



**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI BİRLEŞTİRMELERİNDE FARKLI
KARIŞTIRMA UÇ FORMLARININ BİRLEŞTİRME ESNASINDA
OLUŞTURDUĞU KUVVETLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Esra Hilal TÜRKYILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2019

Esra Hilal TRKYILMAZ tarafından hazırlanan ‘‘SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI BİRLEŞTİRMELERİNDE FARKLI KARIŞTIRMA UÇ FORMLARININ BİRLEŞTİRME ESNASINDA OLUŞTURDUĞU KUVVETLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina EĞitimi Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

Makine EĞitimi Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Baőkan: Prof. Dr. Mustafa BOZDEMİR

Meslek Yüksek Okulu Makine Programı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

ye: Doç. Dr. Yunus KAYIR

Makine EĞitimi Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 24/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli őartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŐYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Esra Hilal TÜRKYILMAZ

24/06/2019

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI BİRLEŞTİRMELERİNDE FARKLI
KARIŞTIRMA UÇ FORMLARININ BİRLEŞTİRME ESNASINDA OLUŞTURDUĞU
KUVVETLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Esra Hilal TÜRKYILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Kaynaklı birleştirmeler, endüstrinin büyük bir bölümünde iki metalin birleştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Metallerin birleştirilmesinde, malzemenin özelliğini kaybetmemesi için çeşitli araştırmalar ve deneyler yapılmış ve son 20 yıldır sürtünme karıştırma kaynağı üzerinde önemli bir yol kat edilmiştir. Günümüzde, ileri teknolojilerin uygulandığı gelişmiş endüstride, mekanik parçaların kaynaklı birleştirilmelerinde faz dönüşümleri ve malzemede deformasyon genellikle istenmeyen bir durumdur. Bu olumsuzlukları gidermek, ancak malzemelerin mekanik ve metalurjik özelliklerini etkilemeyecek kadar düşük sıcaklıklarda yapılan birleştirme işlemleri ile mümkündür. Sürtünme karıştırma kaynağı ile metal malzemeler ergitilmeden katı faz ya da yarı katı halde birleştirilerek özellikleri korunmuş ve daha dayanıklı ve güvenli birleştirmeler gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde kullanılan kaynak pimlerinin seçimi ve özellikleri, malzemenin birleştirme kalitesinde önemli ölçüde etkilidir. Bu çalışma ile sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan farklı pim tasarım ve imalatları gerçekleştirilmiştir. 7 farklı tipte karıştırıcı pim tasarlanmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalarda oluşan kuvvetler incelenerek en iyi performansı gösteren pim tespiti yapılmıştır. Yapılan tüm deneyler sonunda üçgen vidalı karıştırıcı pimin en yüksek mukavemetli birleştirmeyi gerçekleştirdiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91439
Anahtar Kelimeler : Sürtünme karıştırma kaynağı, karıştırıcı uç profili, kuvvet ölçümü, çekme testi
Sayfa Adedi : 95
Danışman : Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DIFFERENT STIRRING PIN FORMS
CAUSING FORCE ON FRICTION STIR WELDING

(M. Sc. Thesis)

Esra Hilal TÜRKYILMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

It is used in welding combination industry for the purpose of combining two metal parts. While combining metals, there were a lot of researches conducted for no properties loss of material and in the last decade there were important developments in stir friction welding. Today, in developed metal parts' welded connections, phase transformations and material's deformation is an undesirable situation. To remove these undesirable situations, it is able to connect the parts at the low temperature but not changing the mechanical and metallurgical properties. By this way, metal materials are not melted, and it is carried out as solid phase formed so their properties are prevented and we have more strong connected parts. In this way, choosing pin and material properties are very important for connection quality. By this study, the different pins used for friction stir welding are designed and manufactured. There are 7 different types of stir pin. The best performance pin was determined by examining the forces formed in the parts which were joined by friction stir welding. At the end of all experiments, it was seen that the triangular screw mixer pin realized the highest strength coupling.

Science Code : 91439

Key Words : Friction Stir Welding, Stirrer pin profile, Force measurement, tensile test

Page Number : 95

Supervisor : Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Prof. Dr. Hüdayim BAŞAK'a, kullanılan aparatların üretiminde ve deneylerin yapılmasında gösterdiği maddi ve manevi desteklerinden dolayı “Düzce Mesleki Ve Teknik Anadolu Lisesi” nden değerli meslektaşlarım Bülent NARŞAP ve Erdoğan ÇEVİK'e, “Pagev Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi” nden Ümit KURTULMUŞ, Canan TUGAYTİMUR, Ömer ŞENGÜL ve numunelerin mikroyapı ve mikrosertlik testlerinin yapılmasındaki katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Malzeme Anabilim Dalına ve testlerin yapımında ve değerlendirmesindeki katkılarından dolayı Arş. Gör. Yasemin DÜNDAR, Arş. Gör. İrem Burcu ALGAN, Arş. Gör. Esra ALTUN'a, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli annem Ersin CAN, babam Hasan CAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. SÜRTÜNME VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMLERİ	39
3.1. Sürtünme Kaynağı.....	39
3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	40
3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağı için Temel Hazırlık	41
3.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Yöntemi.....	41
3.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Metalurjik Yapısı	42
3.6. Karıştırıcı Uç Ve Özellikleri	43
3.7. Malzeme Özellikleri Ve Kaynak Parametreleri	43
3.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılabilen Malzemeler.....	44
3.9. SKK da Etkin Olan Kaynak Parametreleri.....	45
3.10. SKK'nın Üstünlükler Ve Sınırlamalar	46
3.10.1. SKK'nın avantaj ve dezavantajları	46
3.10.2. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarındaki sınırlamalar	47
4. MATERYAL VE METOD	49

	Sayfa
4.1. Tezin Amacı ve Önemi	49
4.2. Kullanılan Malzeme ve Elemanlar	49
4.2.1. Dinamometre	49
4.2.2. Amplifier.....	50
4.2.3. Veri alma ünitesi	52
4.2.4. Karıştırıcı uçlar (Pimler).....	52
4.2.5. Bağlama kalıbı	55
4.2.6. SKK yönteminde kullanılacak malzeme seçimi	56
4.2.7. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan tezgah tipi	57
4.3. SKK'nın Yapılışı.....	58
4.3.1. SKK için tezgahın hazırlanışı	58
4.3.2. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemine başlama	60
4.3.3. Çekme deneyi çalışmaları ve sonuçları	68
4.3.4. Mikroyapı test çalışmaları ve sonuçları	71
5. TARTIŞMA	75
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	85
EK-1. Materyal detay resimleri.....	86
EK-2. Çizelgeler	90
ÖZGEÇMİŞ	94

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kaynak parametreleri	20
Çizelge 2.2. Mikroyapı inceleme sonuçları	22
Çizelge 2.3. Kare profilli pim için kaynak hızının birleştirmeye etkisi.....	24
Çizelge 2.4. Kare profilli pim (SQ) için omuz genişliğinin birleştirmeye etkisi.....	24
Çizelge 2.5. Aynı ve farklı alaşımların birleştirilmesinde kullanılan kaynak parametreleri.....	30
Çizelge 2.6. Yapılan test sonuçları	31
Çizelge 2.7. Dönme hızı ve ilerleme hızına göre oluşan maximum yük sonuçları	36
Çizelge 2.8. Kullanılan takım uçlarının ölçüleri	37
Çizelge 2.9. Kullanılan parametreler	37
Çizelge 4.1. Dinamometrenin kuvvet ölçme aralığı ve üzerindeki etki yönleri	50
Çizelge 4.2. Amplifier'ın teknik özellikleri	51
Çizelge 4.3. Al 6066 kalite al alaşımının kimyasal bileşimi.....	57
Çizelge 4.4. Al 6066 kalite al alaşımının mekanik özellikleri	57
Çizelge 4.5. Kaynak sırasında kullanılan parametreler ve kaynak esnasında oluşan kuvvet analizi sonuçları	61
Çizelge 4.6. Çekme numunesi sonuçları.....	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde özel olarak tasarlanmış pim.....	2
Şekil 2.1. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı	5
Şekil 2.2. Whorl ticari markalı karıştırıcı uç çeşitleri	6
Şekil 2.3. MX Triflute ve Flaret-Triflute uç dizaynları	6
Şekil 2.4. Skew-Stir ucunun resmi.....	7
Şekil 2.5. Whorl ve MX Triflute serileri için omuz dizaynları.....	7
Şekil 2.6. Uç profilleri	12
Şekil 2.7. Farklı omuz genişliğindeki pimler.....	13
Şekil 2.8. Kaynak başlığı tasarımı	14
Şekil 2.9. Deneyde kullanılan kaynak takımı ve ölçüleri	16
Şekil 2.10. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan pim	17
Şekil 2.11. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi	19
Şekil 2.12. Çekme deneyi sonuçları grafiği	20
Şekil 2.13. SKK da kullanılan pim tasarımı	21
Şekil 2.14. Seçilen takım uç profilleri	21
Şekil 2.15. Uç profillerinin mikrosertliğe etkisi	23
Şekil 2.16. Takım ucu profilinin mikrosertliğe etkisi	25
Şekil 2.17. Takım dönme hızının mikrosertliğe etkisi	26
Şekil 2.18. Uç profillerinin görünümü ve ölçüleri.....	26
Şekil 2.19. Takım geometrisi	28
Şekil 2.20. Sürtünme karıştırma kaynağı ile farklı dönme hızlarında birleştirilen numunelerin mikroyapı incelemesi a) 400dev/dak hız ile birleştirilen numune, b) 1500dev/dak hız ile birleştirilen numune	29
Şekil 2.21. Al5083-H111(a) ve Al 7075-T651(b) alaşımlarının birleşimlerinin mikroyapısal görünümleri	32
Şekil 2.22. Sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmenin mikroskobik incelemesi	33

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. Farklı kaynak hızlarında kaynatılan birleştirmelerin çekme deneyi sonuçları: a) 36mm/dak, b) 63mm/dak, c) 90mm/dak	33
Şekil 2.24. Tasarlanan uç profili ve açısı	34
Şekil 2.25. Sürtünme karıştırma kaynağının mafsallı birleştirilmesi	35
Şekil 2.26. Sürtünmeli mafsal kaynak parametreleri ile oluşturulan kaynak görüntüsü	36
Şekil 3.1. Sürtünme kaynağının yapım aşaması	40
Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma kaynağının yapım aşaması	40
Şekil 3.3. Sürtünme Karıştırma kaynak yönteminin çalışma prensibi	42
Şekil 3.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü: A: kaynak tesiri altında olmayan bölge, B: ısının tesiri altındaki bölge, C: yeniden kristalleşen bölge, D: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge	43
Şekil 3.5. Temel olarak tasarlanan karıştırıcı uç formu	43
Şekil 3.6. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde ucu eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi	44
Şekil 4.1. Deney seti kurulumu.....	52
Şekil 4.2. SKK için kullanılan uçlara ait vida profilleri (p:vida adımı, α :Vida açısı, h:Vida derinliği, d1:Vida dişi dibi çapı, d:Vida dişi üstü çapı)	54
Şekil 4.3. SKK işleminin dinamometre yardımıyla gerçekleştirilme düzeneği.....	59
Şekil 4.4. Al alaşımlı malzemeye kaynak öncesi hizalanması ve karıştırıcı ucun yanaşması	60
Şekil 4.5. Al 6066 Malzemelerinin, S: 900 dev/dak, f: 31.5 mm/dak kesme şartlarında değişik uç tipine sahip 7 adet kesici ile yapılan sürtünme-karıştırma kaynağında elde edilen Mz, Fz, Fx değerleri	62
Şekil 4.6. Her bir numune için oluşan kuvvet grafikleri; a:Ham Kanallı, b:Yuvarlak Vidalı, c:Üçgen Vidalı, d: Kare Vidalı, e: Düz Vidasız Üçgen, f: Testere Vidalı, g: Trapez Vidalı.....	63
Şekil 4.7. Çekme deneyi için hazırlanan numunelerin teknik resmi.....	68
Şekil 4.8. Çekme numunesi grafiği.....	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. MX Triflute uç dizaynının esin kaynağı deniz kabuğudur	7
Resim 2.2. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi	8
Resim 2.3. Space Shuttle External tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuvarlarındaki sürtünme karıştırma kaynak sistemlerinden görüntüler	8
Resim 2.4. Japonya ‘da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan al-paneller	9
Resim 2.5. Çekme numunelerinde kaynak ve kopma bölgeleri (1 kare piramit, 2 kare, 3 üçgen, 4 üçgen piramit, 5 koni)	12
Resim 2.6. Kaynaklı birleştirmelere ait yüzey resimleri	13
Resim 2.7. Çekme deneyi sonucu	13
Resim 2.8. SKK da kullanılan NC tezgahı ve üzerindeki kaynak aparatları (önden görünüş)	15
Resim 2.9. (a) Deneysel çalışmada kullanılan SKK kaynak aparat parçaları, (b) Aparatın montajlı hali ve kaynak numune çifti	15
Resim 2.10. Deney sonrası oluşan numune (1120dev/dak ‘da)	16
Resim 2.11. Farklı geometrik uçlar ile yapılan kaynak resimleri	27
Resim 2.12. Farklı geometrideki uç profillerinin birleştirdiği kaynak incelemesi a) 1nolu, b) 2nolu, c) 3 nolu, d) 4 nolu uç profilleri	27
Resim 2.13. Otomatik olarak çalışan ve geri çekilebilen takım	38
Resim 4.1. Deneylerde kullanılan dinamometre	50
Resim 4.2. Dört Kanaldan veri akışını düzenleyen amplifier	51
Resim 4.3. Veri alma kartı (data kart).....	52
Resim 4.4. Temel olarak tasarlanan karıştırıcı uç formu geometrik boyutları ve imal edilen karıştırıcı uç örneği	53
Resim 4.5. Karıştırıcı uç profillerinin genel görünüşü	55
Resim 4.6. Karıştırıcı uç profillerinin genel görünüşü	55
Resim 4.7. Bağlama kalıbının resmi ve teknik resmi	56

Resim	Sayfa
Resim 4.8. Al6066 malzemenin kaynak işlemine hazır hali.....	57
Resim 4.9. Ünlversal Freze tezgahı (FU 315x1250 V/1).....	58
Resim 4.10. SKK ile birleşirilen Al Alaşımı Levhalar	67
Resim 4.11. Tel erozyonda kesilen numunelerin frezede 6mm kalınlığa getirilmesi.....	68
Resim 4.12. Kesilen numune örneği	69
Resim 4.13. Instron 3369 marka çekme cihazı	69
Resim 4.14. a) Kalıplama makinesi, b) Kalıplama makinesi haznesi, c) Bakalitlenmiş numune	71
Resim 4.15. Otomatik parlatma makinesi.....	72
Resim 4.16. SKK ile birleştirilen Al 6066 alaşımı numunelerin tarayıcı resimleri	72
Resim 4.17. SKK ile birleştirilen numunelerin mikroskobik fotoğrafları	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

HRc

Rockwell C- Sertliği

N/mm²

Newton/milimetre kare

Kısaltmalar

Açıklama

AISI

Amerikan Standart Birimi

DIN

Alman Endüstri Normu

EDS

Enerji Dağılımlı Spektrometre

FSW

Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding)

ISO

Uluslararası Standart Organizasyonu

ITAB

Isının Tesiri Altındaki Bölge

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

SKK

Sürtünme karıştırma kaynağı

TEB

Termodinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge

TSE

Türk Standartları Enstitüsü

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile yeni geliştirilen malzemeler yeni yöntemlerle birleştirilme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Son yirmi beş yılda alaşımların geliştirilmesi ile bu malzemelerde kaynaklı birleştirmelerde farklı problemler ortaya çıkmıştır. Geleneksel yöntem olan ark kaynağı özellikle düşük sıcaklıklarda ergiyen alüminyum ve benzeri alaşımların birleştirilmesinde problemlere neden olmuştur. Bu sorunların ortadan kaldırılması için geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle güç olan, özellikle yaşlanma sertleşmesine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde başarıyla kullanılmıştır [1].

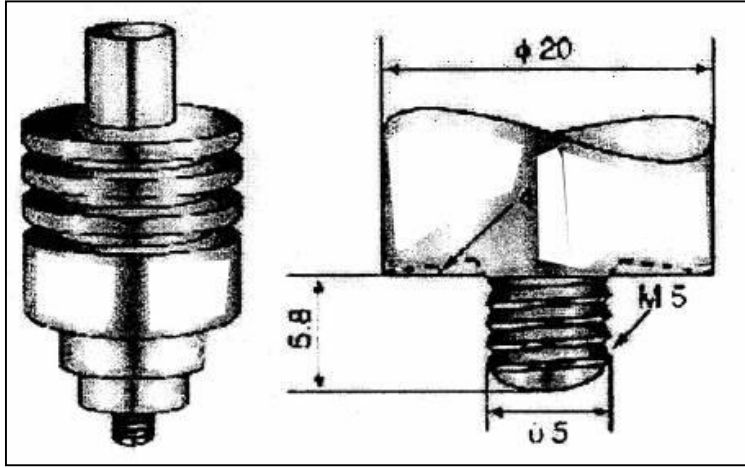
Sürtünme karıştırma kaynağı ilk olarak 1991 yılında İngiltere (Cambridge)'de tanıtılmış ve özellikle 1990'lı yıllarda gelişim göstermiş önemli bir kaynak yöntemidir [2-4]. SKK halen yapılmakta olan çalışmalarla da gelişim göstermektedir. Alüminyum ve alaşımlarının ergitmeli kaynak yöntemleriyle birleştirilmesinden doğan problemleri ortadan kaldırmak için birçok araştırmacı yeni yöntemler keşfetmiş ve sürtünme karıştırma kaynağının farklı uygulanış yöntemleri ortaya çıkmıştır. Yapılan tüm çalışmalarda alüminyum ve alaşımlarında geleneksel yöntemlerde oluşan yüksek ısı girdisi ve bu malzemelerin ısı genleşmelerinin yüksek olmasından dolayı oluşan kaynak dikişlerindeki çatlakların oluşumunu sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle yüksek oranda yok olduğu gözlemlenmiştir [5-6]. Ayrıca ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, alüminyum alaşımlarının ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) tane sınırlarında düşük ergime dereceli fazların oluşumuna ve dolayısıyla bu bölgede katılaşma esnasında tane sınırlarında çatlamlara yol açtığı bilinmektedir [6]. Bir başka problemde kaynak dikişinde sertleştirici çözeltilerin çözünmesi ile ITAB'da aşırı yaşlanma sonucu sertlik ve mukavemetin düşmesidir. Bu sebeplerden dolayı bu tarz malzemelerin kaynaklı birleştirmelerinde Katı Hal Kaynakları (difüzyon, sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynağı) büyük avantaj sağlamaktadır [7-9].

Bir katı hal kaynağı olan SKK, kaynaklı birleştirilmesi zor olan malzemelerin birleştirilme işlemlerinde kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine ait avantajlardan dolayı tercih edilmektedir. Bu yöntem herhangi bir koruyucu gaz, ilave bir kaynak metali ya da kaynak ağzı açılmasına gerek kalmadığından dolayı alternatif bir yöntem olarak kullanılmaktadır [10].

Günümüzde, uygulanan ileri teknolojilerde herhangi bir kaynaklı birleştirmede plastik deformasyon ve faz dönüşümleri istenmeyen bir durumdur. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için, malzemelerin mekanik ve metalürjik özellikleri etkilenmeyecek kadar düşük sıcaklıklarda birleştirme işlemleri yapılmalıdır [11]. Yöntemin uygulanışı sırasında herhangi bir ısı, gaz çıkışı, duman olmaması; koruyucu gaz, toz ve ilave malzeme katılmaması; kaynak ağzı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak edilebilirliği ve otomasyona da yatkınlığı gibi birçok avantajından dolayı yöntemin uygulama alanı genişlemektedir [12].

Bu yöntem birçok malzemede kullanılabilmektedir. Sürtünme Karıştırma Kaynağında plaka kalınlığının 1-75mm arasında uygulanabileceği kanısına varılmıştır [14].

Sürtünme Karıştırma Kaynağı, sürtünen elemanlarla kaynak yönteminden türetilmiştir [15]. Sürtünme Karıştırma Kaynağı yöntemi alın altına birleştirilmiş levhalara, yüksek devirde dönen bir omuzlu pimin (prob) belirli bir ilerleme hızı ile daldırılarak istenilen uzunlukta kaynak yapılması işlemidir. Şekil 1.1’de yöntem için daha önceden tasarlanmış pim örneği örülmektedir [16-17].



Şekil 1.1. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde özel olarak tasarlanmış pim [15]

Bu yöntem uzay, havacılık, gemi, raylı sistem, yakıt deposu, gıda depolama elemanları, radyoaktif atık malzeme taşıyıcılarının üretiminde kullanılan 2000, 5000, 6000, 7000 ve 8000 serisi alüminyum alaşımlarının yanı sıra Cu alaşımları, Ti alaşımları, Mg alaşımları ve bazı çeliklerinde birleştirilmesinde kullanılmaktadır [18].

Birleştirilecek levhalar aralarında boşluk kalmayacak şekilde alın altına birleştirilir. Yöntem iki şekilde uygulanabilir. Birincisi takım kendi ekseninde döner ve ilerler, levhalar sabittir. İkincisi ise parça ilerler, takım kendi ekseninde döner. Geniş silindir omuzlu, delme yapabilecek şekilde bir pim (Karıştırıcı uç) freze tezgahı ekipmanları ve arka tutucuları ile yüksek devirde döndürülerek, kaynak yapılacak alın altına birleştirilmiş levhaların birleşme kısmına daldırılır. Kaynak yapılacak uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerler. Pim, malzemeye temas ettiğinde oluşan ısı ile malzeme plastik değişime uğrar akışmaya başlar. Bu akışmış iki levha birbirine karışır ve istenen birleşme gerçekleşir [20].

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır.

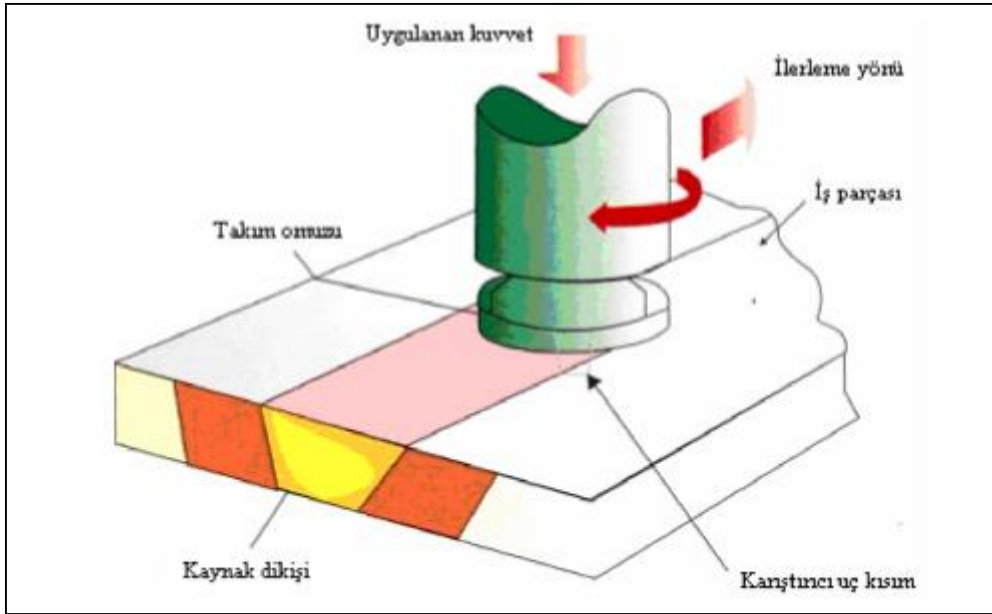
1. Bölüm giriş bölümüdür. Bu bölümde yapılan çalışmanın konusu hakkında temel bilgiler, tarihsel gelişimi hakkında ve tezin genel konusu hakkında bilgiler verilmiştir.
2. Bölüm, daha önceden SKK ile yapılan çalışmaların literatür araştırması yapılmıştır.
3. Bölümde sürtünme karıştırma kaynağının tanıtımı ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması yapılmıştır.
4. Bölümde, sürtünme karıştırma kaynağı yapımında kullanılan malzeme, kaynak sırasında kullanılan elemanların tanıtımı yapılmış, tasarım aşaması anlatılmış ve Sürtünme karıştırma kaynağı deneyi esnasında dinamometre ile ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümlerden elde edilen kuvvet sonuçları tablolastırılmıştır. Alınan numunelerin çekme testleri ve mikro yapı testleri yapılmış ve değerlendirilmiştir.
5. Bölümde, tüm veriler ışığında tartışmalar yapılmıştır.
6. Bölümde, sürtünme karıştırma kaynağı sonucunda elde edilen tüm çalışmalar değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

Bu çalışmada Al 6066 kalite alüminyum alaşımı, farklı geometri ve farklı adımlara sahip karıştırıcı uçlar kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle birleştirilmiştir. Birleştirme esnasında X, Y, Z koordinatlarında oluşan kuvvetler dinamometre yardımıyla ölçülmüş ve uç profillerine göre momentleri elde edilmiştir. Deneyler sırasında karıştırıcı uç devir sayısı ve ilerleme hızları sabit bir değer olarak belirlenmiştir. Kaynak işlemleri sonucunda numunelerden çekme deneyleri ve mikroyapı incelemeleri için parçalar alınıp testler yapılmıştır. Test sonuçları tartışılmış ve SKK ile birleştirilen parçalardaki mekanik performanslar ve oluşan kuvvetlere göre en optimum uç profili tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kaynaklı birleştirmeler endüstride genellikle iki metalin birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Kaynaklı birleştirme için birçok yöntem kullanılmakta ve gün geçtikçe yeni yöntemler uygulanmaktadır. Önemli olan metallerin birleştirilmesinde malzemenin özelliklerini kaybetmemesi ve gerilmelere dayanıklı olmasıdır. Bunun için birçok araştırma ve deneyler yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucu Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) keşfedilmiş ve son 10 yıldır sürekli geliştirilmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynağı bir katı faz kaynağıdır. Bu yöntemde tablaya alın altına sabitlenmiş parçalar birbirlerine sürtünmez. Karıştırıcı uç dediğimiz omuzlu bir pim, parçalar sabitlendikten sonra, parçaların içine daldırılarak, belirli bir devir ve ilerlemede kaynak hattı boyunca ilerler. Bu esnada oluşan ısı sebebi ile ergiyen malzeme hamurumsu bir kıvamda birbirine karışır ve pimin omuz kısmının yüzeye basınç uygulaması ile sıvanma gerçekleşir. Yöntemin uygulanışı Şekil 2.1’de gösterilmektedir. [19]

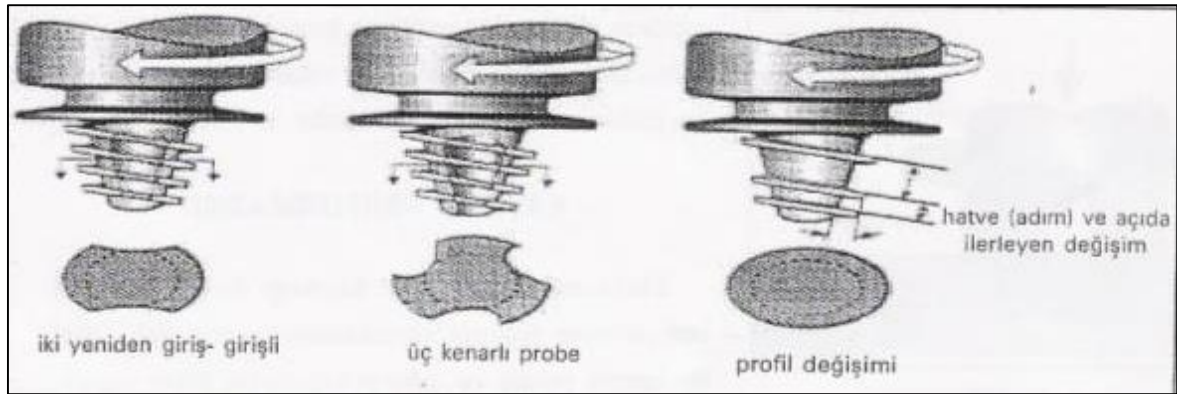


Şekil 2.1. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı [19]

Bu kaynak yöntemi ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda öncelikle geleneksel kaynak yöntemleri ve SKK arasındaki farklar belirlenmiştir. Özellikle son dönemlerde karıştırıcı uç dizaynının kaynak üzerindeki etkisi ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır.

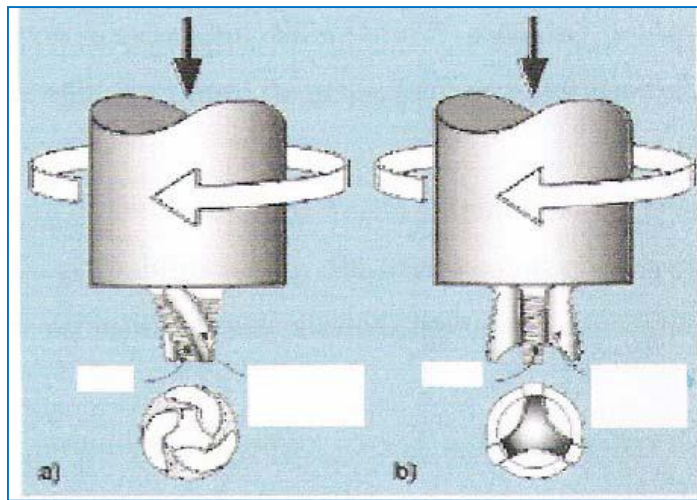
Çam (2003), çalışmasında Sürtünme Karıştırma Kaynağında olan gelişmelerden bahsetmektedir. Bu çalışmada SKK yöntemi, kaynak esnasında oluşan hatalardan ve karıştırıcı uç profili tasarımlarından söz edilmektedir [1].

Whorl (helisel) biçimli karıştırıcı uçlarda dairesel olmayan profiller kullanılmıştır (Şekil 2.2). Bu sayede az bir ilerlemede oldukça fazla metalin karıştırılabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca karıştırılan metalin hamur halinde akışı daha kolaylaşmıştır [1].



Şekil 2.2. Whorl ticari markalı karıştırıcı uç çeşitleri [1]

MX Triflute karıştırıcı uç, helisel çok dişlidir ve dik açılı kanallara sahiptir. (Şekil 2.3- Resim 2.1) Helisel diş yüzeyleri geniştir. Bu sayede malzeme karıştırıcı uçtan kolayca akış gösterir ve malzemedeki oksitler rahatça parçalanır [1].

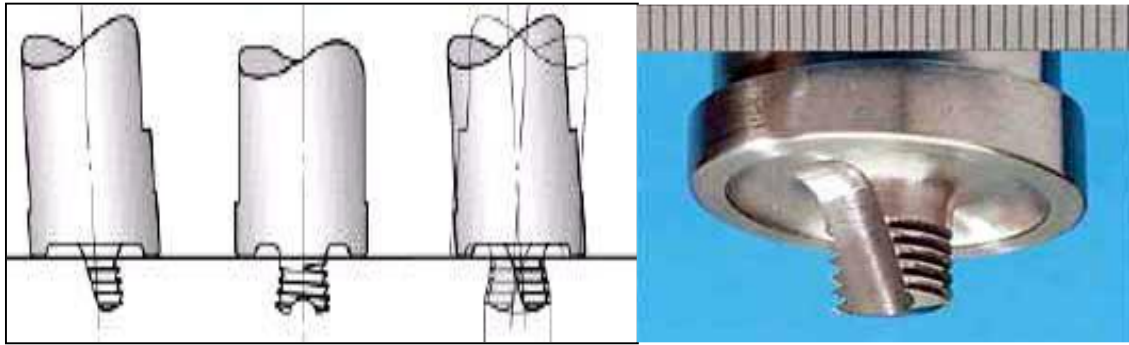


Şekil 2.3. MX Triflute ve Flaret-Triflute uç dizaynları [1]



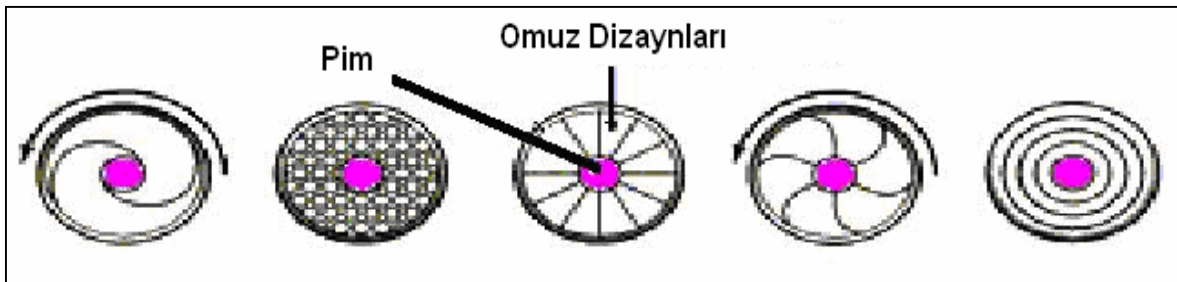
Resim 2.1. MX Triflute uç dizaynının esin kaynağı deniz kabuğudur [1]

Geleneksel metottan farklı olarak Skew-Stir TM biçimi pimlerde kullanılır. (Şekil 4) Şekilde gösterildiği gibi takım eksenini makine miline eğik olur. Bu eğim dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı arttırmaktadır. Bu oran boşluğu azaltma ve verimi arttırmada etkilidir. Eğrilik açısı arttırıldıkça omuzun hareket alanı da artacaktır [1].



