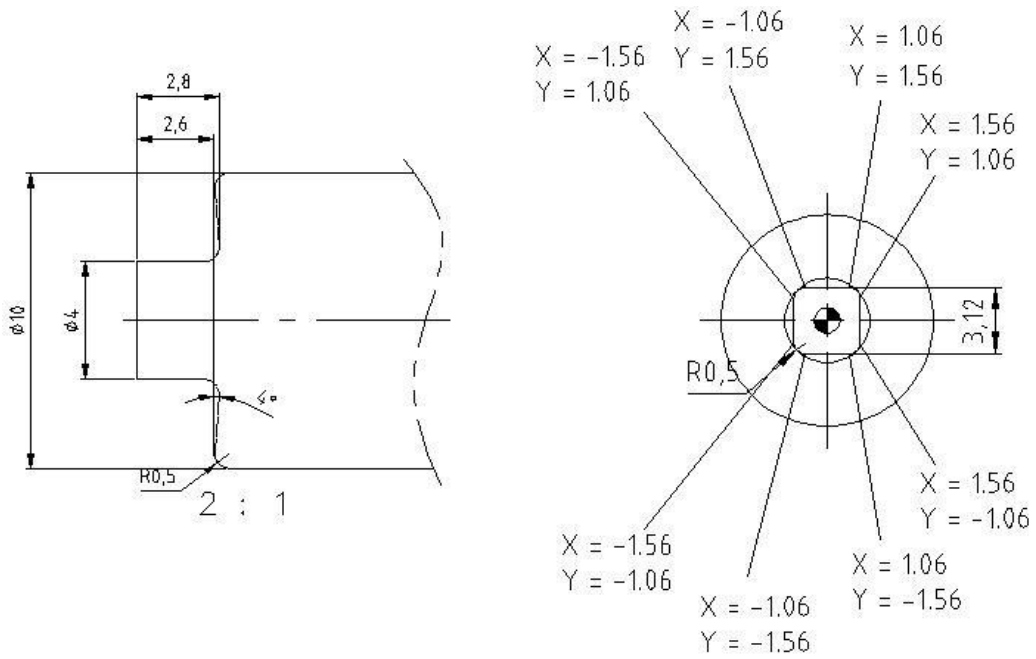
Sürtünme karıştırma kaynağı ile gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde yapılan literatür araştırması sonucunda karıştırıcı takım malzemesi olarak yüksek hız çeliği (HSS) kullanılmıştır. Karıştırıcı takımın omuz çapı 10 mm olarak seçilmiş, kaynak işlemlerinde karıştırıcı pim olarak ise üçgen, kare profillerinin yanı sıra ucunda pim olmayan ve omuz kısmına profil açılmış karıştırıcı takım kaynak prosesinde kullanılmıştır. Takımların toplam boyları standart tutularak 100 mm olarak seçilmiştir.

Üçgen, kare ve pimsiz profilli karıştırıcı takımlar torna ve freze tezgahında şekillendirildikten sonra 58-60 HRC sertliği ulaşması için ısıl işleme gönderilmişlerdir. Ucunda pim bulunan üçgen ve kare profilli takımların pim boyu 2,6 mm olarak seçilmiş ve kaynak esnasında takımın eğme açısı dik eksenle 1,5° olacak şekilde ayarlanmıştır. Pimsiz takımla kaynak işlemi esnasında ise freze miline eğim verilmeden tablaya dik olacak şekilde kaynak yapılmıştır. Pimli takımla yapılan kaynak işlemlerinde takımın malzemeye dalma derinliği pim boyu ile aynı tutulurken pimsiz takımın kullanıldığı kaynak işlemlerinde ise takım malzemeye 0,8 mm girecek şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca kaynak prosesi sırasında kullanılan takımlardaki profillerin sivri olmaması nedeniyle kaynak başlangıçları bağlı parçaların yan yüzeylerinden olacak şekilde ayarlanmış, takımım parçaya 3-4 cm girişi manuel olarak yapılıp 5-10 sn arası takım kaynak yönünde hareket ettirilmeyip gerekli ısı sağlandıktan sonra otomatik ilerlemeyle kaynak işlemi tamamlanmıştır.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’ de kullanılan üçgen ve kare profilli karıştırıcı takımların teknik resimleri yer almaktadır.



Şekil 4.6. Üçgen profilli karıştırıcı takımın teknik resmi



Şekil 4.7. Kare profilli karıştırıcı takımın teknik resmi



Şekil 4.8. Üçgen, kare ve pimsiz karıştırıcı takımların resimleri

4.5.2. Yöntemde kullanılan kaynak parametreleri

Yapılan literatür araştırılmaları sonucunda sürtünme karıştırma kaynak yöntemi üç farklı karıştırıcı takım dizaynı, iki farklı takım rotasyon hızları ve iki farklı kaynak ilerleme hızları baz alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3 ve Tablo 4.4' te kullanılan parametrelerin özeti yer almaktadır.

Tablo 4.3. Karıştırıcı uç profili, takım dönme ve ilerleme hızları

KARIŞTIRICI UÇ PROFİLİ	TAKIM DÖNME HIZI (RPM)	İLERLEME HIZI (mm/dk)
ÜÇGEN	2478	200
KARE	2478	200
PİMSİZ A	2925	98

Tablo 4.4. Deneysel çalışmada kullanılan parametrelerin toplu gösterimi

KAYNAK YÖNTEMİ	MALZEME	KALINLIK (mm)	KAYNAK EDİLEN PARÇA BOYU (mm)	KAYNAK EDİLEN PARÇA GENİŞLİĞİ (mm)	PARÇALARIN ÜST ÜSTE BİNDİRİLME GENİŞLİĞİ (mm)	OMUZ ÇAPI (mm)	PİM YÜKSEKLİĞİ (mm)	TAKIM EĞME AÇISI
BİNDİRME (Pimli takım)	Al 5005	1,5	300	150	12	10	2,6	1,5°
BİNDİRME (Pimsiz takım)	Al 5005	1,5	300	150	12	10	-	0°

4.6. Deney Numunelerinin Görsel İncelenmesi

Yapılan kaynak işleminden sonra deney numuneleri görsel incelemeye tabi tutulup parçalardaki çarpılmalar, dikiş görünüşleri, kaynağın başlangıç ve bitiş bölümleri dikkate alınmıştır.

Standartlara göre deney numunelerinin başlangıç ve bitiş bölgesinden 25 mm' lik kısımların atılarak diğer bölgelerden deney numunesi çıkarıldığı için kaynak başlangıç ve bitiş bölgeleri sorun yaratmamıştır.



Şekil 4.9. Üçgen profilli takımın kaynak başlangıç bölgesi



Şekil 4.10. Üçgen profilli takımın kaynak bitiş bölgesi



Şekil 4.11. Pimsiz takımın kaynak bitiş bölgesi

Kaynak dikişleri incelendiğinde ise üçgen ve kare profilli takımlarda çok az malzeme sıçramalarına rastlanmasına rağmen pimsiz takımlı kaynak parçalarında kaynak bağlantısının sağlam olması ve takımın omuz kısmı malzemedeki plastik deformasyonu sağladığı için yığma bölgesinde malzeme sıçramaları oldukça fazladır. Bu nedenle bu parçalara kaynak işleminden sonra çapak alma işlemi uygulanmıştır. Kaynaklı parçaların kök kısımlarına bakıldığında ise herhangi bir kusura rastlanılmamıştır.



Şekil 4.12. Üçgen profilli takımın kaynak dikiş ve kök bölgesinin görüntüsü



Şekil 4.13. Kare profilli takımın kaynak dikiş ve kök bölgesinin görüntüsü



Şekil 4.14. Pimsiz takımın kaynak dikiş görüntüsü

4.7. Deney Numunelerinin Hazırlanma Esasları

4.7.1. Deney numunelerinin kodlanması

Deneyler gerçekleştirilirken test edilen numunelerin hangi parametreler ile üretildiğinin takibi için deney numunelerinde kodlama sistemine gidilmiştir. Bu sayede yapılan deneylerin birbiri içinde kıyaslanması daha basit ve anlaşılır kılınmıştır.

4.7.1.1. Kullanılan karıştırıcı pim profilinin kodlanması

Yapılmış olan deneylerde daha önce bahsedildiği üzere üç farklı pim profili kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

U: Üçgen pim profilli karıştırıcı takım

K: Kare pim profilli karıştırıcı takım

P: Pimsiz karıştırıcı takım

4.7.1.2. Deney türünün kodlanması

- C: Çekme deneyi
- E: Eğme deneyi
- EK: Kök eğme
- EY: Yüz eğme
- Y: Yorulma deneyi
- M: Metalografi inceleme

4.7.1.3. Numune sayısı

Kaynağı gerçekleştirilen parçalardan çıkartılan numune sayıları aşağıdaki gibidir;

Çekme numune sayısı: Üçgen ve kare profilli takım için 4 adet iken, pimsiz takım için 3 adettir.

Eğme numune sayısı: Üç değişik kaynak parametresi için kök ve yüz olmak üzere birer numune çıkartılmıştır.

Metalografik inceleme numunesi: Kare, üçgen ve pimsiz profilli takımla kaynak yapılan deney parçalarından 4' er adet numune çıkarılmıştır.

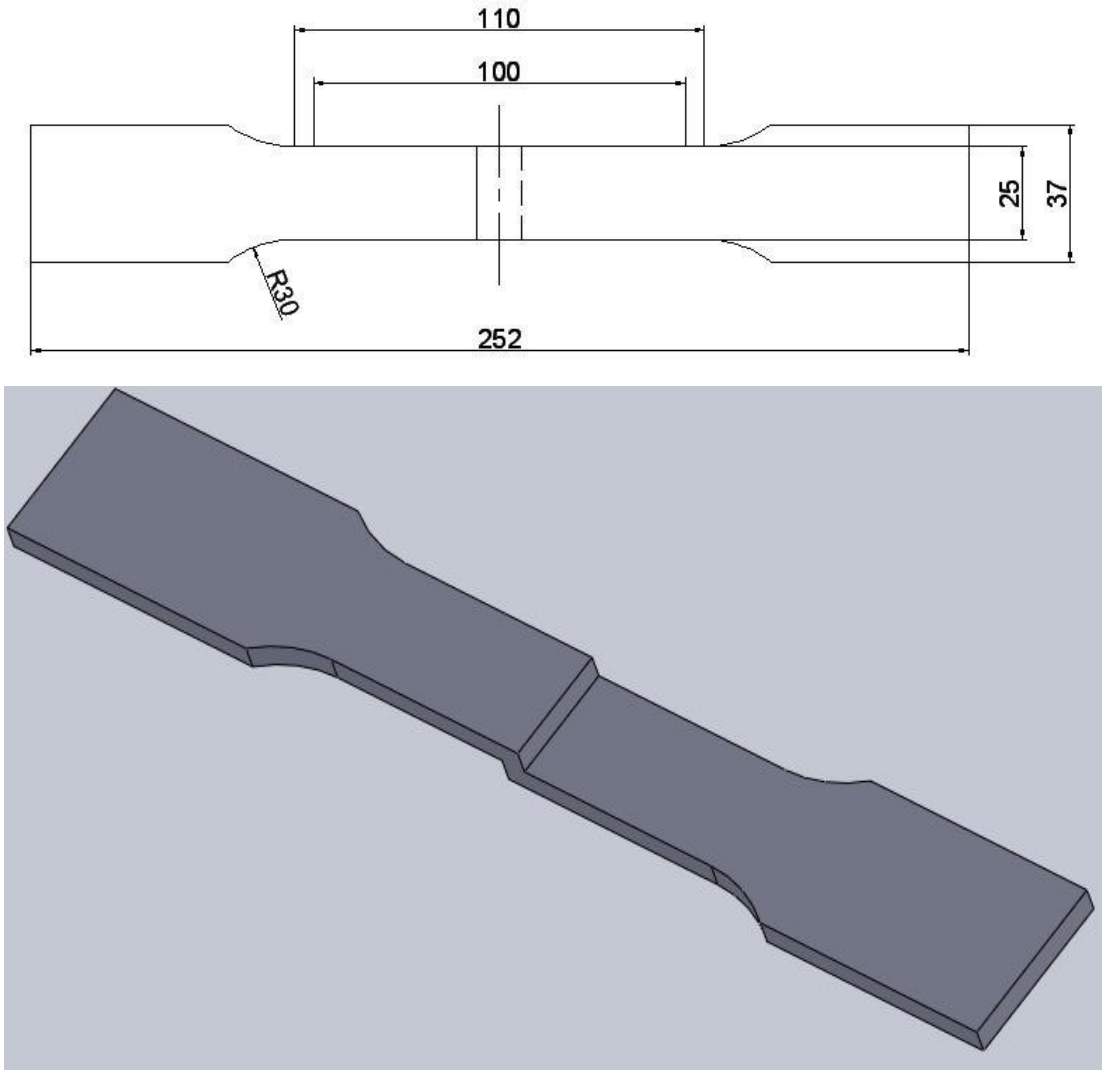
Yorulma numune sayısı: Üçgen ve kare profilli takımla kaynak yapılan deney parçalarından 13' er adet, pimsiz takımla kaynak yapılan deney parçalarından ise 6 adet numune çıkarılmıştır.

Sertlik deneyinde her yöntem türü için birer adet metalografi numunesi kullanılmıştır.

4.7.2. Kaynaklı levhalardan deney numunelerinin çıkarılması

4.7.2.1. Çekme deney numuneleri

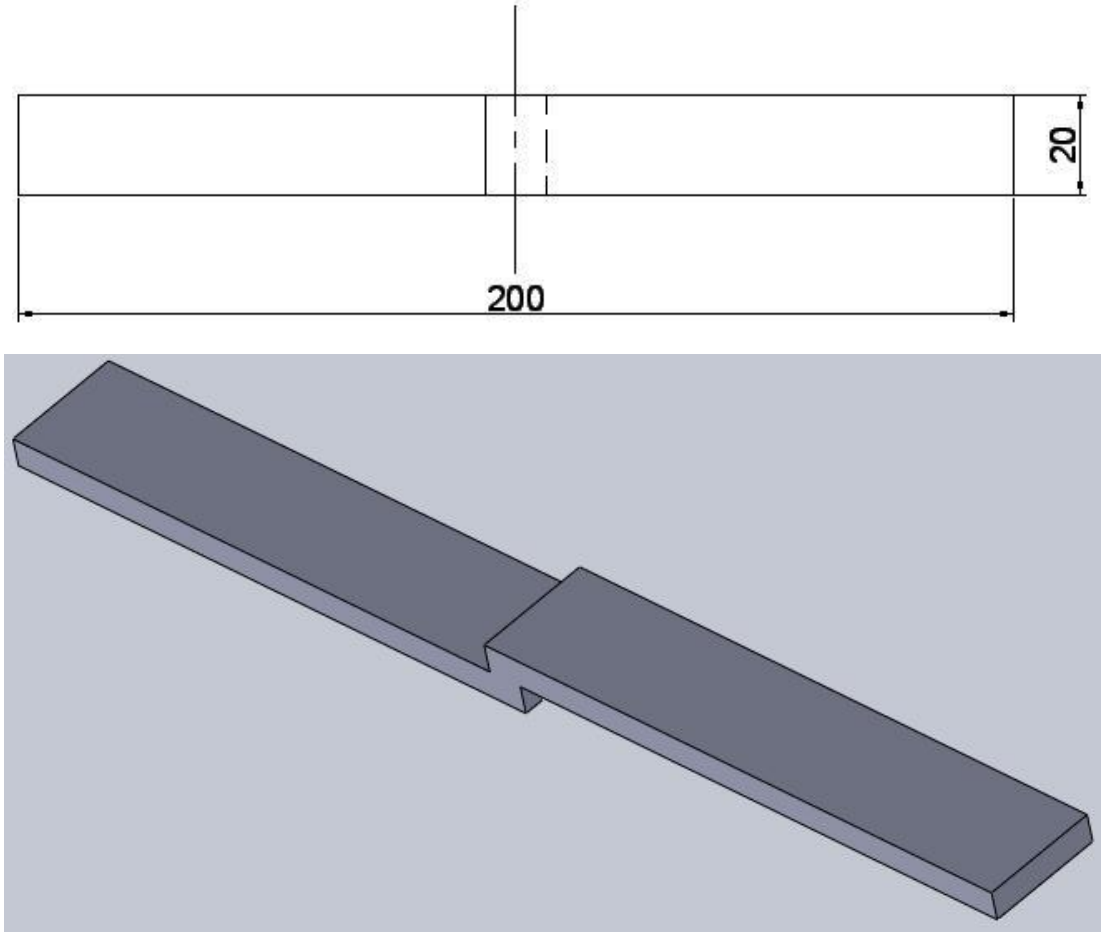
Çekme deney numuneleri EN 895 standardına göre hazırlanmıştır. Kaynaklı levhalarda çekme numunelerinin yerleri belirlendikten sonra giyotin makas ile kaba ölçülerde elde edilip son ölçülerine üç eksenli CNC freze tezgahında getirilmişlerdir. Frezeleme sonrasında parçaların çapakları temizlenmiştir. Şekil 4.15' te çekme deneyi için hazırlanmış çekme numunesinin boyutları yer almaktadır.



Şekil 4.15. EN 895' e uygun olarak hazırlanmış çekme deney parçalarının boyutları

4.7.2.2. Eğme deney numuneleri

Eğme deney numuneleri EN 910 standardına göre çekme numunelerine benzer biçimde CNC tezgahta hazırlanmışlardır. Frezeleme sonrasında parçaların çapakları temizlenmiştir. Şekil 4.16' da eğme deneyi için hazırlanmış çekme numunesinin boyutları yer almaktadır.



