

Sürtünme Karıştırma Prosesi İle Yüzeyine SiC Partikül Takviye Edilmiş Al 7075-T651
Alüminyum Alaşımının Mikro Yapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi

Abdullah Sert

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım 2010

The Investigation of Wear Behavior and Microstructure Properties of SiC Particle Reinforced
Al 7075-T651 Alloy by Using Friction Stir Process

Abdullah Sert

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

November 2010

Sürtünme Karıştırma Prosesi İle Yüzeyine SiC Partikül Takviye Edilmiş Al 7075-T651
Alüminyum Alaşımının Mikro Yapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi

Abdullah SERT

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon- İmalat Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Kasım 2010

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Abdullah Sert'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Sürtünme Karıştırma Prosesi İle Yüzeyine SiC Partikül Takviye Edilmiş Al 7075-T651 Alüminyum Alaşımının Mikro Yapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman :Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof.Dr. Y. Macit YAMAN

Üye : Prof. Dr. Orhan Şerif KOMAÇ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Üye : Yrd. Doç.Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ümit ER

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma prosesi (SKP) ile SiC partiküllerinin Al 7075-T651 alaşımının yüzeyine takviye edilmesi sonucu yüzeyde oluşan kompozit yapının mikro yapı özellikleri ile aşınma davranışı incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda optimum deney parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sürtünme karıştırma prosesi üç farklı takım ilerleme hızı (20, 40, 56 mm/dk) ve üç farklı takım devir sayısı (710, 1000, 1400 dv/dk) kullanılarak uygulanmıştır. Proses sonrasında malzemede oluşan yeni yapının mikro yapı analizleri optik mikroskop ile yapılmıştır. Aşınma deneyleri ball-on-disc geometrisinde 2 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında aşınmış bölgelerin analizlerinde taramalı elektron mikroskobundan (SEM) faydalanılmış ve bölgelerin EDS analizleri yapılmıştır. Ayrıca numunelere sertlik testleri yapılmış ve aşınma oranları ölçülmüştür. Sonuç olarak; sürtünme karıştırma prosesi (SKP) ile Al 7075 – T651 malzemenin yüzeyinde kompozit bir bölgenin oluşturulabileceği görülmüştür. Malzemenin ısı işlenmiş haline göre daha düşük sertlik değerleri elde edilmiş ancak aşınma oranlarında iyileşme görülmüştür. Artan takım ilerleme hızı ve takım dönme hızının oluşan yapının mikro yapı özellikleri üzerinde özellikle homojen kompozit form üretilmesine etki ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Prosesi, Al 7075-T651, Aşınma.

SUMMARY

In this study, wear behaviour and microstructure properties of SiC particle reinforced Al7075 – T651 alloy's composite surface that produced by using friction stir processing (FSP) was investigated. As a result of the experiments, it was worked to determine optimal experimental parameters. Friction stir welding was applied by using three different sets of tool traverse speed (20, 40, 56 mm/min) and three different tool rotation rate (710, 1000, 1400 rpm). Micro-structure analysis of the new structure of the material generated after the process was done with an optical microscope. Worn experiments on the ball-on-disc geometry was carried out under the 2 N. After worn experiments, Scanning electron microscopy (SEM) was used on the analysis of the worn area and EDS analysis of this area was done. Besides the hardness of samples was tested and worn rate was measured. As a conclusion; composite layer can be produced on Al 7075 – T651 alloy with friction stir processing method. After processing, the hardness values of materials were lower than substrate but worn rates improved. Properties of micro structure and uniform composite structure related to increasing the tool travel speed and tool rotational speed.

Keywords: Friction Stir Processing, Al 7075-T651, Wear.

TEŞEKKÜR

Gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan, mühendislik anlamında beni yetiştirmek için çaba gösteren ve kendi bilgi birikimi ile donatıp yetiştiren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e, tez çalışmam süresince bana her konuda yardımcı olan meslektaşım Arş. Grv. Zerrin BÖCÜ'ye ve her daim yanımda olup dualarını esirgemeyen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN ile Yrd. Doç. Dr. Hakan GAŞAN'a ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	4
2.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	5
2.2. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri.....	6
2.2.1. Çökelme sertleşmesi ısıl işlemi	7
2.3. Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemeler	11
2.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	13
3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ (SKP)	15
3.1. Sürtünme Karıştırma Prosesinde Malzemede Oluşan Bölgeler	17
3.1.1. Esas metal (EM)	18
3.1.2. Isıdan etkilenmiş bölge (IEB)	18
3.1.3. Termo mekanik etkilenmiş bölge (TMEB)	18
3.1.4. Kaynak metali (KM)	19
3.2. SKP Yöntemi Sonucunda Oluşabilecek Hata Türleri.....	19
4. AŞINMA	22
4.1. Aşınma Mekanizmaları.....	22
4.1.1. Adhezif aşınma.....	22
4.1.2. Abratif aşınma	24
4.1.3. Yorulma aşınması.....	25
4.1.4. Korozyon aşınması.....	25
5. LİTERATÜR TARAMASI	26