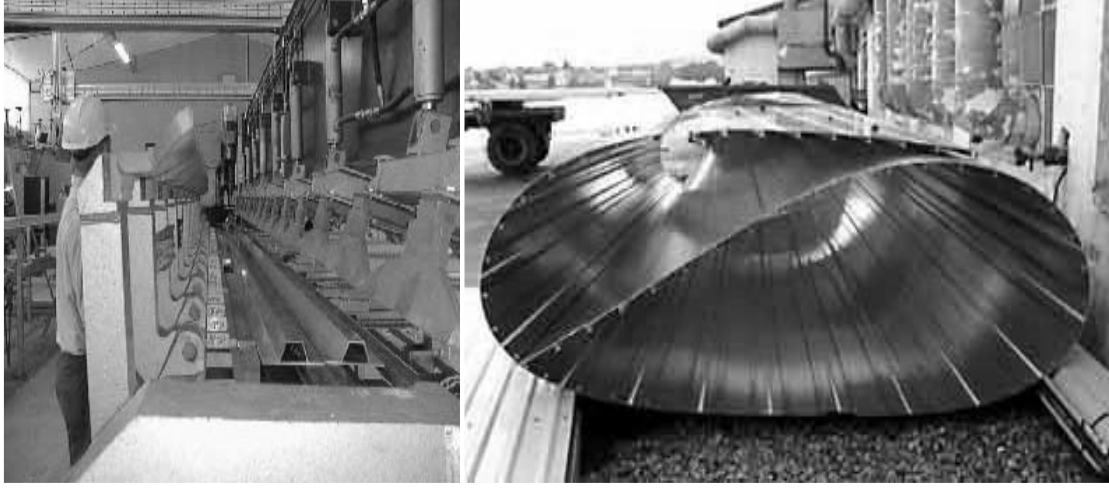
Şekil 2.4. Skew-Stir ucunun resmi [1]

Whorl ve MX Triflute marka uç serilerinde farklı tip omuz dizaynlarında kullanılmaktadır. (Şekil 5) Omuz profilleri omuzla parça yüzeyinde en iyi teması sağlamak için kullanılmaktadır. Sürtünme ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenir [1].

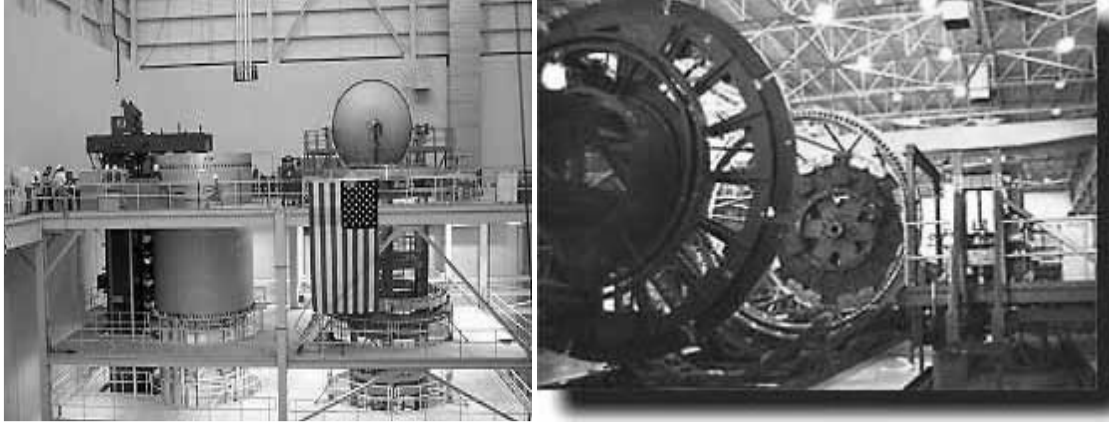


Şekil 2.5. Whorl ve MX Triflute serileri için omuz dizaynları [1]

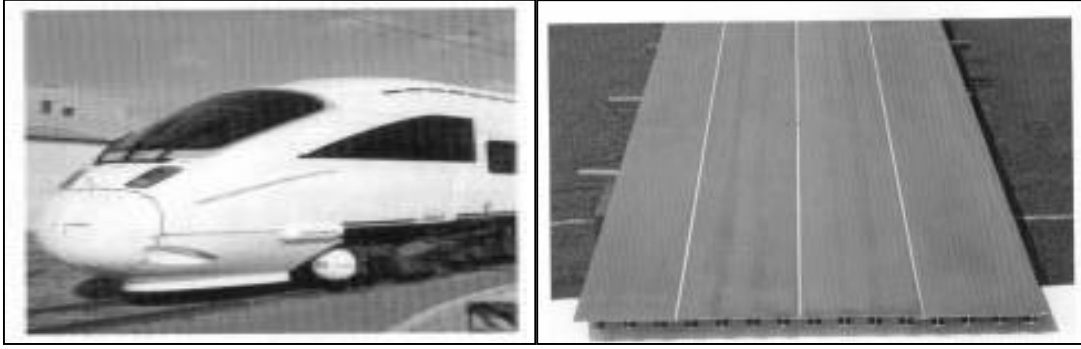
Çam ayrıca bu çalışmasında SKK'nın uygulama alanlarından bahsetmektedir. SKK; Gemi, Uçak ve Uzay endüstrisinde birçok alanda uygulanmaktadır (Resim 2-3-4) [1].



Resim 2.2. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi [1]



Resim 2.3. Space Shuttle External tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuvarlarındaki sürtünme karıştırma kaynak sistemlerinden görüntüler [1]



Resim 2.4. Japonya 'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan al-paneller [1]

Uzun ve Özbekmez (2008), yaptıkları çalışmada SKK ve Elektrik Ark Kaynak teknikleri ile birleştirilen $CnZn30$ levhaların mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmada SKK işleminde ilerleme hızı sabit (12.5 mm/dak) alınmıştır. Dönme hızları ise 1000 dev/dak, 630 dev/dak, 500 dev/dak alınmıştır. Üç farklı devir sayısında da numuneler çekme deneyi sonucunda ITAB bölgesinde kırılmıştır. 1000 dev/dak ile yapılan birleştirmelerde yüzey kalitesi bir miktar düşmüştür. Ark kaynak işleminde ise birbirinden farklı kaynak parametreleri kullanılmıştır. Bir numunede akım: 100 amper, gerilim: 22 volt, kaynak hızı: 320 mm/dak kullanılırken diğerinde akım: 120 amper, gerilim: 26 volt, kaynak hızı: 360 mm/dak kullanılmıştır. Çekme deneyinde numuneler ergime hattı boyunca kırılmıştır. Elektrik ark kaynak numunelerinde ITAB bölgesindeki sertlik 100Hv'e iken SKK ile birleştirilen numunelerde 65Hv değerine düşmüştür. Ayrıca SKK ile yapılan numunelerde Zn buharlaşması görünmez iken ark kaynağı ile yapılan birleştirmelerde %21 oranında Zn buharlaşması tespit edilmiştir. Tüm bunlardan yola çıkılarak $CnZn30$ levhaların birleştirilmesinde SKK tekniğinin, tamir ve bakım kaynağı işlerinde ark kaynağının kullanılmasının daha verimli olacağı düşünülmüştür [2].

Saraçoğlu (2007), Al 7075 alaşımının farklı numuneleriyle yapılan sürtünme karıştırma kaynağındaki mekanik, mikroskobik özelliklerini incelemiş ve bu numuneleri karşılaştırmıştır. 6mm kalınlığındaki Al 7075 levhaları alın altına SKK yöntemiyle, 6mm çapında karıştırıcı uç ile birleştirmiştir. Devir sayısı olarak 800-1250 ve 1600 dev/dak olmak üzere üç parametre seçmiş ve ilerleme hızı olarak 100 ila 200 mm/dak kullanmıştır. Yapılan deney sonucunda 1250 dev/dak devir sayısı ve 100 mm/dak ile 200 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen numunelerin ve 1600 dev/dak devir sayısı ve 200 mm/dak

ilerleme hızıyla birleştirilen numunenin Al 7075 levhaların SKK ile birleştirilmesinde en uygun kaynak koşullarını sağladığını gözlemlemiştir [3].

Şık ve Kayabaş (2003), Al 1050 alaşımının SKK yöntemi ile birleştirilmesi sonucu oluşan kaynak bölgesini incelemiş, karıştırıcı ucun devir sayısı ve kaynak ilerleme hızı değişken parametre olarak alınmıştır. 4mm kalınlığındaki levhalar 120mm/dak ilerleme hızı sabit tutularak 1000dev/dak, 1500dev/dak ve 2500dev/dak devir sayılarıyla farklı numuneler elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucu artan devir sayılarında çekme dayanımında düşüş gözlemlenmiş ve aynı şekilde sertlik değerleri de devir sayısı arttıkça azalmıştır. Bunun nedeninin de artan devir sayısı ile malzemeye giren ısı girdisinin artmasıyla malzemede homojen olmayan karışımın oluşmasından kaynaklandığı öngörülmüştür [4].

Kurt, Özdemir ve Boz (2004), SKK'da kaynak hızının birleşebilirliğine etkisini incelemişlerdir. 5x50x150 mm ebatlarındaki Al malzemeler alın altına getirilerek farklı kaynak ilerleme hızlarında birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi 6,25-10-16 ve 20 mm/dak kaynak ilerleme hızlarında ve 800 dev/dak dönme hızında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çekme testlerinde birleştirilen malzemeler kaynak dikişinin dışından kopmuştur. Kopma genellikle ITAB ve toparlama bölgesi arasında bir noktada gerçekleşmiştir. Kaynak ilerleme hızı arttırıldıkça daha düzgün bir yüzeyin oluştuğu gözlemlenmiştir. 16 ve 20 mm/dak kaynak ilerleme hızında azalan ısı girdisine bağlı olarak daha düzgün görünümlü dikişler oluştuğu gözlemlenmiştir [5].

Şık (2005), SKK ile birleştirilen Al levhaların eğilme ve yorulma özelliklerini incelemiştir. Al 1050 levhaların küt alın konumunda birleştirilerek oluşan bağlantının eğmeli yorulma dayanımı incelenmiştir. Karıştırıcı ucun dönme ve kaynak ilerleme hızları değişken parametreler olarak seçilmiştir. Yapılan birleştirmeler eğme yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan test sonucunda en yüksek esas malzemenin dayanımı çıkmıştır. Kaynak ilerleme hızı sabit tutulduğunda devir hızını arttırdıkça yorulma dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Bunun nedeninin ilerleme hızı sabit iken kaynak devir sayısı arttıkça malzemeye giren ısı miktarındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir [6].

Arıcı ve Ertürk (2007), SKK ile birleştirilen polietilen levhalarda kaynak bölgesi özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak takımına verilen sabit devir hızı ve kaynak takımına eğim verilerek, farklı ilerleme hızlarında polietilen malzemeler birleştirilmiştir.

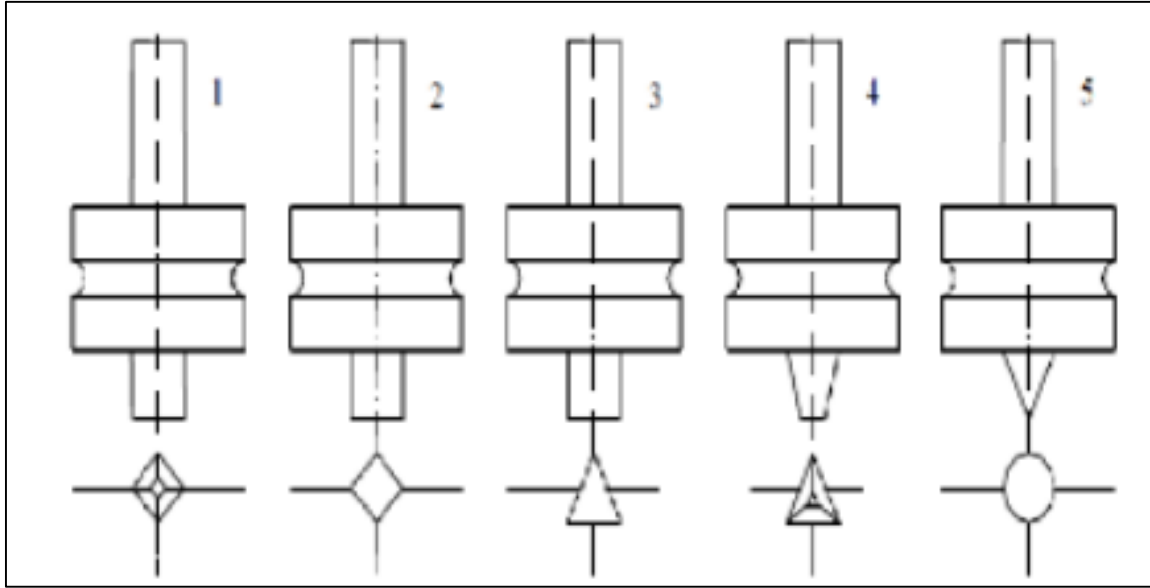
Birleştirmelere çekme deneyi uygulanmış ve sonuçlar incelenmiştir. Sonuçlarda ısıнын kaynak bölgesi mikroyapısını etkilediği, deneylerin sonrasında elde edilen camsı geçiş sıcaklıklarından anlaşılmıştır. Özellikle takıma eğim verildiğinde camsı geçiş sıcaklığında daha yüksek değerlerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca takım ilerleme hızının da camsı geçiş sıcaklığını etkilediği görülmüştür [7].

Özdemir, Büyükarıslan ve Sarsılmaz (2007), SKK yöntemi ile birleştirilen Al 1030 alaşımlarında karıştırıcı uç, devir sayısı ve ilerleme hızının mekanik davranışlar üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma sonunda devir sayısının SKK'lı birleştirmelerde çekme deneyi sonucuna fazla etkisi olmadığı ve karıştırıcı uç ile ilerleme hızının çekme deneyi sonuçlarını daha çok etkilediğini gözlemlemişlerdir [8].

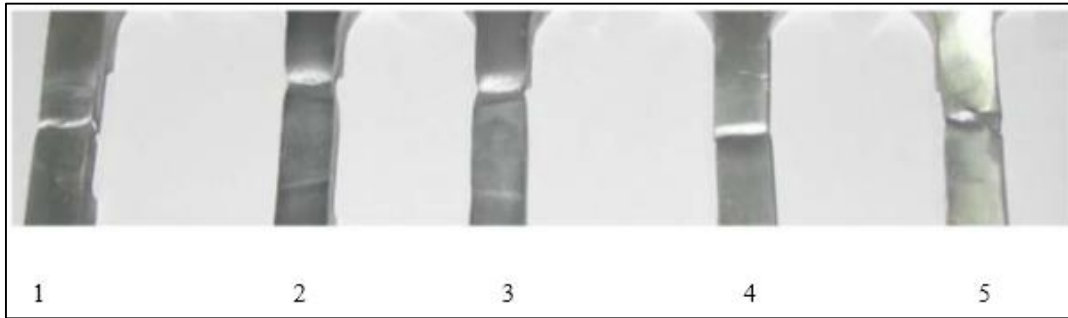
Sarsılmaz ve Özdemir (2008), Al 1050/Al 6061 alaşımları çiftinin SKK'da karıştırıcı uç profilinin mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada vida, üçgen ve koni şeklindeki profiller kullanılmış ve yapılan kaynaklardan çekme numunesi alınmıştır. Yapılan çekme deneyleri sonucunda vidalı pimle yapılan birleştirmeler daha uygun bulunmuştur [9].

Çakır, Kurt ve Ateş (2008), Toz metal Al malzemelerinin SKK'da devir sayısının kaynaklanabilirliğe etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada Toz metal teknolojisi ile yapılan Al levhalar SKK yöntemi ile farklı devir sayılarında birleştirilmiş en iyi sonuç 900dev/dak elde edilmiştir [10].

Hasçalık, Çaydaş, Ünal ve Karaca (2007), Al5251 alaşımının SKK ile birleştirilebilirliğine uç geometrisinin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada devir sayısı ve ilerleme sabit alınmış uç profillerinin (Şekil 6) kaynak üzerine etkisi araştırılmıştır. En mukavemetli birleştirme kare piramit kesitli uçta, en zayıf birleştirme ise koni kesitli uçta gerçekleşmiştir (Resim 2.5) [11].

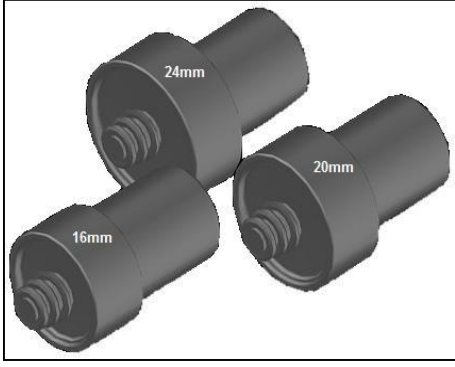


Şekil 2.6. Uç profilleri [11]

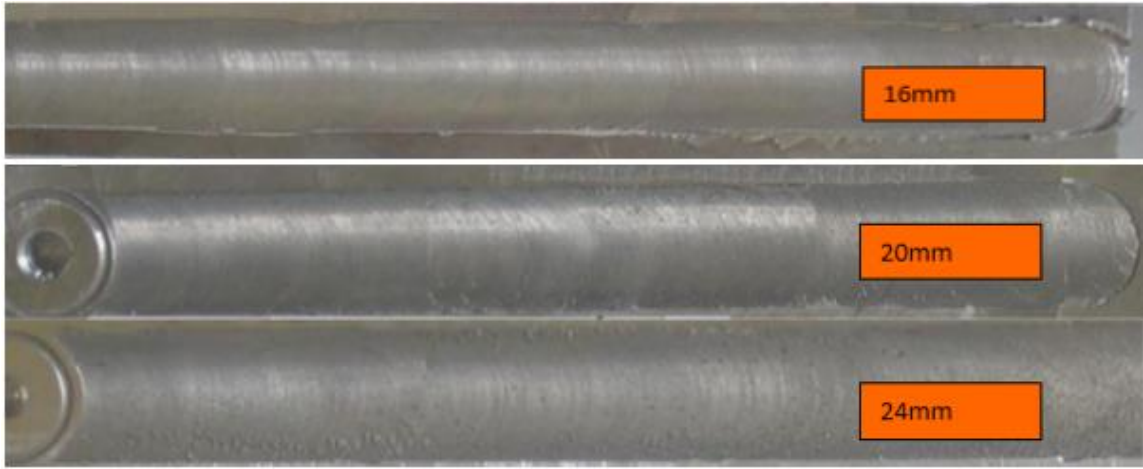


Resim 2.5. Çekme numunelerinde kaynak ve kopma bölgeleri (1 kare piramit, 2 kare, 3 üçgen, 4 üçgen piramit, 5 koni) [11]

Sarsılmaz, Özdemir ve Özel (2007), SKK yöntemi ile birleştirilen Al 6061/Al 7075 çiftinde karıştırıcı uç omuz genişliğinin mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada üç farklı omuz genişliğine sahip pimler kullanılmıştır (16mm, 20mm, 24mm) (Şekil 2.7). Sonuç olarak en iyi birleştirme 16mm omuz genişliğindeki pimle sağlanmıştır (Resim 2.6-2.7) [12].



Şekil 2.7. Farklı omuz genişliğindeki pimler [12]



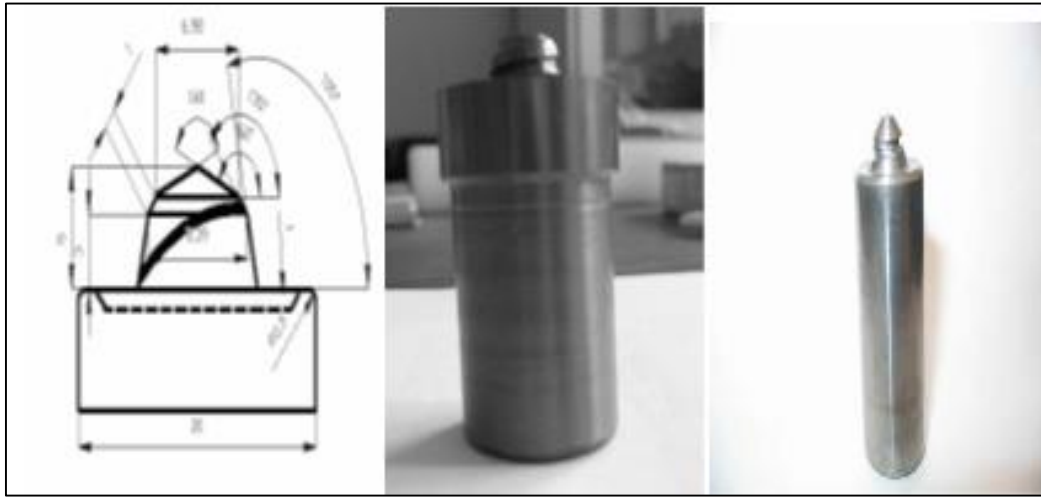
Resim 2.6. Kaynaklı birleştirmelere ait yüzey resimleri [12]



Resim 2.7. Çekme deneyi sonucu [12]

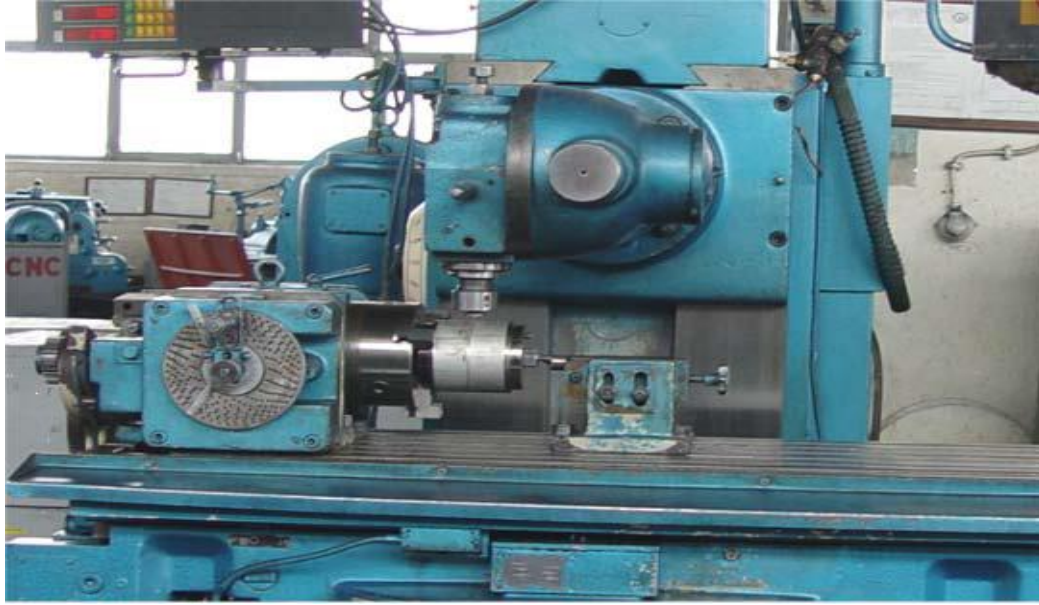
Meran ve Çolak (2008), SKK için Takım tutucu Tasarımı ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada SKK esnasında çıkan yüksek sıcaklıkla frezenin rulman yataklarında oluşan hasarı önlemek için takım tutucu tasarlanmıştır. 1000-1100°C gibi yüksek sıcaklık değerlerine ulaşan karıştırıcı takım frezenin rulman yataklarına hasar vermektedir. Tasarlanan takım tutucu hem koruyucu gaz hem de soğutma sistemini birlikte içermektedir. Bu takım tutucunun birçok işletmede rahatlıkla bulunabilen freze tezgahlarına kolayca monte edilerek SKK işleminin gerçekleştirilebileceği gözlemlenmiştir [13].

Çelik (2006), Martenzitik paslanmaz çelik ve ferritik paslanmaz çeliğin kendileriyle ve birbirleriyle SKK yöntemiyle kaynak edilebilirliğini araştırmıştır. Bu çalışmada özel olarak uç başlığı tasarlanmıştır. (Şekil 2.8) Bu tasarımda amaç uç kısma verilen açılarla kaynak işlemi esnasında malzemenin kolayca akması sağlanmaktadır [14].



Şekil 2.8. Kaynak başlığı tasarımı [14]

Eren (2005), Al 6063-T6 Borularının SKK yöntemi ile kaynak edilebilirliğini incelemiştir. Bu çalışmada boruların freze tezgahına bağlanabilmesi için özel bir aparat kullanılmıştır (Resim 2.8-2.9) [15].

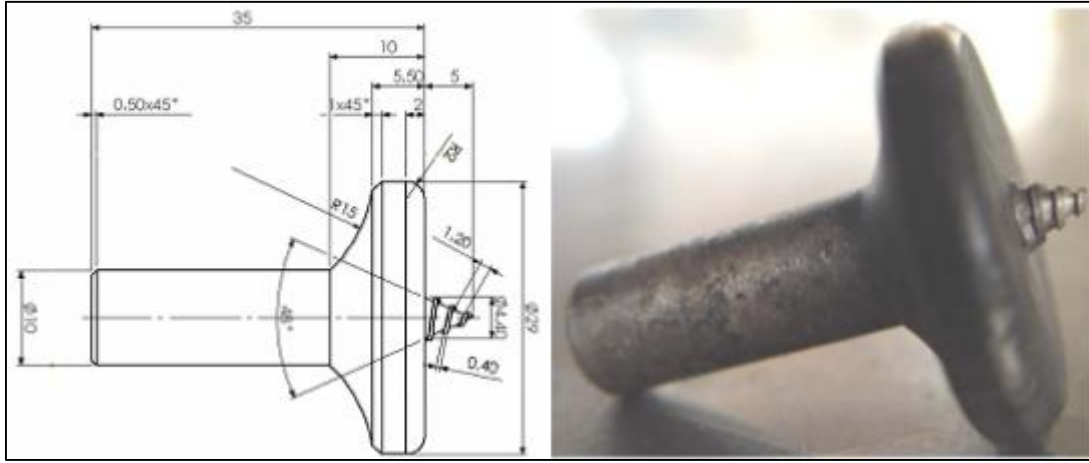


Resim 2.8. SKK da kullanılan NC tezgahı ve üzerindeki kaynak aparatları (önden görünüş) [15]



Resim 2.9. (a) Deneysel çalışmada kullanılan SKK kaynak aparat parçaları, (b) Aparatın montajlı hali ve kaynak numune çifti [15]

Ayrıca bu işlemde özel bir kaynak takımı kullanılmıştır. Kaynak esnasında kaynak takımının parçayı kazıyarak malzeme kaybı olmaması için omuz kısmına kavis verilmiştir. Şekil 2.9’da kaynak takımının resmi gösterilmektedir. Oluşan kaynak resmi Resim 2.10’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Deneyde kullanılan kaynak takımı ve ölçüleri [15]

Aşağıda deney sonrası oluşan numunenin resmi görülmektedir. (Resim 2.10)



Resim 2.10. Deney sonrası oluşan numune (1120dev/dak 'da) [15]

Doğan (2006), Al 5754-H22 alaşımının SKK işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Bu çalışmada kaynağı yapılan malzemelere görsel, mikroyapı ve makroyapı incelemeleri ve mekanik deneyler yapılmıştır. Sabit devir sayısında ilerleme hızının artmasıyla ve aynı ilerleme hızında devir sayısının artmasıyla kaynak dikişlerinde oluşan halkaların arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca çekirdek bölgenin genişliği, sabit devir sayısında ilerleme hızını arttırdığımızda karıştırma süresi azalmaktadır. Bununla birlikte devir sabit iken ilerleme arttıkça sertlikte de bir artma olduğu gözlemlenmiştir [16].

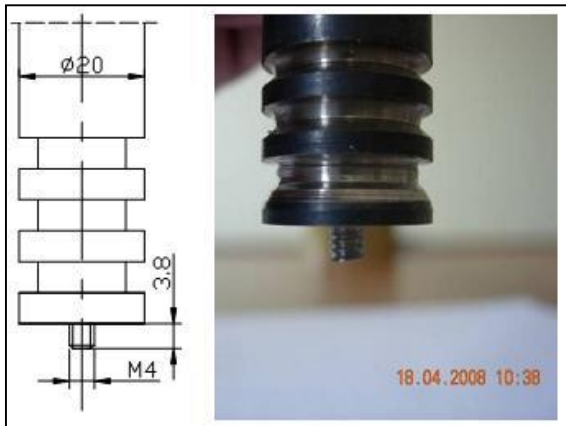
Serindağ (2006), Pirinç levhaların SKK yöntemi ile alın kaynağı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada devir 2000 dev/dak olarak sabit alınmış, 3 farklı ilerleme kullanılmıştır. İlk olarak 70/30 pirinç levhalar kaynak yapılmış sonra 90/10 levhalar

kaynak yapılmıştır. Sonuç olarak 70/30 pirinç levhalarda sadece 210 mm ilerleme hızında porozite (gözeneklilik) tespit edilmemiş, diğer hızlarda gözenek oluşmuştur. 90/10 pirinç levhalarda ise 3 farklı ilerlemede de porozite oluşumu gerçekleşmemiştir. Sonuç olarak Zn oranı azaldıkça porozite de azalmıştır [17].

Binal (2006), Al 2024-T3 alaşımı SKK'da işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Devir sayısı ve ilerleme hızı değişken parametreler, karıştırıcı uç profili ise sabit alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde devir sayısı sabit, ilerleme hızı artarken kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde artış gözlemlenmiştir. İlerleme hızı sabitken devir sayısının artmasıyla kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir [18].

Eker ve Sevim (2009), bir karıştırıcı uç ile farklı devirler ve ilerleme hızlarında yapılan kaynaklar karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Karıştırıcı ucun devir hızı sabitken kaynak ilerleme hızı dört farklı değerde seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kaynaklı kısımdan ana metale doğru gidildikçe sertliğin arttığı görülmektedir. Çekme makaslama deneylerinin sonuçlarında 1100 dev/dak ve 1400 dev/dak sayısında ilerlemeye bağlı olarak hem akma mukavemetinin hem de kesme mukavemetinin 90 mm/dak ilerleme hızına kadar az bir artış, ilerleme hızı arttıkça da bir azalma olduğu gözlemlenmiştir [19].

Şık (2010), Magnezyum Alaşımında bir uç (Şekil 2.10) ile iki farklı devirde kaynak yapmış ve bunları karşılaştırmıştır. Magnezyum Alaşımında SKK yönteminin başarıyla uygulandığı görülmüştür [20].



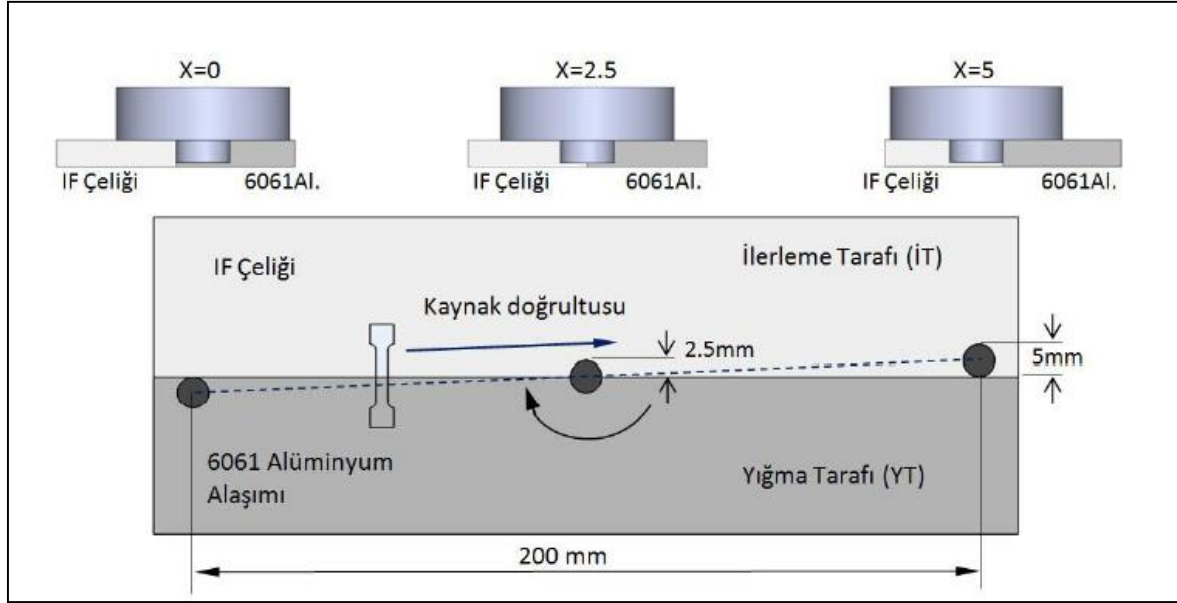
Şekil 2.10. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan pim [21]

Şık, Ertürk ve Önder (2010), Sürtünme Karıştırma Kaynağının farklı parametrelerde mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı devir ve ilerleme hızlarında sürtünme karıştırma kaynağı yöntemini kullanmışlardır. Bu değerlerden en iyi kaynağın 1500 dev/dak-200 mm/dak değerindeki devir sayısı ve ilerleme hızıyla gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir [21].

Kafalı ve Ay (2014), Uzay ve havacılıkta kullanılan SKK 'nın mekanik test sonuçlarını incelemişler ve ana malzemeye kaynaklı malzemeyi karşılaştırmışlardır. Çekme-yorulma testleri yapılmış, mikroyapıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre SKK tekniği 6013 serisi Al alaşımlarında başarıyla uygulanmıştır. Yapılan testler sonucu kaynaklı numunelerde kaynak bölgesinde sertlik sebebiyle dayanımda düşüklükler görülmüş ve en çok bu bölgede kopmaların olduğu gözlemlenmiştir [22].

Orhan ve Asma (2014), SKK yapılan Al 6061-7075 Alaşım çiftlerinin mikrosertlik ve çekme testi ilişkisini incelemişlerdir. Sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi kullanarak kaynak yapmışlardır. 2000 dev/dak. Devir ile yapılan numunenin en fazla uzama katsayısına sahip olduğu ve aynı zamanda mikrosertliğinin de en fazla olduğu gözlemlenmiştir [23].