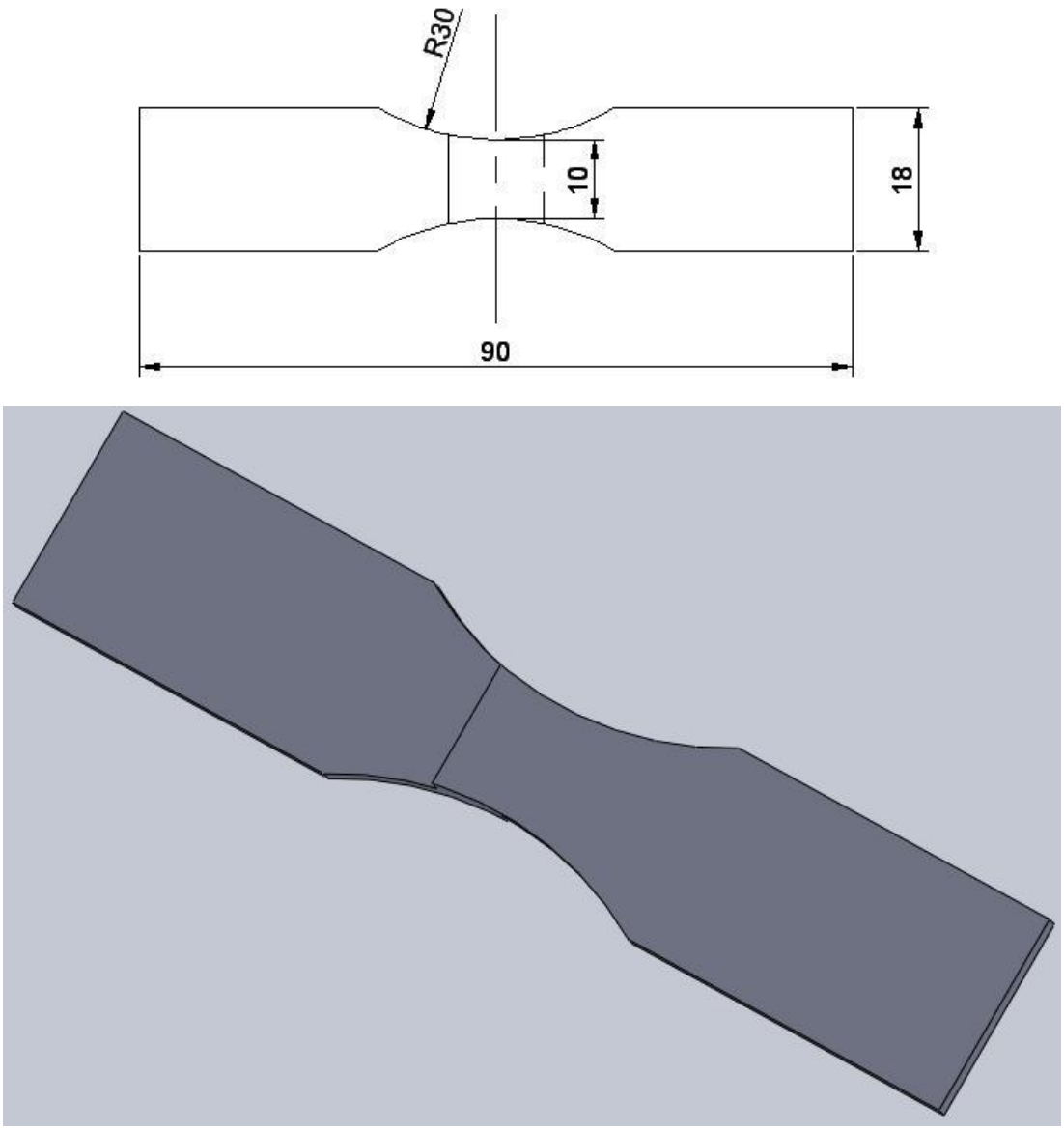
Şekil 4.16. EN 910 standardına göre hazırlanmış eğme deney numunesinin boyutları

4.7.2.3. Metalografik inceleme ve sertlik taraması numuneleri

Metalografik inceleme numunelerinin kaba ölçüleri kaynaklı levhalardan 10 x 60 mm ölçülerinde giyotin makas ile kesilip sonrasında metalografik numune kesme cihazında yumuşak malzemeler için özel üretilmiş kesme taşı ile hassas bir şekilde son ölçüleri olan 10 x 30 mm boyutlarına getirilmiştir.

4.7.2.4. Yorulma deney numuneleri

Yorulma numuneleri de diğer deney numunelerinin hazırlanmasında olduğu gibi kaba ölçülerine giyotin makas ile son ölçülerine ise CNC frezede getirilmiştir.



Şekil 4.17. Yorulma deney numunesinin boyutları

4.7.2.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) numuneleri

Yorulma deneyi sonrasında kırılma yüzeylerinin karşılaştırılması için parçalar uygun boyutlarda elektrikli testere ile kesilerek taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelenmiştir.

4.8. Deneylerin Yapılışı

4.8.1. Çekme deneyleri

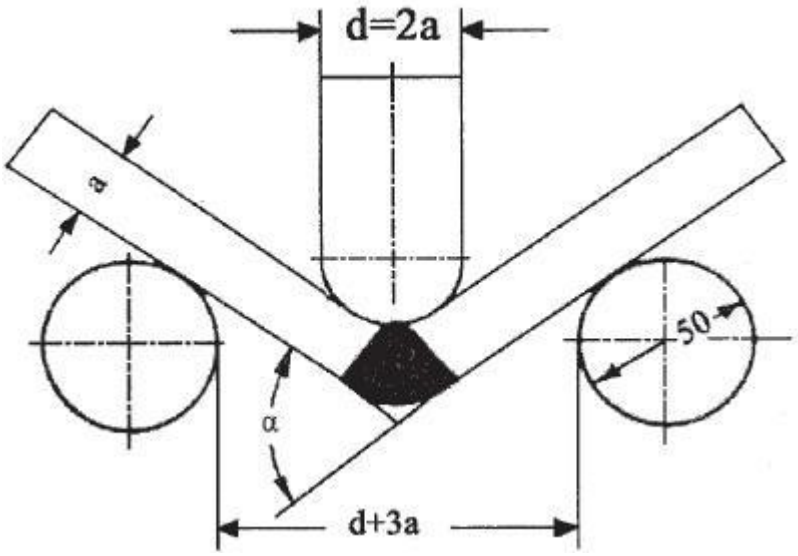
Çekme deneyleri 3 ton kapasiteli üniversal test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilirken, sonuçlar bilgisayar ortamında kaydedilip grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Çekme deneyi uygulanmış bir deney numunesinin görüntüsü

4.8.2. Eğme deneyleri

Eğme deneyleri de 3 ton kapasiteli üniversal test cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.19. Kaynak dikişlerine eğme deneyi uygulama prensibi



Şekil 4.20. Eğme deneyi uygulanmış bir deney numunesinin görüntüsü

4.8.3. Yorulma deneyleri

Şekil 4.21’ de eğmeli yorulma deneylerinde kullanılan cihaz gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Yorulma deneylerinin gerçekleştirildiği cihaz



Şekil 4.22. Yorulma deneyi uygulanmış bir deney numunesinin görüntüsü





Şekil 4.23. Deney numunelerinin test cihazına bağlanması ve deney sonunda kopan bir numunenin görüntüsü

4.8.4. Metalografi deneyleri

Kaynak işleminden sonra çıkartılan metalografi numuneleri kaynak çekirdeği merkezinden boyuna kesilip bakalite alınmıştır. Daha sonra sırası ile zımparalama ve parlatma işlemini takiben numuneler dağlanmıştır. Son olarak 50X ve 200X büyütme oranlarında esas metal, termomekanik etkilenmiş bölge ve kaynak metalinin görüntüleri incelenip, görüntüler video-kamera ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

4.8.5. Vickers sertlik taraması

Kaynaklı bağlantılardan alınan metalografik inceleme numuneleri üzerinde Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılarak sertlik taraması yapılmıştır. Deney yükü olarak 20 gr. ve izler arası mesafe 50 μm alınarak ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçme işlemi EM-TMEB-KM-TMEB-EM olacak şekilde sabit yönde sertlik taraması yapılmıştır.



Şekil 4.24. Mikrosertlik taraması yapılmış bir deney numunesinin makro görüntüsü

5. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

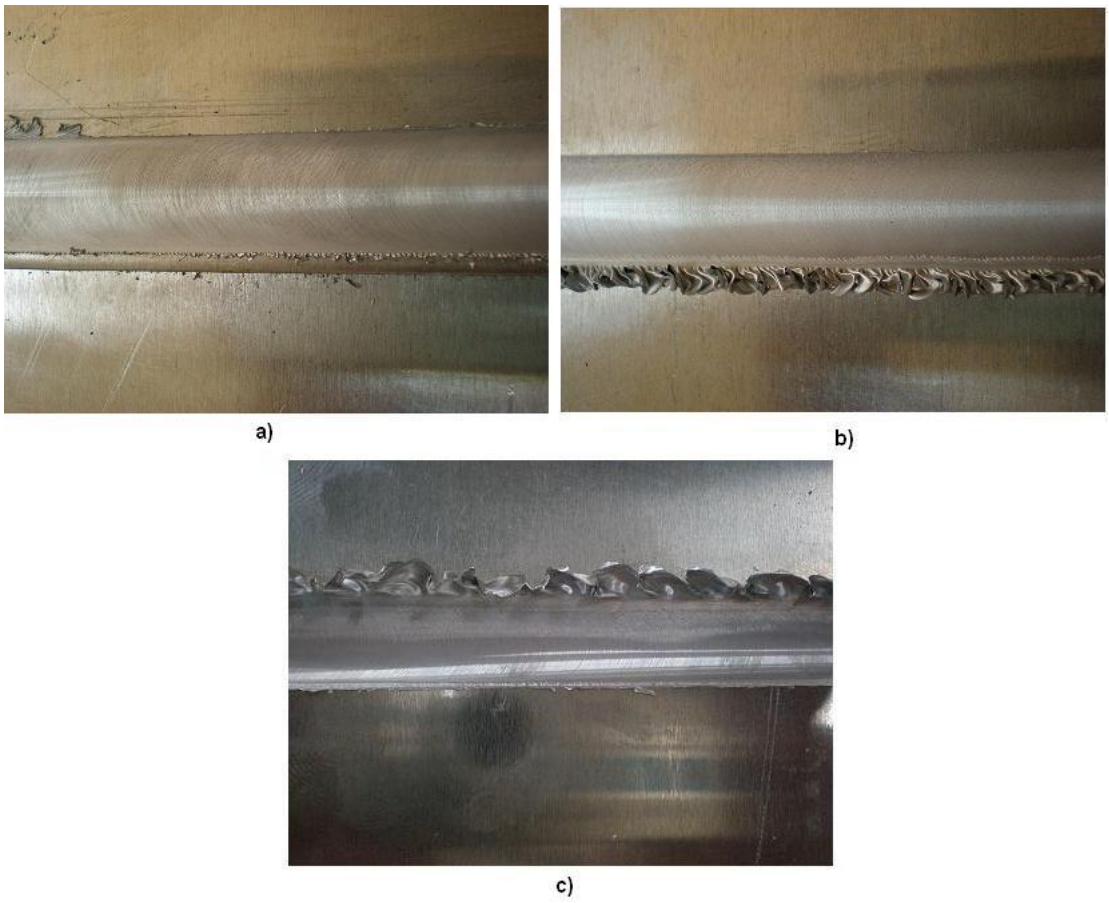
5.1. Deney Sonuçları

5.1.1. Görsel inceleme sonuçları

Yapılan görsel inceleme sonucunda üçgen ve kare profilli karıştırıcı uç ile kaynak yapılan levhaların kaynak dikiş görüntülerinin levha boyunca sabit ve uygun olduğu görülmüş, kaynak kalitesine etki edecek bir kusura rastlanmamıştır. Sadece kaynak başlangıç ve bitiş noktalarında başlangıç plakası kullanılmadığı için bu bölgelerdeki mukavemet diğer bölgelere daha düşüktür. Bu nedenle standartlarda belirtildiği gibi kaynak başlangıç ve bitiş bölgesindeki 25 mm' lik kısımlar deneylerde dikkate alınmamıştır. Pimsiz karıştırıcı uç kullanılan kaynaklı parçalarda ise malzemeden talaş kaldırıp ilerleme bölgesinden yığma bölgesine malzemeyi sürüklediği için bu levhaların kaynak işleminden sonra çapak alma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak edilen levhalardaki çarpılma dikkate alındığında yok denecek kadar az olduğu görülmüştür.



Şekil 5.1. Üçgen ve kare profilli pim ile kaynak yapılmış levhalar



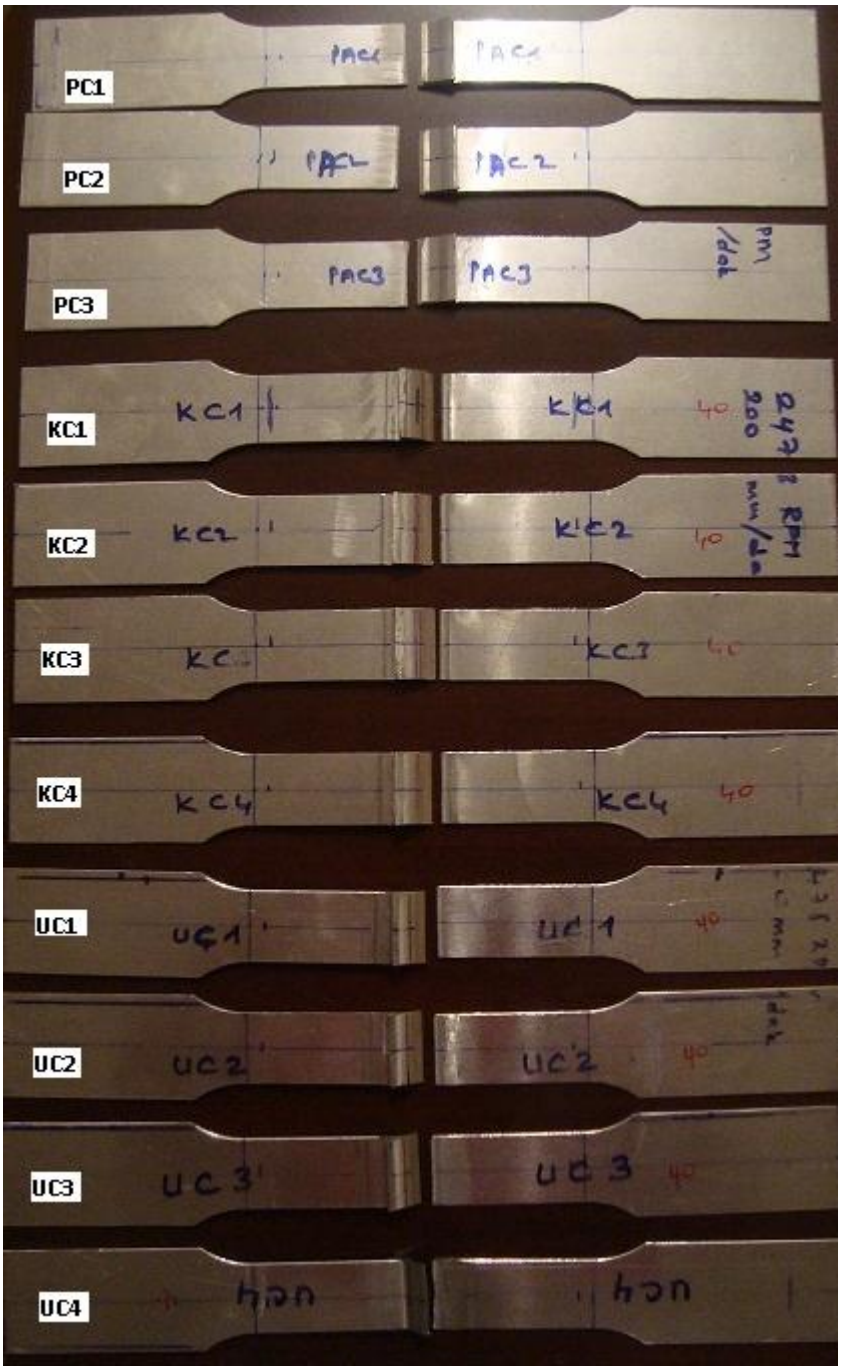
Şekil 5.2. a)Üçgen b) Kare c) Pimsiz profilli takımların kaynak dikişlerinin görüntüsü

5.1.2. Çekme deney sonuçları

FSW yöntemi uygulanmış kaynaklı levhalardan ve esas metalden çıkarılan çekme numunelerinin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinin belirtildiği sonuçlar Tablo 5.1' de yer almaktadır.