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
6.1. Deney Malzemeleri ve Cihazı	37
6.1.1. Esas malzeme	37
6.1.2. Karıştırıcı uç	39
6.1.3. Takviye edilecek toz.....	39
6.1.4. Tezgah	40
6.2. Proses Parametreleri	41
6.3. Metalografik Çalışmalar	41
6.4. Mikro Sertlik Ölçümleri	43
6.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	43
6.6. Aşınma Deneyleri	44
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	45
7.1. Görsel İnceleme Sonuçları.....	45
7.2. Makro Yapı İnceleme Sonuçları	47
7.3. Mikro Yapı İnceleme Sonuçları	50
7.4. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları	59
7.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları	62
7.6. Aşınma Deney Sonuçları	62
8. SONUÇLAR	67
9. KAYNAKLAR DİZİNİ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Uçak yapımında kullanılan malzemeler ve yıllara göre yüzde dağılımı (Campbell, 2006).....	4
Şekil 2.2. Alüminyum – çinko alaşımına ait: a) denge diyagramı, b) yaşlandırma işleminin kademeleri.	8
Şekil 2.3. Al-Zn denge diyagramı (ASM Handbook, 1992).	9
Şekil 2.4. Çökelti sertleşmesi ısıtma işleminde yaşlanma eğrisi (Campbell, 2006).	10
Şekil 2.5. Metal esaslı kompozit malzemelerin geometrik türleri (Kainer, 2006).	11
Şekil 2.6. Alüminyum ve alaşımlarının endüstrideki kullanım alanları: a) uçak içyapıları, b) tır damperleri, c) uzay aracı roketleri, d) yüksek hızlı trenler, e) otomotiv konstrüksiyonları, f) uçak konstrüksiyonları (Kaufman, 2000).	14
Şekil 3.1. SKK/SKP'nin şematik olarak gösterilmesi (Campbell, 2006).	15
Şekil 3.2. Sürtünme Karıştırma Prosesinin kullanım alanları (Mishra and Mahoney, 2007). .	17
Şekil 3.3. SKP uygulanmış malzemedeki oluşan bölgeler (Mishra and Mahoney, 2007).	17
Şekil 3.4. Proses parametrelerine bağlı oluşan hata türleri (Mishra and Mahoney, 2007).	20
Şekil 3.5. Dövme kuvvetinin yapıdaki hatalara etkisi (Mishra and Mahoney, 2007).	21
Şekil 4.1. Aşınma türleri: a) adhezif aşınma, b) abrazif aşınma, c) yorulma aşınması, d) korozyon aşınması (Bhushan, 2000).	22
Şekil 4.2. Adhezif aşınma bölgesinden bir görüntü (Bhushan, 2000).	23
Şekil 4.3. Abrazif aşınma (Bhushan, 2000).	24
Şekil 5.1. SKK uygulanmış 2024 - T351 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Yang et al., 2004).	29
Şekil 5.2. SKK uygulanmış 2524 - T351 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Yang et al., 2004).	30
Şekil 5.3. SKK uygulanmış 2219 - T6 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Chen et al., 2006).	30
Şekil 5.4. SKP uygulanmış 2124/SiC alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Uzun, 2007).	31
Şekil 5.5. SKK uygulanmış 6061 - T6 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Hwang et al., 2008).	32
Şekil 5.6. SKK uygulanmış 6063 – T5 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Chen et al., 2009).	33
Şekil 5.7. SKP uygulanmış 6063 – T5 alüminyum alaşımının: a) % 6 B ₄ C ilaveli, b) % 10.5 B ₄ C ilaveli durumlarının sertlik dağılımları (Chen et al., 2009).	34
Şekil 5.8. SKP uygulanmış 2024 - T4 alüminyum malzemesine ait sertlik dağılımı (Zahmatkesh et al., 2010).	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.9. SKK uygulanmış 7075 - T651 alüminyum alaşımının yaşlandırma süresine bağlı olarak sertlik dağılımı (Fuller et al., 2010).....	36
Şekil 6.1. Malzemelere: a) freze tezgahında kanallar açılırken, b) kanal açılmış durumda.....	38
Şekil 6.2. Uygulamaya ait şematik gösterim.....	38
Şekil 6.3. Prosese ait: a) boyutsal ölçüler, b) karıştırıcı uç.....	39
Şekil 6.4. Takviye elemanı olarak kullanılan SiC partikülleri, 300x.....	40
Şekil 6.5. Sürtünme karıştırma prosesinde kullanılan freze tezgahı.....	40
Şekil 6.6. Metalografik çalışmalar için kesiti alınan numune.....	41
Şekil 6.7. Metalografik numune hazırlama cihazları: a) görüntü analizörü, b) kesme cihazı, c) parlatma ve zımparalama cihazı, d) kalıplama cihazı.....	42
Şekil 6.8. Mikro sertlik ölçümlerinin yapılış düzeni.....	43
Şekil 6.9. Deneylerde kullanılan bazı cihazlar: a) sertlik ölçüm cihazı, b) aşınma deney sistemi, c) yüzey profil ölçüm cihazı.....	44