Aktarer, Sekban ve Küçükömeroğlu (2015), çalışmalarında 2 mm kalınlığındaki Al 6061-T6 alaşımı ile IF çeliği sürtünme karıştırma kaynağı ile alın altına birleştirilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere tungsten karbürden imal edilen takım ucu omuz çapı 16mm, pim çapı 5mm ve pim uzunluğu 1.8 mm boyutlarında düz silindirik şekilde tasarlanmıştır. Kaynak işlemi için üç farklı dönme hızı (1000, 1250 ve 1600 dev/dak) ve 115 mm/dak ilerleme hızı seçilmiştir. Takıma 3°'lik eğim açısı verilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında üniversal freze tezgahı kullanılmıştır ve takım baskı kuvveti tezgaha yerleştirilen hidrolik bir düzenek ile sağlanmıştır. Baskı kuvveti olarak 6 kN kuvvet seçilmiştir (Şekil 2.11) [24].



Şekil 2.11. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi [24]

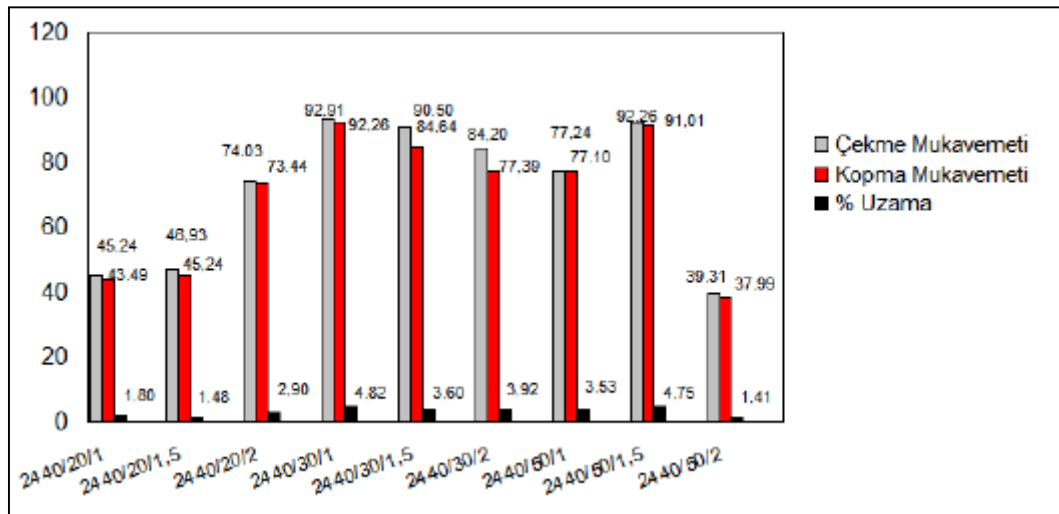
Çalışma sonunda IF çeliği ile Al 6061 birleştirilmesinde alınan numuneler incelenmiştir. Bu sonuçlara göre 1250 dev/dak dönme hızında gerçekleştirilen sürtünme karıştırma kaynağı sonrası, en yüksek mukavemet takımın IF çeliği tarafına doğru 0.4 mm konumu olarak bulunmuştur. Takım dönme hızını arttırdıkça IF çeliği tarafındaki karıştırma bölgesi genişlemektedir. Ayrıca dönme hızı arttıkça sertlikte artmıştır. Tüm sonuçlar incelendiğinde en iyi değerler 1250 dev/dak dönme hızında elde edilmiştir [24].

Çakır ve Çelik (2015), çalışmalarında Al 1050 alaşımı levhalar bakır levhalar ile sürtünme karıştırma kaynağı yardımıyla yüksek devirde (2440 dev/dak), üç farklı kaynak hızı (20, 30, 50 mm/dak) ve dört farklı takım konumlandırılması (0-1-1.5-2 mm) ile birleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinin birleştirmelere etkisi araştırılmıştır. Mikroyapı ve mekanik özellikleri incelemiştir. Sonuç olarak % 83.55 kaynak performansı elde edilmiştir. 4 mm kalınlığındaki Al 1050 ve % 99.99 saflıkta elektrolitik bakır levhalar 100x150 mm ölçülerde hazırlanmıştır. Takım ucu malzemesi olarak yüksek hız çeliği seçilmiştir (Çizelge 2.1) [25].

Çizelge 2.1. Kaynak parametreleri [25]

Deney No	Takım Dönme Hızı (dev/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Kaydırma (mm)	Numune Kod
1	2440	20	1	2440/20/1
2			1.5	2440/20/1.5
3			2	2440/20/2
4		30	1	2440/30/1
5			1.5	2440/30/1.5
6			2	2440/30/2
7		50	1	2440/50/1
8			1.5	2440/50/1.5
9			2	2440/50/2

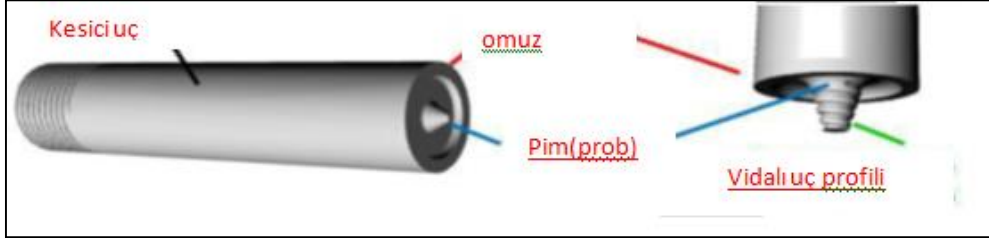
Yapılan deneyler sonucunda kopmalar genellikle Al alaşımının ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) gerçekleşmiştir. Bunun nedeninin Al ana metalinin Cu ana metale oranla daha düşük çekme mukavemetine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En büyük çekme mukavemeti 2440/30/1 numunesinde gerçekleşmiştir. En düşük çekme mukavemeti ise 2440/50/2 numunesinde görülmüştür (Şekil 2.12) [25].



Şekil 2.12. Çekme deneyi sonuçları grafiği [25]

Mubiayi ve Akinlabi (2013), çalışmalarında SKK ile Al ve Cu levhaları birleştirmişlerdir. Kaynağı yapılan malzemelerin mikroyapı incelemesi ve mekanik testleri yapılmıştır. Al ve Cu arasında yeteri kadar çalışma yapılmadığı görülmüş bu çalışma ile bu eksik kapatılmak istenmiştir. İmalat sektöründe Al ve Cu birleştirilmesi güçlü bir ihtiyaç olduğu için geliştirilmektedir. Bundan dolayı SKK tekniği kullanılarak Al ve Cu birleştirilmesi

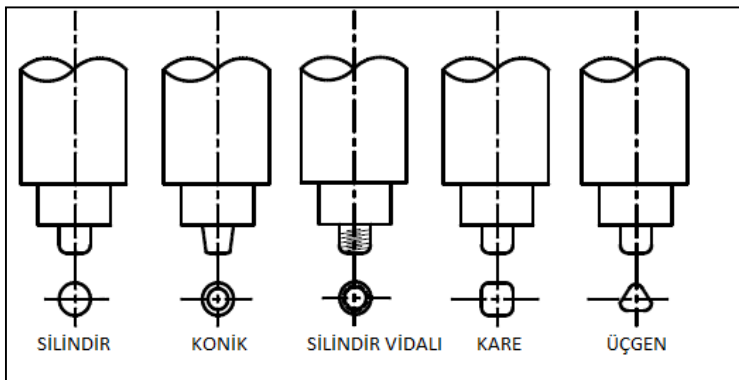
endüstriyel uygulamalarda önemli yer tutmuştur. Yapılan çalışmada konik vida şeklinde bir uç (Şekil 2.13) kullanılmıştır [26].



Şekil 2.13. SKK da kullanılan pim tasarımı

Çeşitli Al alaşımı ve bakır alaşımı levhalar başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Isının etkisinin ve karıştırıcı ucun geometrisinin önemli oranda kaynak birleştirmelerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek kaliteli kaynak için karıştırıcı uç profilinin önemli olduğu gözlemlenmiştir [26].

Padmanaban ve Balasubramanian (2008), çalışmalarında AZ31B Magnezyum alaşımını sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Bu çalışmada füzyon kaynağı ile birleştirilmesi güç olan magnezyum alaşımı malzemelerin hem kolay hem de ucuz bir yöntem ile birleştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada devir hızı ve ilerleme hızı sabit tutulmuştur. Uç profili, omuz genişliği ve takım malzemesi farklı parametreler seçilmiştir. 6 mm kalınlığındaki levhalar 220 ± 75 mm boyutlarında kesilmiştir. Beş farklı malzemeden (yumuşak çelik, paslanmaz çelik, zırh yapılmış çelik, yüksek karbonlu çelik ve yüksek hız çeliği) takım ucu imal edilmiştir. Uç profili olarak düz silindirik, konik silindirik, vidalı silindirik, üçgen ve kare uç profilleri kullanılmıştır. (Şekil 2.14) Omuz çap genişlikleri 15mm, 18mm, 21mm seçilmiştir [27].

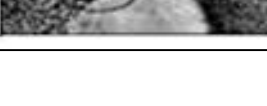


Şekil 2.14. Seçilen takım uç profilleri [27]

Yapılan sürtünme karıştırma kaynağı sonrası çekme deneyleri ve mikroyapı testleri incelenmiş ve sonuç olarak şu veriler elde edilmiştir: En iyi kaynak kalitesi Yüksek karbonlu çelik malzemeden imal edilen 18 mm omuz çaplı, vidalı silindirik uç profili ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 2.2) [27].

Çizelge 2.2. Mikroyapı inceleme sonuçları [27]

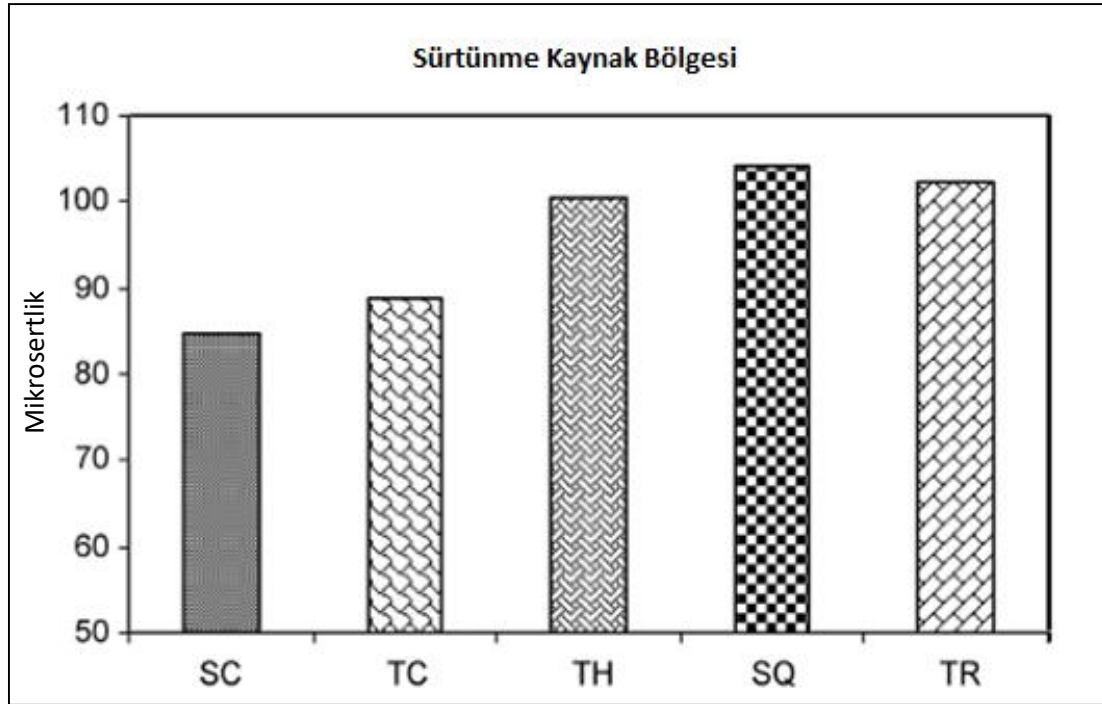
Takım Ucu Profili	Kaynak Kesit Bölgesi	Oluşan Kusurların Sebepleri	Çekme Testi Sırasında Oluşan Kopma Bölgesi
SİLİNDİR		Dikey Bölgede kaynak oluşmamıştır	Kaynak kusurunun olduğu bölge
KONİK		Dikey Bölgede kaynak oluşmamıştır	Kaynak kusurunun olduğu bölge
SİLİNDİR VIDALI		Kaynak kusursuz oluşmuştur	AS-TMAZ
KARE		Sürtünme bölgesinde kaynak oluşmamıştır	Kaynak kusurunun olduğu bölge
ÜÇGEN		Yetersiz sıcaklık	Kaynak kusurunun olduğu bölge

OMUZ ÇAPI	Kaynak Kesit Bölgesi	Oluşan Kusurların Sebepleri	Çekme Testi Sırasında Oluşan Kopma Bölgesi
15		Yetersiz sıcaklık olması	Kaynak kusurunun olduğu bölge
18		Kaynak kusursuz oluşmuştur	AS-TMAZ
21		Fazla sıcaklık olması	Kaynak kusurunun olduğu bölge

Mikroyapı sonuçlarında kaynak bölgesi en düzgün olan takım 18mm omuz çaplı vidalı silindirik pim (TH) olarak gözlemlenmiştir [27].

Elangovan ve Balasubramanian (2008), yaptıkları çalışmada Al 2219 alaşımı levhaların birleştirilmesinde takım ucu profilinin ve kaynak hızının kaynak yapılabilişliğine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında Al 2019 alaşımı levhalar 5 farklı uç profili (düz silindirik,

konik silindirik, vidalı silindirik, üçgen ve kare) ile 3 farklı kaynak hızında (0.37 mm/dak-0.76 mm/dak-1.25 mm/dak) birleştirilmiştir. 6 mm kalınlığındaki haddelenmiş Al levhalar 300x150 mm boyutlarında kesilmiştir. Toplamda 15 adet birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir birleştirmeden çekme testi ve mikroyapı analizi için numuneler alınmıştır. Sonuç olarak konik silindirik pim ile yapılan tüm birleştirmeler kusurlu olmuş, kaynak yapılamamıştır. Vidalı silindir ve üçgen pim ile birleştirilen levhalarda en iyi birleştirme 0.76 mm/dak hızında yapılan birleştirmeler olarak görülmüştür. Diğer yandan tüm hızlarda en üstün kaynak kare pim ile gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2.15) Genel olarak tüm uç profillerinde en yüksek mukavemet 0.76 mm/dak hız ile gerçekleştirilen birleştirmelerdir [28] (Çizelge 2.3).



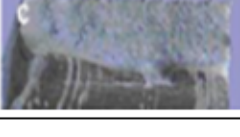
Şekil 2.15. Uç profillerinin mikrosertliğe etkisi [28]

Çizelge 2.3. Kare profilili pim için kaynak hızının birleştirmeye etkisi [28]

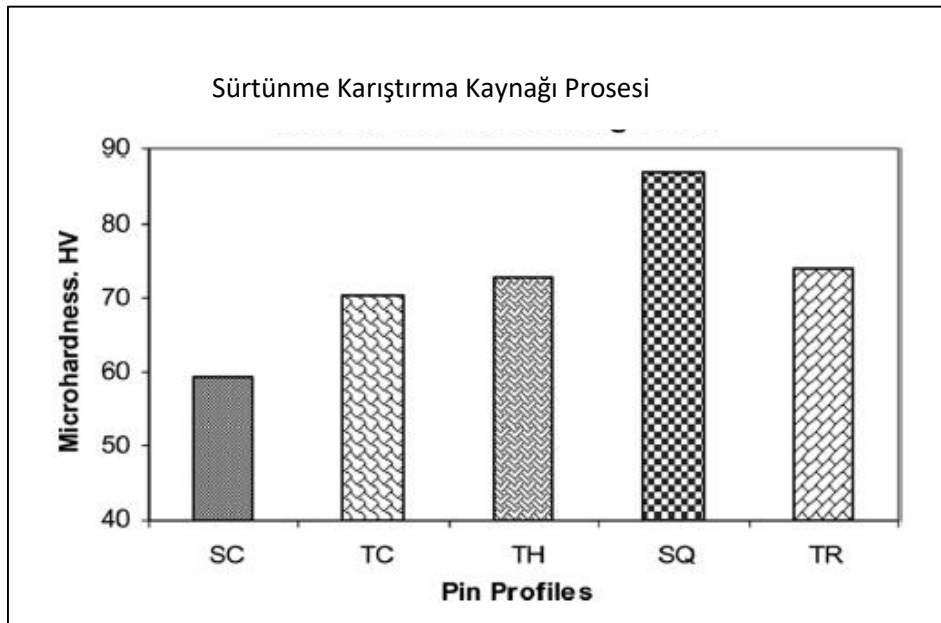
Kaynak Hızı	Kopma Yüzeyi	Kopma Bölgesi	Kopma Yüzeyi Görünümü	Kusurun Oryantasyonu
0.37		SKK ve ITAB Arasındaki Bölge	Alt kısmı çizgili kaba taneli bir yüzey görünümü	KUSUR YOK
0.76		SKK ve ITAB Arasındaki Bölge	Parlak taneli içbükey yüzey görünümü	KUSUR YOK
1.25		SKK ve ITAB Arasındaki Bölge	Lifli düzensiz yüzey görünümü	KUSUR YOK

Elangovan ve Balasubramanian (2008), bu çalışmalarında Al 6061 alaşımı levhaları 5 farklı uç profili (düz silindirik, konik silindirik, vidalı silindirik, üçgen ve kare) ve üç farklı omuz genişliğinde (15mm-18mm-21mm) kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. 6 mm kalınlığındaki haddelenmiş Al levhalar 300x150 mm boyutlarında kesilmiştir. Toplamda 15 adet birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir birleştirmeden çekme testi ve mikroyapı analizi için numuneler alınmıştır. Sonuç olarak 15 numunenin içinde en üstün kaynak kalitesi 18 mm omuz çaplı kare uç profilili pim ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 2.4) [29].

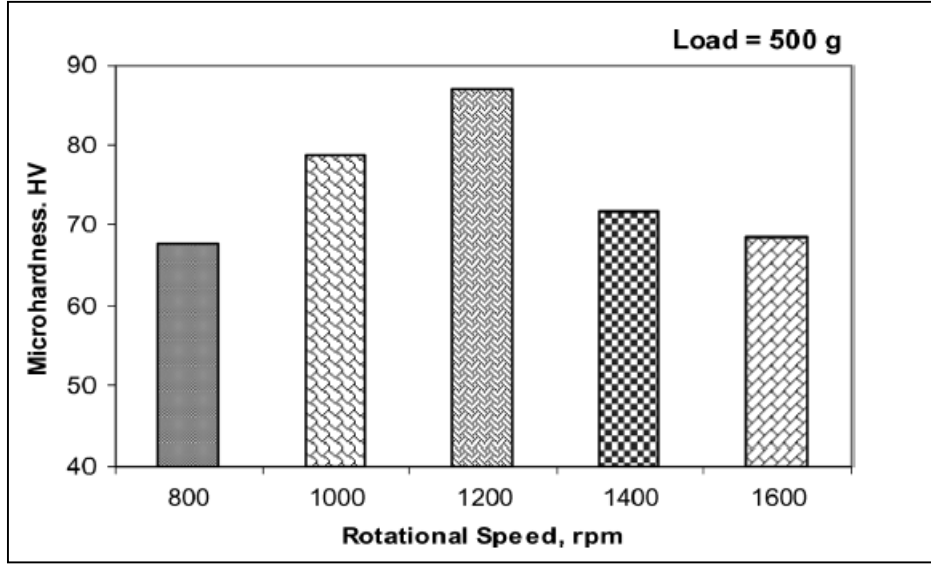
Çizelge 2.4. Kare profilili pim (SQ) için omuz genişliğinin birleştirmeye etkisi [29]

Omuz Çapı	Kopma Yüzeyi	Kopma Bölgesi	Kopma Yüzeyi Görünümü	Kusurun Oryantasyonu
15		SKK ve ITAB Arasındaki Bölge	Yivin üstünde parlak granüllü mükemmel düz yüzey	Kaynak Kesitinden kaynak eksenine boyunca tünel oluşmuştur.
18		SKK ve ITAB Arasındaki Bölge	Lifli mat gri görünümü olan düz olmayan yüzey	KUSUR YOK
21		SKK ve ITAB Arasındaki Bölge	Granüllü düz yüzey, ancak kenarlarda damla çıkıntılar gözlemlenmiştir.	KUSUR YOK

Elangovan, Balasubramanian ve Valliappan (2008), bu çalışmalarında Al 6061 alaşımı levhaları 5 farklı uç profili (düz silindirik, konik silindirik, vidalı silindirik, üçgen ve kare) ve 5 farklı takım dönme hızında (800-1000-1200-1400-1600 dev/dak) kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. 6 mm kalınlığındaki haddelenmiş Al levhalar 300x200 mm boyutlarında kesilmiştir. Toplamda 25 adet birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir birleştirmeden çekme testi ve mikroyapı analizi için numuneler alınmıştır. Sonuç olarak 25 numunenin içinde en üstün kaynak kalitesi 1200 dev/dak dönme hızındaki kare uç profilili (SQ) pim ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.16-17) [30].



Şekil 2.16. Takım ucu profilinin mikrosertliğe etkisi [30]



Şekil 2.17. Takım dönme hızının mikrosertliğe etkisi [30]

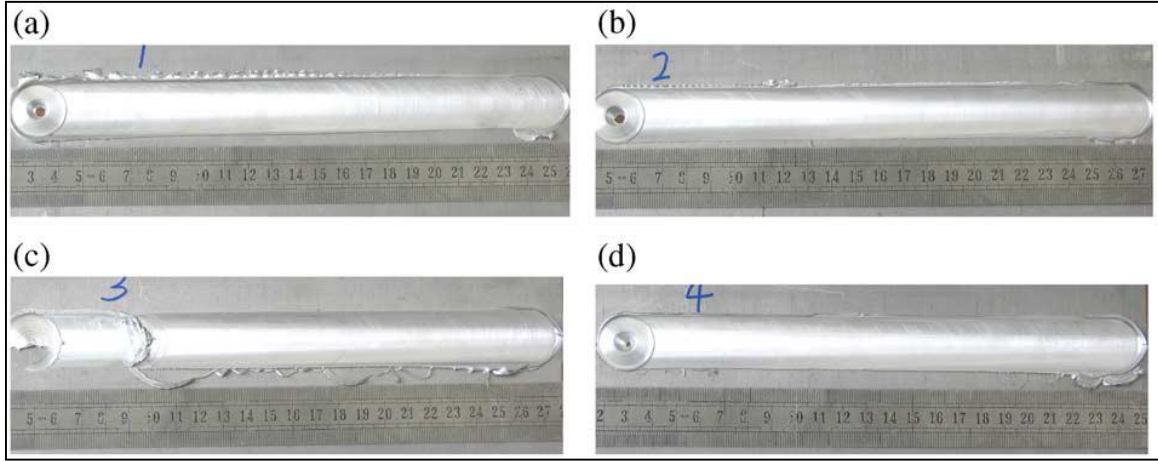
Zhao, Lin, Wu ve Qu (2005), çalışmalarında Al 2014 alaşımı levhaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde pim geometrisinin etkisini araştırmışlardır. 4 farklı geometride (konik silindirik, düz silindirik, konik vidalı silindirik, düz vidalı silindirik) karıştırıcı pim tasarlamışlardır (Şekil 2.18) [31].



4 Farklı Pim Profiline Sürtünme Karıştırma Kaynağı				
No	Pim Profili	En Büyük Pim Çapı	En Küçük Pim Çapı	Pimin Vida Adımı
1	Düz silindirik vidalı pim	8	8	1
2	Konik Vidalı Pim	8	6	1
3	Düz Silindirik pim	8	8	yok
4	Konik Pim	8	6	yok

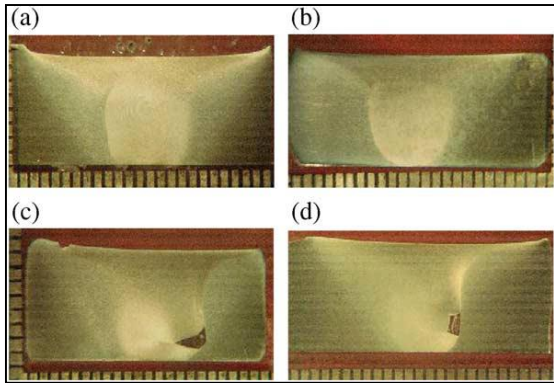
Şekil 2.18. Uç profillerinin görünümü ve ölçüleri [31]

Al alaşımı malzeme 250x100x8 mm boyutlarında hazırlanmış ve takım ucu olarak 4 farklı pim tasarlanmıştır. Takım uçları omuz genişliği 24 mm, pim uzunluğu 7.6 mm olarak imal edilmiştir. Kaynak esnasında 1-2-4 nolu (düz vidalı, konik vidalı, konik silindir) pimler ile yapılan kaynaklar temiz olmuş ve belirgin bir kusur göstermemişlerdir. 3 nolu düz silindir uç ile kaynak düzgün ve temiz yapılamamıştır (Resim 2.11) [31].



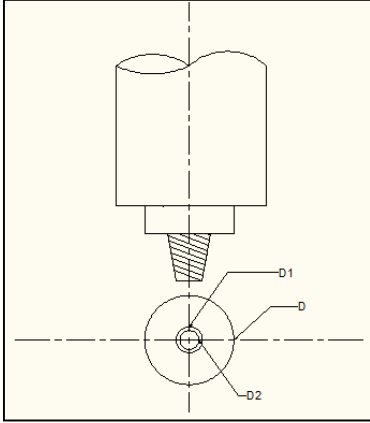
Resim 2.11. Farklı geometrik uçlar ile yapılan kaynak resimleri [31]

Yapılan birleştirmelerden numuneler alınıp metalografik olarak incelenmiştir. Yapılan incelemede vidalı olmayan uçlar ile yapılan kaynaklar kusurlu olduğu görülmüştür. (Resim 2.12) Vida dişi ısı üretimi için daha faydalı olmuş ve vidalı dişlerde karışım daha iyi gerçekleşmiştir. Sonuç olarak tüm testlerden en üstün kaynak özellikleri ve mukavemet gücü 2 nolu konik vidalı silindirik uç profilinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir [31].



Resim 2.12. Farklı geometrilerdeki uç profillerinin birleştirdiği kaynak incelemesi
a) 1 nolu, b) 2 nolu, c) 3 nolu, d) 4 nolu uç profilleri [31]

Avula ve Singh (2011), çalışmalarında 100x40x6mm boyutlarındaki ısıtma işlem görmüş ticari saf bakır levhalar kullanmışlardır. Levhaları birleştirmek için kullanılan takım geometrisi Şekil 2.19’de gösterilmiştir. Takım dönme hızı 635 dev/dak ‘da sabit tutulmuştur. Kaynak hızı olarak iki farklı hız kullanılmıştır. (8-19 mm/dak) Takım konik açısı 3° alınmıştır. Yapılan birleştirmelerden mikroyapı birleştirilmeleri için numune alınmıştır [32].

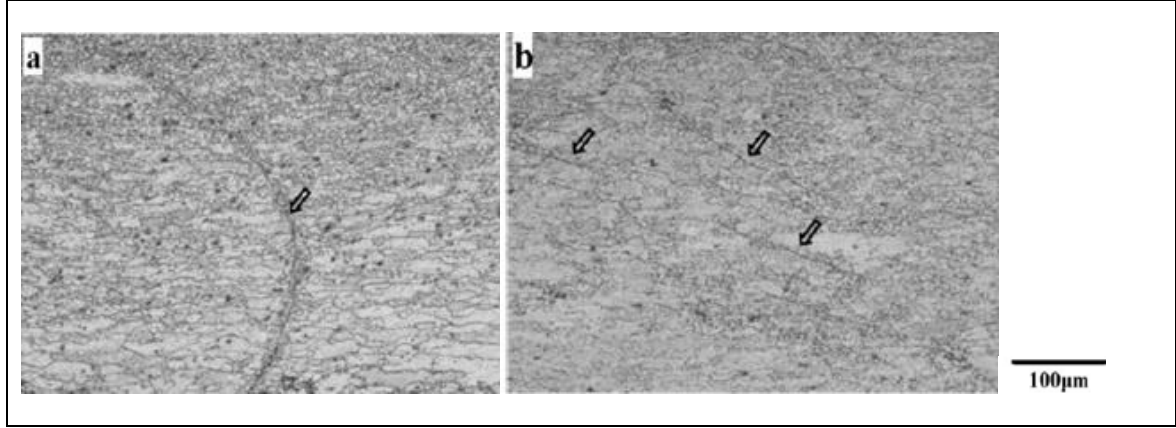


Şekil 2.19. Takım geometrisi [32]

Sonuç olarak 19 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynaklar en iyi kaynak özelliği göstermiştir. Yüksek hızda daha iyi karışım gözlemlenmiştir [32].

Krishna ve Reddy (2014), çalışmalarında aynı malzemeden üretilmiş levhaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi ile farklı iki malzemeden olan levhaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi arasındaki mekanik davranışları incelemişlerdir. AL6351 levhalar tasarlanan takım ucu yardımıyla sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir. Al 6351-Al 5083 levhalar aynı geometrideki takım ucu ile birleştirilmiştir. Her iki birleştirmeden alınan numuneler testlere tabi tutulmuştur. Tüm testlerden elde edilen sonuçlara göre benzer alaşım kombinasyonlarının gerilme, sertlik ve darbe özellikleri farklı alaşım kombinasyonlarına kıyasla daha iyi değerler göstermiştir [33].

Saad ve Shibayanagi (2006), çalışmalarında Al 2024 alaşımı levhaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin mekanik ve metalurjik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı dönme hızlarının sürtünme karıştırma kaynağına etkisi araştırılmıştır. 3mm kalınlığındaki Al 2024-T3 alaşımları 50mm/dak'lık sabit ilerleme hızı ile 400-600-800-1000-1250-1500 dev/dak 'lık dönme hızlarıyla birleştirilmiştir. Tane boyutlarının kaynak esnasında artan dönme hızı ile (1000dev/dak 'ya kadar) arttığı görülmüştür. 1000dev/dak'dan sonra kaynak bölgesindeki tane büyüklüğünde artış gözlemlenmemiştir. Ayrıca artan dönme hızı ile kaynak bölgesinde ikinci faz parçacıkların daha ince ve daha homojen dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 2.18) [34].



Şekil 2.20. Sürtünme karıştırma kaynağı ile farklı dönme hızlarında birleştirilen numunelerin mikroyapı incelemesi a) 400 dev/dak hız ile birleştirilen numune, b) 1500 dev/dak hız ile birleştirilen numune [34]

Sertlik hem kaynak bölgesinde hem ısıdan etkilenen bölgede dönüş hızı attıkça ana metalin sertliğine ulaştı. Maximum gerilme kuvveti 402 Mpa 1250dev/dak lık dönme hızında elde edilmiştir. Kaynak birleşiminin ortak verimliliği %88 olarak gözlemlenmiştir [34].

Saad ve Shibayanagi (2007), çalışmalarında aynı ve farklı Al ve Mg alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin mekanik ve metalurjik özelliklerinin inceleyip karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada aynı birleştirmeler için AL2024 Al alaşımı levhalar kullanılmıştır. Farklı birleştirmeler için ise Al 2024 –Al 7075 ve AZ31 Mg alaşımı levhalar kullanılmıştır. Levha kalınlığı 3mm seçilmiş, takım ucu için ise omuz genişliği 12mm, uç genişliği 4mm seçilmiştir (Çizelge 2.5) [35].

Çizelge 2.5. Aynı ve farklı alaşımların birleştirilmesinde kullanılan kaynak parametreleri [35]

Kaynak Koşulları														
Kaynak Tipi	Destek Plakası	Dönme Hızı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Birleştirilen Metaller		Kaynak Takımı								
				İlerleyen Kenar	Geri Çekilen Kenar	Omuz Çapı	Pim Çapı	Eğim Açısı						
2024 Al Alaşımlarının Birleşimi	SUS304 (Tip 1)	400	50	2024 Al Alaşımı	2024 Al Alaşımı	12mm	4mm	3°						
		600												
		800												
		1000												
		1250												
	1500	50												
		120												
		180												
		250												
	Saf Bakır (Tip 2)	100	50											
Saf Bakır ± 0.5mm	100													
50														
2024 Al ve 7075 Al Alaşımlarının Birleşimi	SUS304 (Tip 1)	400	100	2024 Al Alaşımı	7075 Al Alaşımı	12mm	4mm	3°						
		800												
		1200	40											
			70											
			100											
			200											
		1600	100											
		2000												
		2024 Al ve AZ31 Mg Alaşımlarının Birleşimi	2500						200	2024 Al Alaşımı	AZ31 Mg Alaşımı	12mm	4mm	3°
									300					
400														
550														

Sonuç olarak Al 2024 ve Al 7075 alaşımlarının 400 dev/dak'lık dönme hızı ile birleştirilmelerinde kaynak oluşamamıştır. Dönme hızının arttırılmasıyla tane büyüklüklerinin değiştiği ve heterojen bir görünüm sergilediği gözlemlenmiştir. Aynı ve farklı birleştirmelerde kaynak bölgesindeki tane büyüklüğünün dönme hızının artışıyla arttığı gözlemlenmiştir. Aynı Al alaşımlarının kaynaklarında (farklı Al alaşımlarıyla aynı koşullarda birleştirilmesinde) tane büyüklüğünün küçük ve homojen olduğu gözlemlenmiştir [35].