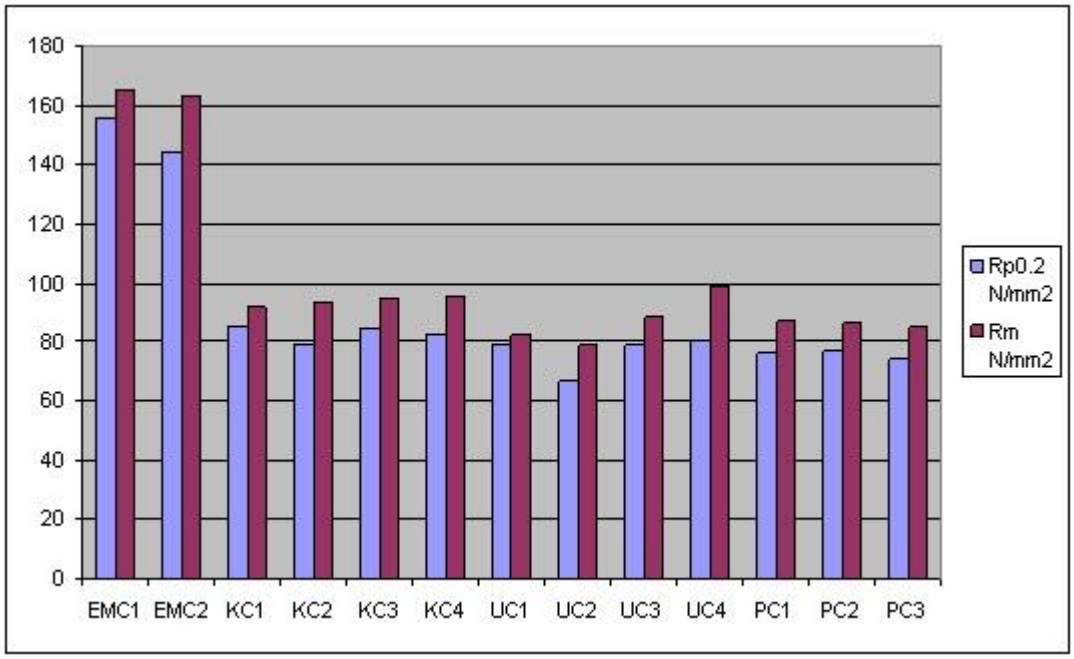
Tablo 5.1. FSW bağlantılarının çekme deney sonuçları

Kaynak Numunesi	Akma Mukavemeti ($Rp_{0.2}$, N/mm^2)	Çekme Mukavemeti (Rm, N/mm^2)	Uzama (%)
KC1	85	92	12,50
KC2	79	94	10,22
KC3	84	95	11,60
KC4	82	96	11,15
KC ORT.	83	94	11,37
UC1	79	82	10,58
UC2	67	79	10,56
UC3	79	88	11,14
UC4	80	99	11,05
UC ORT.	76	87	10,83
PC1	76	87	11,05
PC2	77	86	9,68
PC3	74	85	11,15
P ORT.	76	86	10,63
EMC1	156	165	10,47
EMC2	144	163	10,17
EM ORT.	150	164	10,32



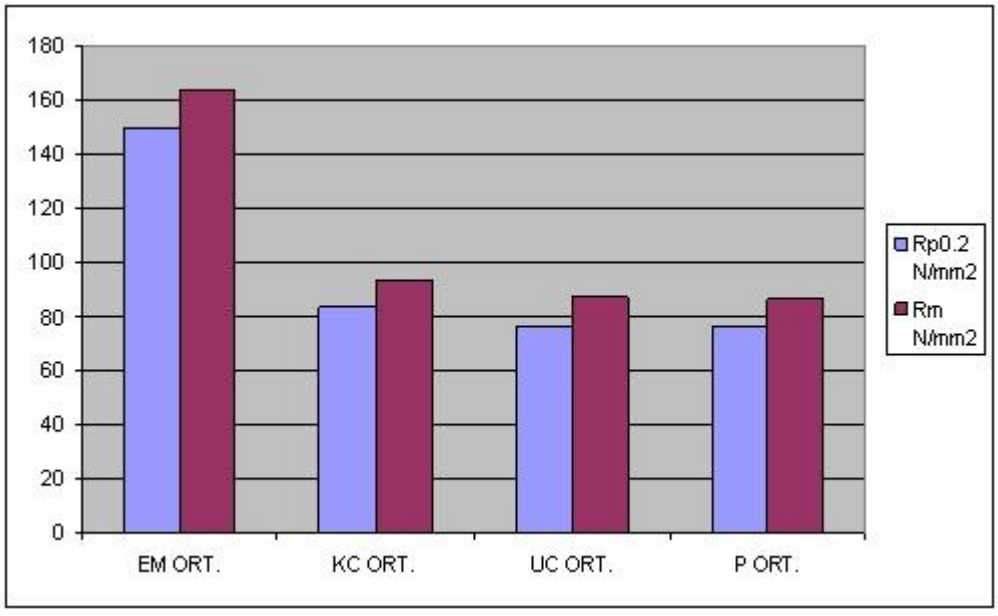
Şekil 5.3. Pimsiz, kare ve üçgen profilli takım ile kaynaklı çekme numunelerinin görüntüsü

Şekil 5.4' te ise her bir bağlantı numunesinin esas metale göre akma ve çekme mukavemetleri kıyaslanmıştır.



Şekil 5.4. SK kaynaklı numunelerin esas metale göre mekanik özelliklerinin kıyaslanması

Şekil 5.5' te de çekme deneyi sonucunda bağlantıların ortalama mukavemet değerleri esas metal ile kıyaslanmıştır.



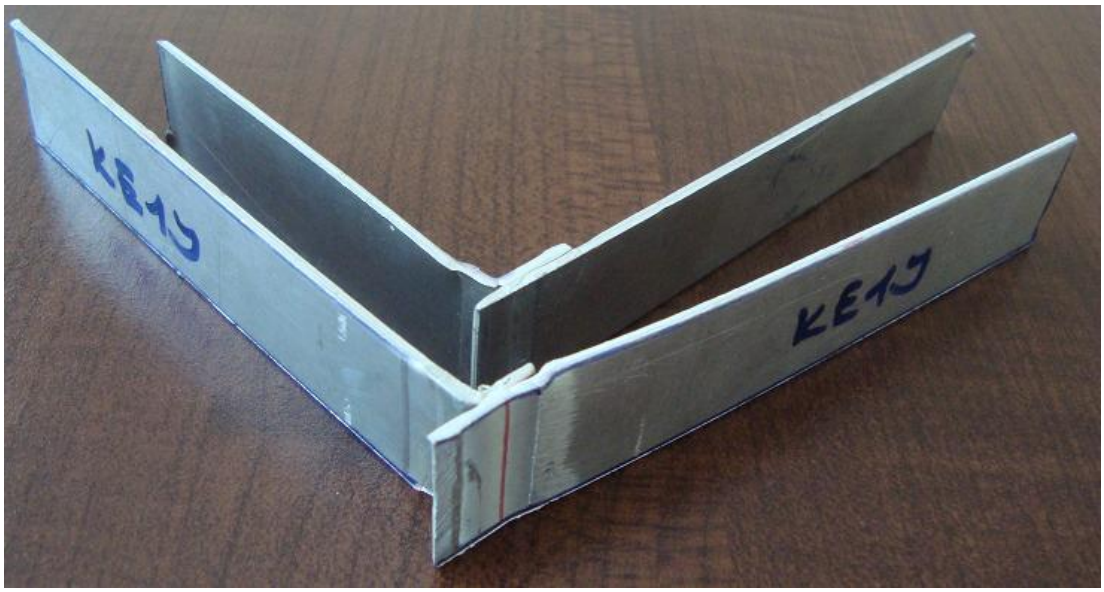
Şekil 5.5. SK kaynaklı numunelerin ortalama mukavemet değerlerinin esas metal ortalama mukavemet değeri ile kıyaslanması

5.1.3. Eğme deneyi sonuçları

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan levhalardan çıkarılan eğme numunelerine uygulanan kök ve yüz eğme deney sonuçları Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8' de verilmiştir.



Şekil 5.6. Üçgen takım ile kaynaklı parçaların kök ve yüz eğme görüntüleri



Şekil 5.7. Kare takım ile kaynaklı parçaların kök ve yüz eğme görüntüleri



Şekil 5.8. Pimsiz takım ile kaynaklı parçaların kök ve yüz eğme görüntüleri

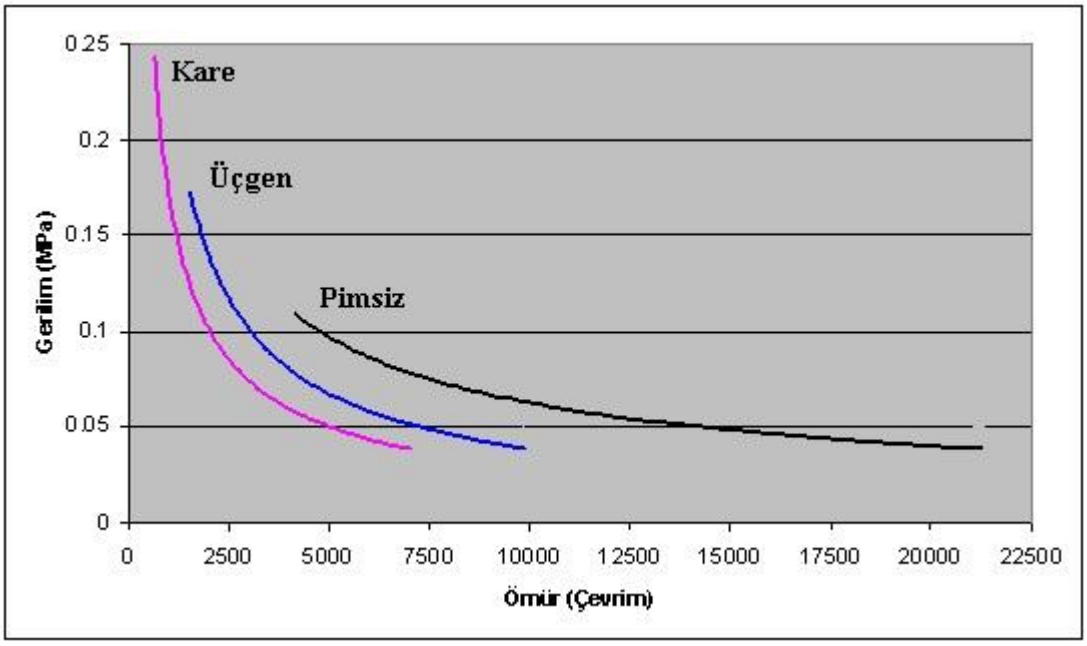
Şekillerden görüleceği üzere numunelere uygulanan deney sonucunda kare, üçgen ve pimsiz takımlı deney numunelerinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir.

5.1.4. Yorulma deneyi sonuçları

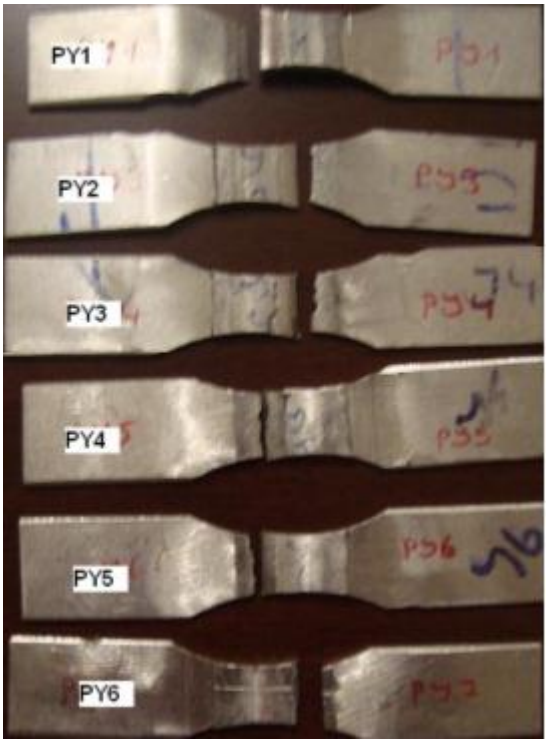
Yapılan eğmeli yorulma deneylerinin sonuçları Tablo 5.2 ve Şekil 5.9' da verilmiştir. Görüleceği üzere deney parçalarının yorulma mukavemet değerlerindeki sonuç çekme mukavemet sonuçlarının tam tersi şeklindedir ve en yüksek mukavemet değerleri sırası ile pimsiz, üçgen ve kare profilli takımlar ile elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere çekme mukavemet değeri yüksek olan karıştırıcı takım tiplerinin yorulma mukavemet değerlerinin düşük çıkması bu bağlantıların yorulmaya zorlanmalarına karşı mukavemetlerinin düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.2. Yorulma deney sonuçları

Üçgen		Kare		Pimsiz	
Gerilim	Ömür	Gerilim	Ömür	Gerilim	Ömür
0,027	2007 (sapma)	0,027	5997	0,027	21253
0,027	4213	0,027	7022	0,053	21154
0,027	7083	0,027	857 (sapma)	0,08	4143
0,053	9867	0,053	2716 (sapma)	0,107	-
0,053	1084 (sapma)	0,053	4627	0,133	5474
0,053	6271	0,053	4998	0,160	-
0,080	6490	0,080	2390 (sapma)		
0,080	5208	0,080	3090		
0,107	622 (sapma)	0,107	1563 (sapma)		
0,133	1952 (sapma)	0,133	2806		
0,133	4006	0,133	3023		
0,160	1539	0,160	642		
0,160	2922	0,160	12094 (sapma)		



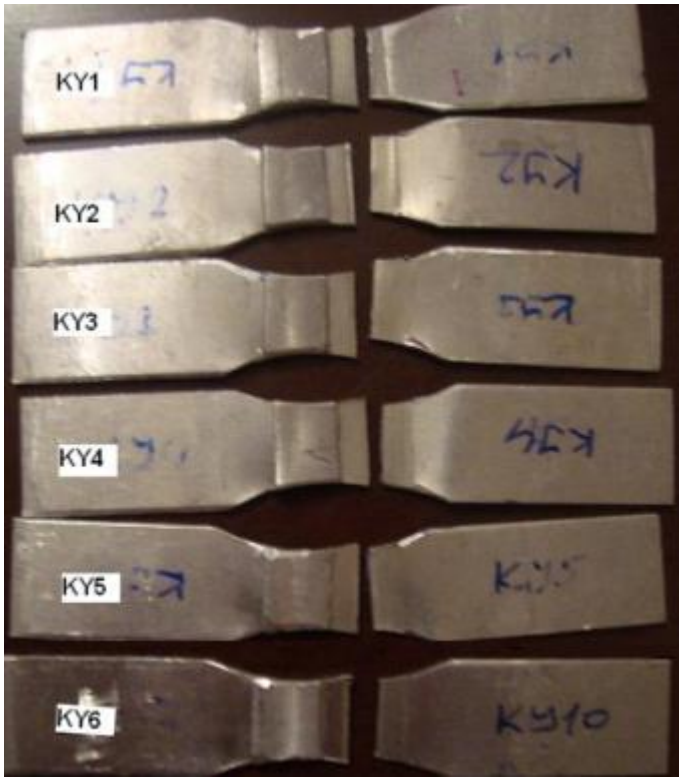
Şekil 5.9. Yorulma deney sonuçlarının gerilme-ömür diyagramı