Saad ve Shibayanagi (2007), yaptıkları çalışmada iki farklı Al 2024-T3 ve Al 7075-T6 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin mekanik ve metalurjik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında 3mm kalınlığındaki plakalar 100mm/dak sabit bir kaynak hızında farklı döndürme hızlarında (400-800-1200-1600dev/dak) birleştirilmiştir. Yapılan incelemede karıştırma bölgesinde element dağılımının homojenliği, sertlik dağılımları ve birleştirmelerin gerilme özellikleri araştırılmıştır. [36] Sonuç olarak 400mm/dak dönme hızında birleştirme gerçekleşmemiştir. İki plaka arasında

sınır gözlemlenmiştir. Devir sayısı arttıkça birleşmenin daha iyi olduğu görülmüştür. En iyi özellikler 1200dev/dak dönme hızında meydana gelmiştir. Maximum gerilme 1200dev/dak ile kaynatılan numunelerden elde edilmiştir [36].

Malarvizhi ve Balasubramanian (2011), çalışmalarında Al 2219 alaşımı levhaların sürtünme karıştırma kaynağı, elektron ışın kaynağı ve ark kaynağı ile birleştirerek oluşan birleşimlerin özelliklerini incelemişlerdir. Öncelikle levhaları üç farklı kaynak prosesine göre kaynatmışlardır. (FSW, EBW, GTAW) Bu birleşmelerden alınan numunelere çekme, yorulma ve korozyon testleri uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir. Mikroyapı analizleri yapılmış ve sonuçları tartışılmıştır (Tablo 2.6) [37].

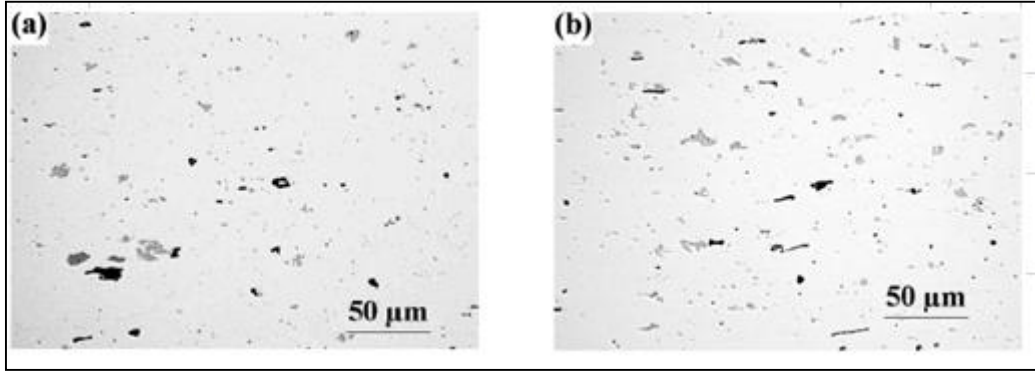
Çizelge 2.6. Yapılan test sonuçları [37]

Kaynaklı Birleştirmelerin Enine Çekme Özellikleri				
Özellik	ANA METAL	GAZ KAYNAĞI	ELEKTRİK IŞIN KAYNAĞI	SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI
Akma Dayanımı	390	220	265	305
Son Çekme Dayanımı	470	242	304	342
Elastikiyet %	15.0	8.8	10.4	12.2
Kesit alanında Azalma %	10.5	6.2	7.5	8.6
Çentik çekme mukavemeti	442	182	243	291
Çentik Gücü Oranı	0.93	0.75	0.80	0.85
Birleşme verimliliği %		51	64	72

Sonuç olarak FSW ile birleştirilen levhalar elektron kaynağı ve ark kaynağı ile birleştirilen levhalara göre daha iyi gerilme ve yorulma özelliği göstermiştir. Ayrıca sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleşimlerin düşük korozyon direnci gösterdiği görülmüştür. Bunun sebebi ise tane yapısının ince olması ve kaynak bölgesinde dağılımının homojen olmasıdır [37].

Ocenasek ve Slamova (2005), çalışmalarında aynı iki Al alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin mekanik ve metalurjik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Bu

Çalışma için Al 5083 iki aynı tip alaşımlı levha ile Al 7075 iki aynı tip levha birleştirilmiştir. Her iki birleştirmede de aynı kaynak parametreleri kullanılmıştır. Genel olarak sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirmelerde makroyapı ve mikroyapılar benzer özellikte görülmüştür (şekil 2.21) [38].

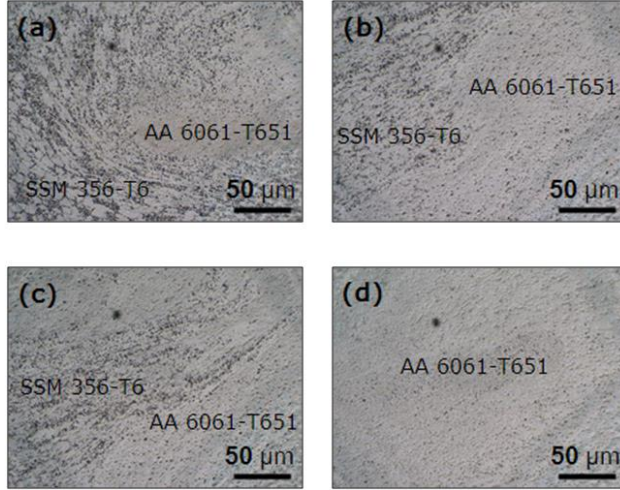


şekil 2.21. Al5083-H111(a) ve Al 7075-T651(b) alaşımlarının birleşimlerinin mikroyapısal görünümleri [38]

Al 7075 alaşımına göre Al5083 alaşımında sertlik daha küçük çıkmıştır. 6mm'lik Al 5083 levha ve Al 7075 levhanın birleşimlerinin malzeme gücü ise sırasıyla %100 ve %72 bulunmuştur. Yapılan tüm testlerin sonucuna göre kaynak sertliğinin; malzemenin türüne, tabaka kalınlığına ve kaynak parametrelerine bağlı olduğu görülmüştür. İşlenmiş alaşımlarda sertlik nispeten daha küçüktür. Al 5083 levhaların ince olanlarında kaynak hattında mukavemet maksimum, kalın olan levhalarda ise kaynak hattındaki sertlik değerinin minimum olarak çıktığı görülmüştür [38].

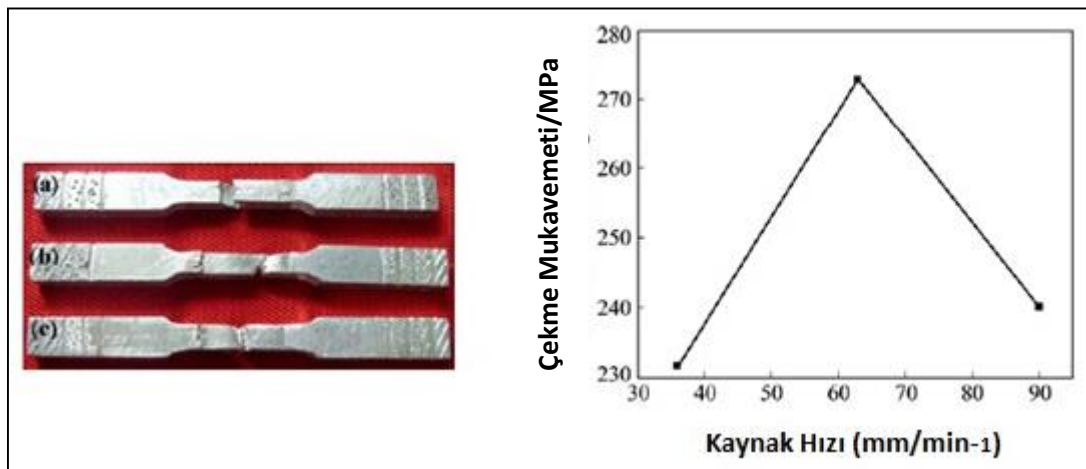
Tehyo ve Muangjunburee (2012), alışmalarında 356-T6 zayıf metal ile Al 6061 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin metalurjik ve metalik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı iki takım döndürme hızı (1.750 dev/dak ve 2.000 dev/dak) ve 6 farklı kaynak hızı (20, 50, 80, 120, 160 ve 200 mm/dak) kullanmışlardır. Birleştirmelerden numuneler alınıp incelendiğinde daha yüksek takım dönme hızı ile birleştirilen zayıf metalin (SSM), düşük takım dönme hızıyla birleştirilene göre mukavemetinin daha az etkilendiği görülmüştür. Kaynak hızındaki artış ise gerilimi daha az etkilediği görülmüştür. Genellikle dönme hızı büyük olan takımla yapılan kaynakta çekme gerilmesi daha fazla oluştur. 80 mm/dak'lık kaynak hızı ve 2000 dev/dak'lık dönüş hızı ile birleştirilen kaynaklarda 206.3 MPa'lık ortalama bir max gerilme mukavemeti türetilmiştir. Sertlik en yüksek kaynak bölgesinde gözlemlenmiştir. Mikroskobik

incelemede AL6061-T651 ile SSM356-T6 levhaların birleştirilmesinde iri taneler SSM356-T6’da gözlemlenmiştir (Şekil 2.22) [39].



Şekil 2.22. Sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmenin mikroskopik incelemesi [39]

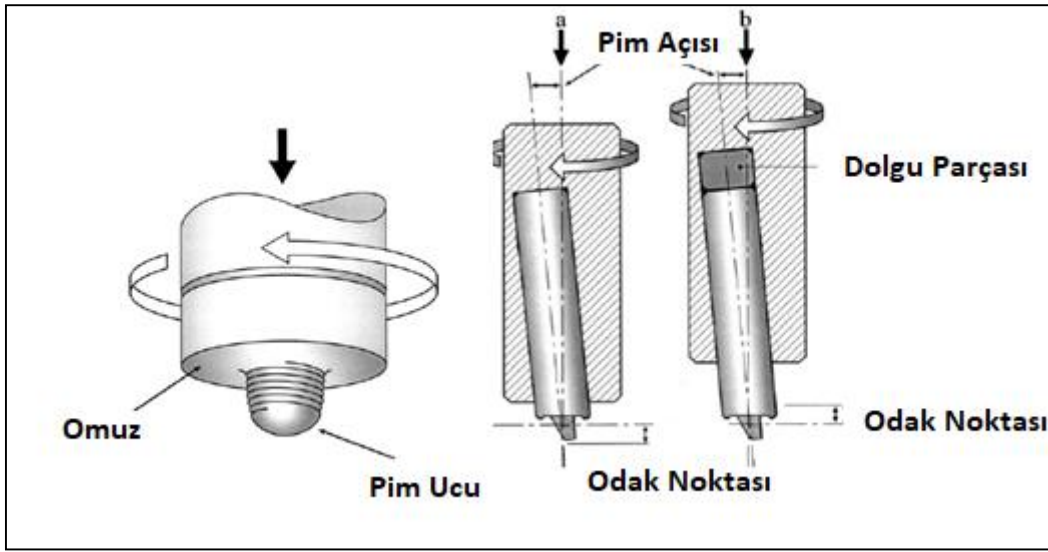
Palanivel ve Mathews (2014), Al 5083-H11 ve Al 6351-T6 Al alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin mekanik ve metalurjik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışma için üç farklı kaynak hızı seçilmiştir. (36, 63, 90 mm/dak) Bu kaynak hızlarının sürtünme karıştırma kaynağına etkisi araştırılmıştır. Kaynak hızının 63mm/dak olduğu birleştirmelerin en iyi mekanik ve metalurjik özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 2.23) [40].



Şekil 2.23. Farklı kaynak hızlarında kaynatılan birleştirmelerin çekme deneyi sonuçları:
a) 36mm/dak, b) 63mm/dak, c) 90mm/dak [40]

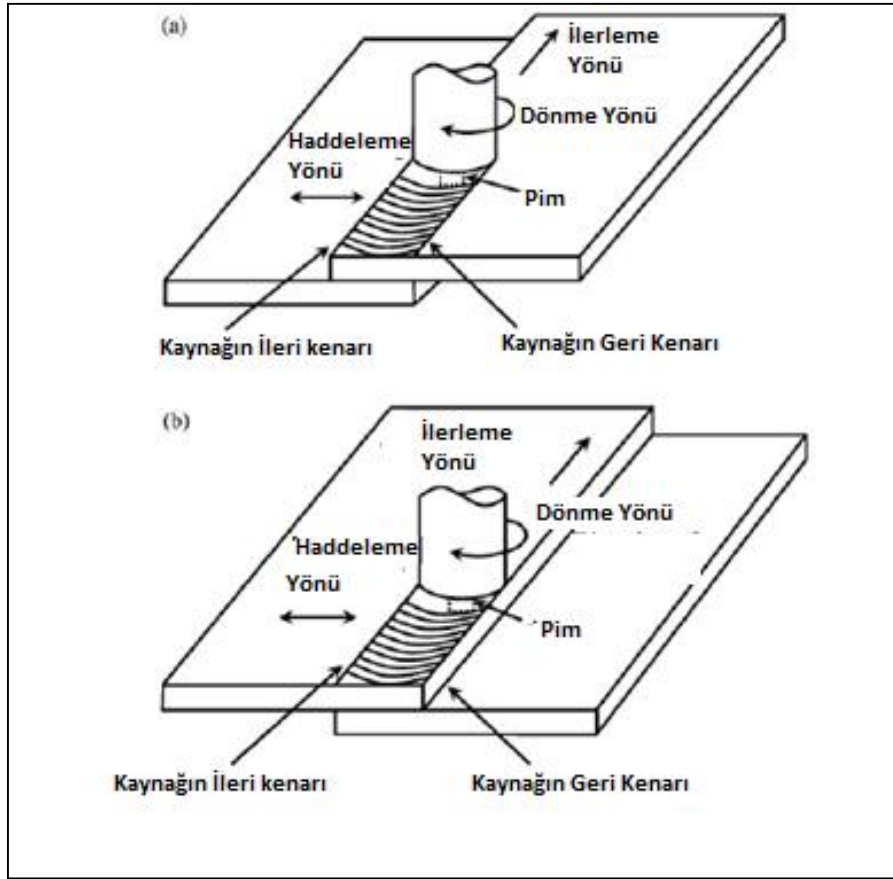
Sürtünme karıştırma kaynağı sadece alın altına olan levhaların birleştirilmesinde değil perçinli birleştirilmelerinde yerine kullanılmaya başlamıştır. Buna örnek birkaç çalışmadan bahsedilecektir.

Cantin ve David (2004), çalışmalarında Al 5083 Al alaşımı levhaları sürtünme karıştırma kaynağı ile mafsallı olarak birleştirmişlerdir. İlk olarak kaynağı yapabilmek için uygun uç tasarımı yapılmıştır. Sonrasında uca bir döndürme açısı tayin edilmiştir (Şekil 2.24) [41].



Şekil 2.24. Tasarlanan uç profili ve açısı [40]

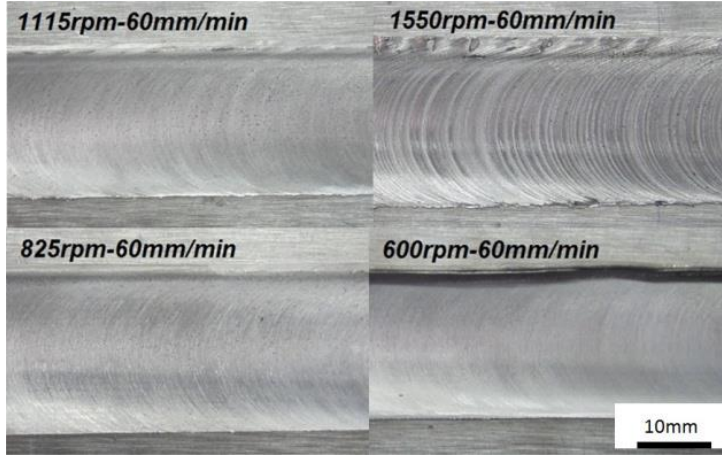
Birleştirme işlemi levhaları üst üste koyarak belli bir açı ile yanaştırılan uç piminin belli dönme hızı ve ilerleme hız ile levhalara daldırılmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.25) [41].



Şekil 2.25. Sürtünme karıştırma kaynağının mafsallı birleştirilmesi [41]

584 dev/dak'lık dönme hızı ve 2 mm/dak ile 4 mm/dak'lık ilerleme hızları kullanılmıştır. Yapılan birleştirmeler incelenmiş ve en iyi birleştirmeler 2 mm/dak'lık ilerleme hızında gerçekleştiği görülmüştür [41].

Bisadi ve Tour (2011), çalışmalarında sürtünme karıştırma kaynağını üst üste mafsallı kaynak şeklinde gerçekleştirmişler. Al5083 alaşımlı levhaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde lap proses parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma özellikle Al alaşımının perçinli birleştirmelerde yaşanan sorunları ortadan kaldırmak için yapılmıştır. Lap eklemleri bir takım ucu yardımıyla belirli bir ilerlemede ve dönme hızında birleştirilmektedir. Sürtünmeli mafsallı birleştirmelerde en önemli parametreler takım ucu profili, takım eğim açısı, takım dönme hızı ve ilerleme hızı olarak tespit edilmiştir. Çapraz eklem kaynağı için Al 5083 levhalar 2.5 mm kalınlığında 150 mm uzunluk ve 100 mm genişlikteki levhalar haline getirilmiştir. 20 mm omuz çaplı, büyük çapı 4.8 mm olan ters konik pim takım kullanılmıştır. H13 söndürülmüş ve temperlenmiş çelik malzemedan üretilmiştir. Farklı ilerleme ve dönme hızları kullanılmıştır (Şekil 2.26) [42].



Şekil 2.26. Sürtünmeli mafsallı kaynak parametreleri ile oluşturulan kaynak görüntüsü [42]

Yapılan birleştirmelerden metalografik testler için numuneler alınmıştır. Sonuç olarak Tablo 2.7’deki yük taşıma özellikleri verilmiştir [42].

Çizelge 2.7. Dönme hızı ve ilerleme hızına göre oluşan maximum yük sonuçları [42]

Farklı Kaynak Koşulları			
Numuneler	Dönme Hızı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Max Yük (N)
1	600	32	10617
2	600	60	8872
3	825	32	14217
4	825	60	13647
5	1115	32	13309
6	1115	60	13615
7	1550	32	7701
8	1550	60	8225

Dönme hızı 600 dev/dak olan hariç diğer dönme hızlarında birleştirilen levhalarda kırılmalar birleşim yerlerinin üst tabakasındaki ısıdan etkilenen bölgede gerçekleşmiştir. Yapılan deney sonuçlarında düşük dönme hızı ve ilerleme hızlarında kaynak birleşiminin daha iyi özellikte olduğu gözlemlenmiş fakat sıcaklığı arttırmak ve bölgedeki malzeme akışını kolaylaştırmak sebebiyle hızın artırılması gerekmektedir. 600dev/dak’lık dönme hızında eklem hatalarının ana sebepleri düşük ısı transferinden ve karıştırılmış eklem alanı yetersizliğinden kaynaklanmıştır. 1550dev/dak’lık devir hızında ise alana aşırı ısı aktarılması, ilerleme esnasında termomekanik bölgesinde kancaya benzer kusurlara neden olur. Sonuç olarak en iyi kaynak özellikleri 825 dev/dak takım dönüş hızı ve 32 mm/dak kaynak hızı ile gerçekleştirilen birleştirmelerden elde edilmiştir [42].

Cederqvist ve Reynolds (2001), yapılan çalışmada farklı uç parametreleri, farklı kaynak hızları ve farklı devir sayıları kullanılarak üst üste mafsallı sürtünme karıştırma kaynağı yapılmıştır. Takım özellikleri Çizelge 2.8’da verilmiştir [43].

Çizelge 2.8. Kullanılan takım uçlarının ölçüleri [43]

Takım No	Pim Uzunluğu (mm)	Pim Çapı (mm)	Omuz Genişliği (mm)
1	4.0	5.1	12.7
2	4.0	4.4	12.7
3	3.0	5.1	12.7
4	3.0	4.4	12.7
5	4.0	5.9	12.7
6	3.0	4.8	15.7
7	3.6	9.7	25.4
8	3.3	9.7	25.4
9	3.0	9.7	25.4

Parametrelerin dışında bazı kaynaklar tek gidiş, bazıları da çift gidiş olarak yapılmıştır. Tüm parametreler Tablo 2.9’da verilmiştir [43].

Çizelge 2.9. Kullanılan parametreler [43]

Kaynak Çalışmaları	Takım No	Kaynak Parametreleri ve Birleştirmelerin Kopma Test Verileri							
		İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	TG/ÇG	Ayrılık Mesafesi	Bozulma Yüğü(kN)R(R1)	Bozulma Yeri R(R1)	Bozulma Yüğü(kN)A(R2)	Bozulma Yeri A(R2)
1	1	2.3	495	TG		7.0	A,B	14.0	A,T,Kaynak boyunca
2	2	2.3	495	TG		n/a	n/a	8.3	A,T
3	3	2.3	495	TG		8.0	kaynak boyunca	9.4	kaynak boyunca
4	4	2.3	495	TG		n/a	n/a	5.6	A,T
5	5	2.3	495	TG		8.5	A,B	12.2	kaynak boyunca
6	6	2.3	495	TG		10.9	A,B	14.0	A,T
7	9	2.3	300	TG		21.4	A,B	15.6	A,T
8	1	2.3	495	ÇG	3.8	14.4	R1,T	15.1	R2,T
9	6	2.3	495	ÇG	3.8	17.8	R1,T	17.7	R2,T
10	6	2.3	495	ÇG	6.4	18.3	R1,T	19.6	R2,T R1,B
11	6	3.3	495	ÇG	3.8	16.7	R1,T	18.6	R2,T R1,B
12	6	3.3	638	ÇG	3.8	17.7	R1,T	14.9	R1,B
13	6	3.3	638	ÇG	6.4	16.7	R1,T	17.1	R1,B
14	6	3.3	638	ÇG	8.9	18.0	R1,T	20.3	R2,T R1,B
15	6	4.2	983	ÇG	5.1	16.1	R1,T	16.7	R2,T R1,B
16	6	4.2	833	ÇG	5.1	15.6	R1,T	17.0	R2,T
17	5	3.3	495	ÇG	5.8	15.7	R1,T	18.1	R2,T
18	5	5.6	495	ÇG	5.8	17.7	R1,T	17.9	R1,B
19	7	2.3	300	ÇG	8.9	19.6	R1,T	21.4	R1,B
20	7	2.3	495	ÇG	8.9	16.4	R1,T	16.6	R2,T
21	8	2.3	300	ÇG	8.9	20.0	R1,T	23.0	R2,T HAZ
22	8	2.3	495	ÇG	8.9	20.9	R1,T	23.8	R1,B
23	9	2.3	300	ÇG	8.9	22.8	R1,T	22.6	R2,T R1,B
24	9	3.3	495	ÇG	8.9	23.2	R1,T HAZ	23.3	R2,T R1,B
25	9	4.2	833	ÇG	8.9	20.9	R1,T	22.4	R2,T

TG=Tek Geçiş; ÇG=Çift Geçiş

Çift geçişli kaynaklar tek geçişlilere göre daha düzgün dağılım göstermiştir. Büyük çaplı pimlerin kayma yükünü azalttığı görülmüş ve birleşmenin daha iyi olduğu görülmüştür. En iyi kaynak 9 numaralı takım ile gerçekleştirilmiştir [43].

Son yıllarda otomatik kontrol edilebilen, geri çekilebilen takım uçları geliştirilmiştir. Farklı kalınlıktaki malzemelerin kaynağı yapılacağı zaman hem hız kazanmak hem de güvenliği sağlamak için NASA da çalışan bir kaynak mühendisi tarafından bir takım ucu tasarlanmıştır (Resim 2.13) [44].



Resim 2.13. Otomatik olarak çalışan ve geri çekilebilen takım [44]

Genel olarak yapılan çalışmalarda malzemelerin birleştirilmesine devir, ilerleme, uç profili ve malzeme içeriğinin etkisi üzerinde durulmuştur. Yapılan araştırmada uç profil yapısının malzeme üzerinde hangi kuvvetleri oluşturduğu ile ilgili çalışmaların yeteri kadar yapılmadığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmamızda bu eksiklik giderilmek istenmiştir. Yaptığımız çalışma ile sürtünme karıştırma kaynağı esnasında oluşan kuvvetlerin kaynak yapılabilirliğe etkisi gözlemlenmiş ve en uygun uç profilinde en iyi kuvvet sonuçlarının ortaya çıktığı görülmüştür.

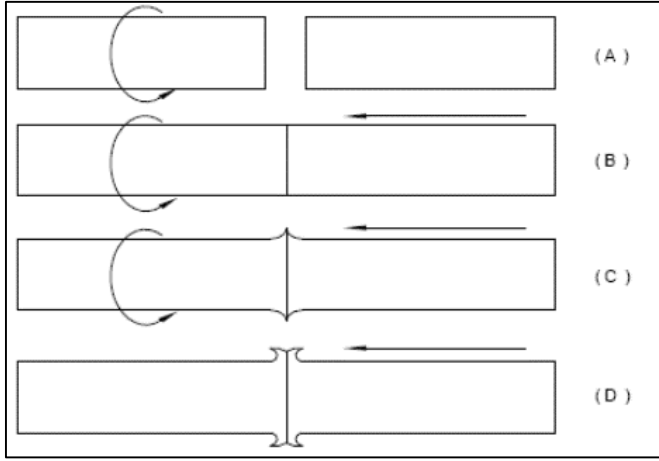
3. SÜRTÜNME VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMLERİ

3.1. Sürtünme Kaynağı

Mekanik dönme hareketiyle oluşan sürtünme ısısının parçadan ergimiş bölge oluşturarak iki farklı parçayı birbirine karıştırma yöntemi olarak tanımlanabilir. Sürtünme kaynağı teknolojisi sürekli gelişen teknolojide yerini almış, dünyada birçok ülkede uygulanmaya başlanmış, ticari ve ekonomik bir yöntemdir. Malzemelerin kaynağında kullanılan bir enerjide sürtünme enerjisidir. Bu yöntem 1890'lı yılların başında keşfedilmiş endüstriyel olarak ise 1950'li yılların ortalarında sanayide yerini bulmuştur. Bevington sürtünme ısısıyla boruların kaynağını yapmıştır. 1924 yılında W.Richter İngiltere'de patent almıştır. 1941 yılında A.R.Nealonds ve H.Klopstock silindirik parçaların sürtünme kaynağı için birer patent almışlardır. Ayrıca 2.Dünya Savaşı sırasında Almanya ve Amerika'da plastik malzemelerin kaynağında sürtünme kaynağı kullanılmıştır [45-46].

İngiltere'de ilk sürtünme kaynağı 1961 yılında kaynak enstitüsü tarafından yapılmış ve 1962 yılında ABD'de Caterpillar Troctor Co. Atalet kaynağı adı altında sürtünme kaynağını değiştirerek kullanmıştır. Sürtünme kaynağı yöntemi giderek yayılmış ve tüm dünyada kullanımı artmıştır. Halen sürtünme kaynağı modern kaynak yöntemleri arasında yer almaktadır [45-46].

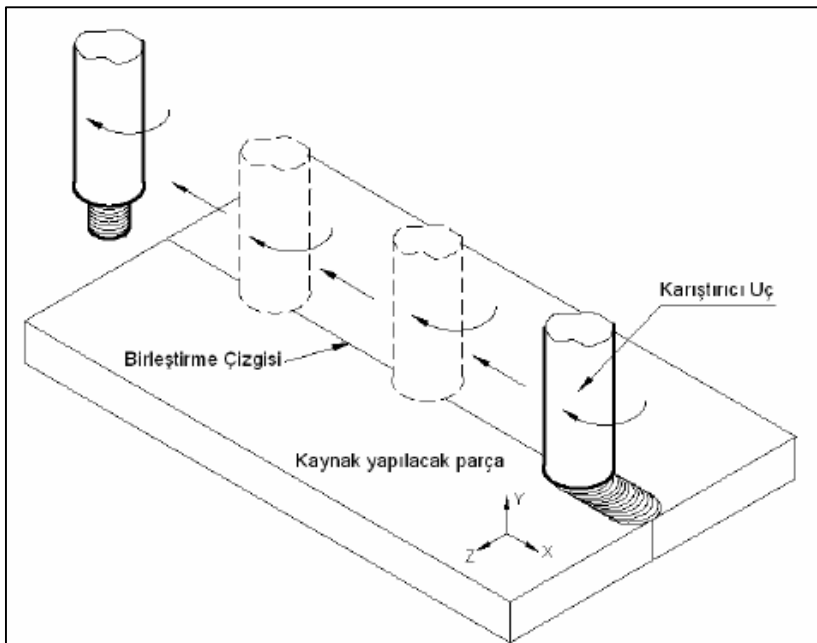
Sürtünme kaynağında genellikle dairesel kesite sahip miller ve borular kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişerek dönel aynanın istenilen pozisyonda kendini frenlemesi sayesinde dönel simetrisi olmayan parçalarda rahatlıkla kaynatılabilmektedir. Buradaki problem sadece merkezleme sorunudur. Sürtünme kaynağı sırasında ara yüzey basınç altındadır. Bu basınç sabit parça, hareketli parça tarafından dönen her iki parça tarafından da sağlanır [47] (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Sürtünme kaynağının yapım aşaması [47]

3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme Karıştırma Kaynağı sürtünme kaynağı yönteminden türetilmiştir. Özellikle kaynak yapılması zor olan alaşımların birleştirilmesinde kullanılmakta ve ergime sıcaklığı düşük olan malzemelerde rahatlıkla uygulanmaktadır. Yöntem bir omuzlu karıştırıcı ucun iki levhayı alın altına birleştirildiği kısımdan sürtünerek belirli bir ilerleme ve dönme hızında karıştırılması işlemidir. Birçok alaşımda kullanılmasına rağmen özellikle alüminyum alaşımlarının kaynak yapılmasında ve askeri, uçak sanayide yoğun olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma kaynağının yapım aşaması [47]

3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağı için Temel Hazırlık

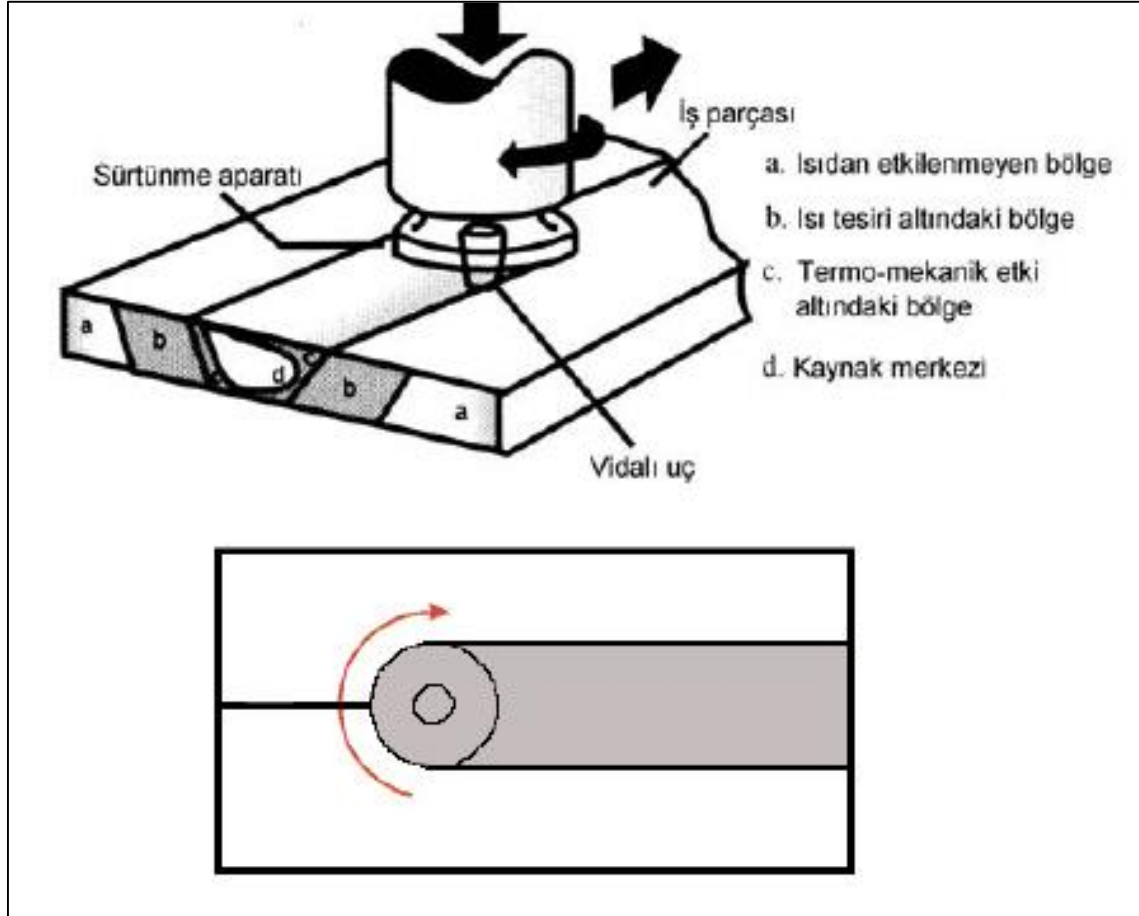
Sürtünme Karıştırma Kaynağı, işlemine ilk olarak pimin (karıştırıcı ucun) tasarlanmasıyla başlanır. Sonra tasarlanan uçlar imal edilir. Parçaların kaynatılabilmesi için bir bağlama kalıbı tasarlanır ve imal edilir. İşlem sırasında oluşan baskıdan dolayı levhaların hareketine engel olmak gerekir. Bunun için bağlama pabuçları kullanılabilir. Geometrik bozuklukların oluşmaması için karıştırıcı ucun her iki yanında ve önünde baskı bilyesi kullanılabilir. Özel olarak yapılan silindirik kademeli uç dairesel hareket yapabilen bir aparata ya da makineye aparat yardımı ile bağlanabilir. Dönmekte olan pim yavaşça birleşme hattına bastırılır. Karıştırıcı pimin uç kısmı istenilen kaynakla aynı boydadır. Uç levhalara değdiği andan itibaren bir ısı oluşturur ve bu ısı malzemenin direncini azaltır ve ergimeye başlar. Ergiyen iki levha karıştırıcı uç sayesinde birbirine kaynamaya başlar. Bu işlem sırasında X, Y, Z’de oluşan kuvvetler ölçülerek oluşan moment hesaplanabilir. Sonuç olarak oluşan birleşme esnasında birleşme hattı ezilir, oksit filmi kırılır, yumuşak metali karıştırarak birbirine birleştirir ve ileriye hareketi ile geride kalan birleşim soğuyarak katı hal kaynağını oluşturur. Tüm bunlar alaşımın ergime sıcaklığının altında bir değerde gerçekleşir [47].

3.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Yöntemi

Sürtünme Karıştırma Kaynağı iki şekilde uygulanabilir. Alın altına kaynatılacak levhalar mengeneyle bağlama aparatı kullanılarak sabitlenir. Sabitlenen levhalar hareketli olabileceği gibi takımın dönme ve ilerleme hareketi de olabilir. [48] Geniş omuzlu pim (karıştırıcı uç) belirli bir ilerleme ve devir sayısında hareket ederek levhaların birleşim kısmına daldırılır ve kaynak yapılacak hat boyunca ilerletilir. Pim malzemeye daldırıldığında aynı sürtünme kaynağında olduğu gibi ısı oluşur ve bu ısıyla malzeme yumuşar. Yumuşayan malzeme karıştırıcı uç sayesinde karıştırılır. Geniş omuz sayesinde üst yüzeye uygulanan baskı kuvvetiyle malzeme içe doğru baskılanarak karışımı kolaylaştırılır. [49] Karıştırılan malzeme, hidrostatik basınç sayesinde soğuyarak katılaşır ve birleşme gerçekleşir [50].

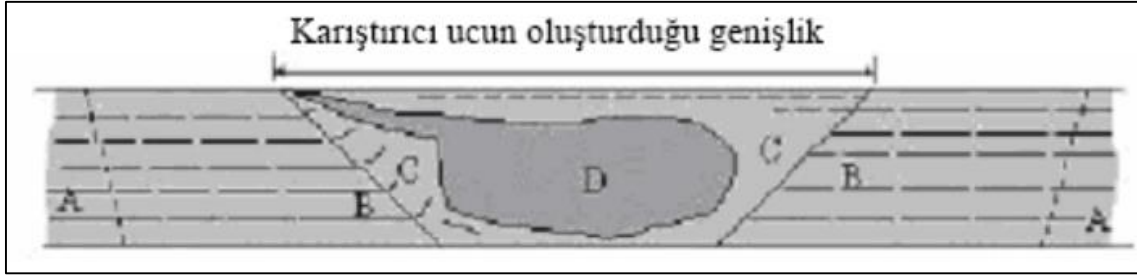
3.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Metalurjik Yapısı

SKK yöntemi bir katı hal kaynağı olduğundan kaynak dikişinde ergime oluşmaz. Yüksek ısı çıkışı olmadığından ısıdan etkilenen bölge oldukça dardır. Şekil 3.3’de kaynak kesit alanı verilmiştir.



Şekil 3.3. Sürtünme Karıştırma kaynak yönteminin çalışma prensibi [20]

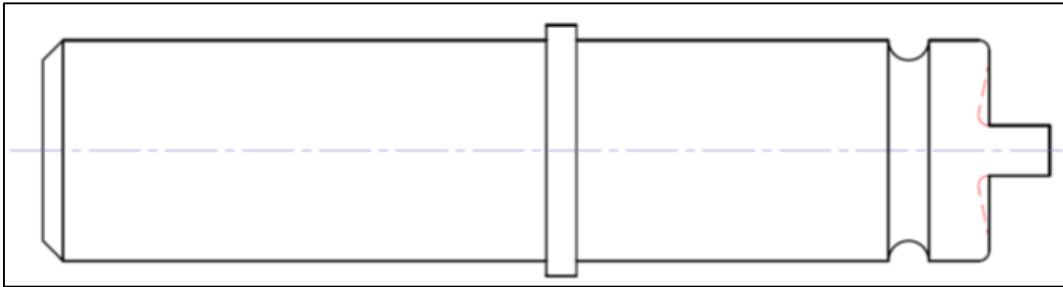
Diğer kaynak türlerinden biri olan ergitme kaynaklarından daha farklı bir kaynak dikişi oluşmaktadır. Isıdan etkilenmeyen ana malzemeden kaynak dikişine doğru sıralama Şekil 3.4’da verilmiştir. Kaynak bölgesi üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge, termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge ve ısı tesiri altındaki bölgedir. Bu bölgelerin oluşumu, karışım bölgesinin şekli, kaynak parametrelerine, levhaların mekanik özelliğine ve kullanılan pimin uç profiline bağlı olarak değişiklik gösterir (Şekil 3.4) [51].



Şekil 3.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü: A: kaynak tesiri altında olmayan bölge, B: ısının tesiri altındaki bölge, C: yeniden kristalleşen bölge, D: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge [51]

3.6. Karıştırıcı Uç Ve Özellikleri

Karıştırıcı ucun tasarımı yapılırken özellikle iki önemli husus vardır. Birincisi karıştırıcı ucun uç formudur. Bu form malzemenin akışını zorlaştırmamalı ve levhanın içerisinde rahat bir şekilde dönebilmesini sağlamalıdır. Bir yandan malzemeyi yumuşatırken diğer yandan karıştırma işlemini yapabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Bir diğer husus ise geniş omuz dediğimiz levhanın üzerine baskı uygulayan kısımdır. Bu kısım ise malzeme yüzeyini düzeltirken parçacıkların yeniden malzemeye karışmasını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 3.5’de örnek bir pim bulunmaktadır [52].

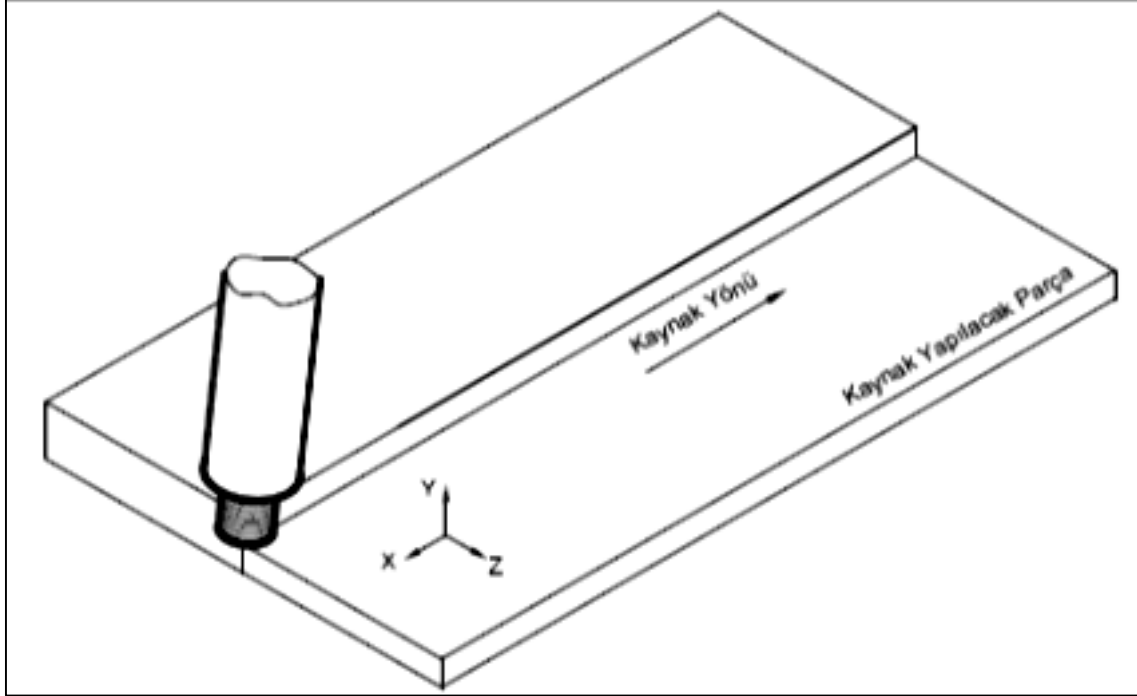


Şekil 3.5. Temel olarak tasarlanan karıştırıcı uç formu [52]

3.7. Malzeme Özellikleri Ve Kaynak Parametreleri

Yapılan çalışmalar özellikle 2219, 2014, 6083, 6082 ve 7075 vb. Al alaşımlarında sürtünen eleman ile kaynak yöntemlerinin başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Levhaların kalınlıkları 1.2 mm’den 50 mm’ye kadar çıkabilmekte ve tek seferde sürekli bir kaynak birleştirmesi mümkün olmaktadır. Farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesinde ise

pimin eğik konumda levhalara daldırılması gerekmektedir.Şekil 3.6’da bu işlemi gösterilmektedir [52].



Şekil 3.6. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde ucu eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi [54]

Bu tez çalışmasında yapılan araştırmalara ek olarak Al 6066 alaşım seçildi.

3.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılabilen Malzemeler

Birçok araştırmada farklı malzeme ve alaşımlar SKK yöntemi ile birleştirilerek farklı veriler elde edilmiştir. SKK kaynağının en önemli özelliği, ergitme kaynağı ile birleştirilemeyen malzemelerde kolaylıkla uygulanabilmesidir. Bunlara örnek olarak çeliğin alüminyum ve bakır ile, toz metalurijisi ile üretilen parçaların ve seramiklerin alüminyum ile, sert ve ağır metallerin diğer metallerle SKK yöntemiyle yapılan birleştirmeleri örnek gösterilebilir. [55].

Döküm-döküm Al alaşımlarında, döküm-dövme Al alaşımlarında, sıvı hal kaynak yöntemleriyle birleştirilemesi güç olan 0,8 mm kalınlığındaki çinko saçların kaynağında, düşük karbonlu yumuşak çeliklerde, orta karbonlu çeliklerde, metal matrisli kompozitlerde,

plastiklerde, farklı iki malzemenin kaynaklarında, bakır alaşımlarında, kurşun, titanyum ve çinko alaşımlarında bu yöntem başarıyla uygulanmıştır. [52].

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek gereçlerin ikisinin de aynı prizmatik kesite sahip olması gerekmektedir. Farklı özellikte parçalarda birleştirilebilir fakat aynı özelliktekilerin birleştirilmesi daha kaliteli olmaktadır. Sürtünme Kaynağı ile birbirine kaynak edilebilen malzemeler şunlardır:

- Düşük karbonlu çelikleri, alaşımlı çeliklerle, paslanmaz çeliklere, al ve alaşımlarına,
- Bakırın, Al ve alaşımlarına,
- Bronzun, Al ve alaşımlarına,
- Bakırın çeliğe,
- Pirincin çeliğe,
- Titanyum ve alaşımlarının çeliğe,
- Titanyum ve alaşımlarının, al ve alaşımlarına,
- Paslanmaz çeliğin zirkonyum gibi metallere kaynak edilebilirliği mümkündür [56].

3.9. SKK da Etkin Olan Kaynak Parametreleri

SKK yöntemi dönme hızı, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, ilerleme süresi, yığma geciktirme süresi, yığma basıncı (dövme) ve yığma süresi gibi çok fazla değişken parametreler içermektedir. Yapılan araştırmalarda bu değişkenlerden en çok kullanılan ve etkili olanların devir sayısı, sürtünme karıştırma süresi, ilerleme ve kullanılan uç profili olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerden hariç kaynatılacak malzeme şartlarına bağlı parametrelerde vardır. Yapılan araştırmalarda parametrelerin hakkında şu genel sonuçlar çıkarılabilir:

Dönme hızı, termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölgede etkili olmaktadır. Sürtünme basıncı ve yığma basıncı, numune geometrisine ve yapıldığı malzemeye göre değişmektedir. Sürtünme ve yığma süreleri malzemeye bağlıdır: malzeme yüzeyindeki pislik ve oksitleri temizlemeli ve gerekli yumuşama için doğru bir kaynak bölgesi sıcaklığını sağlayabilmelidir. Az ısıtma birleşmeyi sağlayacak plastisiteyi sağlamadığı için birleşme olamayacaktır. Fazla ısıtma ise yığma basıncı sırasında fazla malzeme oluşturduğu için malzeme kaybına neden olabilir [57].

3.10. SKK'nın Üstünlükler ve Sınırlamalar

Sürtünme karıştırma kaynağı çok düşük sıcaklıklarda bile yapılabildiğinden çok kısa sürede soğuyabilir. Bu özelliğinden dolayı yalnızca elektrik direnç kaynağı ile karşılaştırılabilen çok yüksek hızlarda yapılabilmektedir [52].

3.10.1. SKK'nın avantaj ve dezavantajları

SKK'nın bir kısım sınırlamaları olduğu gibi diğer kaynaklara göre çok fazla avantajı vardır. Öncelikle erimeyi kolaylaştıran dolgu malzemesi ve koruyucu atmosfere gerek yoktur. Enerji gereksinimi diğer kaynakların küçük bir oranı kadardır. İşlem diğer yöntemlere göre daha az atık çıkardığı için daha temizdir. Isıdan etkilenen bölge daha azdır ve kaynaklı bölgenin tanecik yapısı ana malzemeden daha küçüktür. Farklı yapıdaki malzemelerin birleşmesi için uygundur. Diğer yöntemlerle birleştirilemeyen malzemeler SKK ile birleştirilebilir (ÖRN: 2XXX, 7XXX Al alaşımları ve Al-Li alaşımları). Al üzerinde oluşan oksitlenmelerin temizlenmesine gerek olmadan kaynak işlemi gerçekleştirilebilir. Al alaşımları katı hal birleşme tekniği olduğundan birleştirmede katılaşma ve çatlaklar görülmez. Çekme, yorulma ve kopma mukavemetleri yüksektir. Uygun HSS ile karıştırıcı uç yapılması çok fazla parçanın kaynağının yapılmasını sağlar. Özellikle Al alaşımlarında kullanıldığında plastik deformasyon sayesinde ana metalin parça yapısına göre kaynak metalin parça yapısının daha ince taneli olduğu gözlemlenmiştir. Herhangi bir buharlaşma olmadığından ana metalde eksilme olmaz. Uygulama esnasında insan sağlığına olumsuz bir etkisi olmaz. (Kaynak dumanı, radyasyon vb.) Kaynak sırasında ark oluşumu ve eriyik metal oluşmaz. Malzeme çarpılması malzeme uzun olduğunda oluşur. Uygun bir aparat kullanıldığında değişik kalınlıklardaki Al alaşımları, tek bir karıştırıcı uç ile birleştirilebilir. Kaynak metalinde gözenek oluşmaz. Tüm pozisyonlar için uygundur. Enerji tasarrufu sağlar. İlave metal kullanmaya gerek yoktur. Koruyucu gaz ve maske kullanmaya gerek yoktur. Kalifiye işçiliğe gerek yoktur. Kaynak sonrası çapaklar temizlendikten sonra herhangi bir taşlama ve fırçalamaya gerek duyulmaz.

3.10.2. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarındaki sınırlamalar

Uygulama esnasında bazı sınırlamalar vardır. Bunlar;

1. İş parçaları torka, ısınmaya ve eksenel basınca dayanıklı olmalıdır.
2. İş parçalarını tutan cihazlar ağır şok, tork yüklerine dayanıklı olmalıdır.
3. Açısal birleştirmelerde pahalı değişiklikler yapılmalıdır.

4. MATERİYAL VE METOD

4.1. Tezin Amacı ve Önemi

Bu çalışmada son yıllarda endüstride kullanılmaya başlayan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) ile yapılan birleştirmelerde uç profilinin kaynak esnasında oluşturduğu kuvvetler analiz edilerek, hangi uç profilinin birleştirme için daha uygun olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma genel olarak 3 aşamadan oluşmaktadır:

- Çalışmanın 1. aşamasında: Pim tasarımı, bağlama kalıbı tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir.
- Çalışmanın 2. aşamasında: CNC tezgahında imal edilen pimler kullanılarak parçalar SKK yöntemi ile aynı parametreler altında birleştirilmiştir. Bu işlem esnasında bir dinamometre kullanılarak her pim tasarımı için kuvvet ölçümü yapılmıştır. Birleştirilen parçalardan çekme mukavemetleri analiz edilmek için numuneler alınmıştır. Bu numunelerin analizi sonucunda çıkan veriler kaydedilmiştir. Birleştirilen parçaların microyapısına bakılarak hangi pimin ne derece birleştiği tespit edilmiştir.
- Çalışmanın 3. aşamasında: Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre hangi uç profilinin en uygun olduğu tespit edilmiştir.

4.2. Kullanılan Malzeme ve Elemanlar

4.2.1. Dinamometre

Üzerinde bulunan yükleri yönlerine göre (X,Y,Z) algılayan ve sinyaller üreten cihaza denir.(Resim 4.1.) Dinamometre ile yapılan çalışmalarda genellikle kesme kuvvetlerinin ölçümü yapılmış olup, bu çalışmada SKK esnasında uç profiline göre oluşan kuvvetlerin ölçümü yapıldı. Aşağıda, kullanılan dinamometrenin kuvvet ölçme aralığı ve üzerindeki etki yönleri verilmiştir. (Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1. Dinamometrenin kuvvet ölçme aralığı ve üzerindeki etki yönleri

F_x	-5kN	5kN
F_y	-5kN	5kN
F_z	-5kN	20kN
M_z	-200Nm	200Nm



Resim 4.1. Deneylerde kullanılan dinamometre [53]

4.2.2. Amplifier

Dinamometrenin oluşturduğu sinyalleri algılar ve bilgisayar veri alma kartının algılamasını sağlar.



Resim 4.2. Dört Kanaldan veri akışını düzenleyen amplifier

Çizelge 4.2. Amplifier'ın teknik özellikleri [60]

Amplifier'ın Görevleri		
Kanal Sayısı Seçimi		4-8
Bağlantı Tipi		BNC neg. Titreşim 9 kutup neg.
FS Ölçme Aralığı	PC	$\pm 200 \dots 200\,000$
	PC	$\pm 600 \dots 600\,000$
Hata (0.....50°C)typ/max.	%	$<\pm 0.3 / <\pm 1$
Akım, DC/long tip ölçümü	PC /s	
25°C	PC /s	$<\pm 0.05$
50°C		$<\pm 0.2$
Frekans Oranı(20Vpp)	kHz	=0.....>45
Voltaj Çıkışı		
Bağlantı Çıkışı		D-Sub 15f
Çıkış Voltajı	V	± 10
Çıkış Akımı	mA	$<\pm 2$
Çıkış Direnci	Ω	10
Ölçü Geçişini Sıfırlama	PC	$<\pm 2$
Sıfırlama Hatası	mV	$<\pm 10$
Titreşim Sinyali Çıkışı (0.1 Hz.....1MHz)	mVpp	<10
Alçak İletimli Filtre		
Sıklık		2
Sınır Frekansı(-3dB)	Hz	100, 300, 600, 1000, 2000
Hata	%	$<\pm 5$

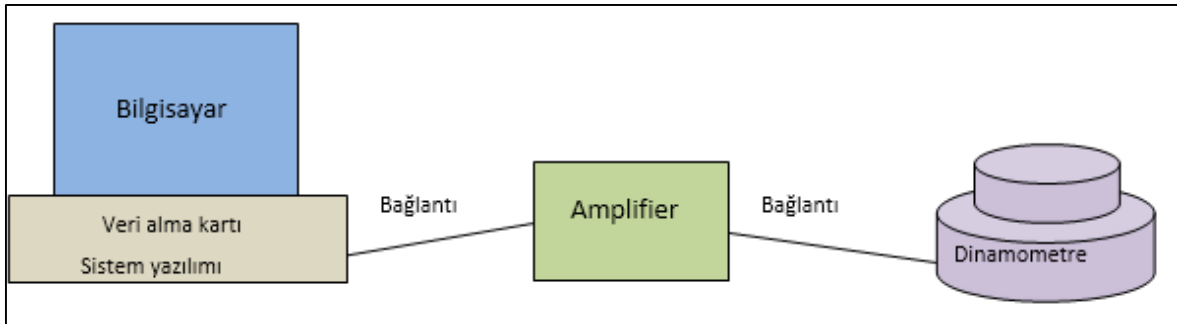
4.2.3. Veri alma ünitesi

Bilgisayara dinamometreden gelen ve amlifierle yükseltlen sinyallerin alınması için takılan karta “data kartı” denir. Bu karta deney setinde kullanılmak üzere bir yazılım yüklenmektedir. Data kartı PCI olup 16 kanaldan veri alabilecek kapasitededir. (Resim 4.3.)



Resim 4.3. Veri alma kartı (data kart)

Test düzeneği Şekil 4.1’de verildiği gibi kurgulanmıştır.



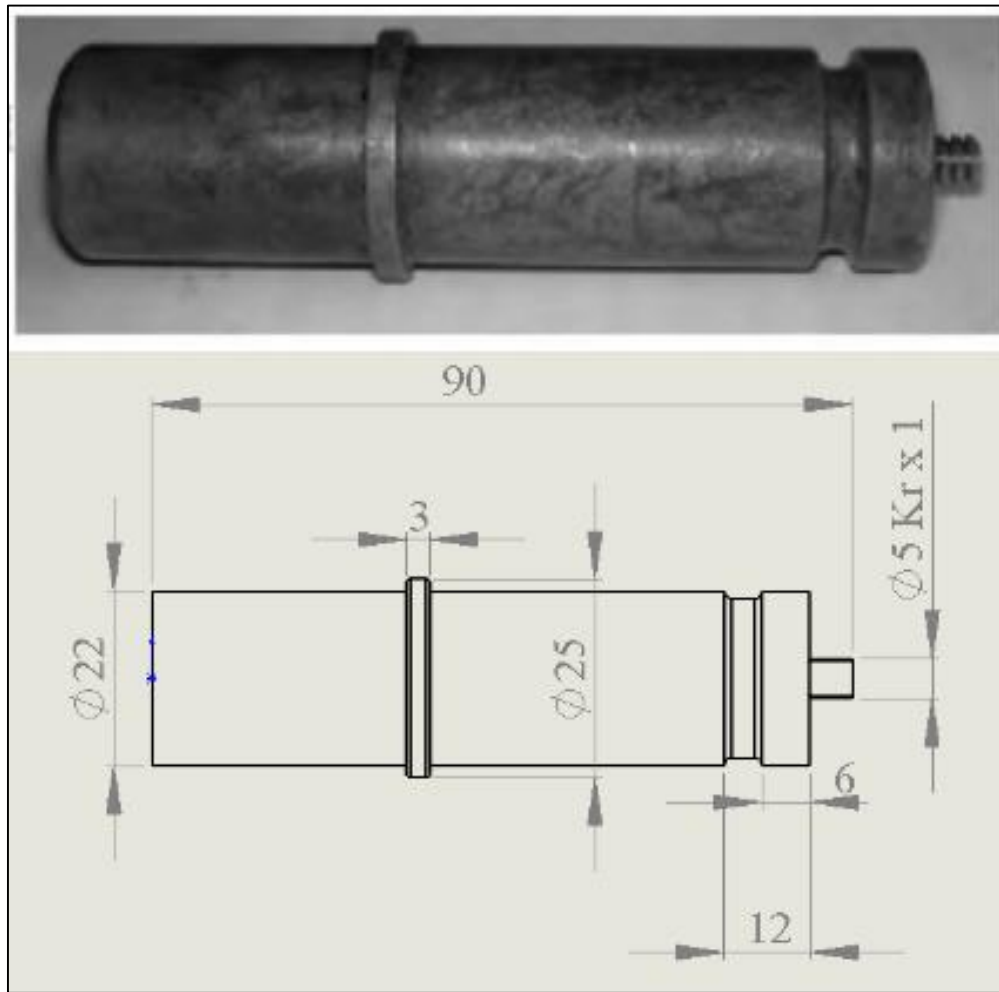
Şekil 4.1. Deney seti kurulumu

4.2.4. Karıştırıcı uçlar (Pimler)

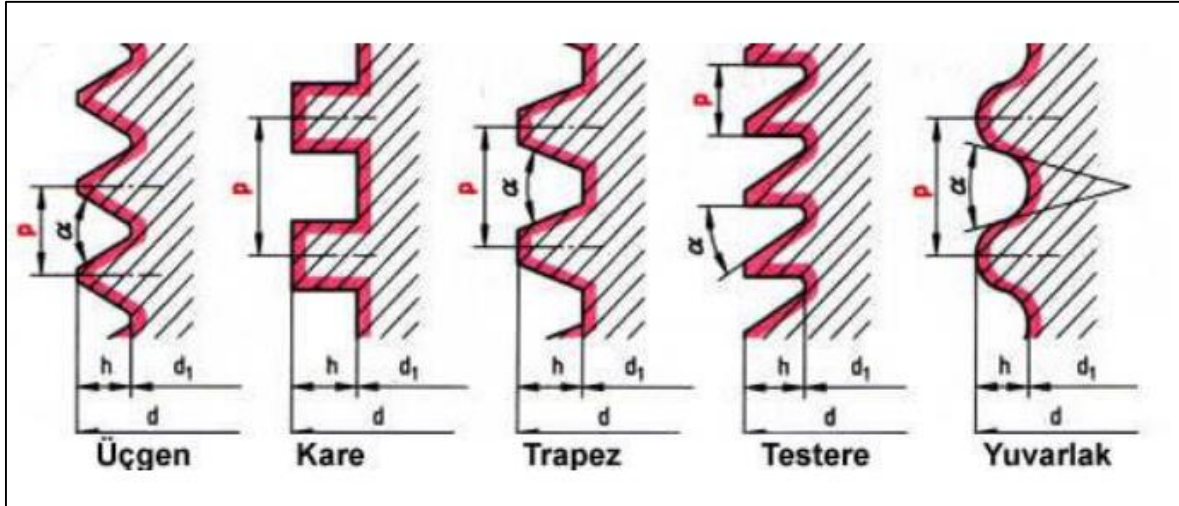
Karıştırıcı uç tasarımı

Çalışma için en önemli olan materyallerden biride karıştırıcı uçtur. Karıştırıcı ucun profil tasarımı ve ölçüleri sürtünme karıştırma kaynağını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Karıştırıcı ucun iki bölgesi çok önemlidir. Birisi karıştırıcı ucun pim kısmıdır. Tasarımda pimin çapı Ø5 mm olarak seçilmiş ve üzerine farklı adımlarda yuvarlak, kare, trapez, testere, üçgen vida açılarak 5 adet vidalı olmak üzere 7 adet karıştırıcı uç

tasarlanmıştır. (Şekil 4.3) Farklı vida çeşitleri kullanılarak tasarımı gerçekleştirilen vidalı uçlarda adım 1mm, karıştırmayı gerçekleştirecek olan pim ucu 5 mm olarak alınmıştır. Her profil için 2 adet pim imal edilmesine karar verilmiş ve parça çizimlerinde Solidworks 2016 çizim programı kullanılarak detay resimleri hazırlanmıştır. Detay resimleri hazırlanan uçlar imal edilirken, karıştırıcı uçları bir pens yardımıyla tezgaha bağlamamız gerektiğinden, pensin içine kaçmaması için uçlara bir kademe yapılmıştır (Resim 4.4). Tasarlanan karıştırıcı uçlara ait detay resimleri EK1’de verilmiştir.



Resim 4.4. Temel olarak tasarlanan karıştırıcı uç formu geometrik boyutları ve imal edilen karıştırıcı uç örneği



Şekil 4.2. SKK için kullanılan uçlara ait vida profilleri (p:vida adımı, α :Vida açısı, h:Vida derinliği, d_1 :Vida dişi dibi çapı, d:Vida diş üstü çapı) [47]

Karıştırıcı uçta kullanılan malzeme

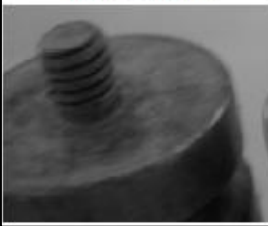
Karıştırıcı uç malzemesi, endüstride yaygın adı Nikel-Krom-Molibden çeliği olarak da bilinen Ç4340 ıslah çeliği seçilmiş ve bu malzemeden her bir profilden 2 adet uç imalatı gerçekleştirilmiştir. İmal edilen uçlar ısıtılma işlemiyle 55 HRC sertliğine getirilmiştir. Ç4340 ıslah çeliğine ait özellikler EK2’de tablolar kısmında gösterilmiştir [47].

Karıştırıcı uç imalatı

Karıştırıcı uç yapımında kullanılacak olan malzeme tedarikçi firmadan Ø26x1330 mm olarak tedarik edilerek testere ile her biri Ø26x95 mm boyutunda olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Karıştırıcı uçların gerçek boyutlarına getirilerek uç profillerine ilgili vidaların açılma işlemi torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. İmal edilen karıştırıcı uçlar ısıtılma işlemiyle 55 HRC olacak şekilde sertleştirilmiştir. Karıştırıcı uçların resimleri aşağıda gösterilmektedir. (Resim 4.5-4.6) Ek 1’de karıştırıcı uçların teknik resimleri gösterilmektedir.



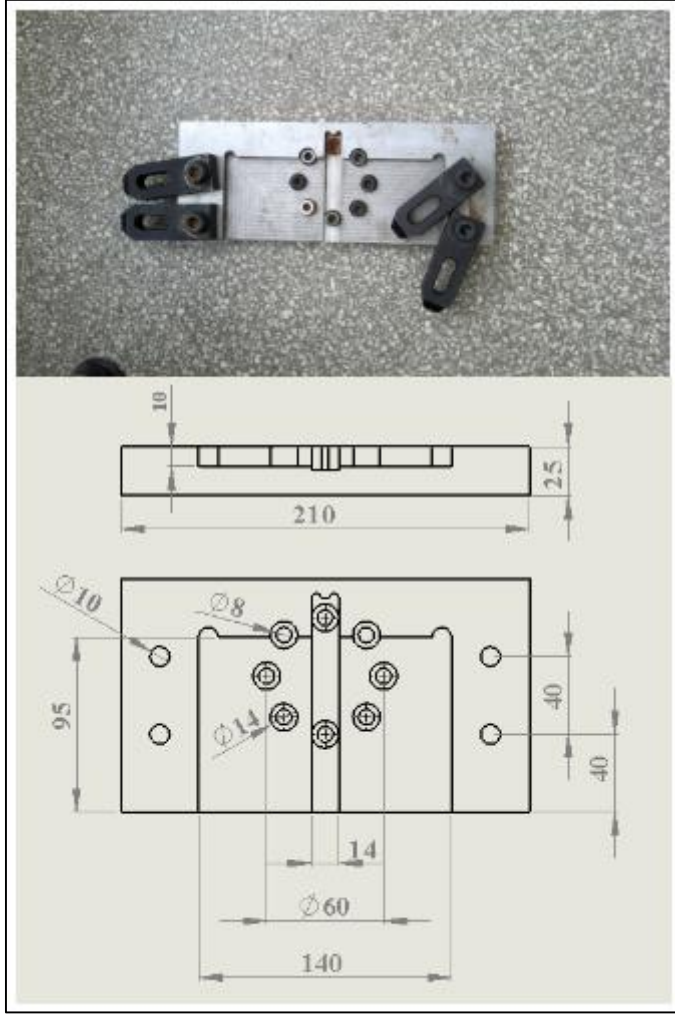
Resim 4.5. Karıştırıcı uç profillerinin genel görünüşü [47]

KARIŞTIRICI UÇ PROFİLLERİ		
Kare Vidalı	Yuvarlak Vidalı	Üçgen Vidalı
		
KARIŞTIRICI UÇ PROFİLLERİ		
Trapez Vidalı	Testere Vidalı	Düz Üçgen
		

Resim 4.6. Karıştırıcı uç profillerinin genel görünüşü

4.2.5. Bağlama kalıbı

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek parçaların hızlı bir şekilde sökülüp takılmasını sağlamak için Ç1050 çeliğinden bir bağlama kalıbının tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen bağlama kalıbının gerekli ölçümleri yapabilmek için dinamometreye de bağlanması gerekmektedir. Tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen bağlama kalıbı Resim 4.7’de verilmiştir.