Şekil 5.10. Pimsiz profil ile kaynaklı yorulma numunelerinin toplu görünümü

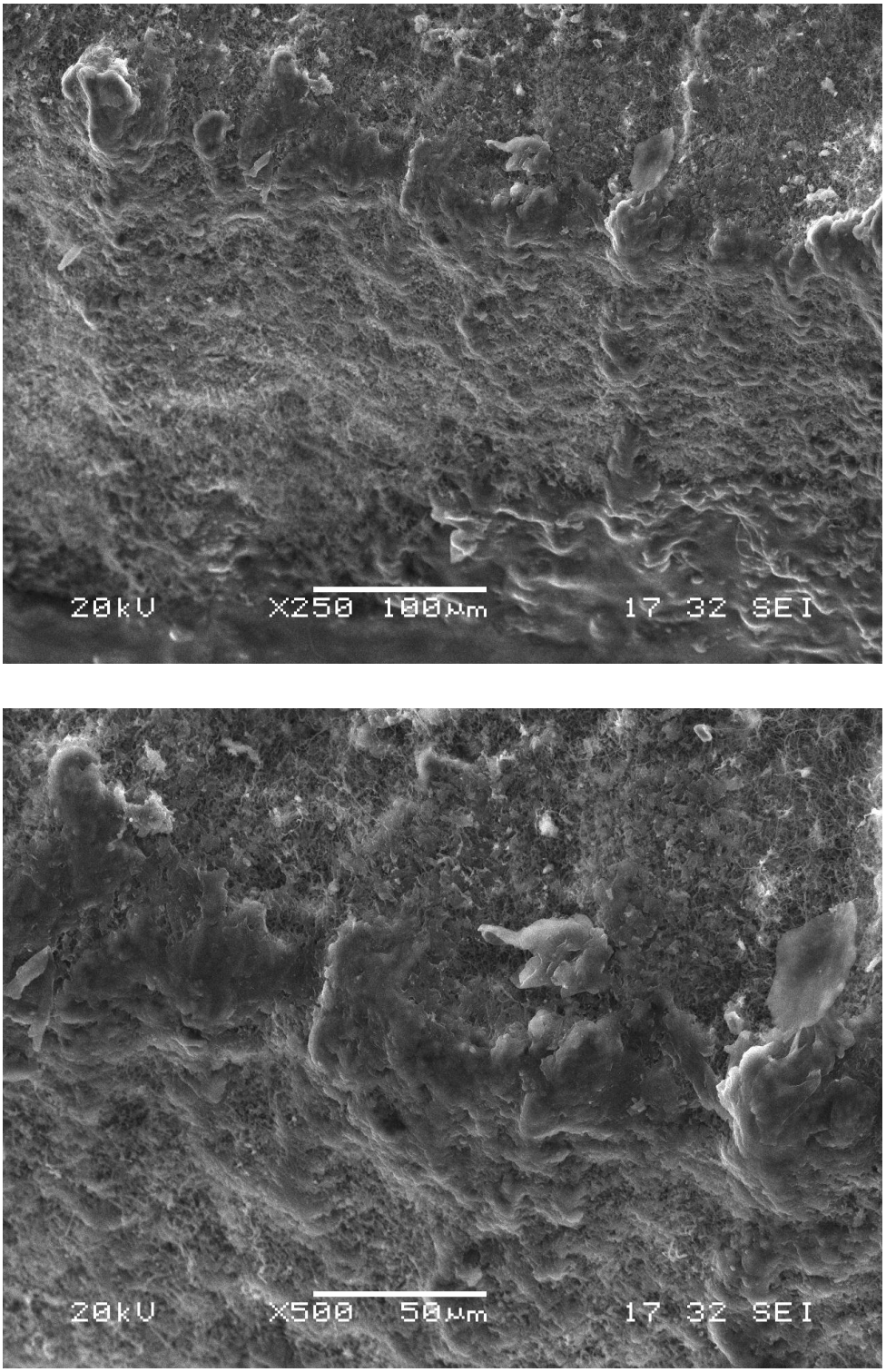


Şekil 5.11. Üçgen profil ile kaynaklı yorulma numunelerinin toplu görünümü

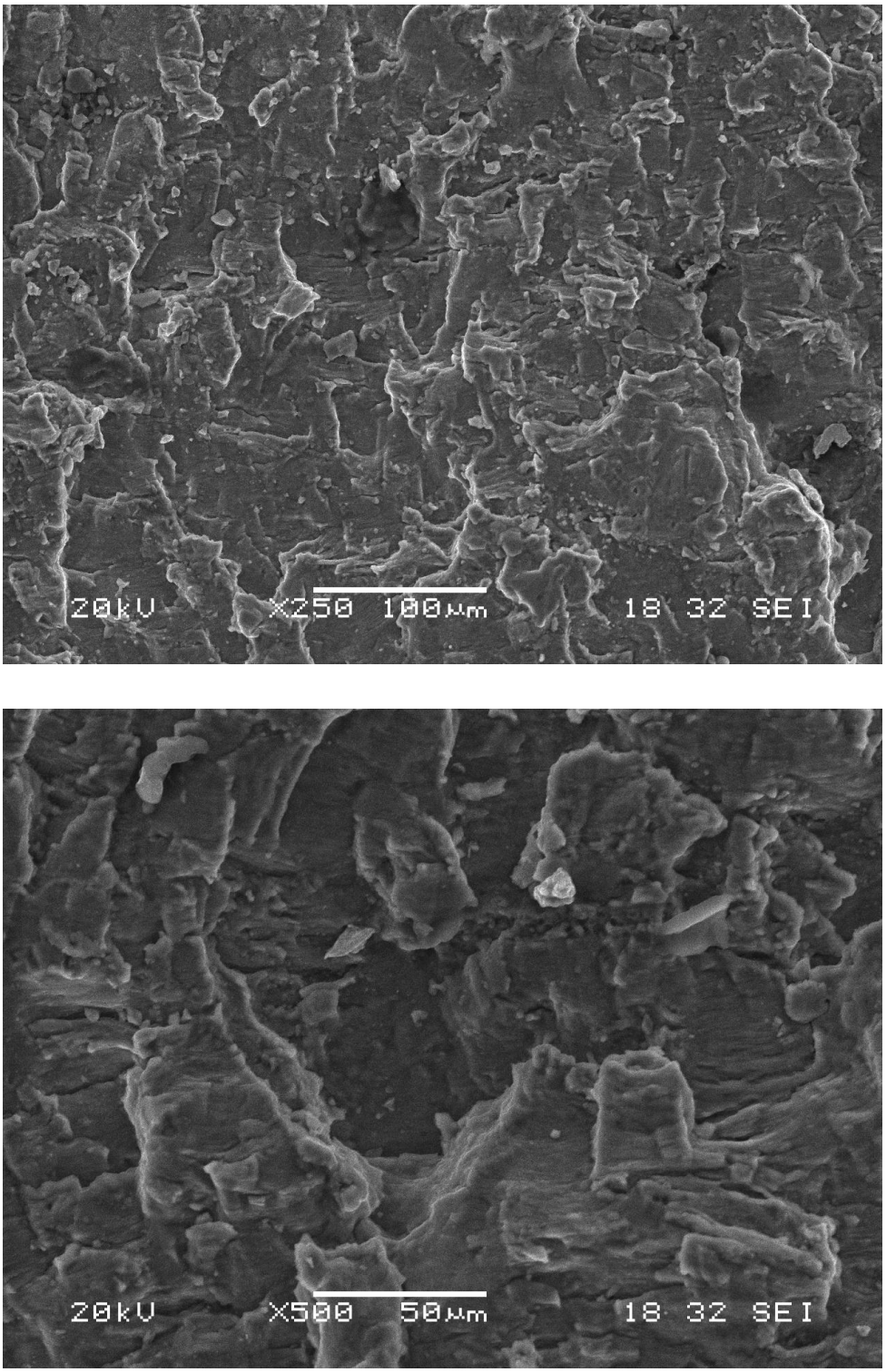


Şekil 5.12. Kare profil ile kaynaklı yorulma numunelerinin toplu görünümü

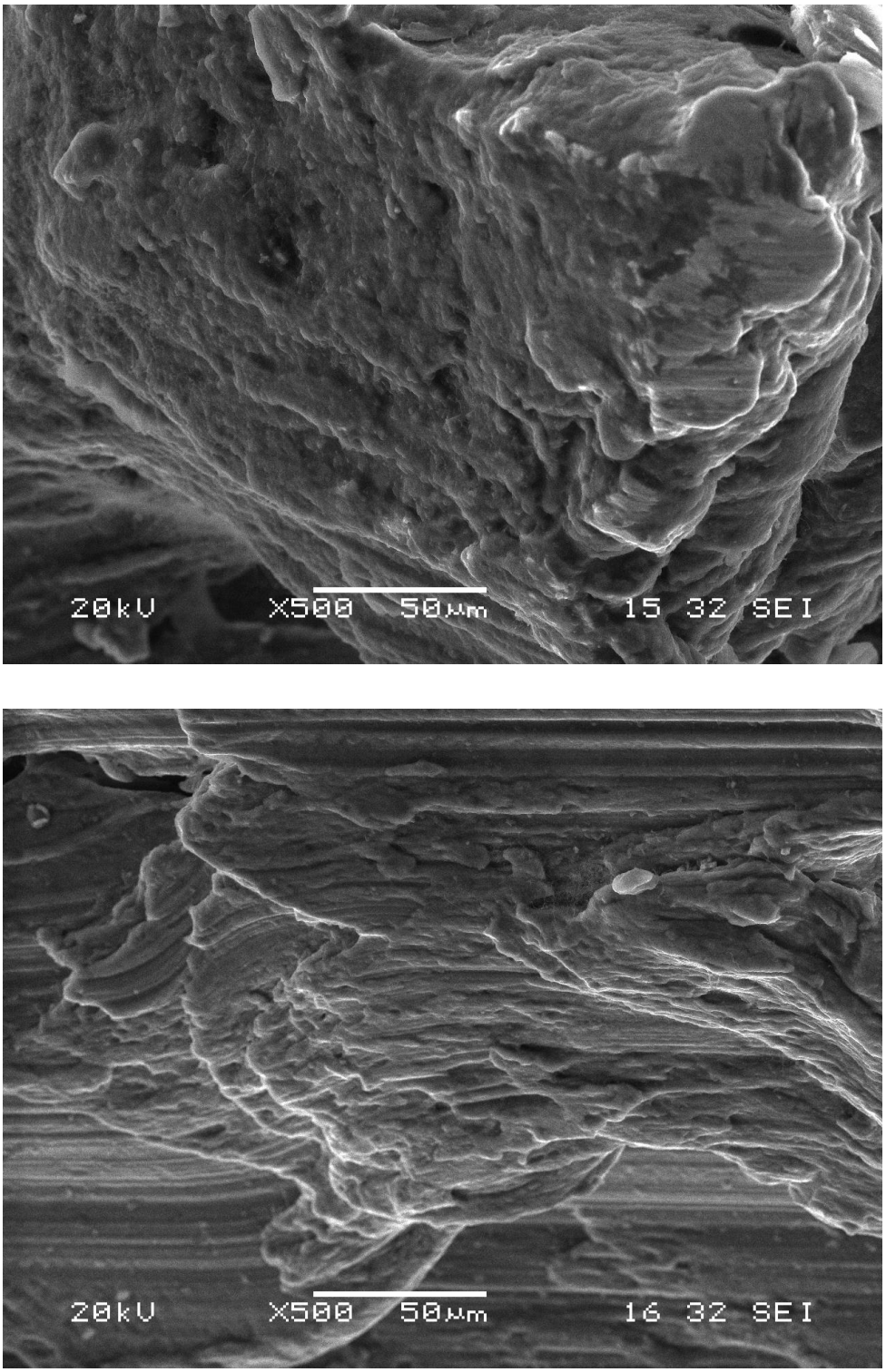
Yorulma deneyi sonrası deney parçalarının kırılma yüzeylerinden alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



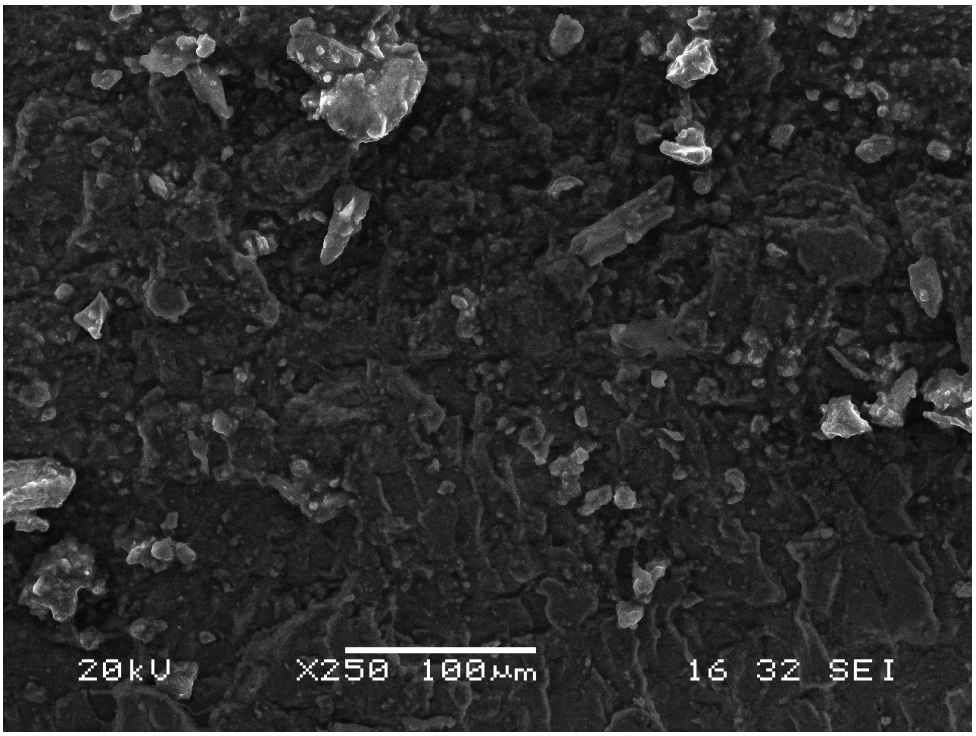
Şekil 5.13. Kare profil takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri

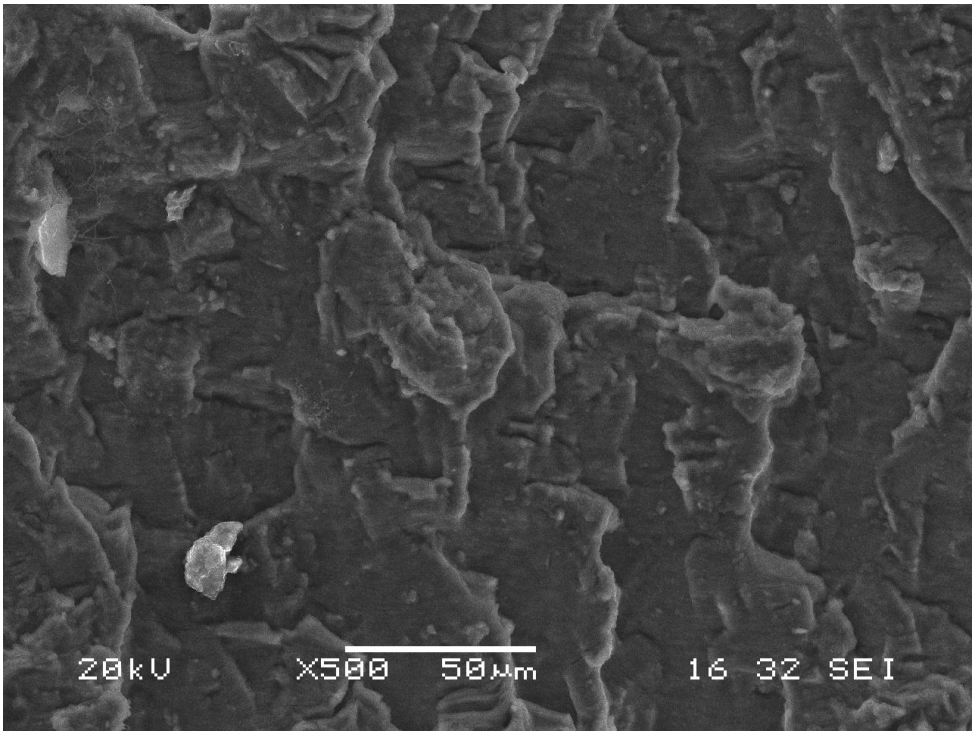


Şekil 5.13. Kare profil takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Devam)

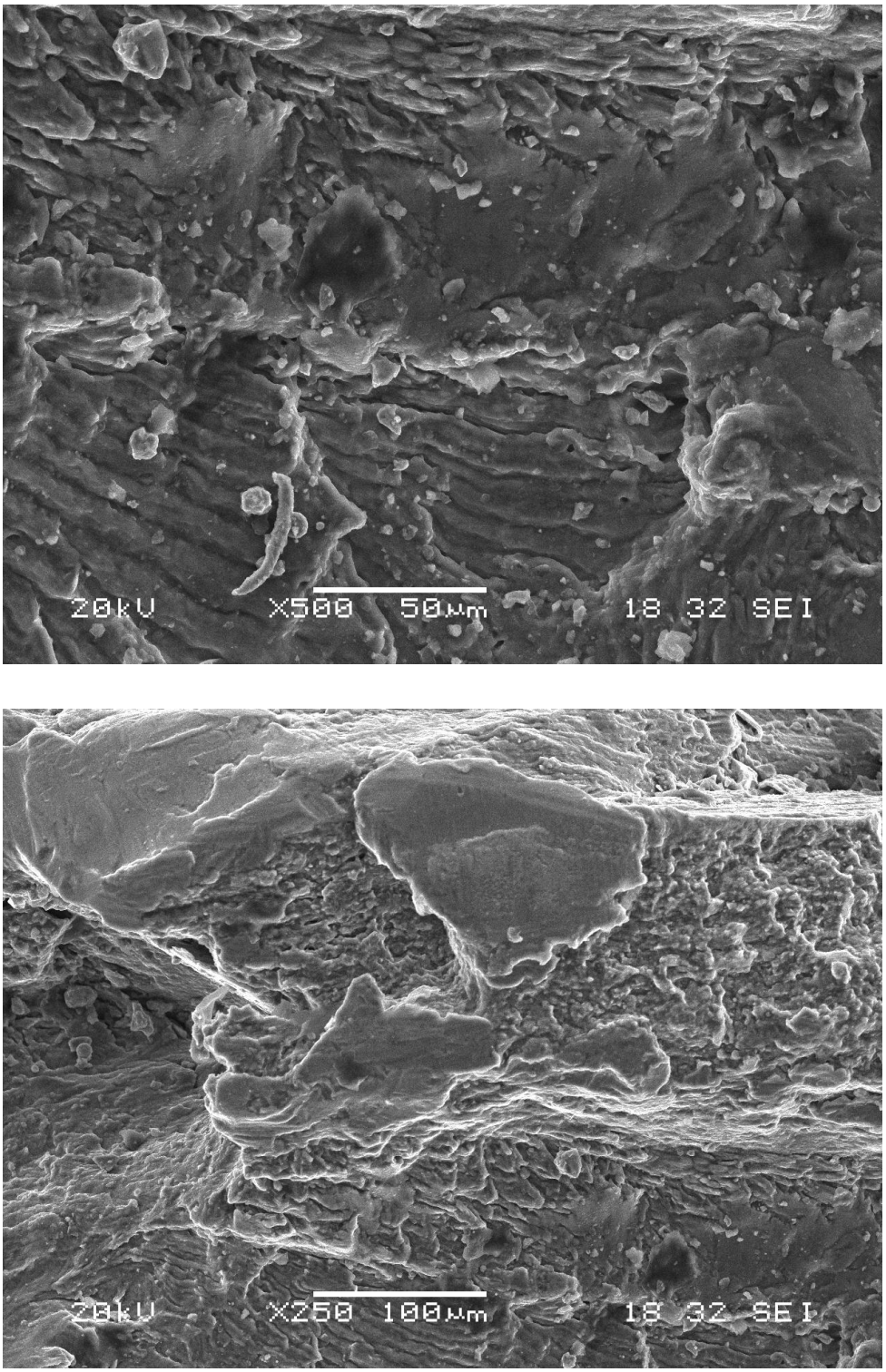


Şekil 5.14. Üçgen profil takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri

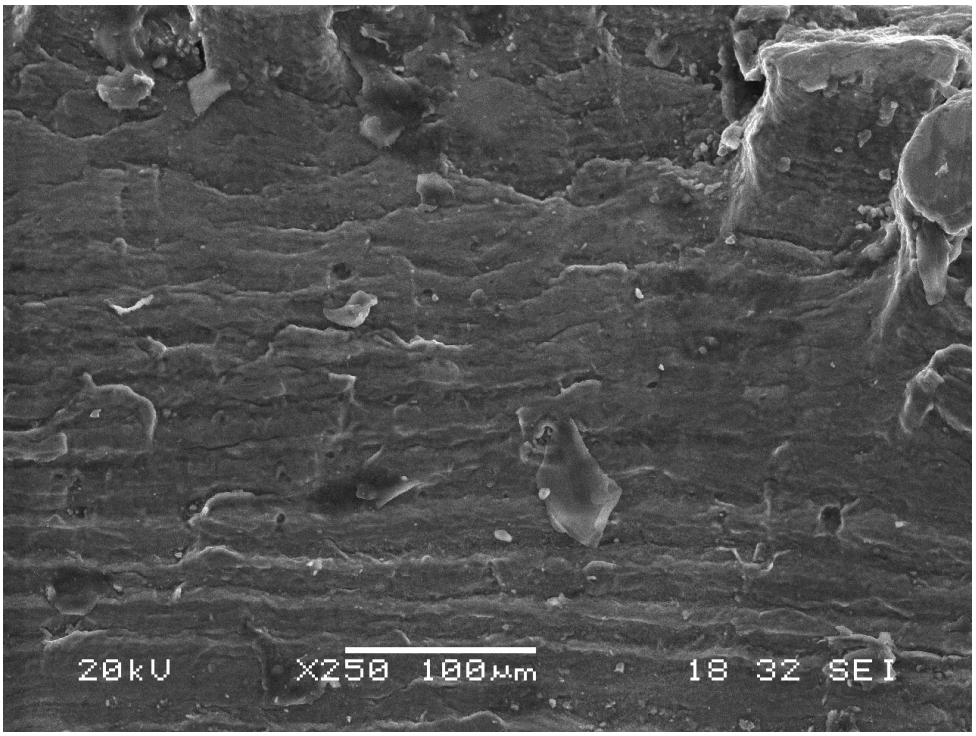


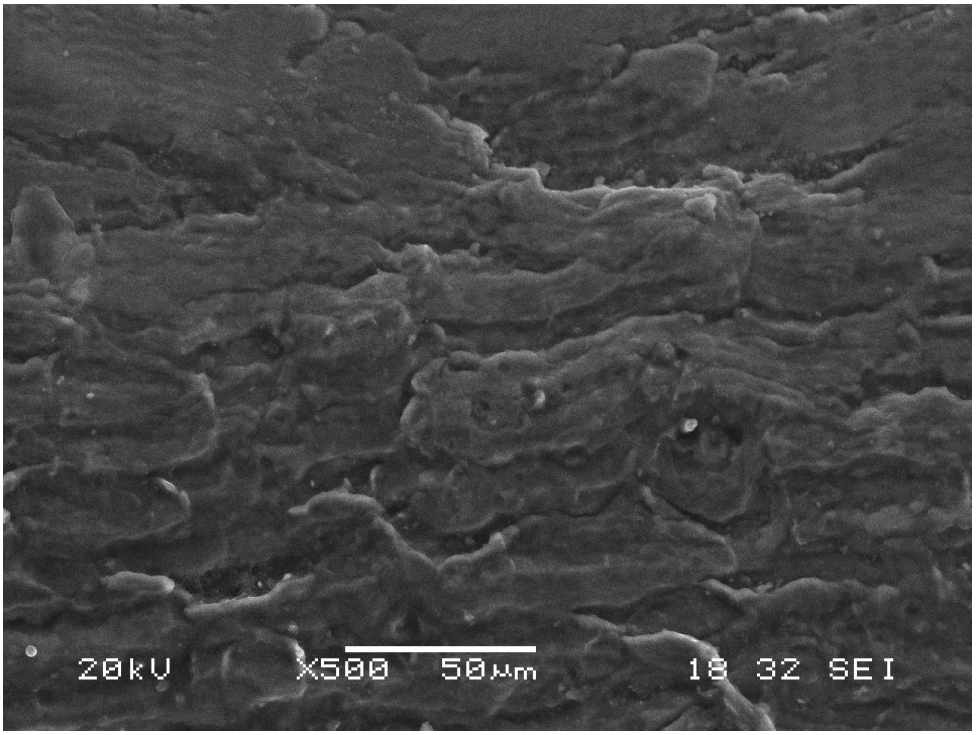


Şekil 5.14. Üçgen profil takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Devam)