Resim 4.7. Bağlama kalıbının resmi ve teknik resmi

4.2.6. SKK yönteminde kullanılacak malzeme seçimi

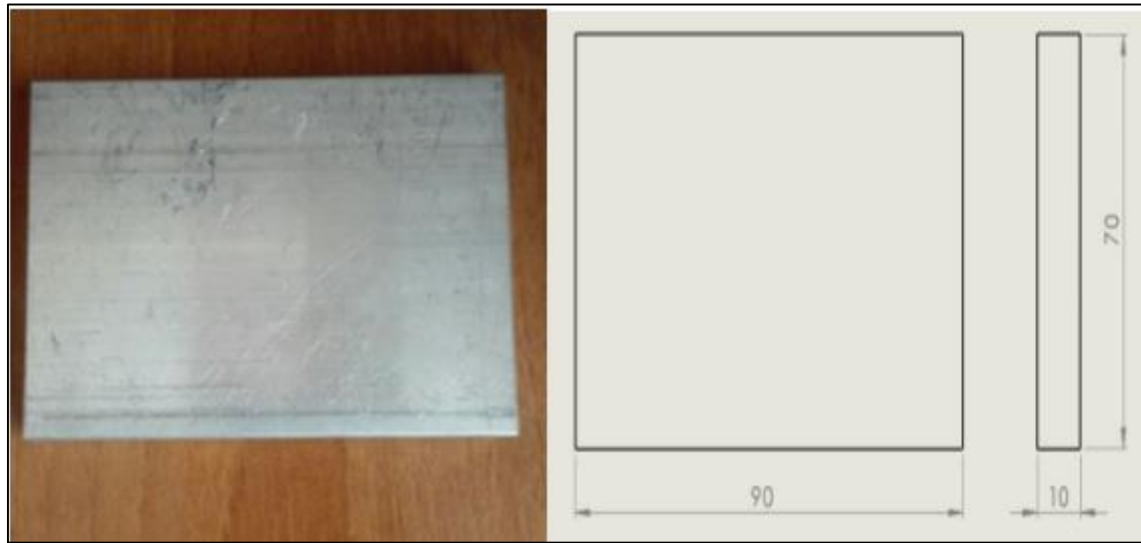
Alüminyum / Alüminyum alaşımları iyi korozyon direncine sahiptir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında güçlerini kaybetme eğilimindedirler. Ancak, bunların sıfır altı sıcaklıklara maruz kaldıklarında güçleri artırılabilir. Al 6XXX Serisi Al-Mg-Si alaşımlarıdır. Esas Alaşım Elementleri magnezyum ve silisyumdur. Şekillendirme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında kullanılır. Isıl işlemle sertleştirilemezler. (61) Bu çalışma da kullanılmak üzere Al 6066 malzeme seçilmiştir. Bu malzemenin genel özellikleri Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Bu malzemenin araştırmalar da çok fazla kullanılmadığı görülmüştür. Bu çalışma da Al 6066 malzemesi 10x70x95 ölçülerinde tedarikçi firmadan hazır halde 20 adet temin edilmiştir (Resim 4.8). Bu parçaların farklı adım ve profillerdeki karıştırıcı uçlar ile alın altına birleştirilmesi hedeflenmiştir.

Çizelge 4.3. Al 6066 kalite al alaşımlarının kimyasal bileşimi

İŞLEM ALAŞIMLARI KİMYASAL BİLEŞİM LİMİTLERİ				
MALZEME	Si	Cu	Mn	Mg
Al 6066	1.40	1	0.8	1.10

Çizelge 4.4. Al 6066 kalite al alaşımlarının mekanik özellikleri

MALZEME	MEKANİK ÖZELLİKLER					
	Isıl İşlem	Akma Dayanımı Mpa	Çekme Dayanımı Mpa	Elastisite modülü Mpa	Sertlik (HB) Kg/ mm ²	Kesme Dayanımı Mpa
Al 6066	O	83	150	70-80	43	15.5



Resim 4.8. Al6066 malzemenin kaynak işlemine hazır hali

4.2.7. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan tezgah tipi

SKK deneylerinin yapılmasında, olası yükleri karşılayacak güçlü bir tezgaha ihtiyaç vardır. Bu çalışmada SKK deneyleri, Ünlversal Freze tezgahında yapılmıştır (Resim 4.9). Ek 2’de Tablo 4.10’da tezgahın özellikleri gösterilmiştir.

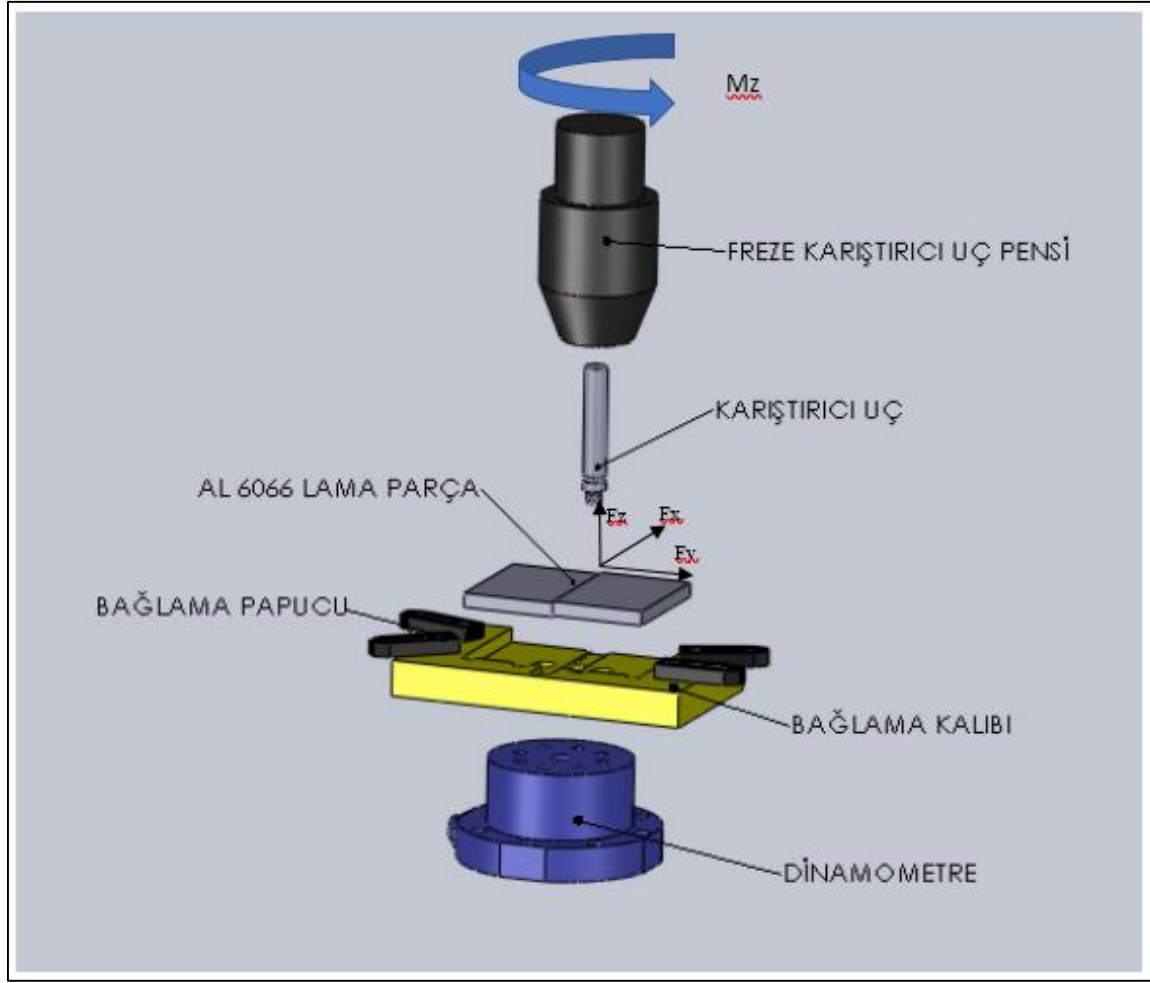


Resim 4.9. Üniversal Freze tezgahı (FU 315x1250 V/1)

4.3. SKK'nın Yapılışı

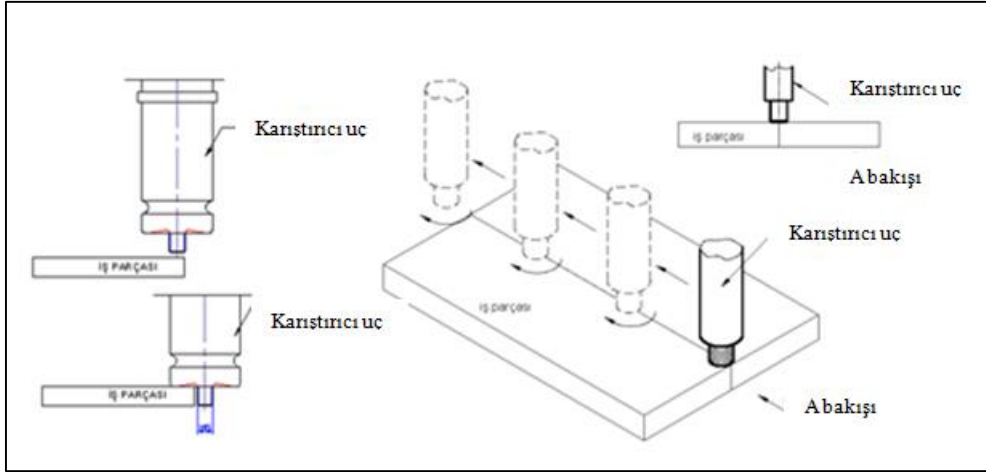
4.3.1. SKK için tezgahın hazırlanışı

Sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak olan tezgahın genel temizliği yapılmış ve kullanılacak olan aparat ve takımlar yerleştirilmiştir. İşlem sırasında kuvvet analizi yapmak için kullanılacak dinamometre diklik gönyesi kullanılarak düz bir şekilde tezgaha sabitlenmiştir. Dinamometre bağlantı kabloları ile Amplifier'e bağlanmış ve Amplifier'de veri alma kartına takılmıştır. Karttaki bilgiler bilgisayara aktarılacak şekilde hazırlanmıştır. Dinamometrenin üzerindeki uygun deliklere göre bağlama kalıbı dinamometreye sabitlenmiştir. Bağlama kalıbının üzerine açılmış olan lama boşluklarına parçalar alın alına olacak şekilde oturtulmuştur. Bağlama kalıbındaki lamaların düzgün bir şekilde sabitlenmesi önemlidir. Bağlama pabuçlarının yardımıyla lama parçalar sağlam bir şekilde sabitlenmiştir. Bu işlemden sonra freze tezgahının iş miline Ø22'lik pens takılıp sağlamlaştırıldıktan sonra sırasıyla karıştırıcı uçlar pens yardımıyla tezgahın iş miline takılmıştır. Sıklığı kontrol edilmiştir (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. SKK işleminin dinamometre yardımıyla gerçekleştirilme düzeneği

Tezgaha bağlama işlemleri bittiğinde bir kez daha parçaların dikliği kontrol edilmiş, iş mili iki lamanın birleşme çizgisi hizasına getirilmiştir. Burada iki yöntem kullanılabilir. Birincisi elle sıfırlama yapmak için iş mili “Z” ekseninde parçaya yanaştırılır, “Z” ekseninde karıştırıcı uç malzeme yüzeyine değdirilir ve sıfırlama yapılır. İkinci yöntem de ise iş mili lama parçaların birleştirme çizgisi hizasında, parçaların dışında çalıştırılır ve ilerleme verilerek parçaya dışarıdan girilir. (Şekil 4.4) Bizim çalışmamızda ikinci yöntem seçilmiştir.



Şekil 4.4. Al alaşımlı malzemeye kaynak öncesi hizalanması ve karıştırıcı ucun yanaşması [42]

4.3.2. Sürtünme karıştırma kaynağı işlemine başlama

Karıştırıcı uç hizalandıktan sonra tezgah devri 800 dev/dak ve ilerleme 25 mm/dak'ya ayarlanmıştır. Tezgah ilk olarak el kontrolü ile malzemeye yaklaştırılmış ve kaynak işlemi başlatılmıştır.

İlerleme ilk olarak 25 mm/dak gibi düşük bir değer alınmıştır. Bunun sebebi işlem sırasında talaş kaldırmadan sürtünme ile parçaların ergimeye başlamasını sağlamaktır. İşlem esnasında ergime görüldüğünde tezgah durdurulmadan ilerleme 31.5 mm/dak hıza yükseltilmiştir. Birkaç uygulama ile devir sayısı 900 dev/dak, ilerleme hızı ise 31.5 mm/dak olarak belirlenmiştir. Her bir uç profili için bu değerler sabit tutulmuştur. Bu değerlerle 7 farklı uç profili kullanılmış ve her uç profili ile 2 adet birleştirme gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağına ilk olarak kare vidalı uçla başlanmış sonra sırasıyla yuvarlak vidalı, üçgen vidalı, ham kanallı, düz üçgen, testere vidalı, trapez vidalı uçlar kullanılmıştır.

Kare vidalı uçla yapılan kaynak malzemeye teması sırasında ve bir miktar malzeme içerisine girene kadar freze tezgahın da elle hissedilebilir bir sarsıntı olmuştur. Malzeme içerisinde bir müddet ilerlediğinde bu sarsıntı kaybolmuştur. Kare vidalı uçla yapılan kaynak düzgün olarak tamamlanmıştır.

Yuvarlak vidalı karıştırıcı uçla yapılan kaynak sırasında hiçbir olumsuzlukla karşılaşılmamıştır. Karıştırıcı uç rahat bir şekilde malzemeye girerek kaynağı yapmıştır.

Trapez vidalı karıştırıcı uçla yapılan kaynakta ise karıştırıcı uç malzemeye girerken zorlanmış ve ilerleme esnasında birleştirilen parçada ısıdan kaynaklı renk değişimi gözlenmiştir.

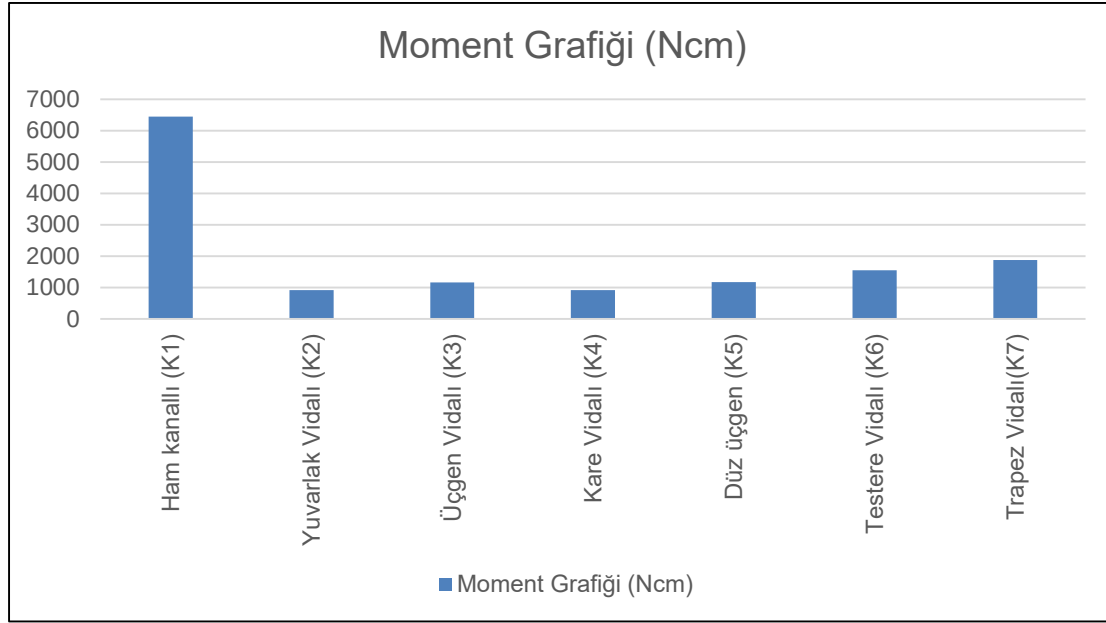
Testere ve üçgen vidalı karıştırıcı uçlarda ise diğer uçlara nazaran daha fazla zorlanma meydana gelmiştir ve ısıdan kaynaklı renk değişimi diğerlerine göre daha fazla olmuştur. Fakat uca zarar verici hiçbir etki olmamıştır.

Yapılan ölçümlerde M_z moment değeri; SKK ucun kendi eksenini dönüşü sırasında durdurmaya çalışan yükü, F_z kuvveti; karıştırıcı uçtan yukarı doğru çıkan malzeme hamurunun kesiciyi yukarı doğru itme yükü, F_x kuvveti; karıştırıcının ileriye doğru gitmesi sırasında kesicinin hareketini durdurmaya çalışan yükü temsil etmektedir. İşlem sırasında oluşan F_y yükü değeri düşük olduğu için dikkate alınmamıştır. Çünkü işlem sırasında kullanılan karıştırıcının dönme hızı ve ilerleme hızı olmak üzere iki hareketinden dolayı iki tepki kuvveti M_z ve F_x oluşmaktadır. Karıştırılan Al 6066 hamurunun kesiciyi yukarı doğru itme etkisiyle F_z kuvveti oluşmaktadır. Bundan dolayı F_y kuvveti analizlerin dışında tutulmuştur. 7 farklı uç profilleri ile yapılan deney sırasında düz üçgen profili dışındaki uçlarla işlem gerçekleştirilmiş kaynaklı birleştirmeler istenilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında oluşan moment ve kuvvet değerleri kaydedilmiş ve Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

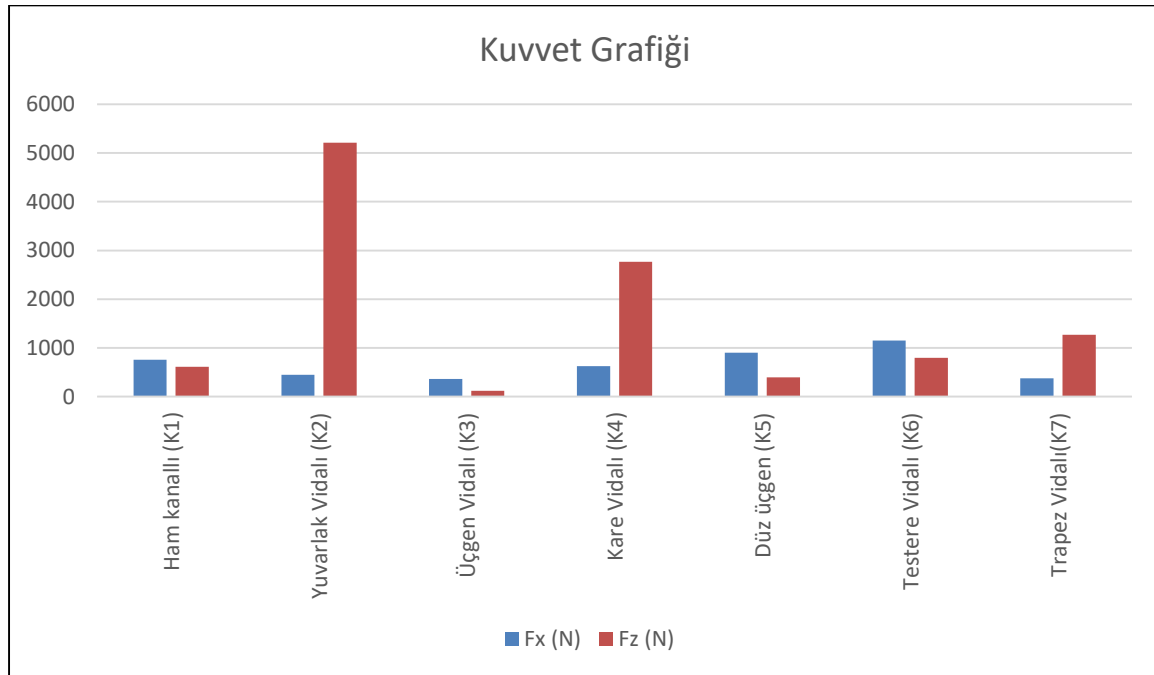
Çizelge 4.5. Kaynak sırasında kullanılan parametreler ve kaynak esnasında oluşan kuvvet analizi sonuçları

DENEY	İlerleme F (mm/dak)	Devir S (dev/dak)	Kesici (K) Uç Tipi	M_z (Ncm)	F_z (N)	F_y (N)	F_x (N)
1	31.5	900	Ham kanallı (K1)	6450	615	260	760
2	31.5	900	Yuvarlak Vidalı (K2)	921	5214	421	451
3	31.5	900	Üçgen Vidalı (K3)	1165	121	276	365
4	31.5	900	Kare Vidalı (K4)	921	2770	437	625
5	31.5	900	Düz üçgen (K5)	1175	400	35	906
6	31.5	900	Testere Vidalı (K6)	1555	800	390	1150
7	31.5	900	Trapez Vidalı(K7)	1875	1270	565	375

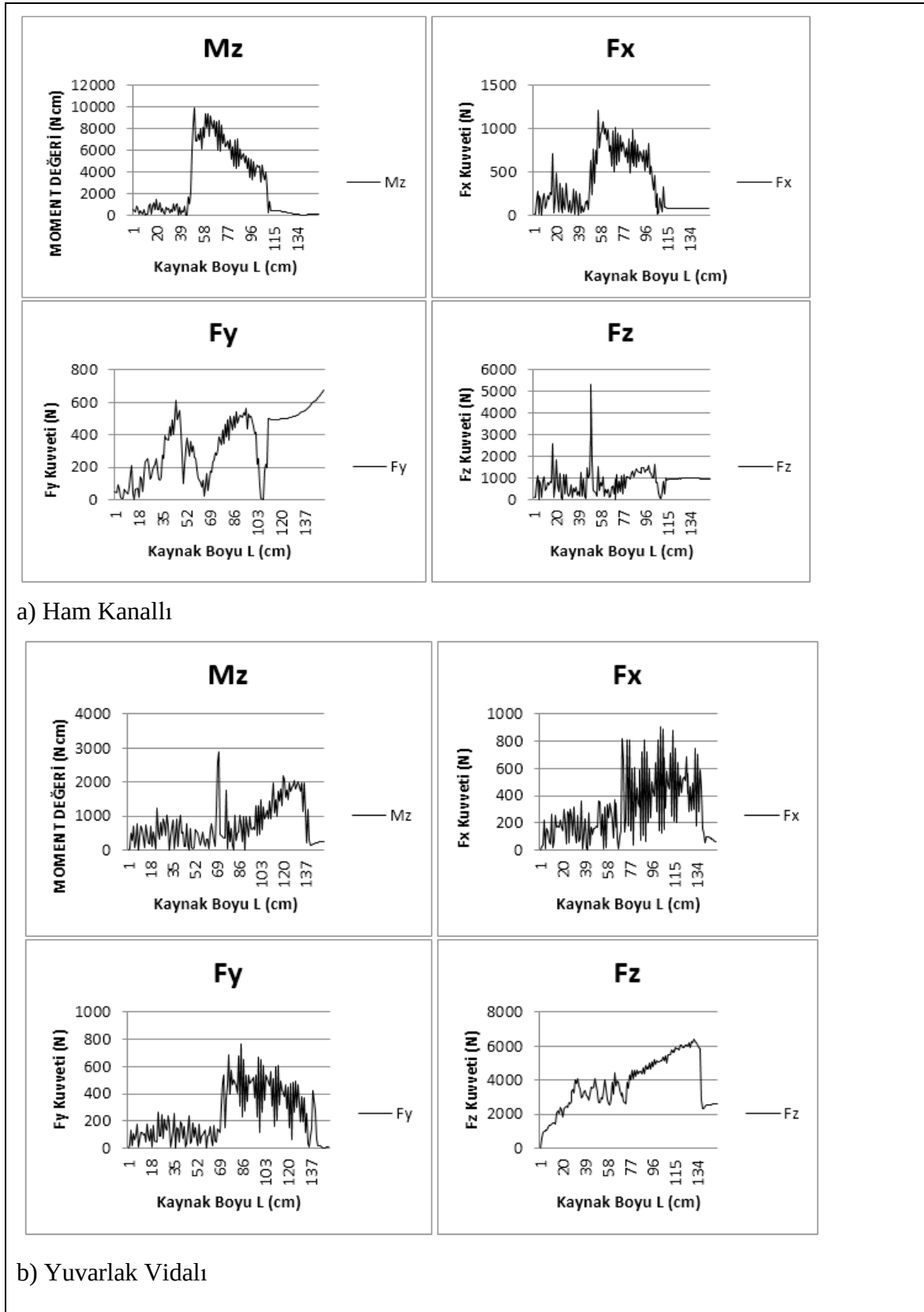
Oluşan kuvvet grafikleri Şekil 4.5 gösterilmiştir. Ayrıca her uç profili için oluşan kuvvet analizleri Şekil 4.6’da toplu olarak verilmiştir.



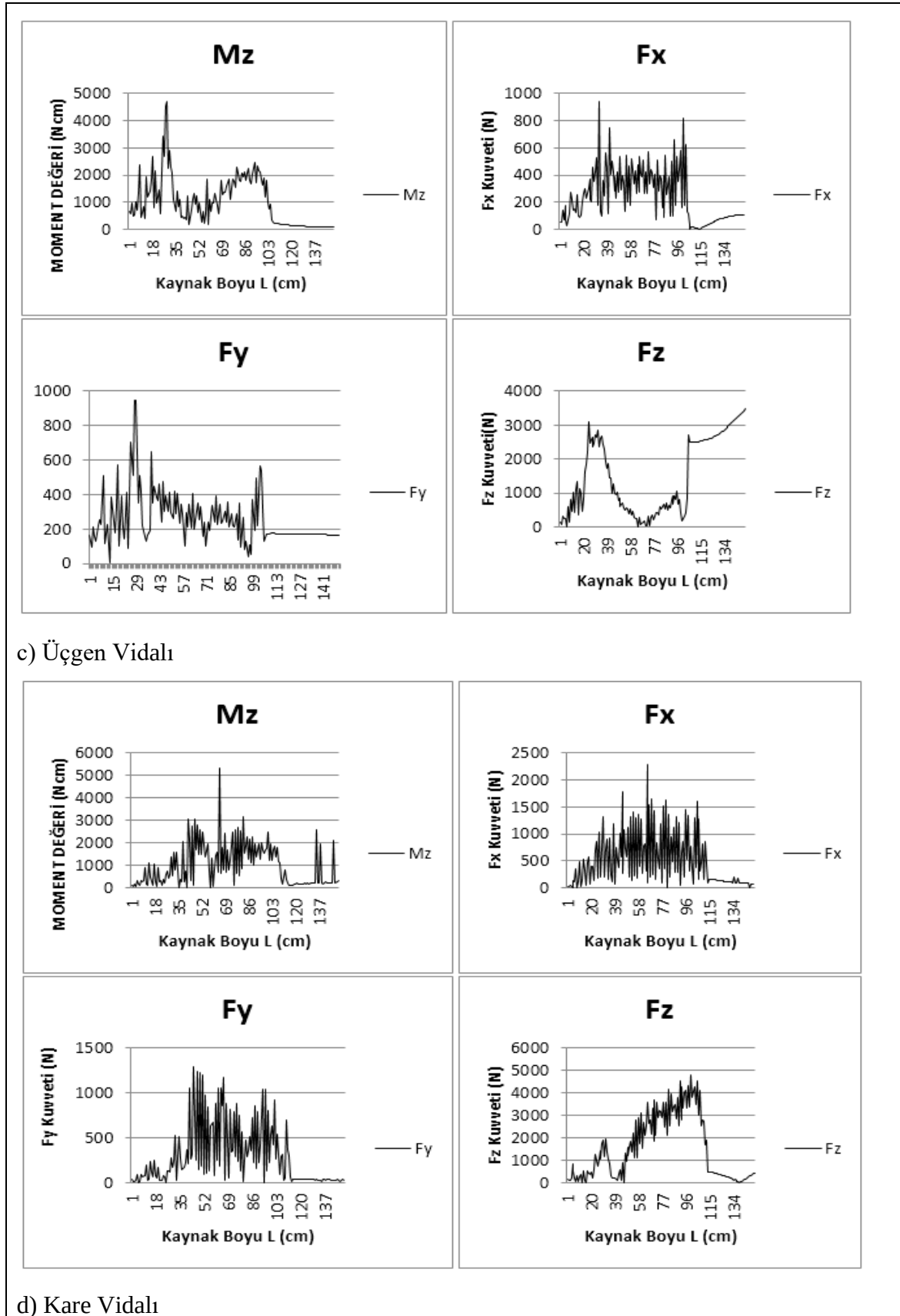
Şekil 4.5. Al 6066 Malzemelerinin, S: 900 dev/dak, f: 31.5 mm/dak kesme şartlarında değişik uç tipine sahip 7 adet kesici ile yapılan sürtünme-karıştırma kaynağında elde edilen M_z , F_z , F_x değerleri



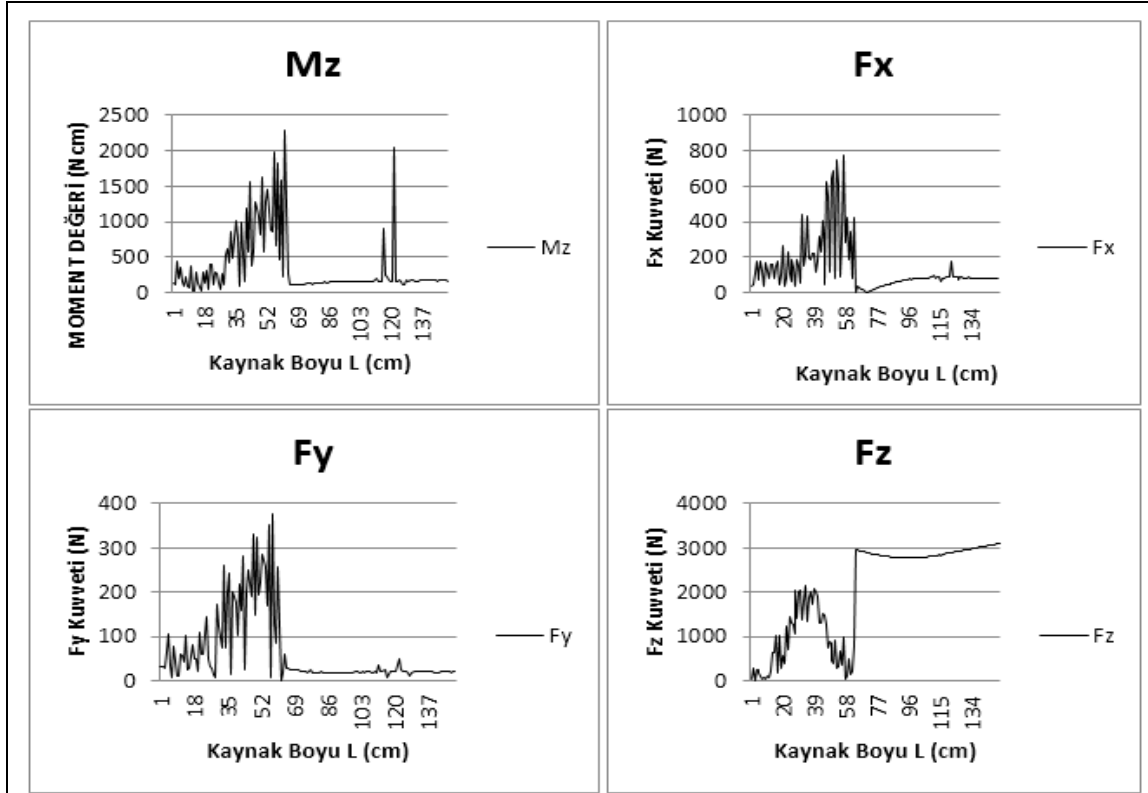
Şekil 4.5. (devam) Al 6066 Malzemelerinin, S: 900 dev/dak, f: 31.5 mm/dak kesme şartlarında değişik uç tipine sahip 7 adet kesici ile yapılan sürtünme-karıştırma kaynağında elde edilen M_z , F_z , F_x değerleri



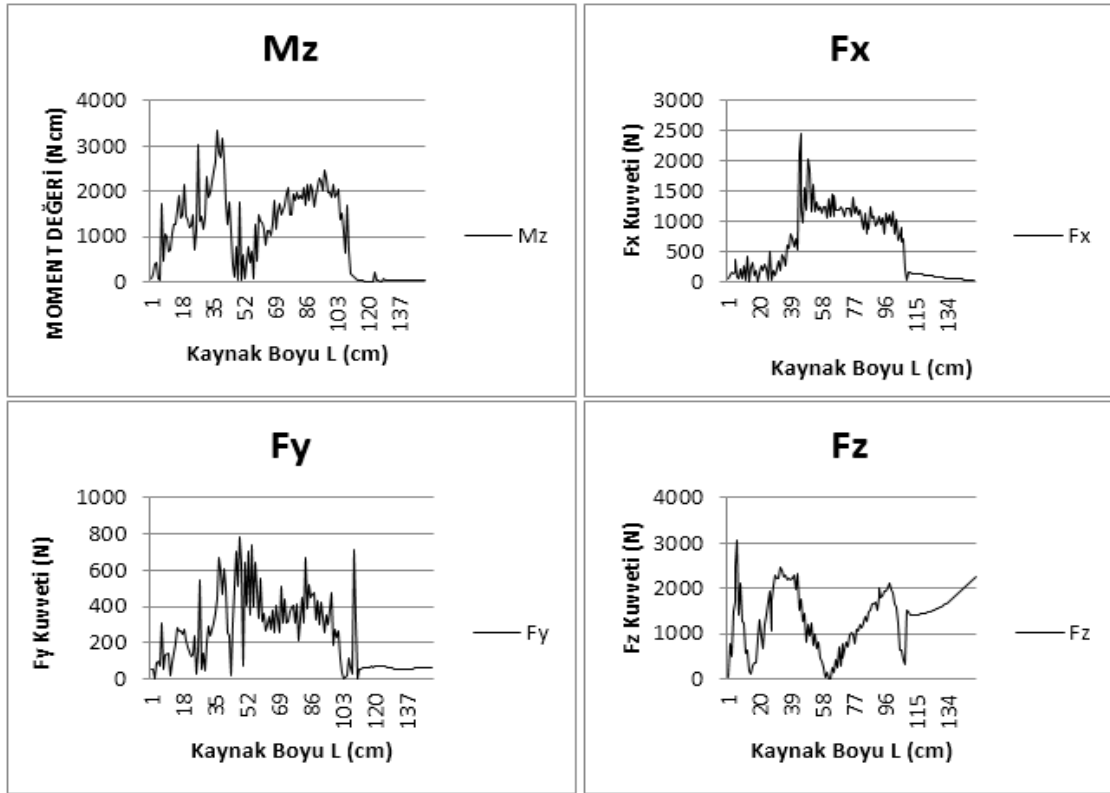
Şekil 4.6. Her bir numune için oluşan kuvvet grafikleri; a:Ham Kanallı, b:Yuvarlak Vidalı, c:Üçgen Vidalı, d: Kare Vidalı, e: Düz Vidasız Üçgen, f: Testere Vidalı, g: Trapez Vidalı



Şekil 4.6. (devam) Her bir numune için oluşan kuvvet grafikleri; a:Ham Kanallı, b:Yuvarlak Vidalı, c:Üçgen Vidalı, d: Kare Vidalı, e: Düz Vidasız Üçgen, f: Testere Vidalı, g: Trapez Vidalı

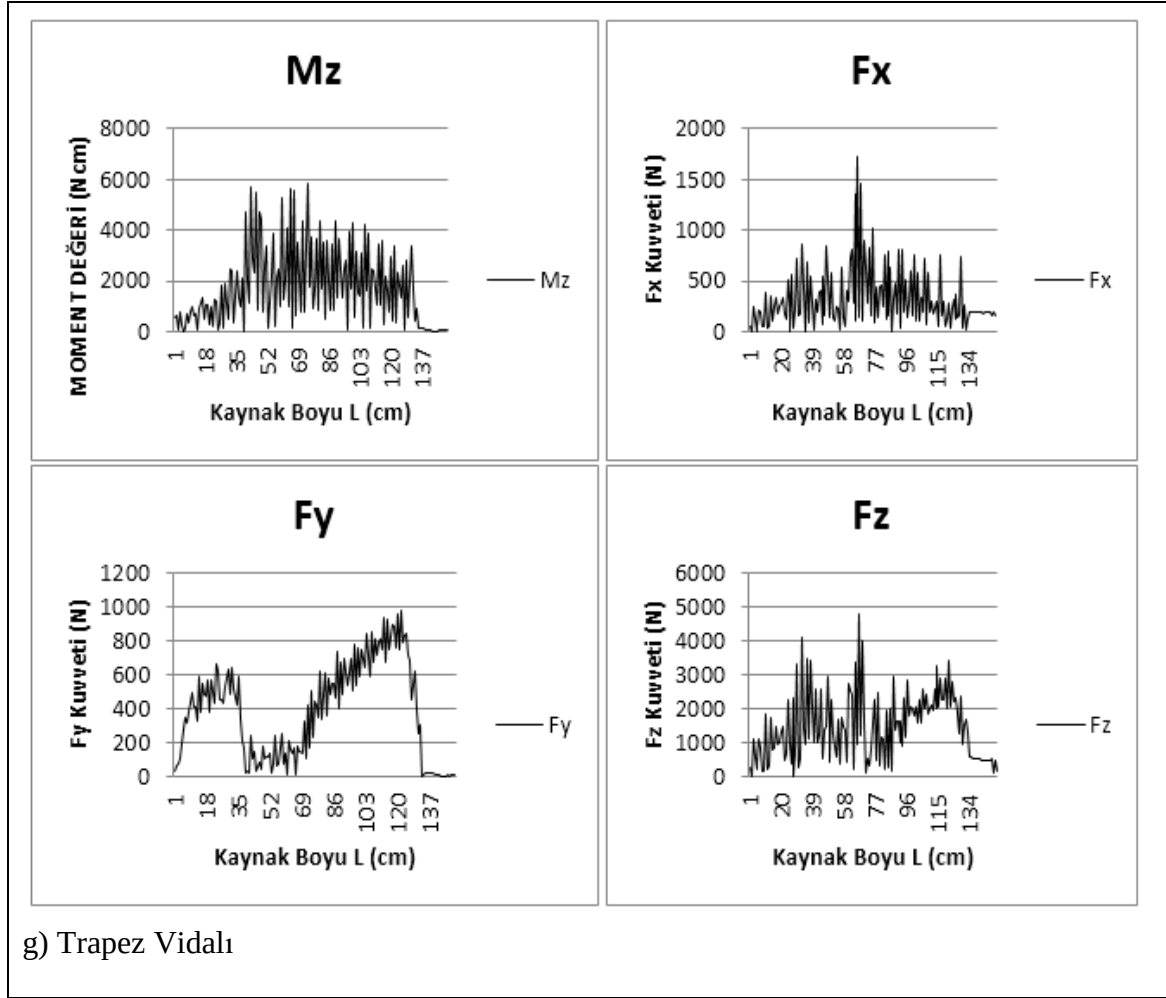


e) Düz Üçgen Vidasız



f) Testere Vidalı

Şekil 4.6. (devam) Her bir numune için oluşan kuvvet grafikleri; a:Ham Kanallı, b:Yuvarlak Vidalı, c:Üçgen Vidalı, d: Kare Vidalı, e: Düz Vidasız Üçgen, f: Testere Vidalı, g: Trapez Vidalı



Şekil 4.6. (devam) Her bir numune için oluşan kuvvet grafikleri; a:Ham Kanallı, b:Yuvarlak Vidalı, c:Üçgen Vidalı, d: Kare Vidalı, e: Düz Vidasız Üçgen, f: Testere Vidalı, g: Trapez Vidalı

Düz üçgen uç profili hariç diğer uç profillerinde kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Düz üçgen uç profilinde uç parçaya daldırıldığı anda kırılmıştır. Çizelge 4.5'te sırasıyla verilen moment (M_z) değerleri incelendiğinde en düşük moment değerlerinin (921 Ncm) yuvarlak (K2) ve kare (K4) vidalı uçlardan elde edildiği görülmüştür. Bu durumda, Al 6066 malzemelerinin SKK ile birleştirmelerinde kesici kırılmalarının en az yaşanacağı uç profillerinin yuvarlak ve kare vidalı uçlarda olacağı yorumu yapılabilir. Öte yandan M_z değerinin en yüksek olduğu (6450 Ncm) K1 ucu yani ham kanallı ucun SKK yöntemi için uygun olmayacağı yorumu yapılabilir. Hatta işlem sırasında uçların kırılabileceği sonucu çıkarılabilir. Çizelge 4.5'te verilen F_z değerleri incelendiğinde, karıştırıcı uçlarda bulunan vida tipi ve vida helis yönünün F_z kuvvetine etki ettiği görülmektedir. (Helis yönü tüm vidalı uçlarda aynıdır.) SKK işlemi esnasında sıcaklıkla birlikte hamurlaşan malzeme uçlar ile karıştırılırken aynı zamanda uçların vida helis yönü ile malzemeyi aşağıdan yukarı

çıkarmaya çalışmaktadır. Bu işlem esnasında oluşan Fz kuvvetinin en düşük (121 N) olduğu üçgen vidalı uç (K3) olmuştur. En yüksek Fz değerini (5214 N) ise yuvarlak vidalı uç oluşturmuştur. Bu durumda yuvarlak vidalı uç profilinin Al 6066 malzemenin alt yüzeyinden üst yüzeyine büyük bir kuvvet iletmekte olduğu söylenebilir. Fx değerleri incelendiğinde ise en düşük değer (365 N) üçgen vidalı uç, en yüksek değer (1150 N) ise testere vidalı uçtan elde edilmiştir. Bu durumda SKK işlemi sırasında üçgen vidalı ucun zorlanmadan ilerleyeceğini, testere vidalı ucun ise daha zor ilerleyeceği sonucuna varabiliriz.

Sonuç olarak tüm veriler incelendiğinde en düşük kuvvetleri gösteren üçgen vidalı uç profilinin SKK için en uygun sonuçları verdiği görülmektedir. Bu varsayım SKK yapılan deney numunelerine uygulanan çekme deneylerinde de görülmektedir.

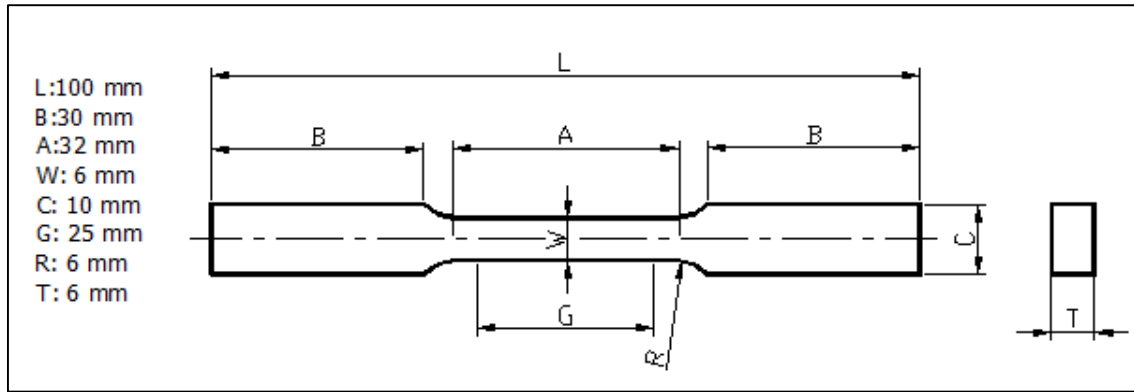
Bu uçlarla yapılan numune profilleri Resim 4.10'de gösterilmiştir. Yapılan birleştirmeler gözlemlendiğinde deneylerle paralel sonuç verdiği görülmektedir. Kare vidalı, yuvarlak vidalı ve üçgen vidalı uçlarla yapılan birleştirmelerin daha iyi olduğu görülmektedir.



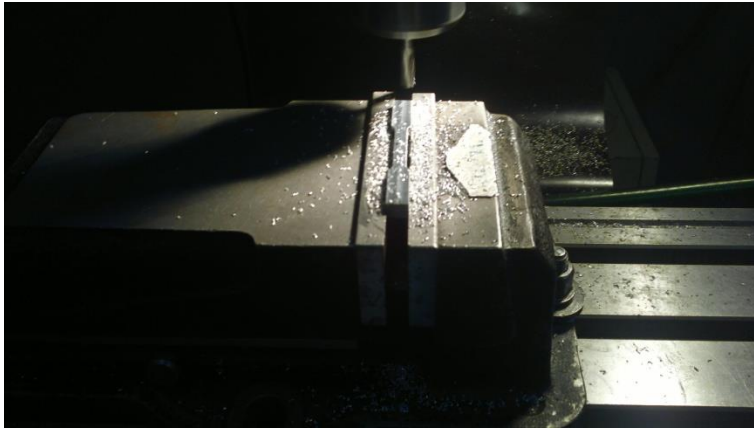
Resim 4.10. SKK ile birleştirilen Al Alaşımı Levhalar

4.3.3. Çekme deneyi çalışmaları ve sonuçları

SKK yöntemiyle birleştirilen numunelerin karıştırıcı uçları Çizelge 4.5'teki gibi numaralandırılmıştır. 10x70x95 mm ölçülerinde birleştirilmiş numunelerden tel erozyon tezgahında 2 şer çekme numunesi kesilmiştir. Şekil 4.7'de numunelerin kesildiği ölçüler gösterilmiştir. Numuneler çekme için frezede 6mm kalınlığına indirilmiştir (Şekil 4.7-Resim 4.13).



Şekil 4.7. Çekme deneyi için hazırlanan numunelerin teknik resmi



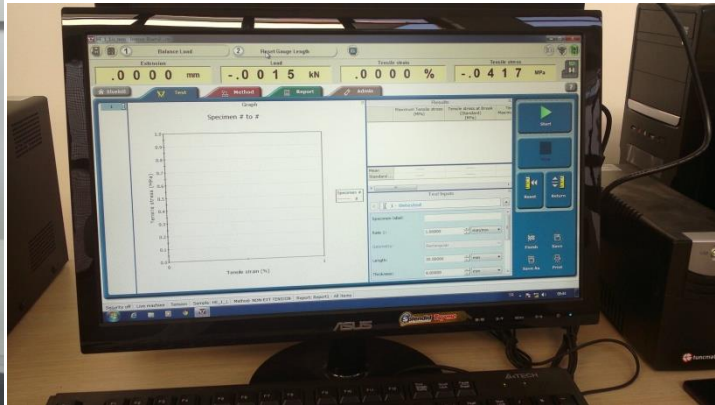
Resim 4.11. Tel erozyonda kesilen numunelerin frezede 6mm kalınlığa getirilmesi



Resim 4.12. Kesilen numune örneği

Çekme deneyi bulguları

Numuneler Instron 3369 marka çekme cihazında 50kN çekme kuvveti ve 1mm/dak ilerleme hızında çekilmiş ve çekme sırasında oluşan veriler kaydedilmiştir.

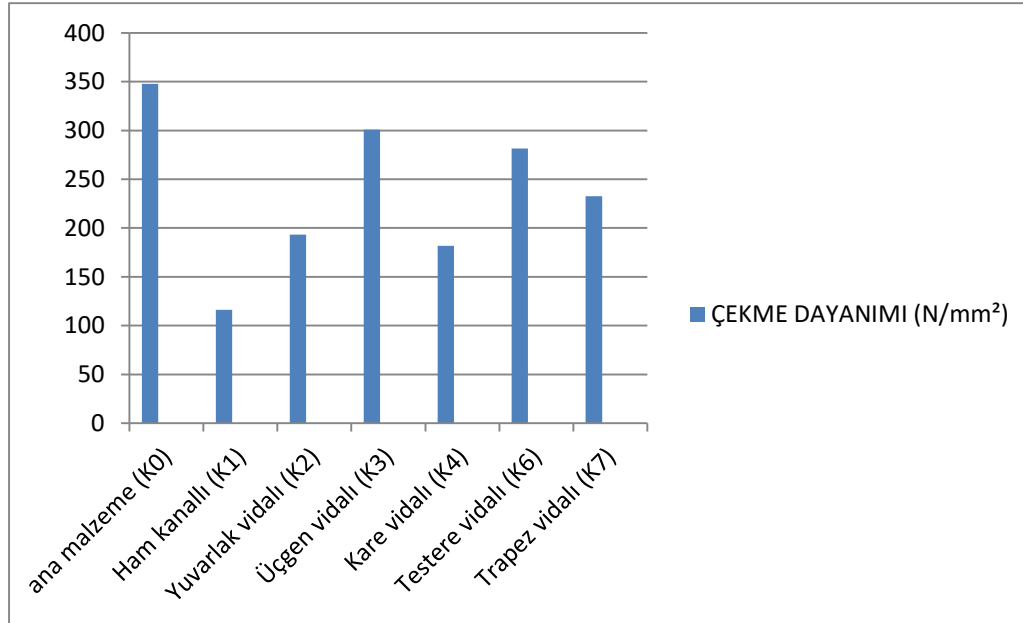


Resim 4.13. Instron 3369 marka çekme cihazı

Çekme testine tabi tutulan numunelerin çekme gerilme değerleri N/mm^2 birimi ile elde edilip tüm numunelerin çekme değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü kadarıyla beklenen değerlerden daha düşük değerler elde edilmiştir. Bunun sebebi kaynak esnasında birleştirmenin etkili bir şekilde yapılamamış olmasıdır. Ancak kaynak profillerini karşılaştırmak için birçok veri elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. Çekme numunesi sonuçları

NO	PARÇA İSMİ	ÇEKME DEĞERİ(N/mm ²)
K0	Esas parça	347.68 N/mm ²
K1	Ham kanallı uç	116 N/mm ²
K2	Yuvarlak vidalı karıştırıcı uç	193.4 N/mm ²
K3	Üçgen vidalı karıştırıcı uç	301.02 N/mm ²
K4	Kare vidalı karıştırıcı uç	181.65 N/mm ²
K6	Testere vidalı karıştırıcı uç	281.67 N/mm ²
K7	Trapez vidalı karıştırıcı uç	232.55 N/mm ²



Şekil 4.8. Çekme numunesi grafiği

Yukarıdaki değerlere bakıldığında ana malzemeye en yakın çekme değerinin K3 numaralı üçgen vida profilli uçla elde edildiği görülmektedir. En düşük çekme değeri ise K1 numaralı ham kanallı uçla elde edilmiştir. Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde kuvvet analizi sonuçları ile benzer olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre vidalı uç profilleri ile yapılan birleştirmelerin vidasız uç ile yapılan birleştirmelere göre daha iyi mukavemete sahip olduğu gözlenmiştir.

4.3.4. Mikroyapı test çalışmaları ve sonuçları

Kaynaklı birleştirmelerin iç yapısını görebilmek için mikroyapı ve makroyapı incelemesi yapılmıştır. Bu inceleme için numuneler belli işlemlere tabi tutulmuştur. İlk olarak her bir lama parçanın kaynak bölgesinden 25x5 mm boyutlarında parça telerozyon tezgahında kesilmiştir.

Kesilen numunelerin her biri daha kolay parlatılması için ayrı ayrı bakalit kalıplama makinesinde kalıplanmış ve numaralandırılmıştır. (Resim 4.15; a-kalıplama makinası b-kalıplama makinesi haznesi c-bakalitletlenmiş numune)



Resim 4.14. a) Kalıplama makinesi, b) Kalıplama makinesi haznesi, c) Bakalitletlenmiş numune

Bakalitlenen numuneler parlatma işlemine hazırlanmıştır. Parlatmanın amacı parlak bir yüzey elde ederek kaynaklı bölgenin daha net görüntüsünü elde etmektir. Bunun için numuneler ince zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Sırasıyla:

- 240 mesh'lik zımparada 2.5dk sürede 50N kuvvet uygulanarak 300U/min devirde
- 400 mesh'lik zımparada 1.5dk sürede 50N kuvvet uygulanarak 300U/min devirde
- 800 mesh'lik zımparada 1.5dk sürede 50N kuvvet uygulanarak 300U/min devirde
- 1200 mesh'lik zımparada 3dk sürede 20N kuvvet uygulanarak 200U/min devirde

otomatik makinada zımparalanmıştır.(Resim 4.16.Otomatik parlatma makinası)



Resim 4.15. Otomatik parlatma makinesi

Zımparalanan numuneler sırasıyla 6 μ , 3 μ , 1 μ 'luk solüsyon ve uygun keçeler kullanılarak parlatılmıştır. Ayna yüzeyini elde ettikten sonra numuneler kaynak yüzeyini ve detayını görebilmek için KELLER isimli dağlayıcıyla 10-20 sn daldırılarak dağlanmış. KELLER; Al ve Al alaşımlarını dağlamak için kullanılan bir dağlayıcı türüdür. Bileşiminde; 1cm³ hidroflüorik asit, 1.5 cm³ klorhidrik asit, 2.5cm³ nitrik asit, 95cm³ su'dur.

Dağlanan numuneler Leica marka optik mikroskopta sırasıyla 2.5x-5x-10x-20x-50x boyutlarında incelenmiş ve veriler kaydedilmiştir.

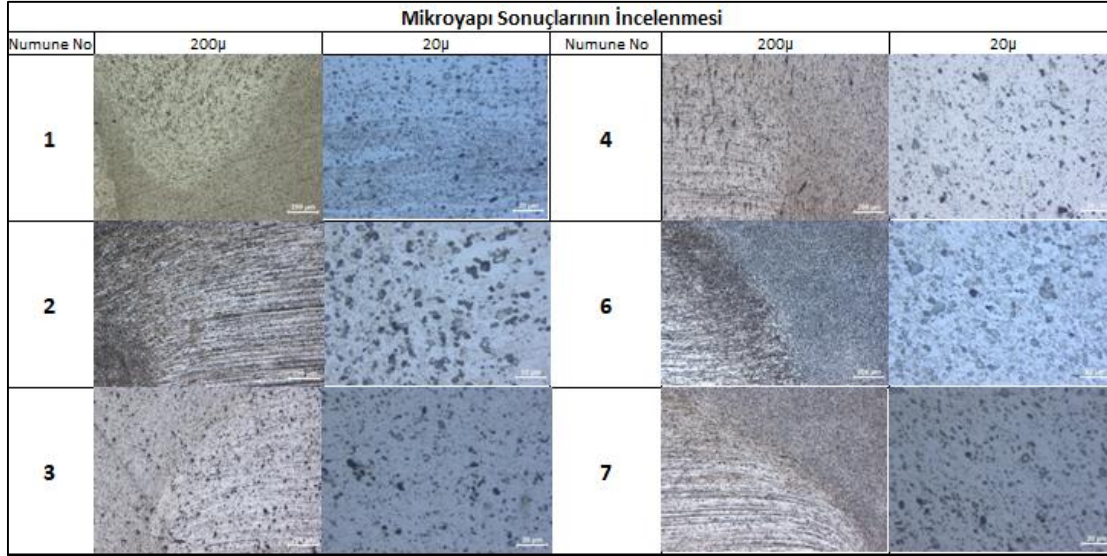
Mikroyapı test sonuçları

Hazırlanan numuneler incelenmiş ve aşağıdaki fotoğraflar kaydedilmiştir. Resim 4.17'de hazırlanan numunelerin tarayıcı resimleri görülmektedir.

Karıştırıcı Uç İle Yapılan Kaynağın Makro yapısı			
Ham Kanallı	Yuvarlak Vidalı	Üçgen Vidalı	Kare Vidalı
Düz Üçgen	Testere Vidalı	Trapez Vidalı	
GERÇEKLEŞMEDİ			

Resim 4.16. SKK ile birleştirilen Al 6066 alaşımı numunelerin tarayıcı resimleri

Ayrıntılı inceleme için numune parçalar mikroskopla incelenmiştir. Yapılan inceleme sonuçları 200 μ -20 μ 'luk boyutlandırmalar ile Resim 4.18'de gösterilmektedir.



Resim 4.17. SKK ile birleştirilen numunelerin mikroskopik fotoğrafları

Yukarıdaki resimler de K1 nolu numunede (ham kanallı) heterojen bir dağılım olduğu görülmektedir. Kaynak bölgesinde helisel bir şekilde dağılım olduğu ve düzgün bir yapı oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu istenen bir durum değildir. Çekme deneylerinde de yeteri kadar karışma işlemi gerçekleşmediği için en düşük çekme mukavemeti bu numunede meydana gelmiştir. Resim 4.18 incelendiğinde en uygun kaynak bölgesinin olduğu numunenin K6 nolu numune olduğu görülmektedir. İstenilen 3 bölgenin de (dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) olduğu gözlemlenmiştir. Çekme sonuçlarına göre K3 Nolu numuneyi sırasıyla K6 ve K7 nolu numuneler takip etmektedir. Mikroyapı sonuçlarının çekme testlerinden farklılık göstermesindeki sebebin 3 nolu numuneden alınan mikroyapı örneğinin kaynak bitimine denk gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. K4 nolu (Kare Vidalı) ile birleştirilen numunenin çekme mukavemeti vidalı uçlarla yapılan birleştirmelerin içinde en düşük değerde olmasına rağmen, tanecik yapısına bakıldığında genel olarak tanecik yapısının ana parçaya benzediği fakat belirli aralıklarla boşlukların olduğu görülmektedir. Bu durumun da mukavemet değerini düşürdüğü düşünülmektedir. K2 nolu (Yuvarlak Vidalı) ile birleştirilen numunelerin çekme mukavemet değeri kare vidalı uç ile yapılan birleştirmelere göre yüksek değerde olmasına rağmen, keskin kenarlı olmadığından dolayı tane yapısı daha büyük oluşmuştur. Diğer 3 vidalı (K3, K6 ve K7) birleştirmeye göre tane yapısının daha büyük oluşmasındaki sebebin ise uç vida profilindeki konikliğın tanecik oluşumunu etkilemesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

5. TARTIŞMA

Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan Al6066 lama parçalarından alınan numune sonuçları incelendiğinde kuvvet değerlerinin analizlerinde yuvarlak vidalı (K2) ve kare vidalı (K4) uçlar ile yapılan birleştirmelerin moment değerlerinin (Mz) en düşük olduğu, bundan dolayı kırılmaların en az yaşanacağı uçların K2 ve K4 vidalı uçlar ile olacağı sonucu çıkmaktadır. Tanecik yapısı olarak baktığımızda yuvarlak vidalı ucun daha iri taneli, kare vidalı ucun ise daha ufak taneli bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Bunun sebebinin keskin kenarlı vidaların tane yapısını küçültmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. En yüksek moment değeri (Mz) ise ham kanallı (K1) uç ile yapılan birleştirmelerde görülmüştür. Bu ucun SKK işleminde kullanılamayacağı hatta uçların kırılabileceği sonucu çıkarılabilir. Çekme testi sonuçlarında da en düşük çekme mukavemeti bu uça gözlemlenmiştir. Mikroyapısal olarak K1 numunesini incelediğimizde heterojen bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Fz kuvvetleri incelendiğinde en düşük Fz kuvveti değerini üçgen vidalı uç ile yapılan birleştirmeler vermiştir. Bu durum aşağıdan yukarı hamurlaşan malzemenin yukarı doğru olan baskısının en az üçgen vidalı uç ile yapılan birleştirmelerde oluşacağını göstermektedir. Mikroyapısal olarak K3 numunesini incelediğimizde homojen bir tanecik yapısında olduğunu görmektedir. Çekme Testi sonuçlarında üçgen vidalı uç profilinin SKK için en uygun uç profili olduğunu göstermektedir. Fx kuvvet değeri içinde üçgen vidalı (K3) uç ile yapılan birleştirmelerin en düşük değeri oluşturduğu görülmektedir. Buradan SKK işleminin üçgen vidalı uç profili ile daha kolay ilerleyeceği sonucu çıkmaktadır. En yüksek değer ise testere vidalı (K6) uç ile yapılan birleştirmelerde görülmüş ve K6 vidalı ucun SKK işlemi esnasında zor ilerleyeceği sonucu çıkarılmıştır. K3 ve K6 numunelerinin mikroyapılarını karşılaştırdığımızda tanecik yapısı K6 ile yapılan numunelerde değişik boyutlarda olduğu, K3 ile yapılan numunelerde ise tane yapısının benzer olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında üçgen vida profilili ucun en yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda mikro ve makro resimleri incelendiğinde en düzgün kaynak yapısına sahip olduğu, sırasıyla kaynak bölgelerinin olduğu görülmektedir. Düz üçgen profil kuvvetlere dayanamayıp kaynak işlemini gerçekleştirememiş ve işlemin başında iken kırılmıştır. Deneyler ve testler sonucunda vidalı uçların sürtünme karıştırma kaynağı için daha uygun olduğu gözlemlenmiş ve ana malzemeye en yakın çekme sonucunu testere vidalı ve üçgen vidalı uçlar vermiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı üzerine yapılan çalışmalara artı olarak Al6066 malzeme kullanılmış ve 7 farklı uç için; özellikle malzeme karışımını kolaylaştırmak için vida türleri kullanılarak yeni uçlar tasarlanmış, bu uçların imalatı gerçekleştirilmiş ve sürtünme karıştırma kaynağı tekniği kullanılarak birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı tekniği ile birleştirilen numunelerden çekme deneyi için standartlara uygun parçalar alınarak en iyi sonucu veren uçlar tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmaların sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sürtünme karıştırma kaynağı ile Al 6066 al alaşımlar başarıyla birleştirilmiştir.
- SKK ile yapılan birleştirmelerin kaynak dikiş görüntüsü diğer kaynak yöntemlerine göre daha düzgün olduğu görülmüştür.
- Sürtünme karıştırma kaynağı işleminde, tezgah devir sayısı Al6066 malzeme için 900 dev./dak devir sayısı, ilerleme içinde 31.5 mm/dak. ile istenen birleşme elde edilmiştir.
- Karıştırıcı ucun ilerleme hızı arttıkça, özellikle kanallı uçta kırılmalar olabilir. Eğer kırılma ihtimalini düşürmek istenirse ilerlemenin düşük, devre (700-1000-1200 dev./dak) ayarlanması tavsiye edilir. Fakat her bir uç için uygun devir ve ilerleme denemeler ile belirlenmelidir.
- Karıştırıcı uçlarda adım olarak 1 mm iyi sonuçlar verdiği için adım olarak kullanılması önerilir.
- Karıştırıcı uçlarda en iyi performans ve en mukavemetli birleştirme üçgen vidalı ve testere vidalı dıştan elde edilmiştir. Karıştırıcı uç tasarımlarında bu tiplerin tercih edilmesi tavsiye edilir.
- Teorik olarak doğrulanan ve tezin uç tasarım kısmında belirtildiği gibi en mukavemetli birleştirme vidalı uçlardan elde edilmiştir.
- Üçgen diş ile elde edilen mukavemet değeri tablodan görüldüğü gibi esas parçaya en yakın değeri bize vermiştir.
- Vida çekilmeden yapılan karıştırıcı uçta yapılan kaynağın mukavemeti ve birleşimi istenilen şekilde olmamıştır.
- Vida çekilmiş karıştırıcı uçlar ile yapılan birleştirmelerde en kötü sonuç kare dişli karıştırıcı uç ile birleştirilen numuneden elde edilmiştir.

- Kare vidalı uçta sürtünme yüzeyi daha az olduğu için en kötü kaynak kare vidalı uçta gerçekleşmiştir.
- SKK yöntemi ile esas malzemeye yakın çekme mukavemeti elde edilebilir.
- Karıştırıcı uç tasarımlarında vidalı ve kaynak dikişinin akışını kolaylaştıran tipler tercih edilmelidir.
- Karıştırıcı uç tasarımlarında sürtünme yüzeyi fazla olan uçlar tercih edilirse birleşme daha homojen ve sağlıklı olabilir.
- Karıştırıcı uç kaynak yapılacak malzemedan uzun olmamalıdır.
- Kaynak yapılacak parçalar, uygun bağlama kalıbı ile bağlamalıdır ve kesinlikle hareket etmesi engellenmelidir.
- Kaynak bölgesinde ya da birleşmeye yakın kısımlarda sertliğin artışı çekme dayanımlarını arttırdığı söylenebilir.
- Çekme testinde kopma bölgesi genelde kaynaklı bölge ile ana metalin birleşim noktasında olduğu görülmüştür.
- Karıştırıcı ucun vida sürtünme yüzeyinin büyüklüğü, kaynaklı birleşmenin çekme mukavemetini arttırdığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

1. Çam, G. (2003). *Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler*. Kaynak Teknolojisi 4.Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 47-99.
2. Uzun, H., Özbekmez, R. (2008). Sürtünme karıştırma ve elektrik ark kaynak teknikleri ile birleştirilen CuZn30 levhaların mekanik ile birleştirilen CuZn30 levhaların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 9-16.
3. Saraçoğlu, E. (2007). *Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının incelenmesi*. Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir, 2-3.
4. Şık, A., Kayabaş, Ö. (2003). Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyumun kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, 11(12), 30-43.
5. Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M. (2004). Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2), 191-197.
6. Şık, A. (2005). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum levhaların eğme ve yorulma özelliklerinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 12-17.
7. Arıcı, A., Ertürk, A.T. (2007, Kasım). *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen polietilen levhalarda kaynak bölgesi özelliklerinin belirlenmesi*. 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul, 491-496.
8. Özdemir, N., Büyükarıslan, S., Sarsılmaz, F. (2007). Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş Al1030 alüminyum alaşımında karıştırıcı uç profili ve ilerleme hızının arayüzey mikroyapı değişimi üzerine etkisi. *Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 407-415.
9. Sarsılmaz, F. (2008). *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AL7075/AL6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 61-65.
10. Çakır, M., Kurt, A., Ateş, H. (2008). Toz metal al malzemelerin sürütme karıştırma kaynağında devir sayısının kaynaklanabilirliğe etkisi. *Mühendis ve Makine*, 49, 580.
11. Haşçalık, A., Çaydaş, U., Ünal, E., Karaca, F. (2007). AL 5251 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleşebilirliğine uç geometrisinin etkisi. *Teknolojik Araştırmalar Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 1-7.
12. Sarsılmaz, F., Özdemir, N., Özel, S. (2008). Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilen AL6061/AL7075 çiftinde karıştırıcı uç omuz genişliğinin mekanik özellikler üzerine etkisi. *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi*, 7(1), 51-61.

13. Meran, C., Çolak, M. (2008). Sürtünme karıştırma kaynağı için takım tutucu tasarımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(3), 671-679.
14. Çelik, E. (2006). *Martenzitik paslanmaz çelik ve ferritik paslanmaz çeliğin kendileriyle ve birbirleriyle sürtünme karıştırma yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
15. Eren, T. (2005). AL6063-T6 Borularının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
16. Doğan, S. (2006). *AL 5754-H22 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
17. Serindağ, H.T. (2006). *Pirinç levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
18. Binal, A. (2006). *AL2024-T3 Al alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
19. Eker, İ., Sevim, İ. (2009). 6061 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 137-141.
20. Şık, A. (2010). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Bilimleri Dergisi*, 14(2), 134-140.
21. Şık, A., Ertürk, İ., Önder, M. (2010). AL2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 139-147.
22. Kafalı, H., Ay, N. (2014). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş havacılık ve uzay yapılarında kullanılan AL 6013-T6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 7(2), 85-101.
23. Orhan, A., Asma Y. (2014). Sürtünme Kaynağı Yapılan AL6061-AL7075 Malzeme Çiftinin Mikrosertlik-Çekme Testi ilişkisi. *Fırat Üniversitesi Müh.Bil. Dergisi*, 26(1), 43-52
24. Aktarer, S.M., Sekban, M., Küçükömeroğlu, T. (2015, Kasım). *IF Çeliği ile AL6061 Al alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliği*. Kaynak Kongresi IX.Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Ankara, 33-36.
25. Çakır, R., Çelik, S. (2015). Alüminyum ve bakırın yüksek devirli sürtünme karıştırma kaynağında takım pozisyonunun etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(8), 352-357.