Şekil 5.15. Pimsiz takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri

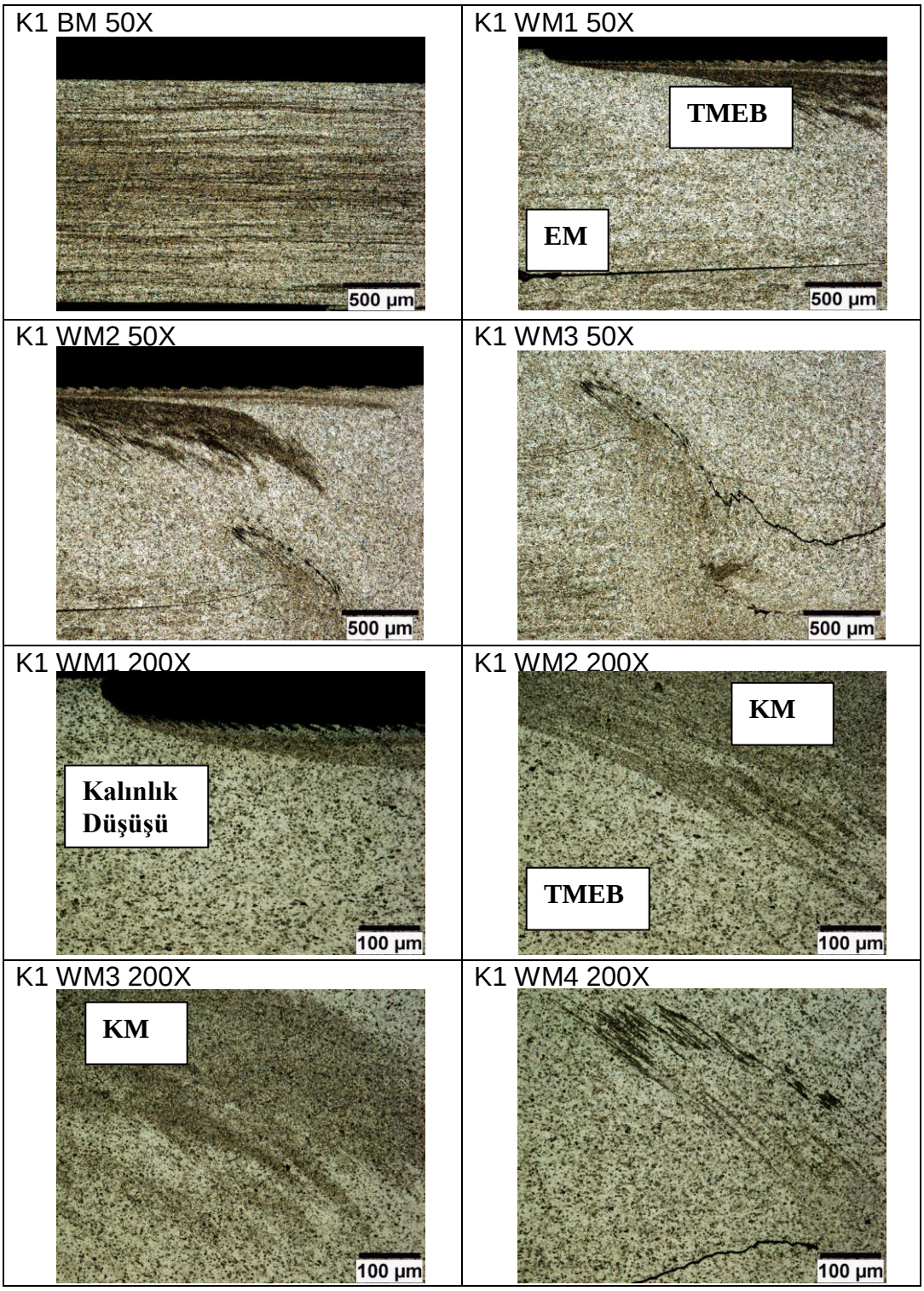




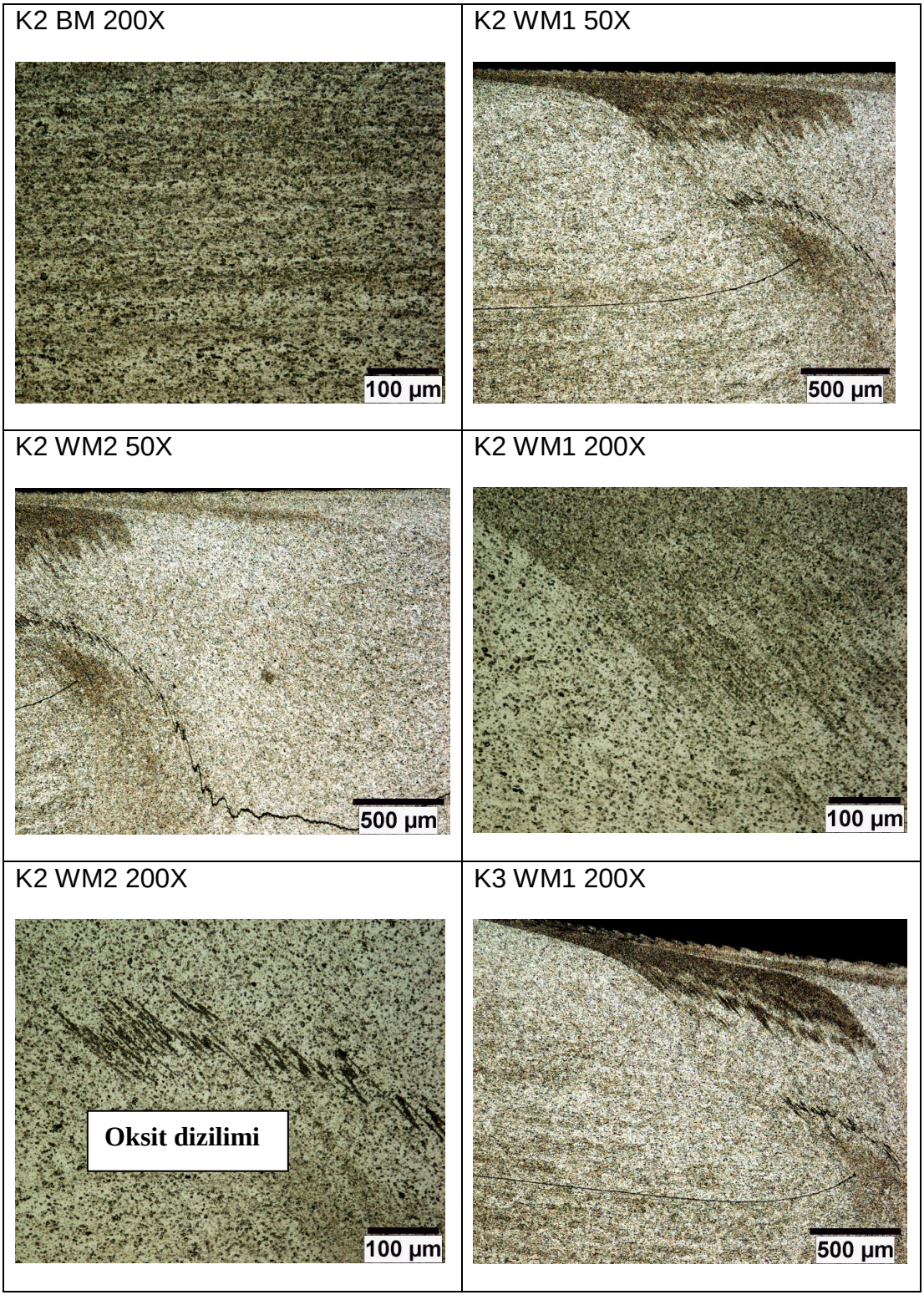
Şekil 5.15. Pimsiz takım ile kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (Devam)

5.1.5. Metalografik inceleme sonuçları

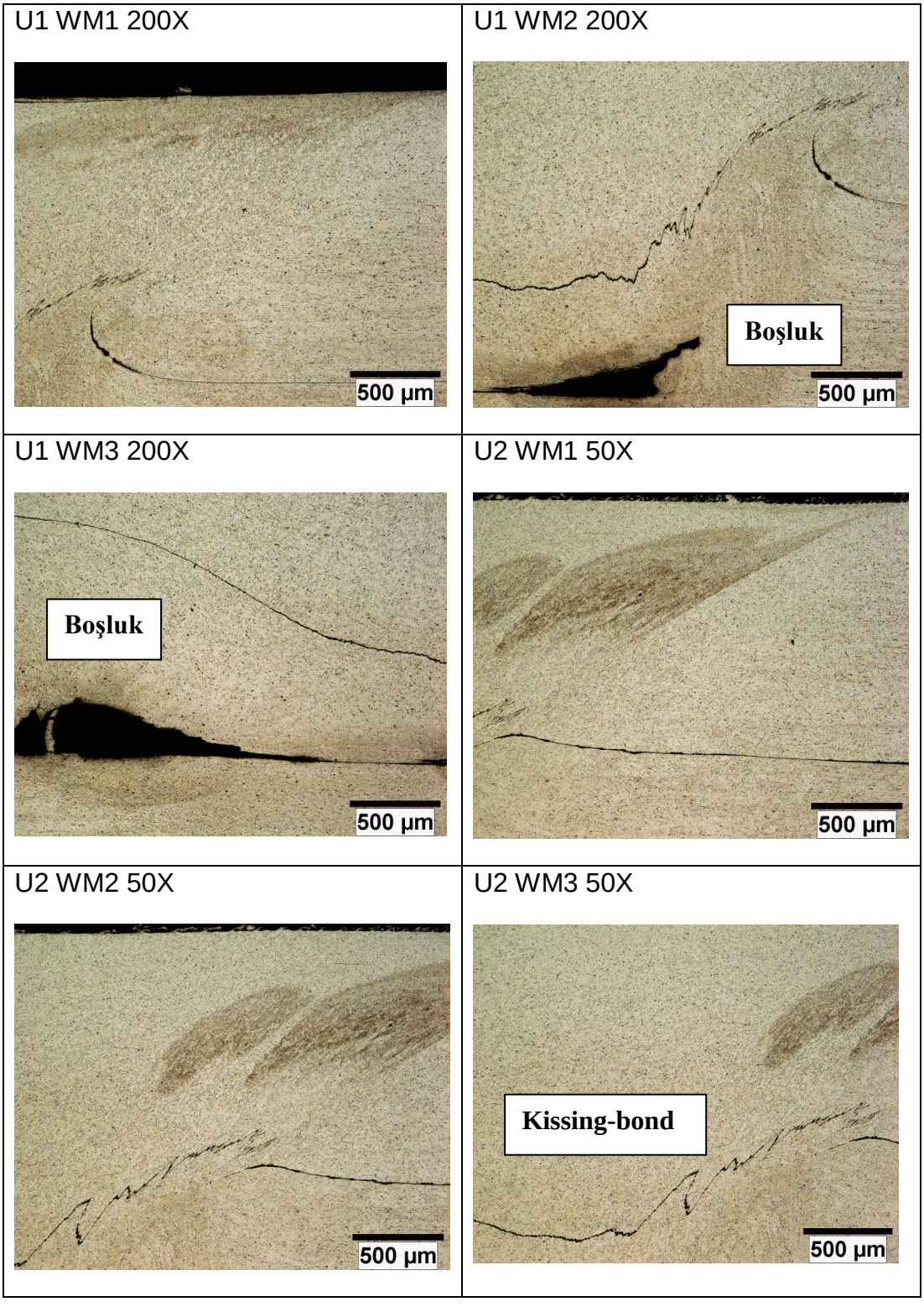
Kaynaklı bağlantılardan alınan metalografi numunelerinin mikroyapıları incelenmiş olup şekiller sırası ile aşağıda verilmiştir.



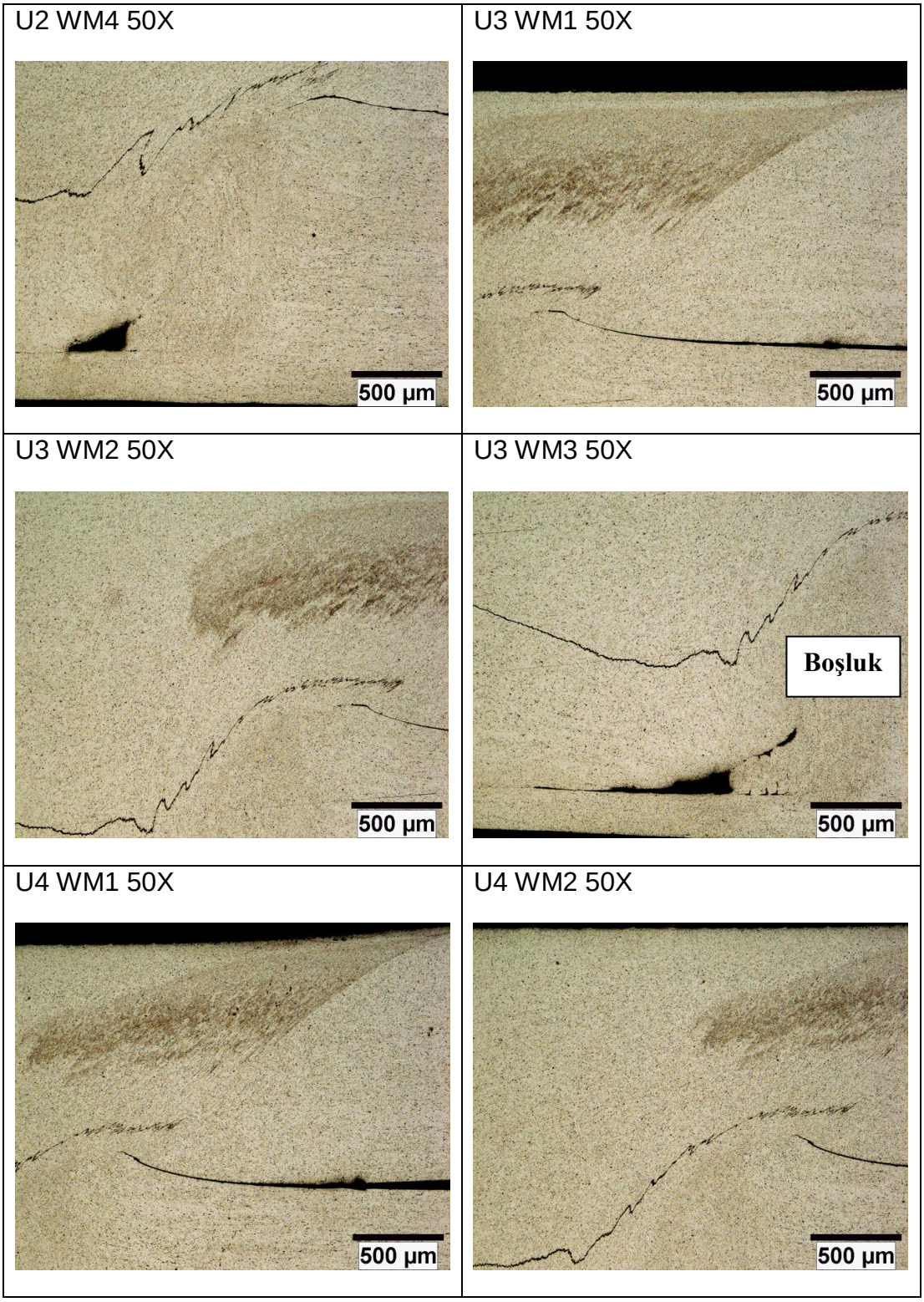
Şekil 5.16. Kare profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı 1. levhanın mikroyapı görüntüleri



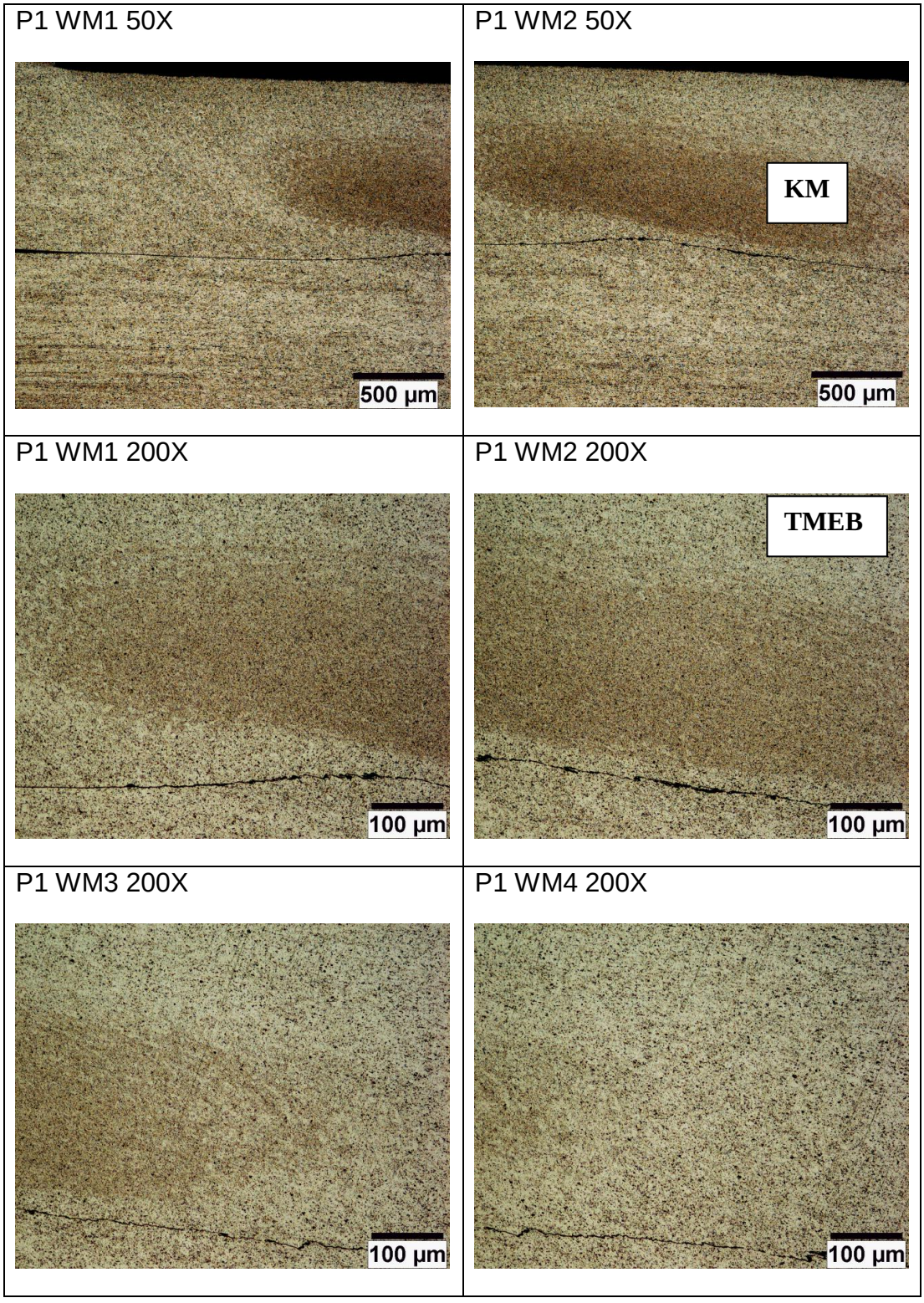
Şekil 5.17. Kare profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı 2. ve 3. levhanın mikroyapı görüntüleri



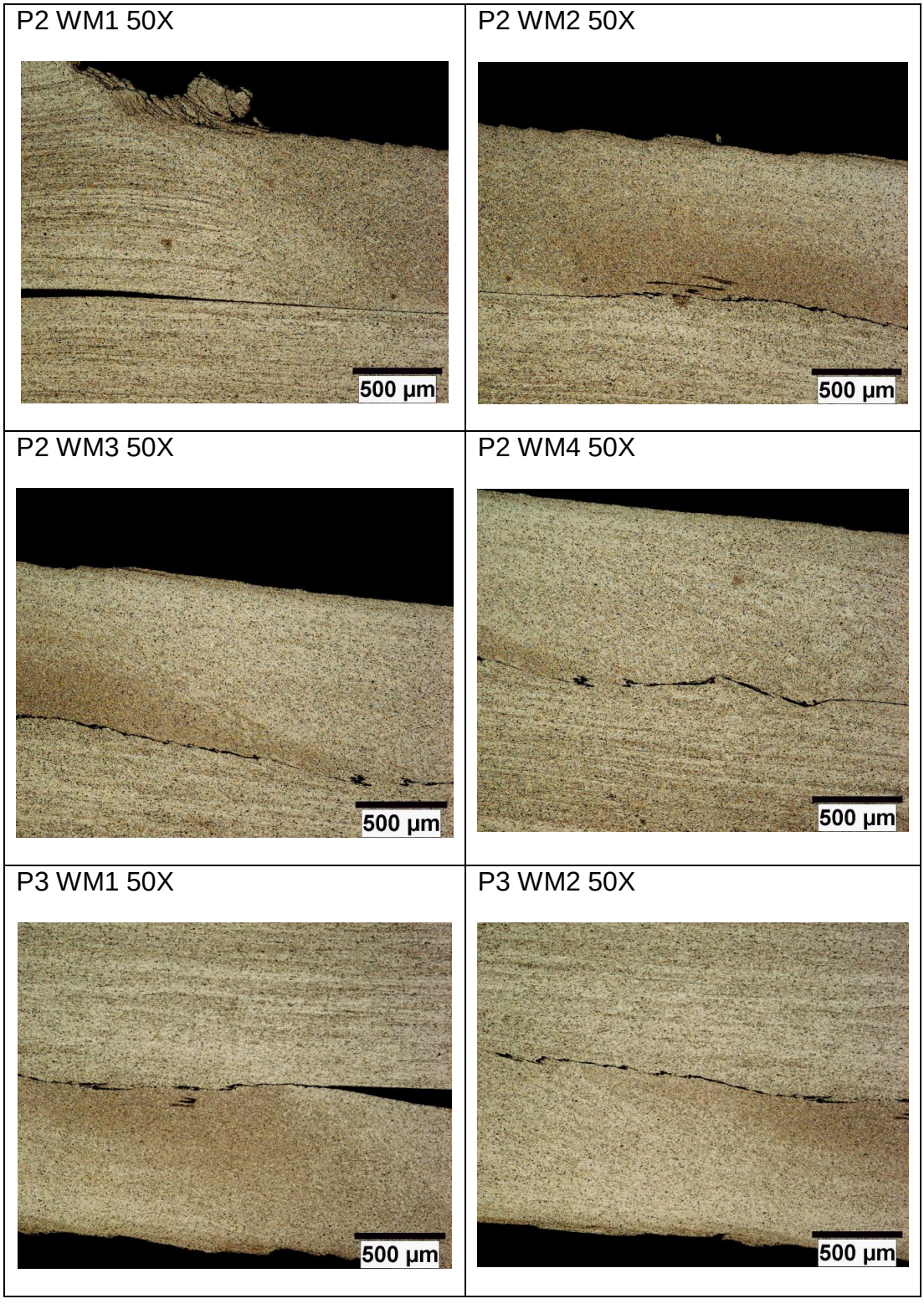
Şekil 5.18. Üçgen profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı levhaların mikroyapı görüntüleri



Şekil 5.18. Üçgen profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı levhaların mikroyapı görüntüleri (Devam)



Şekil 5.19. Pimsiz profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı levhaların mikroyapı görüntüleri



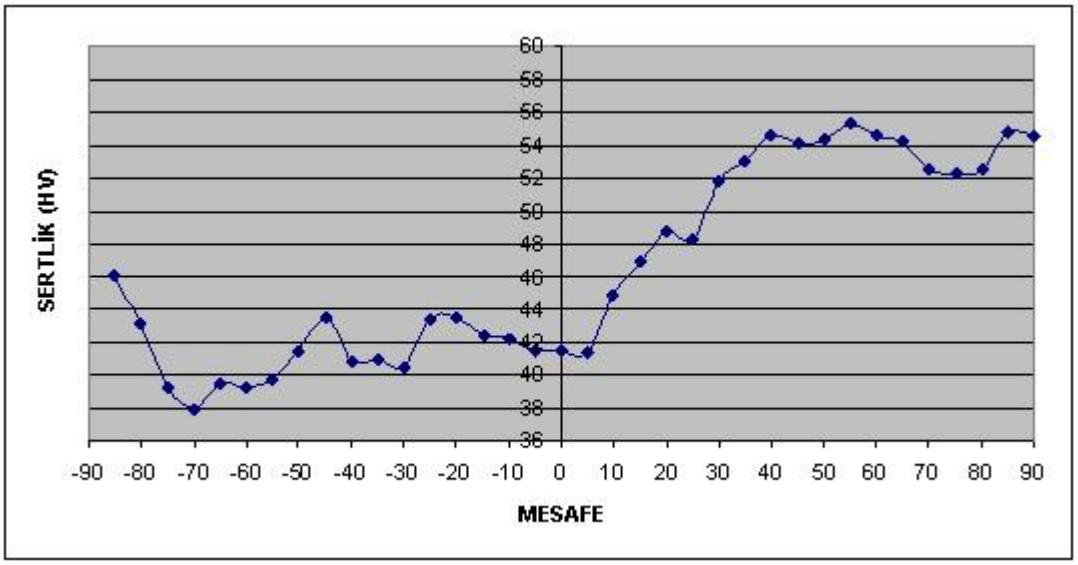
Şekil 5.19. Pimsiz profilli karıştırıcı takım ile kaynaklı levhaların mikroyapı görüntüleri (Devam)

5.1.6. Mikrosertlik inceleme sonuçları

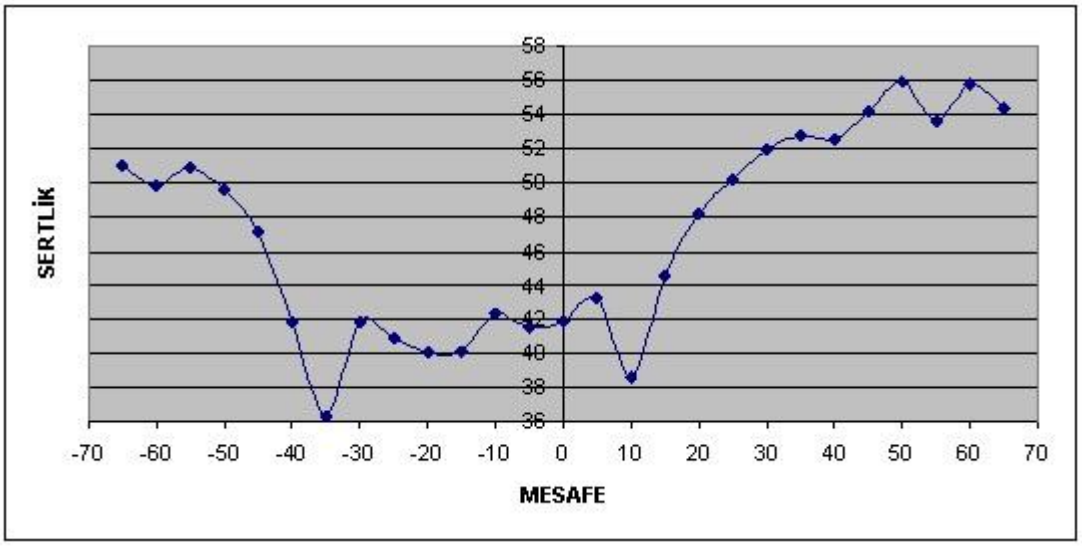
Kaynaklı levhalardan alınan metalografik inceleme numuneleri üzerinde yapılan mikrosertlik deneyi 50 μm izler arası mesafe ve 20 gr. deney yükü uygulanarak gerçekleştirilmiş ve numunelerin EM-TMEB-KM-TMEB-KM sertlik profilleri ortaya çıkarılmıştır.

Tablo 5.3. Vickers sertlik taraması sonuçları

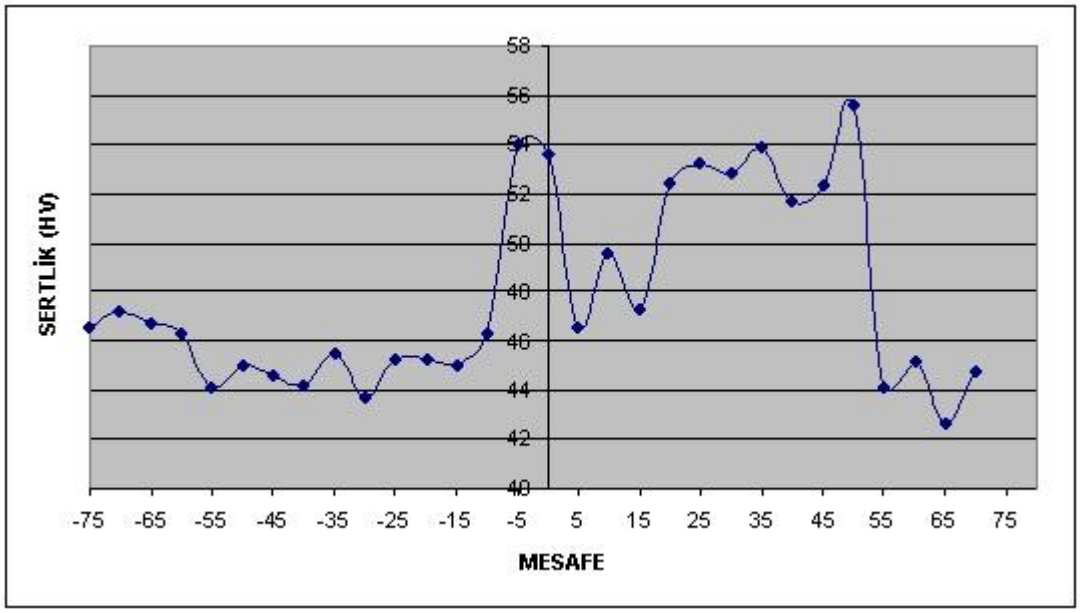
İz No	Kare	Üçgen	Pimsiz
1	46,1	51	46,6
2	43,2	49,8	47,2
3	39,3	50,9	46,7
4	37,9	49,6	46,3
5	39,5	47,1	44,1
6	39,3	41,8	45
7	39,7	36,3	44,6
8	41,5	41,8	44,2
9	43,5	40,9	45,5
10	40,9	40,1	43,7
11	41	40,1	45,3
12	40,5	42,3	45,3
13	43,4	41,5	45
14	43,5	41,8	46,3
15	42,4	43,2	54
16	42,2	38,6	53,6
17	41,5	44,6	46,6
18	41,4	48,2	49,6
19	41,3	50,2	47,3
20	44,8	51,9	52,4
21	46,9	52,7	53,2
22	48,7	52,5	52,8
23	48,3	54,1	53,9
24	51,7	55,9	51,7
25	53	53,6	52,3
26	54,5	55,8	55,6
27	54,1	54,4	44,1
28	54,3		45,2
29	55,3		42,7
30	54,6		44,8
31	54,2		
32	52,5		
33	52,3		
34	52,5		
35	54,8		
36	54,5		



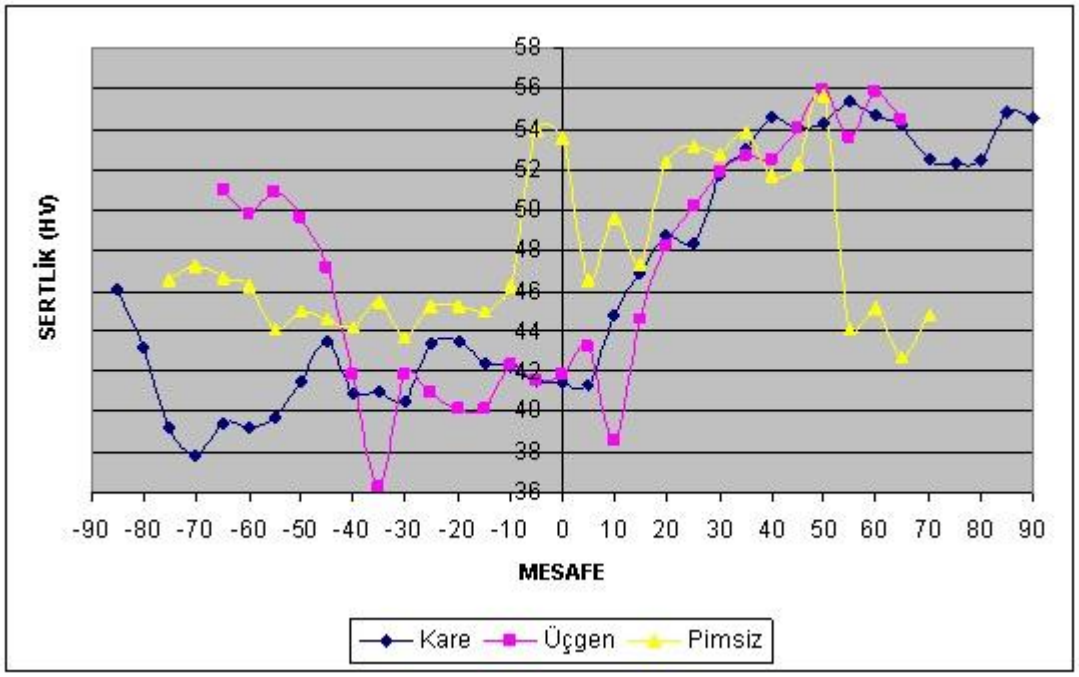
Şekil 5.20. Kare takımla kaynaklı bağlantının sertlik sonuçları



Şekil 5.21. Üçgen takımla kaynaklı bağlantının sertlik sonuçları



Şekil 5.22. Pimsiz takımla kaynaklı bağlantının sertlik sonuçları



Şekil 5.23. Kaynaklı bağlantıların sertlik sonuçları

5.2. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

5.2.1. Görsel inceleme sonuçlarının irdelenmesi

Yapılan görsel inceleme sonucunda üçgen ve kare profilli karıştırıcı takımla yapılan bağlantıların kaynak dikişlerinde görsel kusura rastlanmamış, takım omuz basıncı

etkisiyle oluşan çökme derinliğinin literatürde belirtilen maksimum 0,5 mm' yi aşmadığı tespit edilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin doğası gereği kaynak sırasında ilerleme bölgesinden yığma bölgesine doğru malzeme akışı olduğu için, kaynak sonrasında levhalarda çapak temizleme işlemine gerek duyulmuştur. Ayrıca daha önce de bahsedildiği üzere kaynak başlangıç ve bitiş noktalarında pim boyutu kadar boşluk oluşması nedeniyle bu bölgelerin kusurlu oldukları fakat literatürde belirtilen 25 mm' lik kısımların kaynak başlangıç ve bitiş noktasından atılması ile bu sorunun bağlantıların mukavemet özellikleri üzerine olumsuz etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Pimsiz takımla yapılan bağlantılarda ise kaynak işleminin gerçekleştirilebilmesi için takım dalma derinliği olarak 0,8 mm seçilmesi ve omuzun pimli SKK yöntemine göre kaynak işleminde gerekli ısı ve plastikleşmiş malzemelerin karışmasını sağlaması nedeniyle kaynak esnasında ilerleme kenarından yığma kenarına doğru takımın talaş kaldırması durumu bu yöntemde daha belirgin bir şekilde gözlemlenmiş ve kaynak sonrası düzgün bir dikiş görüntüsü için çapak alma işlemi uygulanmıştır. Yorulma deneylerinden de görüleceği üzere pimsiz takımla kaynak işleminde üçgen ve kare profilli takımların bindirme kaynağında karşılaşılan kaynak çekirdeğinin her iki yanındaki iki kaynak metalinin birbirine kaynamama durumu pimsiz profilli takımın kaynaklı bağlantılarda görsel olarak tespit edilmemiş, bu da pimsiz profilli takımın yorulma mukavemet değerlerinin diğer karıştırıcı takımlara göre yüksek çıkmasına neden olmuştur.