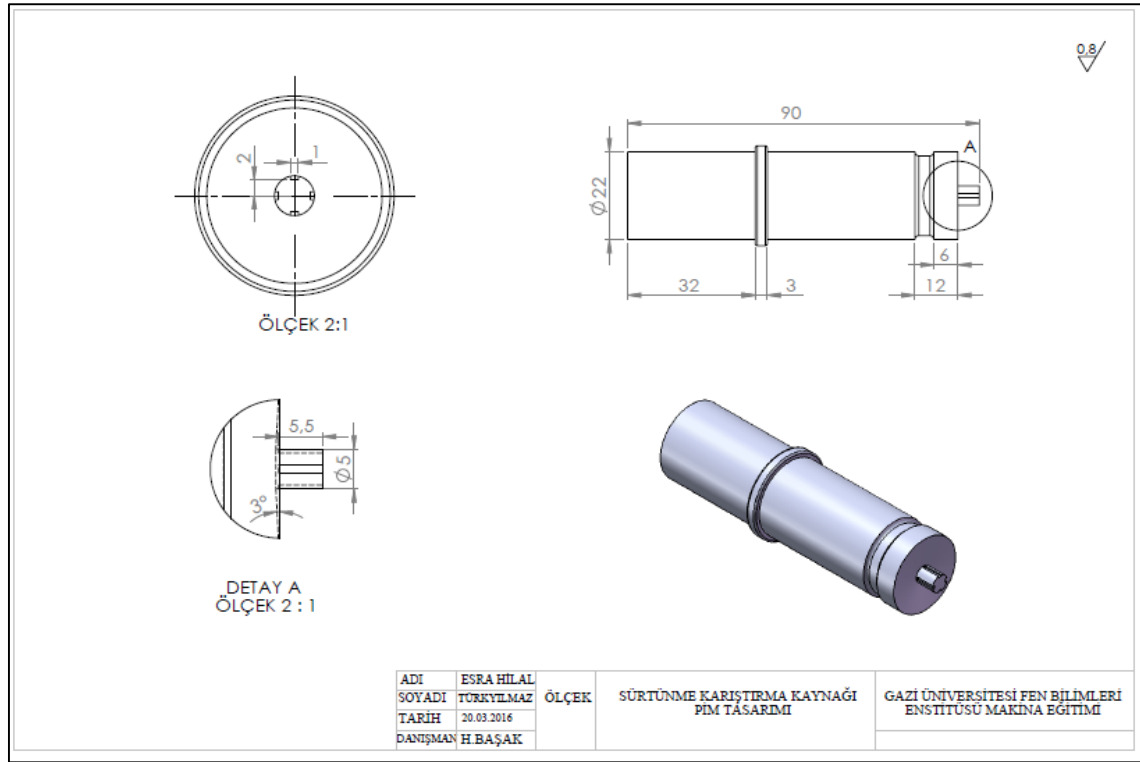
26. Mubiayi, M.P., Akinlabi, E.T. (2013, July). *Friction stir welding of dissimilar materials between aluminium alloys and copper- an overview*. Proceeding of the World Congress on Engineering 2013 Vol III, WCE 2013, London, U.K.
27. Padmanaban, G., Balasubramanian, V. (2009). Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy. *Materials and Design*, 30, 2647–2656.
28. Elangovan, K., Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AL2219 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 200, 63–175.
29. Elangovan, K., Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AL6061 aluminium alloy. *Materials and Design* 29 362–373
30. Elangovan, K., Valliappan, M., (2008). Effect of tool pin profile and tool rotational speed on mechanical properties of friction stir welded AL6061 aluminium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 23, 251–260.
31. Zhao, Y., Lin, S., Wu, L., Qu, F. (2005). The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy. *Materials Letters*, 59, 2948–2952.
32. Avula, D., Singh, R.K.R., Dwivedi, D.K., Mehta, N.K. (2011). Effect of friction stirwelding on microstructural and mechanical properties of copper alloy. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 5, 174-182.
33. Krishna, G.G., Reddy, P.R., (2014). Mechanical behaviour of friction stir welding joints of aluminium alloy of AL6351 with AL6351 and AL6351 with AL5083. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 10, 4.
34. Sald, A.K., Shibayanagi, T. (2006). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AL2024-T3 aluminum alloy. *Materials Transactions*, 47, 185-193.
35. Sald, A.K., Shibayanagi, T. (2007). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded similar and dissimilar joints of Al and Mg alloys. *Transactions of Joining and Welding Research Institute*, 36(1), 21-34.
36. Sald, A.K., Shibayanagi, T. (2007). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded dissimilar aluminum joints of AL2024-T3 and AL7075-T6. *Materials Transactions*, 48(7), 1928-1937.
37. Malarvizhi, S., Balasubramanian, V. (2011). Effect of welding processes on AL2219 aluminium alloy joint properties. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 962–973.
38. Ocenasek, V., Slamova, M. (2005). Microstructure and properties of friction stir welded aluminum alloys. *Hradec nad Moravicí*, 24, 26.

39. Tehyo, M., Muangiunburee, P. (2012). Influence of friction stir welding parameters on metallurgical and mechanical properties of dissimilar joint between semi-solid metal 356-T6 and aluminum alloys 6061-T651. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 34(4), 415-421.
40. Palanivel, R., Mathews, P.K. (2014). Mechanical and metallurgical properties of dissimilar friction stir welded A5083-H111 and AL6351-T6 aluminum alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24, 58-65.
41. Cantin, G. M. D., David, S. A., Thomas, W. M., Lara-Curzio, E., Babu, S. S. (2005). Friction Skew-stir welding of lap joints in 5083-0 aluminium. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(3), 268-280.
42. Bisadi, H., Tour, M. (2011). The influence of process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al 5083 alloy lap joint. *American Journal of Materials Science*, 1(2), 93-97.
43. Cederqvist, L., Reynolds, A. P. (2001). Factors affecting the properties of friction stir welded aluminum lap joints. *Welding Journal-New York-*, 80(12), 281.
44. İnternet: TMMOB. (2003, Ekim). Kaynak Teknolojisi IV.Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 339, URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fdocplayer.biz.tr%2F1268167-Kaynak-teknolojisi-iv-ulusal-kongresi.html&date=2019-05-13>, Son Erişim Tarihi: 12.05.2017.
45. Ertuğ, A. (1977). Sürtünme kaynağı. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 21(241), 45-54.
46. Erdmann, H.C (1968). Metallografie und estigkeitscerhalten von reibschweißverbindungen an unterschiedlichen werkstoffen. *Materials DVS*, 2, 1-17.
47. Kaptan, K. (2008). *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmelerinde farklı karıştırıcı uç formlarının birleştirme kalitesine etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
48. Şık, A. (2005). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum levhaların eğme ve yorulma özelliklerinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 12-17.
49. Dong, P. (1999, June). *On friction stir welding*. Proceedings of the First International Symposium, Thousand Oaks, Ca, Usa.
50. Nagasawa, T., Otsuka, M., Yokota, T., Ueki, T. (2016). Structure and mechanical properties of friction stir weld joints of magnesium alloy AZ31. *Essential Readings in Magnesium Technology*, 517-521.
51. Dawes, C.J., Thomas, W. M. (1996). Friction stir process welds aluminium alloys. *Welding Journal*, 28(1), 41-45.

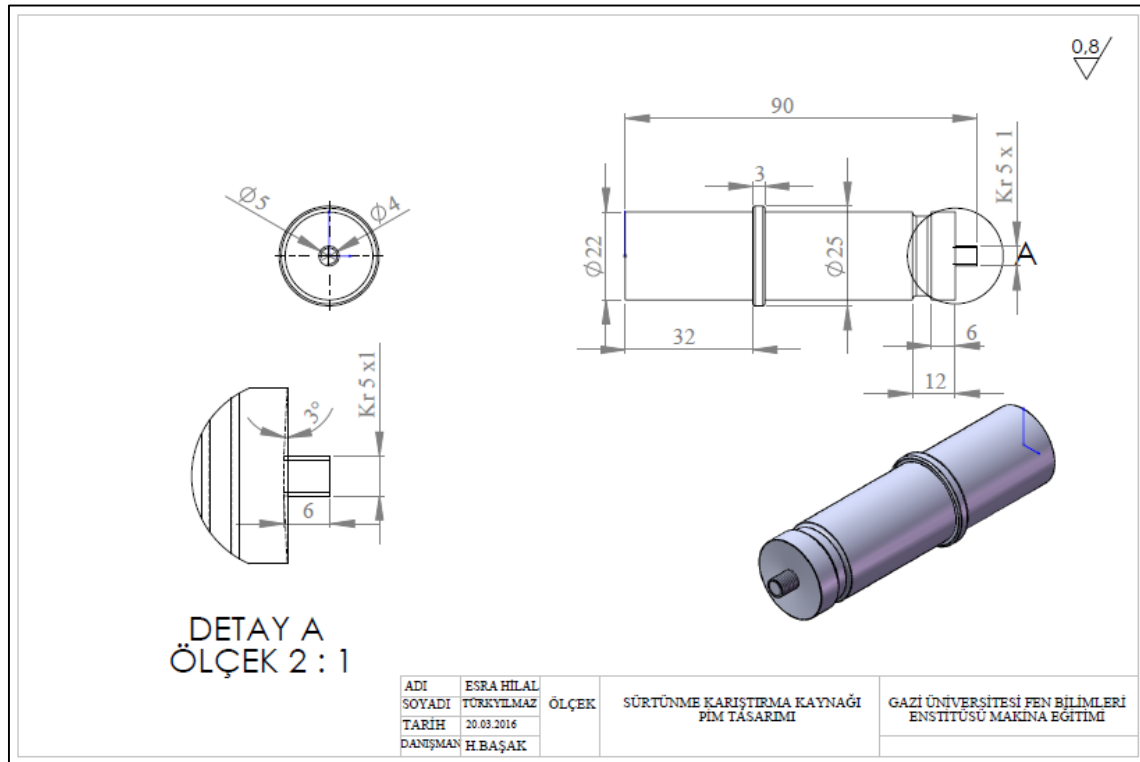
52. Özkan, S. (2006). *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalarda haddeme (burnishing) ile yüzeylerin işlenmesi, haddemenin yüzey pürüzlülüğü ve sertleşmeye etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
53. İnternet: Kistler. URL: <https://www.kistler.com/en/product/type-9257b/> , Son Erişim Tarihi: 12.05.2017
54. Jonhson, R., Kallee, S. (1999). Friction stir welding. *Materials World*, 7(12), 751-753.
56. Elliott, S., Vvallah, E.R. (1981). Joining aluminium to steel part 1-diffosion bonding. *Metal Construction*, 167-171.
57. Gürleyik, M.Y. (1997). Sürtünme kaynağı. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 16, 241.
58. İnternet: Pınar Metal Malzeme Katalogu (2007). URL: <http://www.pinarmetal.com/Pinar-Metal-Plastik-Urun-Kataloglari>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2010.
59. İnternet: Hedef Çelik Malzeme Katalogu (2007). URL: <http://hedefcelik.com/urunler/TAKIM-ELKLER>, Son Erişim Tarihi: 12.01.2010.
60. İnternet: Kistler. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kistler.com&date=2019-05-13>, Son Erişim Tarihi: 12.05.2017.
61. İnternet: Akdoğan, A. (2008). *Al ve alaşımları*. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.yildiz.edu.tr%2F%7Eakdogan%2Fflessions%2Fmalzeme%2FAluminyum_ve_Aluminyum_Alasimlari.pdf&date=2019-05-13, Son Erişim Tarihi: 12.05.2017.
62. Cuellar, K.J.Q., Silveina, J.L.L. (2017). Analysis of torque in friction stir welding of aluminum alloy 5052 by inverse problem method. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(4), 8.
63. Cuesta, M., Aristimuño, P., Garay, A., Arrazola, P.J. (2016). Heat transferred to the workpiece based on temperature measurements by IR technique in dry and lubricated drilling of Inconel 718. *Applied Thermal Engineering*, 104, 309-318.

EKLER

EK-1. Materyal detay resimleri

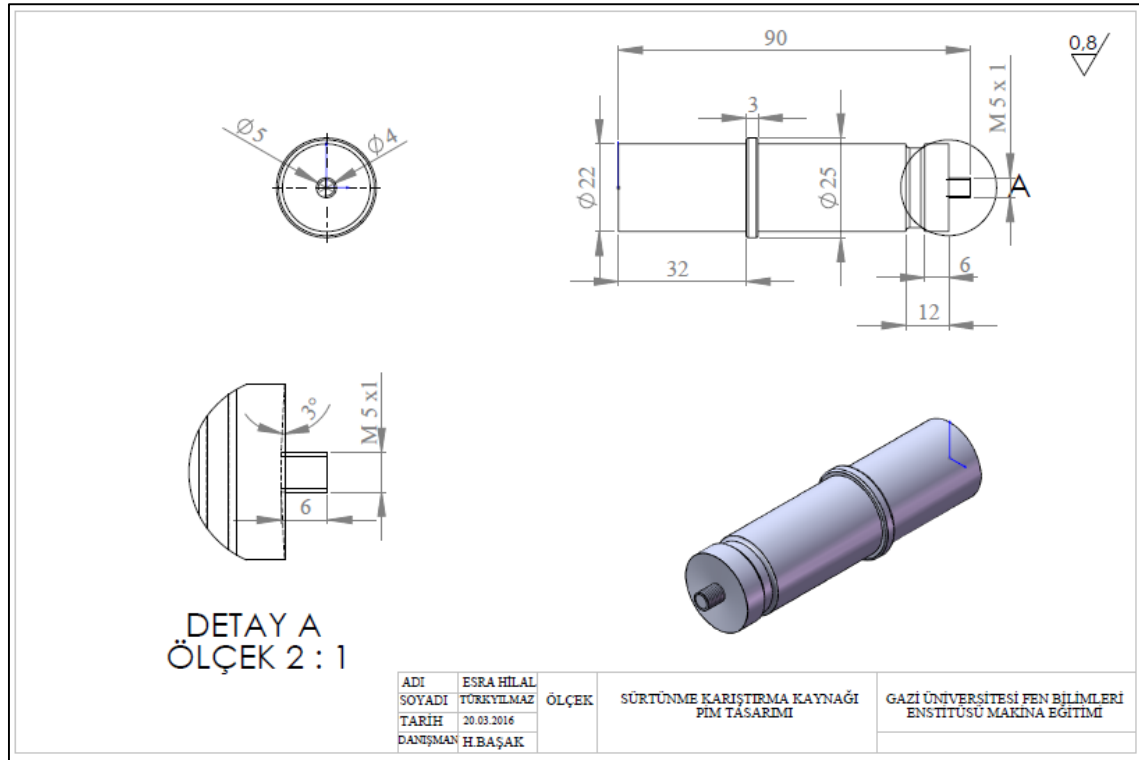


Şekil 1. Ham kanallı vidasız uç detay resmi

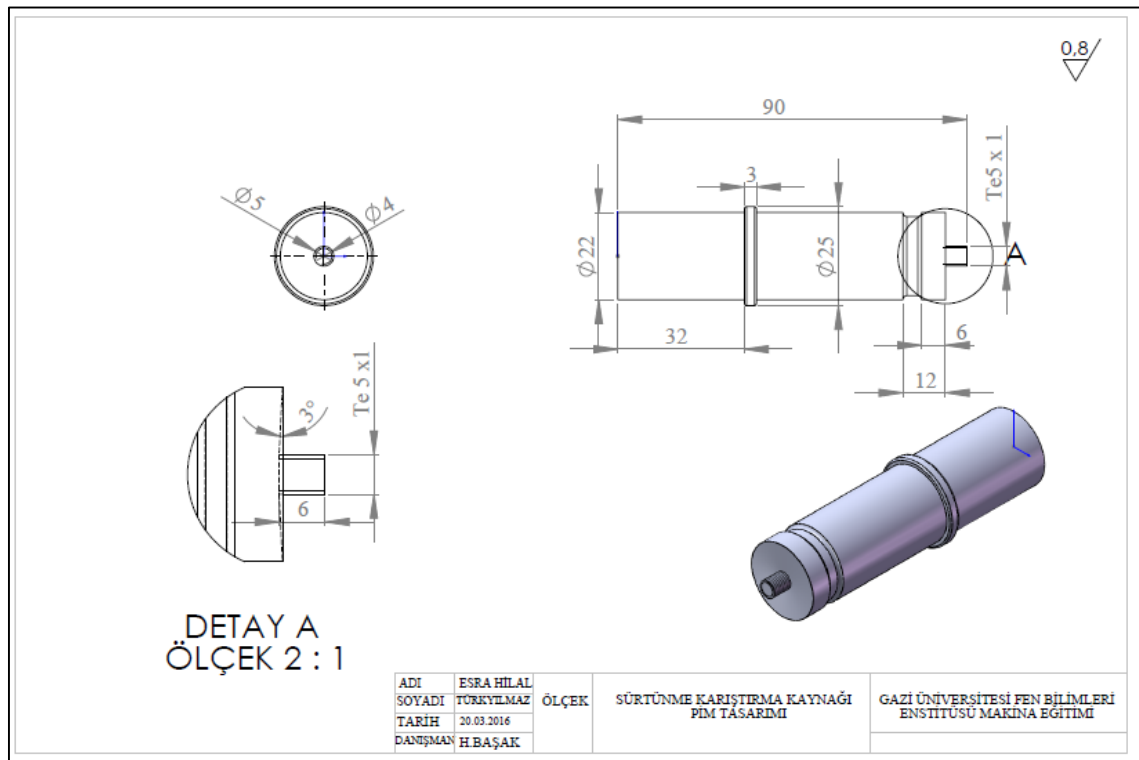


Şekil 2. Kare vidalı uç detay resmi

EK-1. (devam) Materyal detay resimleri

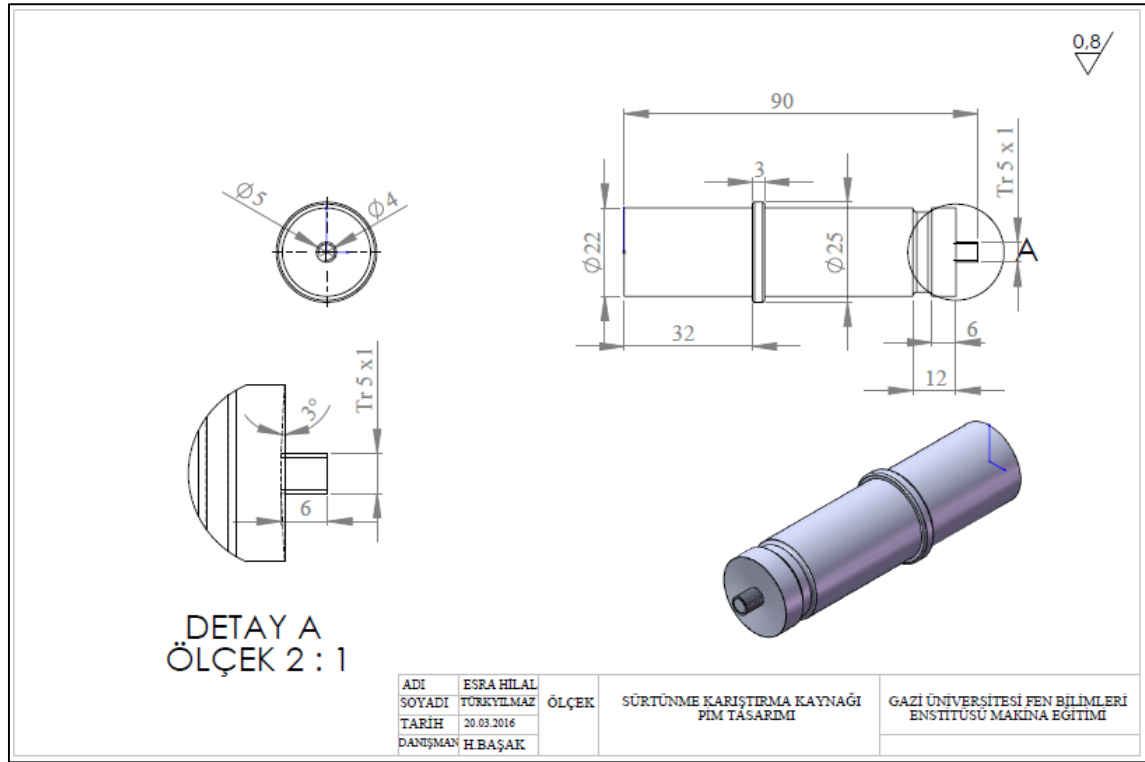


Şekil 3. Üçgen vidalı uç detay resmi

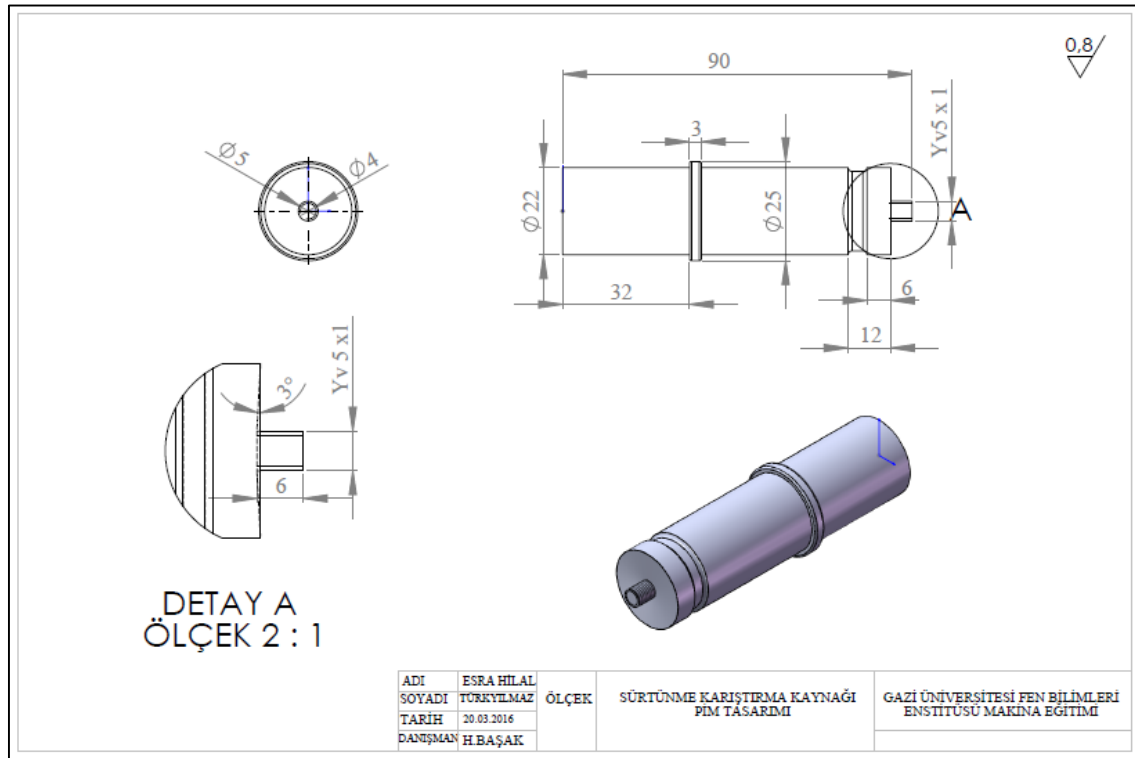


Şekil 4. Testere vidalı uç detay resmi

EK-1. (devam) Materyal detay resimleri

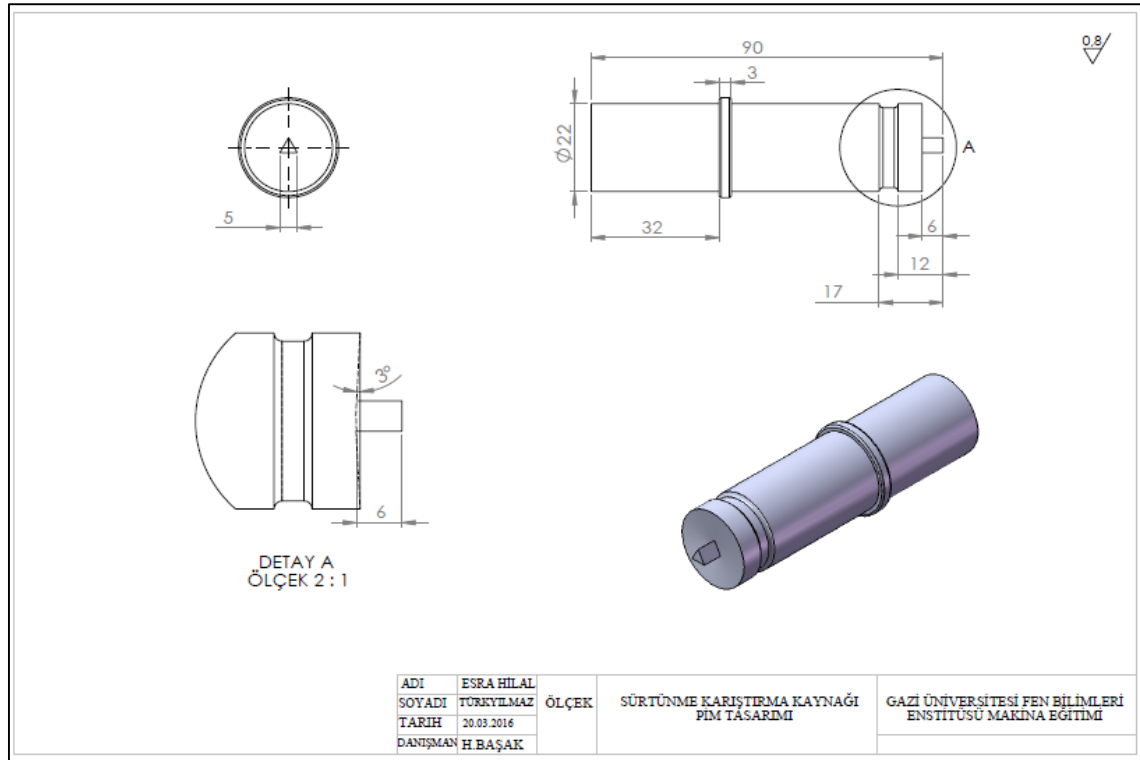


Şekil 5. Trapez vidalı uç detay resmi

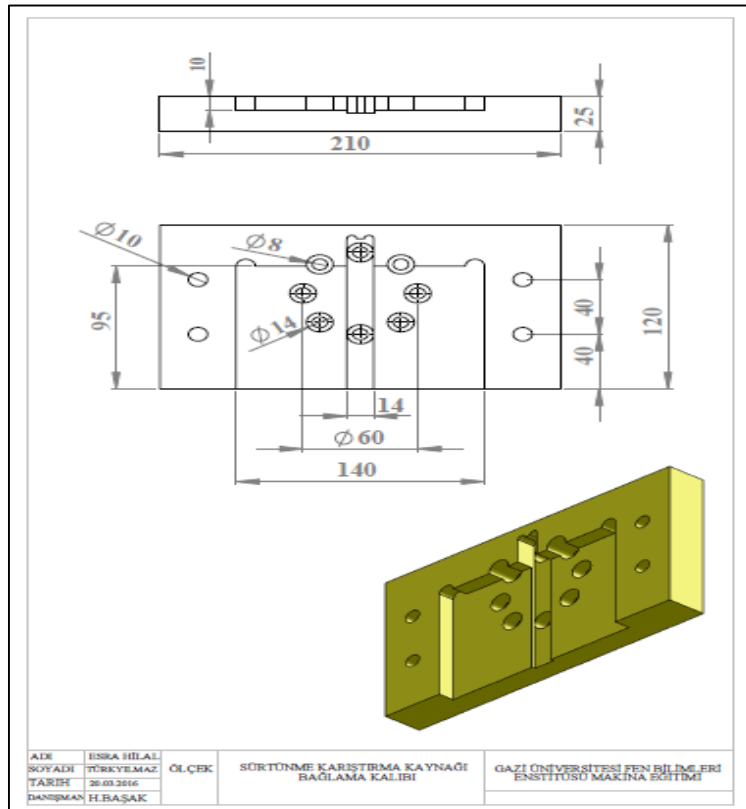


Şekil 6. Yuvarlak vidalı uç detay resmi

EK-1. (devam) Materyal detay resimleri



Şekil 7. Üçgen profilli vidasız uç detay resmi



Şekil 8. Bağlama Kalıbı detay resmi

EK-2. Çizelgeler

Çizelge 1. Ç 4340 Islah çeliğinin kimyasal özellikleri [57]

MKE NORMU	DIN NORMU	GEREÇ NR. ST.	SAE AISI	KULLANIM ALANLARI
Ç 4340	340Cr Ni Mo6	1.6582	4340	Yüksek dayanım gerektiren 90akine parçaları şaft mil civata dişli krank milleri eksantrik milleri şanzıman parçaları

Çizelge 2. Ç 4340 Islah çeliğinin genel özellikleri [57]

SEA AISI	C	Si	MN	P	S	Cr	Mo	Ni	V
4340	0.38-0.43	0.15-0.40	0.60-0.80	0.035	0.040	0.70-0.90	0.20-0.30	1.65-2.00	---

Çizelge 3. Ç 4340 Islah çeliğinin sıcak şekillendirme ve ısıtıl işlem sıcaklıkları [57]

Sıcak şekillendirme sıcaklığı (dövme sıcaklığı)	1050 °C (Baslangıç) max. 850 °C (Bitiş)
Normalizasyon tavlama sıcaklığı (normalizasyon)	850 – 880 °C (Havada Soğutma)
Yumuşak tavlama sıcaklığı	700 °C ye ısıtılır ve bunu takiben 650°C ye ani soğutulur 8 sAlt beklenir
Yumuşak tavlama (Perlitik yapı için)	830 °C ye ısıtılır ve bunu takiben 705 °C ye ani soğutulur.
Sertleştirme ortamı ve soğuma sıcaklığı	Suda : --
	Yağda : 830 – 860 °C
Temperleme (Menevişleme)	540 – 680 °C
Gerilim Giderme	120 – 200 °C

EK-2. (devam) Çizelgeler

Çizelge 4. Ç 4340 Islah çeliğinin mekanik özellikleri [58]

Özellikleri	Değeri	Koşullar		
		T (°C)	Temper sıcaklığı	İşlem
Elastik Modülü , Gpa	190-210			
Darbe Mukavemeti , İzod (J)	51.1	25	810 °C de tavllanmış	
Max. Çekme Mukavemeti, Mpa	744.6	25	810 °C de tavllanmış	
	1279		870 °C normalize edilmiş	
	1875		205	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş
	1724		315	
	1469		425	
	1172		540	
	965		650	
Akma Mukavemeti, Mpa	472.3	25	810 °C de tavllanmış	
	861.8		870 °C normalize edilmiş	
	1675		205	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş
	1586		315	
	1365		425	
	1076		540	
	855		650	
Uzama %	22	25	810 °C de tavllanmış	
	12.2		870 °C normalize edilmiş	
	10		205	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş
	10		315	
	10		425	
	13		540	
	19		650	
	40		315	
	44		425	
	51		540	
	60		650	
Kesit Daralması %	49.9	25	810 °C de tavllanmış	
	36.3		870 °C normalize edilmiş	
	38		205	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş

EK-2. (devam) Çizelgeler

Çizelge 5. Ç 4340 Islah çeliğinin fiziksel özellikleri [58]

Özellikleri	Değeri	Koşullar		
		T (°C)	Temper Sıcaklığı	İşlem
Yoğunluğu (x 1000 kg/m ³)	7.7- 8.03			
Erime Noktası (°C)	1413 °C			
Poisson Oranı	0.27- 0.30	25		
Sertlik, HB	217	25	810 °C de tavllanmış	
	363		870 °C normalize edilmiş	
	520		205	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş
	486		315	
	430		425	
	360		540	
	280		650	

EK-2. (devam) Çizelgeler

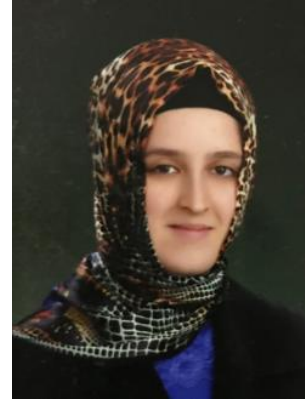
Çizelge 6. Freze tezgahının teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Değer	Birim
İş tablası		
İş bağlama yüzeyi	315 x 1250	mm
Tablanın her iki yönde dönüş açısı	$\pm 45^\circ$	
Max. İş parçası ağırlığı	1000	Kg
Hareketler (motor ile / el ile)		
Boyuna hareket	850 / 880	mm
Enine hareket	270 / 300	mm
Dikey hareket	355 / 385	mm
Çalışma alanı		
Tabla arka kenarı - gövde kızıakları	100.. ..370	mm
İş mili alnı - karşı yatak	600	mm
İş mili eksenini - üst kafa alt yüzeyi	150	mm
İş mili alnı - tabla	45 ... 400	mm
İş mili		
İş mili ön yatak çapı	110	mm
Max. Tork	2000	Nm
İş mili koniği dın 2079 (iso 297-1976)	50	
Max. Freze çıkışı çapı	250	mm
Hızlar		
Kademe sayısı	18	
Tahvil oranı	1.25	
Hız değeri	28 ... 1400	Dev./Dak.
İlerlemeler		
Kademe sayısı	18	
Tahvil oranı	1.25	
Hız değerleri		
Boyuna ve enine	16 ... 800	mm/dak.
Dikey	5 ... 250	mm/dak.
Hızlı hareket		
Boyuna ve enine	3150	mm/dak.
Dikey	1000	mm/dak.
Tahrik güçleri		
İş mili motoru (50 hz)	7.5	kW
İlerleme motoru	1.5	kW
Eş yönlü frezeleme motoru	0.04	kW
Soğutma sıvısı motoru	0.15	kW
Konsol alçaltma motoru	0.12	kW
Toplam güç	9.31	kW
Ağırlık		
Tezgah ağırlığı	2800	Kg
Elektrik panosu ağırlığı	200	Kg
FU 315x1250 V1 Universal Freze Tezgahı		

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TÜRKYILMAZ, Esra Hilal
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 21/12/1985, İzmit
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 5056659575
 e-mail : hesracan85@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği	2009
Lise	Düzce Anadolu İmam Hatip Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Gebze Pagev Mesleki ve Teknik Anadolu lisesi	Tek. Müd. Yard.
2012-2018	Gebze Pagev Mesleki ve Teknik Anadolu lisesi	Öğretmen
2010-2012	Bayrampaşa İnönü Meslek Teknik Anadolu lisesi	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Başak, H., Kayır, Y. ve Turkeyılmaz, E. H. (2017). Sürtünme karıştırma kaynağında farklı karıştırma uç formlarının oluşturduğu kuvvetlerin ve birleşmeye etkisinin deneysel incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 4(2), 249-257.

Hobiler

Yüzme, Kitap okuma, Seyahat etme



GAZİ GELECEKTİR...