5.2.2. Çekme deney sonuçlarının irdelenmesi

Çekme mukavemet değerlerinin karşılaştırıldığı Tablo 5.1 ve Şekil 5.5 incelendiğinde bağlantılardaki en yüksek mukavemet değerlerinin sırası ile kare, üçgen ve pimsiz profile sahip karıştırıcı takımlar ile elde edildiği görülebilmektedir. Üçgen ve kare profilli takımlar kendi içinde değerlendirildiğinde kare profilli takım kullanılması ile pimin temas ettiği plastikleşmiş malzeme hacminin fazla olması ve bu sayede daha yüksek hacimde malzemeyi karıştırma imkanı sağlaması nedeniyle kare profilli takımla yapılan bağlantıların mukavemet değerleri daha yüksek çıkmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen sonuçların literatür araştırmaları ile aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Bunun dışında pimsiz takımla elde edilen mukavemet değerlerinin, üçgen takımla elde edilen değerlere yakın çıkması pimsiz takımla kaynak parametrelerin uygun seçilmesi koşulu ile pim sarfiyatını yaşanmayacağı SKK yöntemiyle malzemelerin başarı ile kaynaklanabileceğinin kanıtıdır. Çekme mukavemet değerleri arasındaki farkın nedenleri incelendiğinde bağlantıların mikroyapı görüntülerine bakacak olursak eğer, pimsiz takımla gerçekleştirilen bağlantılarda bindirme bölgesinde iki malzemenin birbirine yer yer kaynamadığı ve boşluklar oluştuğu görülmektedir. Üçgen profilli bağlantılarda ise kaynak bölgesinin mikroyapı görüntülerinde boşlukların varlığı açık şekilde görülmekte ve buda bağlantı mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. Kare profilli takımla yapılan bağlantılarda ise ısı etkisiyle plastikleşmiş malzemenin kare pim sayesinde diğer takımlara göre daha fazla hacmi karıştırması bağlantının mukavemet değerini arttıran en önemli faktör olmuştur.

Kaynaklı bağlantıların çekme mukavemet değerlerine göre verimi incelendiğinde kare takımlı bağlantıların verimi %57, üçgen takımlı bağlantıların verimi %53, pimsiz takımlı bağlantıların verimi ise %52’ dir.

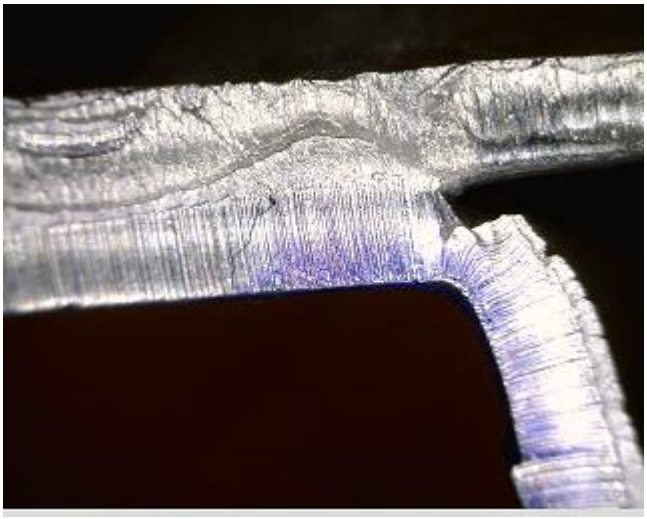
5.2.3. Eğme deney sonuçlarının irdelenmesi

Eğme deney sonuçlarından görüleceği üzere üç farklı karıştırıcı takım ile yapılan bağlantıların hiçbirinde kaynağın kök ve yüz bölgesinde çatlama olmamış ve bağlantılar daha önceki literatür araştırma sonuçlarında olduğu gibi testi başarı ile geçmişlerdir.

Aşağıda eğme deneyi sonucunda parçaların kaynak bölgesinden alınan görüntüler yer almaktadır.



Şekil 5.24. Pimsiz profil karıştırıcı takımla kaynaklı bağlantının yüzey eğme görüntüsü



Şekil 5.25. Kare profil karıştırıcı takımla kaynaklı bağlantının kök eğme görüntüsü



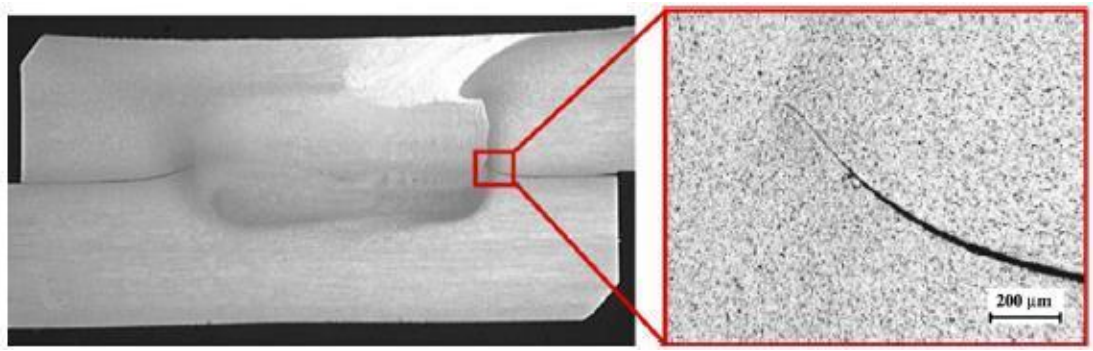
Şekil 5.26. Üçgen profil karıştırıcı takımla kaynaklı bağlantının kök eğme görüntüsü

Yukarıdaki şekillerden de görüleceği üzere pimsiz takımlı bağlantının eğme deneyi sonucunda birleşme bölgesinin yanında açılma oluşmaz iken kare ve üçgen takımlı bağlantıların birleşme bölgesinin yanında uygulanan eğme yükü ile beraber açılmalar oluşmuştur. Şekil 5.8' de gösterildiği gibi pimsiz takımlı bağlantının eğme deneyinde diğer eğme numunelerine göre daha fazla eğilmesine karşın kaynağın kök ve yüz bölgesinde hasar gözlemlenmemiştir.

5.2.4. Yorulma deney sonuçlarının irdelenmesi

Kaynaklı numunelere uygulanan eğmeli yorulma deneyi (Tablo 5.2 ve Şekil 5.9) sonucunda çekme mukavemet değerlerinin tersi olarak en yüksek yorulma mukavemet değerleri sırası ile pimsiz, üçgen ve kare profille kaynak yapılmış numunelerde elde edilmiştir. Üçgen ve kare profilli karıştırıcı takım kaynaklı numuneler kendi içlerinde değerlendirildiğinde bindirme kaynağında kare profil ile plastik şekil değiştiren malzeme hacminin arttırılması çekme mukavemetine artı yönde etki yapar iken oluşan ısı ve mekanik şekil değiştiren malzeme hacminin fazla olması sonucunda TMEB' nin kare profil takım ile kaynaklı bağlantılarda yorulma mukavemetini düşürücü yönde etki ettiği gözlemlenmiştir. Pimsiz karıştırıcı takımla kaynaklı numuneler de ise diğer takımlı bağlantıların çekme mukavemetlerine yakın değerler elde edilmişken yorulma mukavemeti açısında belirgin üstünlük sağlaması literatürde ileride yapılacak olan çalışmalara ışık tutması açısından önem arz etmektedir. Ayrıca metalografi numunelerine bakıldığında üçgen profilli kaynak

numunelerinde kaynak boşluklarını fazlalığı bu parçaların eğmeli yorulma deney sonuçlarını olumsuz yönde etkilemiştir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken konu ise Şekil 5.27' de gösterildiği gibi kare ve üçgen profilli takımlarda bindirme kaynağında kaynak çekirdeğinin her iki yanındaki kaynamamış bölgelerin varlığı numunelerde yorulma mukavemetini düşürücü yönde etki etmiştir. Pimsiz profilli karıştırıcı takım ile daha geniş yüzeyde kaynak sağlandığı ve bindirme bölgelerinde kaynamamış bölge daha az olduğu için pimsiz profilli takımla kaynaklı numunelerde daha iyi yorulma mukavemeti elde edilmiştir.

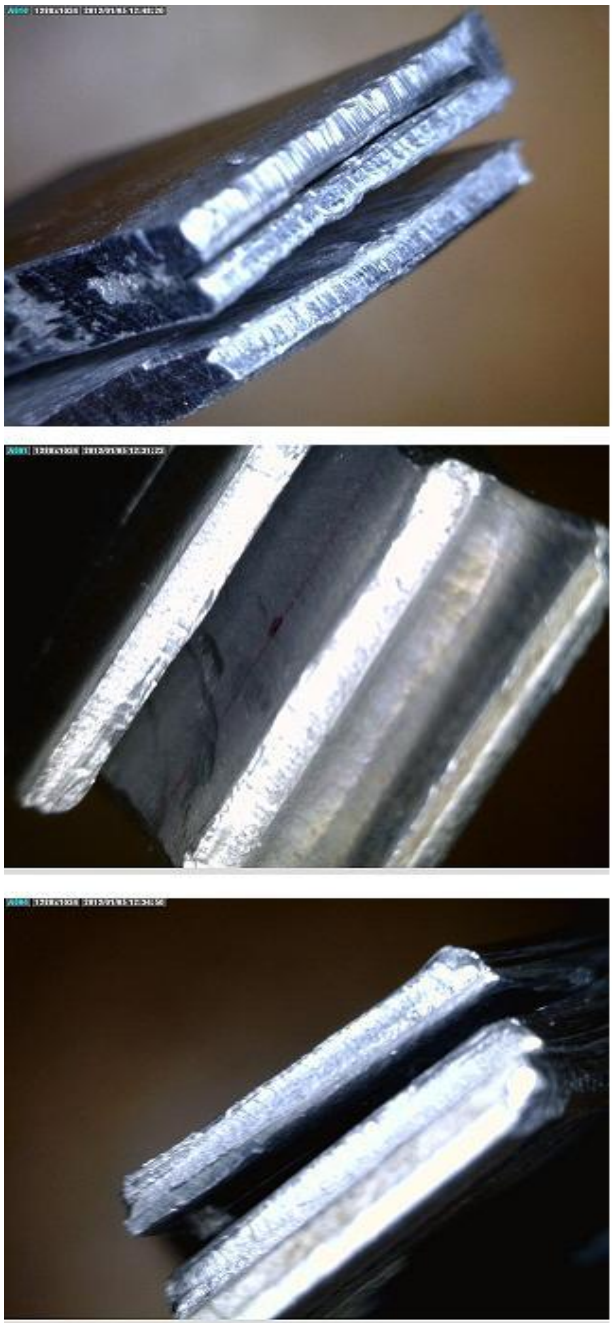


Şekil 5.27. Bindirme kaynağında karşılaşılan kaynak hatası (Fersini ve diğ., 2008)

Ayrıca yapılan literatür araştırmaları sonucu üçgen ve kare takım kaynaklı bağlantıların kaynak bölgelerinde tespit edilen "kissing-bond" bölgelerinin varlığı kaynaklı bağlantıların yorulma mukavemetlerini düşürücü etki ettiği bilinmektedir. Buna karşın pimsiz takımlı bağlantıların metalografik incelemelerinde bu kusurlu bölgelere rastlanılmamıştır.

Taramalı elektron mikroskobu ile bağlantıların kırılma yüzeyleri incelendiğinde yüzeylerde gevrek kırılmanın varlığı görülmüştür. Buna karşın pimsiz takımlı bağlantıların kırılma görüntüleri incelendiğinde diğer takımlı bağlantılara göre daha tabaka tabaka bir kırılmanın olduğu görülmektedir.

Şekil 5.28' de üç farklı karıştırıcı takımla yapılan kaynaklı bağlantılardan alınan numunelerin yorulma deneyi sonrası kırılma yüzeylerinin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.28. Sırası ile pimsiz, kare ve üçgen profil karıştırıcı takımla kaynaklı bağlantıların eğme deneyi sonrası kırlıma yüzey görüntüleri

5.2.5. Metalografik inceleme sonuçlarının irdelenmesi

Kaynaklı parçalardan elde edilen metalografi numunelerinin mikroyapı incelemeleri Şekil 5.16, 5.17, 5.18, 5.19' da verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere mikroyapı görüntülerinde bağlantının EM, TMEB ve KM görüntüleri verilmektedir. Esas metal mikroyapısına bakacak olursak eğer haddeleme hatlarının belirginliği ve ince taneli

homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. TMEB' de ise çökeltilerin daha sıklaşarak oluştukları ve bölgenin kaynak metaline göre daha açık olduğu görülmektedir. Kare profile sahip takımla yapılan bağlantılarda kaynak metal bölgesinin genişliği daha belirgin bir şekilde gözükürken üçgen profilli takımla yapılan bağlantılarda kaynak metal bölgesinin darlığı ve tespit edilen yer yer boşluklar çekme mukavemet sonuçlarını doğrular niteliktedir. Pimsiz takımla yapılan bağlantılarda ise iki malzeme arasındaki birleşme hatasının varlığı kaynak nüfuziyetinin yeterli olmadığına, bağlantının mukavemet değerleri yükseltilmek istenirse değişik kaynak parametrelerinin uygulanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bağlantıların mikroyapı sonuçları literatür araştırmalarında elde edilen bilgiler ile doğru orantılıdır. Pimsiz takımla sürtünme karıştırma kaynak yöntemi günümüzde nokta kaynağı uygulamalarında kullanıyor olmasına karşın yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçların ileriki çalışmalara ışık tutması amaçlanmıştır.

5.2.6. Mikrosertlik taraması sonuçlarının irdelenmesi

SK kaynak yöntemiyle kare, üçgen ve pimsiz takımla kaynak yapılmış levhalardan alınan metalografi numuneleri üzerinde yapılan Vickers sertlik taraması sonuçları Şekil 5.20, 5.21, 5.22, 5.23 'de gösterilmiştir. Literatür araştırmaları sonucunda EM-TMEB-KM hattı boyunca sertlik profilinin azalması ve kaynak metalinden sonra tekrar bir artış gözlemlenmesi beklenmektedir.

Kare takımla yapılan bağlantının sertlik profili incelendiğinde sertlik düşüşünde eksen kayması olduğu ve kaynak metalinden sonra esas metale göre belirgin bir sertlik artışı gözlemlenmiştir. Kaynak metalinde ortalama 40-44 HV sertlik değeri ölçülürken esas metal bölgesinde sertlik değeri 50-54 HV olarak ölçülmüştür.

Üçgen takımla kaynaklı bağlantının sertlik profili incelendiğinde ise literatürde belirtilen sertlik profiliyle uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Kaynak metali bölgesinde sertlik düşüşü belirgin bir şekilde gözlemlenirken esas metal bölgesinde doğru da aynı şekilde belirgin bir sertlik artışı ortaya çıkmıştır. Yapılan tarama sonucunda kaynak metali bölgesinde sertlik değerinin ortalama 40-42 HV olduğu görülmüştür.

Pimsiz takımlı bağlantının sertlik profilinde kaynak bölgelerinin uç kısımlarında üçgen takımlı numunelere göre sertlik değerinin daha düşük olduğu görülmüştür (44-46 HV). Kaynak metaline doğru sertlik profilinin literatürde belirtilen sertlik profiline ulaştığı ve kaynak metalinde düşüş gösterip esas metal bölgesinde tekrar artış gösterdiği görülmektedir.

Metalografi numuneleri üzerinde yapılan sertlik taraması sonuçlarının yorulma mukavemet değerleri ile aynı doğrultuda olması bu sonuçları doğrular niteliktedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yıllarda alüminyum alaşımlarının kaynağında endüstride kullanım oranını hızla arttıran sürtünme karıştırma kaynak yönteminin AW-5005 türü alüminyum alaşımlarının kaynağında kare, üçgen ve pimsiz profilli takımların bağlantının mekanik ve mikroyapısı üzerine etkisi incelenmiş olduğu bu çalışmada elde edilen veriler sonucunda aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır.

(1) Kaynak işleminde 1,5 mm kalınlığında malzeme kullanıldığı için kaynak sırasında parçaların freze tablasına rijit bir şekilde bağlanması ve papuçlar arasına lama konularak ısıdan dolayı çarpılmanın azaltılması hedeflenmelidir. Üç değişik takımla yapılan bağlantılar sonucunda deney parçalarında belirgin bir çarpılma gözlemlenmemiştir.

(2) Üç farklı takımla gerçekleştirilen bağlantı dikişlerinin kök ve yüz bölgelerinde bir kusura rastlanmamıştır.

(3) En yüksek çekme mukavemet değeri kare profilli karıştırıcı takımla elde edilirken üçgen ve pimsiz profilli takımlarda çekme mukavemet değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

(4) Eğme deneyi sonucunda kaynak dikişlerinin kök ve yüz bölgelerinde çatlama ya da hasar oluşmamıştır.

(5) Pimsiz profilli takımla yapılan bağlantıların yorulma mukavemeti kare ve üçgen profilli takıma göre belirgin üstünlük sağlamıştır.

(6) Yorulma deneyi sonucunda kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenmiş olup gevrek kırılmanın olduğu görülmüştür. Yorulma mukavemet ölçümlerin doğrular nitelikte pimsiz takımlı bağlantıların kırılma yüzeylerinde daha tabakalı bir kırılma gözlemlenmiş, bu da yorulma mukavemet değerine etki etmiştir.

(7) Değişik profil yapısına sahip pimsiz takımların sürtünme karıştırma kaynağı bağlantının mukavemet özellikleri üzerine etkisi araştırılmalıdır.

(8) Karıştırıcı takım pim şekli ve boyutlarının değiştirilerek bağlantının mukavemet özelliklerine etkisi araştırılmalıdır.

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin özellikle alüminyum alaşımlarını kaynağında getirmiş olduğu üstünlükler ile çeşitli endüstri kollarında kullanımını giderek arttırmaktadır. Yapılan bu çalışma ve literatür araştırmaları bu yöntemin gelecekte ergitme esaslı yöntemlerin yerini alarak daha fazla alanda kullanılacağını kanıtlamaktadır.

KAYNAKLAR

Askeland D. R., *Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri*, 3üncü baskı, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 1998.

Ataoğlu H., Mıstıkoğlu S., Çam G., Sürtünme karıştırma kaynaklı bir Al alaşımın iç yapı ve mekanik karakterizasyonu, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 24-25 Ekim 2003.

Attallah M., Microstructure property development in friciton stir welds of aluminium based alloys, PhD Thesis, Birmingham University, Metallurgy and Materials Engineering, 2007.

Bakavos D., Chen Y., Babout L., Prangnell P., Material interactions in a novel pinless tool approach to friction stir spot welding thin aluminum sheet, *Metallurgical and Metarial Transactions*, 2011, **42**, 1266-1282.

Bakavos D., Prangnell P., Effect of reduced or zero pin length and anvil insulation on friction stir spot welding thin gauge 6111 automotive sheet, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, **14**, 443-456.

Balasubramanian V., Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters, *Materials Science and Engineering*, 2008, **480**, 397–403.

Barnes T. A., Pashby I. R., Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles Part I-solid and liquid phase welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **99**, 62-71.

Binal A., AA 2024-T3 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006, 184134.

Bozu M., Sürtünme karıştırma kaynağında farklı kaynak parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007, 200947.

Buffa G., Campanile G., Fratini L., Prisco A., Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties, *Materials Science and Engineering*, 2009, **519**, 19–26.

Bulut R., Magnezyum AZ31 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2009, 246198.

Büyükarslan S., Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş alüminyum alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006, 185312.

Cavaliere P., Campanile G., Panella F., Squillace A., Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **200**, 364–372.

Cavaliere P., Campanile G., Panella F., Squillace A., Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by Friction Stir Welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **180**, 263–270.

Cavaliere P., Nobile R., Panella F. W., Squillace A., Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, **46**, 588–594.

Chen H. B., Yan K., Lin T., Chen S. B., Jiang C. Y., Zhao Y., The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds, *Materials Science and Engineering*, 2006, **433**, 64–69.

Çam G., Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 24-25 Ekim 2003.

Dilek M., Mechanical properties of different aluminum alloys joined by friction stir welding, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006, 183741.

Doğan S., AA 5754–H22 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006, 183907.

Dubourg L., Merati A., Jahazi M., Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin, *Materials and Design*, 2010, **31**, 3324–3330.

Elangovan K., Balasubramanian V., Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **200**, 163–175.

EN 895, Destructive Tests on Welds in Metallic Materials-Traverse Tensile Tests, European Standarts, CEN, Brussel, 1995.

EN 910, Destructive Tests on Welds in Metallic Materials-Bend Tests, European Standarts, CEN, Brussel, 1996.

Eren T., AA 6063-T6 borularının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2005, 197272.

Ericsson M., Jin L., Sandström R., Fatigue properties of friction stir overlap welds, *International Journal of Fatigue*, 2007, **29**, 57–68.

Ericsson M., Sandström M., Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG, *International Journal of Fatigue*, 2003, **25**, 1379–1387.

Fersini D., Pirondi A., Analysis and modelling of fatigue failure of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, **75**, 790-803.

Fersini D., Pirondi A., Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, **74**, 468–480.

Flores O. V., Kennedy C., Murr L. E., Brown D., Pappu S., Nowak B. M., McClure J. C., Microstructural issues in a friction stir welded aluminum alloys, *Scripta Materialia*, 1998, **38**, 703-708.

Forcellese A., Gabrielli F, Simoncini M., Mechanical properties and microstructure of joints in AZ31 thin sheets obtained by friction stir welding using ‘‘pin’’ and ‘‘pinless’’ tool configurations, *Materials and Design*, 2012, **34**, 219-229.

Güçlüer S., Sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle alın kaynağı yapılmış Al-5086-H32 levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 2007, 202774.

Hamilton C., Dymek S., Blicharski M., A model of material flow during friction stir welding, *Material Characterization*, 2008, **59**, 1206-1214.

Hirata T., Oguri T., Hagino H., Tanaka T., Chung S. W., Takigawa Y., Higashi K., Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering*, 2007, **456**, 344–349.

John R., Jata K. V., Sadananda K., Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys, *International Journal of Fatigue*, 2003, **25**, 939–948.

Kahraman B., 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, 2009, 232760.

Kallee S. W., Kell J. M., Thomas W. M., Wiesner C. S., Development and implementation of innovative joining processes in the automotive industry, *DVS Annual Welding Conference*, Essen, Germany, 12-14 September 2005.

Kaptan K., Sürtünme karıştırma kaynağı birleştirilmelerinde farklı karıştırıcı uç formlarının birleştirme kalitesine etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 234054.

Kaluç E., Taban E., Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Ark Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilmesi, *Metal Dünyası*, 2007, **174**, 130-140.

Kaluç E., Taban E., Sürtünen eleman ile kaynak (FSW) yöntemi makinaları, *MakinaTek Dergisi*, 2007, **3**, 100-105.

Kamp N., Sullivan A., Robson J. D., Modelling of friction stir welding of 7xxx aluminium alloys, *Materials Science and Engineering*, 2007, **466**, 246–255.

Khaled T., An outsider looks at friction stir welding, Chief Scientific / Technical Advisor, metallurgy federal aviation administration, Lakewood, USA, 5-6 July 2005.

Kimapong K., Watanabe T., Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel, *Welding Journal*, 2004, **23**, 277-282.

Kurt A., Özdemir M., Boz M., Alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 24-25 Ekim 2003.

Külekçi M. K., Şık A., Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynak bağlantılarının özellikleri, *Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 24-25 Ekim 2003.

Külekçi M. K., Şık A., Kaluç E., Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints, *International Journal of Advanced Technology*, 2008, **36**, 877-882.

Leal R. M., Leitao C., Loureiro A., Rodrigues D. M., Vilaça P., Material flow in heterogeneous friction stir welding of thin aluminium sheets: Effect of shoulder geometry, *Materials Science and Engineering*, 2008, **498**, 384–391.

Leal R. M., Loureiro A., Effect of overlapping friction stir welding passes in the quality of welds of aluminium alloys, *Materials and Design*, 2008, **29**, 982-991.

Maddox S. J., Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures, *International Journal of Fatigue*, 2003, **25**, 1359–1378.

Malta D., Alüminyum alaşımı ve pirinç levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle bindirme kaynağı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 2006, 202776.

Mathers G., *The welding of aluminium and its alloys*, 2th ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2002.

Mishra R. S., Ma Z. Y., Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering*, 2005, **50**, 1–78.

Mishra R. S., Mahoney M. W., Friction stir welding and processing, *ASM International*, DOI: 10.1361/fswp2007p037.

Moreira P. G. M. P., Santos T., Tavares S. M. O., Richter-Trummer V., Vilaça P., Castro P. M. S. T., Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6, *Materials and Design*, 2009, **30**, 180–187.

Nandan R., Debroy T., Bhadeshia H. K. D. H., Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science*, 2008, **53**, 980–1023.

Oosterkamp A., Oosterkemp L. D., Nodeide A., Kissing bond phenomena in solid-state welds of aluminum alloys, *Welding Journal*, 2004, **34**, 225-231.

Öksüz C., Yüksek Mukavemetli (2024,6061,7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Suverme Duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996, 55651.

Palanivel R., Mathews P., Murugan N., Dinaharan I., Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys, *Materials and Design*, 2012, **40**, 7–16.

Peel M., Steuwer A., Preuss M., Withers P. J., Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds, *Acta Materialia*, 2003, **51**, 4791–4801.

Perrett J. G., Martin J., Threadgill P. L., Ahmed M. M. Z., Recent developments in friction stir welding of thick section aluminium alloys, *6th World Congress*, Florence, Italy, 13-17 March 2007.

Rai R., De A., Bhadeshia H. K. D. H., Debroy T., Review: friction stir welding tools, Science and Technology of Welding and Joining, 2011, **16**, 325-342.

Rodrigues D. M., Loureiro A., Leitao C., Leal R. M., Chaparro B. M., Vilaça P., Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds, *Materials and Design*, 2009, **30**, 1913–1921.

Santos T., Ramos P. M., Vilaça P. Non destructive testing of friction stir welding: Comparison of planar eddy current probes, *16th IMEKO TC4 Symposium Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements*, Florence, Italy, 22-24 September 2008.

Sarsılmaz F., Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008, 222104.

Sayer S., AA 6063 (AlMgSi0.5) tipi alüminyum malzemelerinin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak değişkenlerinin, bağlantının dayanımı ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007, 202088.

Shahri M. M., Sandström R., Fatigue analysis of friction stir welded aluminium profile using critical distance, *International Journal of Fatigue*, 2010, **32**, 302–309.

Smith W. F., *Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri demir dışı alaşımlar*, 2nci baskı, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 2001.

Sullivan A., Robson J. D., Microstructural properties of friction stir welded and post-weld heat-treated 7449 aluminium alloy thick plate, *Materials Science and Engineering*, 2008, **478**, 351–360.

Starink M. J., Deschamps A., Wang S. C., The strenght of friction stir welded and friction stir processed aluminium alloys, *Scripta Materialla*, 2008, **58**, 377-382.

Şık A., Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyum kaynağında kaynak bölgesinin eğmeli yorulma dayanımının incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 2006, **9**, 125-130.

Şık A., Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum levhaların eğme ve yorulma özelliklerinin incelenmesi, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2005, **9**, 12-17.

Şık A., Kayabaş Ö., Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyumun kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2003, **11**, 30-43.

Taban E., 5xxx serisi alüminyum alaşımlarının TIG, MIG ve sürtünen eleman ile birleştirme kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit, 2004, 154963.

Taban E, Kaluç E., Havacılık, uzay, taşıt ve gemi yapım endüstrisinde kullanılan sürtünen eleman ile birleştirme (FSW) kaynak yönteminin esasları, *MakinaTek Dergisi*, 2006, **12**, 52-57.

Taban E, Kaluç E., Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının standart gösterimleri, *MakinaTek Dergisi*, 2005, **3**, 178-185.

Taban E, Kaluç E., Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının endüstriyel kullanım alanları, *Metal Dünyası Dergisi*, 2005, **141**, 107-114.

Taban E, Kaluç E., Sürtünen eleman ile birleştirme (FSW) kaynaklı EN AW5083 – EN AW5086 çifti alüminyum alaşımı bağlantıların mekanik ve mikroyapısal özellikleri, *Metal Dünyası Dergisi*, 2005, **140**, 84-89.

Taban E, Kaluç E., Sürtünen eleman ile birleştirme (FSW) kaynaklı EN AW-5086 alüminyum alaşımı bağlantıların mekanik ve mikroyapısal özellikleri, *Metal Dünyası Dergisi*, 2004, **138**, 63-68.

Taban E, Kaluç E., Sürtünen eleman ile birleştirme (FSW) kaynaklı EN AW-5083 alüminyum alaşımı bağlantıların mekanik ve mikroyapısal özellikleri, *Metal Dünyası Dergisi*, 2004, **137**, 125-130.

Taban E, Kaluç E., Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının sürtünen eleman ile birleştirme kaynağında (FSW) kaynak bölgesinin mikroyapısal özellikleri, *Metal Dünyası Dergisi*, 2004, **136**, 131-136.

Taban E, Kaluç E., Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının sürtünen eleman ile birleştirme (FSW) kaynağı ve endüstriyel uygulamaları, *Metal Dünyası Dergisi*, 2004, **135**, 79-83.

Tanrıöver L., AA5052/2024 alaşımlarının sürtünme sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008, 222056.

Thomas W., Nicholas D., Staines D., Tubby P. J., Gittos M. F., FSW process variants and mechanical properties, TWI Ltd., http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/fsw-friction-stir-welding-process-variants-and-mechanical-properties-july-2004/, (Ziyaret tarihi: 24 Ocak 2011).

Thurlby N., Advances in high rotational speed-friction stir welding for naval applications, Master Thesis, Wichita State University, Mechanical Engineering, Kansas, 2009.

Toktaş A., Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin AA 6063 alüminyum alaşımına uygulanması ve kaynak parametrelerinin malzeme iç yapısı ile mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2006, 176673.

Tozaki Y., Uematsu Y., Tokaji K., A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 844-851.

Tülbentçi K., *Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı*, 1inci baskı, Böhler Yayınları, İstanbul, 1990.

Uematsu Y., Tokaji K., Shibata H., Tozaki Y., Ohmune T., Fatigue behaviour of friction stir welds without neither welding flash nor flaw in several aluminium alloys, *International Journal of Fatigue*, 2009, **31**, 1443–1453.

URL-1: http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=205&pageid=2144416862, (Ziyaret tarihi: 8 Nisan 2011).

URL-2: http://aluminium.matter.org.uk/content/media/images/weld-fsw.jpg, (Ziyaret tarihi: 09 Nisan 2011).

URL-3: http://content.edgaronline.com/edgar_conv_img/2007/10/24/0001193125-07-224413_G18575IMG21.JPG, (Ziyaret tarihi: 24 Ocak 2011).

URL-4: http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding, (Ziyaret tarihi: 7 Eylül 2011).

URL-5: http://t1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT15XSovPkO3VFmfwBjndL8Vuq44Hggb_IWcpVFuoW7fcBGc_cf, (Ziyaret tarihi: 17 Temmuz 2011).

URL-6: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumble/e/0/Bulkhead_%26_Nosecone_Of_Orion_Spacecraft_Joined_By_Friction_StirWelding.jpg/800pxBulkh

ead_%26_Nosecone_Of_Orion_Spacecraft_Joined_By_Friction_Stir_Welding.jpg, (Ziyaret tarihi: 17 Temmuz 2011).

URL-7: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/3/35/Anand-FSW-Figure1-A.jpg, (Ziyaret tarihi: 14 Temmuz 2011).

URL-8: http://upload.wikimedia.org/wikipedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0f/SpaceX_factory_Falcon_9_booster_tank.jpg/800pxSpaceX_factory_Falcon_9_booster_tank.jpg, (Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2011).

URL-9: http://www.alunet.com/Portals/0/portaladmin_files/article_ images/Graphs/Production_2010.gif, (Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2011).

URL-10: http://www.alunet.com/Statistics.aspx, (Ziyaret tarihi: 18 Mayıs 2011).

URL-11: http://www.dlr.de/wf/en/Portaldata/23/Resources/dokumente/flyers//reibruehrschweissen friction stir welding /Friction_Stir_Welding.pdf, (Ziyaret tarihi: 24 Mart 2011).

URL-12: http://www.dlr.de/wf/en/Portaldata/23/Resources/images/forschung/fsw/fsw_600.jpg, (Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2011).

URL-13: http://www.emt-india.net/process/aluminium/Aluminium.htm, (Ziyaret tarihi: 3 Haziran 2011).

URL-14: http://www.emt-india.net/process/ aluminium/img/al_how1.jpg, (Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2011).

URL-15: http://www.epa.gov/aluminum-pfc/images/dtr_exhibit.gif, (Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2011).

URL-16: http://www.loxin2002.com/en/technologies/, (Ziyaret tarihi: 21 Kasım 2011).

URL-17: http://www.loxin2002.com/imgs/FSW-Imagen1-Resized.jpg, (Ziyaret tarihi: 17 Şubat 2011).

URL-18: http://www.rd-carbon.com/template/image/labo-test-equipment.jpg, (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2011).

URL-19: http://www.sciencephoto/image/97353/530wm/C0033127-aluminium_production -SPL.jpg, (Ziyaret tarihi: 24 Mart 2011).

URL-20: http://www.sciencephoto.com/image/356700/large/T8100278- production_of_aluminium-SPL.jpg, (Ziyaret tarihi: 22 Ocak 2011).

URL-21: http://www.twi.co.uk/EasysiteWebgetresource.axd?AssetID=2426&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-22: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=7703&type==full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-23: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=7847&type=full &servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-24: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=11631&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-25: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=13888&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-26: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=14184&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-27: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=14555&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-28: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=15026&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-29: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb getresource. axd?AssetID=15857&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-30: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=15892&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-31: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=15900&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-32: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=15931&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-33: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=15944&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-34: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/_getresource.axd?AssetID=15948&typefull&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-35: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=15949&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-36: http://www.twi.co.uk/_EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=16071&typefull&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-37: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=16383&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

URL-38: http://www.twi.co.uk/EasysiteWeb/getresource.axd?AssetID=16384&type=full&servicetype=Inline, (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2011).

Venugopal T., Sirinivasa R. K., Prasad R. K., Studies on friction stir welded AA 7075 aluminum alloy, *Trans. Indian Inst. Met*., **57**, 2004, 659-663.

Watts E. R., Staines D. G., Thomas W. M., Nicholas E. D., Dual rotation stir welding-preliminary trials, TWI Ltd., http://www4.twi.co.uk/private/rg/wt_fsw.pdf, (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2011).

Zhang X., Chan B., Lama S., Satikumar V., Shi S., Bao R., Influence of impact dents on the fatigue strength of aluminium alloy friction stir welds, *Procedia* Engineering, 2010, **2**, 1691–1700.

ÖZGEÇMİŞ

1985 Almanya doğumlu olan Onur KIRCI, ilköğrenimini takiben orta öğrenimini Lüleburgaz Anadolu Lisesinde tamamlamış ve 2003 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü' nden 2008 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme ve İmalat Ana Bilim Dalında yüksek lisansa başlamıştır. Askerlik görevinin tamamlayan KIRCI, 2010 Mayıs – 2011 Ocak ayları arasında Sarten Ambalaj Sanayi A.Ş. Ar-Ge Bölümü' nde Üretim Mühendisi olarak çalışmış ve 2011 Ocak ayında girdiği Trakya Cam Sanayi A.Ş. Otocam Fabrikasında Üretim Mühendisi olarak çalışmaktadır.