Şekil 7.1. Sürtünme karıştırma prosesi uygulanmış 1 nolu numune, a) tilt açısı uygulanmamış, b) tilt açısı uygulanmış.....	47
Şekil 7.2. Numunelerin makro resimleri, dağlanmış (Keller ayracı), 50x, a) Numune 1 (1400 dv/dk, 20 mm/dk), b) Numune 2 (1400 dv/dk, 40 mm/dk), c) Numune 3 (1400 dv/dk, 56 mm/dk), d) Numune 4 (1000 dv/dk, 20 mm/dk), e) Numune 5 (1000 dv/dk, 40 mm/dk), f) Numune 6 (1000 dv/dk, 56 mm/dk), g) Numune 7 (710 dv/dk, 20 mm/dk), h) Numune 8 (710 dv/dk, 40 mm/dk), f) Numune 9 (710 dv/dk, 56 mm/dk.).....	49
Şekil 7.3. Haddelenmiş Al7075-T651 alaşımı, dağlanmış (Keller), 200x.....	50
Şekil 7.4. SKP uygulanmış 5 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	51
Şekil 7.5. SKP uygulanmış 1 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	52
Şekil 7.6. SKP uygulanmış 1 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	52
Şekil 7.7. SKP uygulanmış 1 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	53
Şekil 7.8. SKP uygulanmış 2 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	53
Şekil 7.9. SKP uygulanmış 2 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	54
Şekil 7.10. SKP uygulanmış 6 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	54
Şekil 7.11. SKP uygulanmış 3 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	55
Şekil 7.12. SKP uygulanmış 3 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	55
Şekil 7.13. SKP uygulanmış 5 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	56
Şekil 7.14. SKP uygulanmış 6 nolu numune, dağlanmış (Keller), 50x.....	56
Şekil 7.15. SKP uygulanmış 9 nolu numune, dağlanmış (Keller), 50x.....	57
Şekil 7.16. SKP uygulanmış 7 nolu numune, dağlanmış (Keller), 100x.....	58
Şekil 7.17. SKP uygulanmış 4 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 7.18. 1,2 ve 3 nolu numunelere ait sertlik ölçüm sonuçları.	60
Şekil 7.19. 4,5 ve 6 nolu numunelere ait sertlik ölçüm sonuçları.	60
Şekil 7.20. 7,8 ve 9 nolu numunelere ait sertlik ölçüm sonuçları.	61
Şekil 7.21. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelere ait, aşınma oranları ve ortalama sertlik değerleri.....	64
Şekil 7.22. SKP uygulanmış malzemelerin aşınmış profillerinin SEM görüntüleri (300x)....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Dövme Alüminyum alaşımlarının gruplandırılması (Campbell, 2006).....	5
Çizelge 2.2. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlem türleri (Kaufman, 2000; Campbell, 2006).....	7
Çizelge 2.3. Değişik takviye elemanlı MMK'lerin özellikleri (Kainer, 2006).....	12
Çizelge 2.4. Takviye elemanları ve özellikleri (Kainer, 2006).....	12
Çizelge 6.1. Al 7075 alaşımına ait % ağırlıkça kimyasal bileşim.....	37
Çizelge 6.2. Proses parametreleri.....	41
Çizelge 6.3. Aşınma deneyi parametreleri.....	44
Çizelge 7.1. Sürtünme karıştırma prosesi uygulanmış numunelerin takım devir sayısı ve takım ilerleme hızına bağlı olarak üstten görünüşleri.....	46
Çizelge 7.2. Aşınma deneyleri öncesinde ve sonrasında ölçülen bazı değerler.....	63
Çizelge 7.3. Aşınmış malzemelerin EDS analizleri sonucunda elde edilen değerler.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Al	Alüminyum
Cr	Krom
Cu	Bakır
Fe	Demir
Li	Lityum
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Si	Silisyum
T	Temper
Ti	Titanyum
WC	Tungsten
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
HV	Vickers Sertliği
°C	Celcius
K	Kelvin
α	Alfa
β	Beta
μ	Mikro
gr	Gram
m	Metre
sn	Saniye
R _a	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
EDS	Enerji dağılımlı spektroskopi (Electron dispersive spectroscopy)
EM	Esas metal
FSP	Sürtünme Karıştırma Prosesi (Friction stir processing)
hegz	Altıgen biçimli (Hekzagonal)
IEB	Isı etkili bölge
KM	Kaynak metali
MMK	Metal matrisli kompozit
SEM	Tarayıcı elektron mikroskopisi (Scanning electron microscopy)
SKK	Sürtünme karıştırma kaynağı
SKP	Sürtünme karıştırma prosesi
TMEB	Termo mekanik etkilenmiş bölge
TWI	Kaynak Enstitüsü (The Welding Institue)
YMK	Yüzey merkezli kübik
YNE	Yetersiz nüfuz etme
YSY	Yüzey sürtünme yapışması

1. GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları, otomobiller başta olmak üzere günlük hayatımızda kullandığımız pek çok üründe karşımıza çıkmaktadır. Düşük ağırlığı, yüksek dayanımı, mükemmel korozyon direnci ve uygun maliyeti ile alüminyum ve alaşımları, yaygın kullanılan metal malzemeler grubundadır. Alüminyum ve alaşımları, dayanım/ağırlık oranı ile de özellikle modern havacılık sanayisinde tercih edilmektedir. Uzay ve uçak araçlarında ağırlıktan kazanç sağlamak için; ağır metallerin yerine hafif metallerin kullanılması yıllardır süregelen bir uygulama olmuştur. (Kaufman, 2000; Campbell, 2006).

Alüminyum ve alaşımlarının düşük ergime noktasına sahip olması ve diğer özellikleri, bu malzemelerin kaynak yapılabilirlikleri üzerine bazı dezavantajları beraberinde getirir. Alüminyum alaşımlarının kaynak yapılabilmesi için yüzeydeki oksit tabakasının ortadan kaldırılması gerekmektedir. Malzemenin yüksek ısı iletkenliği nedeniyle kaynak esnasında gerilmelere maruz kalması ve buna bağlı çatlak oluşumu riski bulunmaktadır, ayrıca yüksek ısı iletkenlik özelliği nedeniyle malzemeye kaynak esnasında daha fazla ısı girdisi sağlanması gerekir ve bu durumda malzemede yapısal kusurlar meydana gelmesine neden olur. Kaynak işlemi sonrasında katılma çekmesi çatlak oluşma riski vardır. Hidrojenin alüminyum içerisinde yüksek çözünme kabiliyeti nedeniyle kaynak esnasında yapıda boşluklar oluşabilmektedir, yüksek alaşımlı ve yüksek dayanımlı 2xxx ile 7xxx serisi alüminyum alaşımları özellikle kaynak esnasında çatlak oluşumuna duyarlıdır (Campbell, 2006)

Alüminyum alaşımlarının kaynak edilmesindeki zorluklar, yeni yöntemlerin araştırılmasına hız vermiştir. Son yıllarda Alüminyum malzemeler üzerinde kullanılan başarılı kaynak yöntemlerinden biri Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) olmuştur (Kaluç ve Taban, 2007).

Sürtünme karıştırma kaynağı ile katı durumda sürtünmeden kaynaklanan ısı ve oluşan plastik deformasyonla alüminyum ve alaşımlarının diğer konvansiyonel yöntemlere gerek kalmadan birleştirilmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntem daha sonraları proses amaçlı; yüzeyde kompozit yapı elde edilmesinde, toz metalurjisi ile üretilen alüminyum alaşımlarının homojenleştirilmesinde, metal matrisli kompozit yapıların mikro yapılarının değiştirilmesinde ve döküm alüminyum alaşımlarının özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılmıştır (Mishra et al., 2005).

Birçok uygulamada, makine elemanlarının kullanım ömürleri, aşınma direnci gibi yüzey özelliklerine bağlı olmaktadır. Bu durumda; makine elemanlarının kullanım ömürlerini artırmak amacıyla, yüzeyleri dış etmenlerden korunması için bazı prosesler yapılmaktadır. Seramik partikül takviyeli metal matrisli kompozit yapıların, takviyesiz yapılara göre; yüksek dayanım, yüksek elastik modülü, gelişmiş aşınma direnci, sürtünme ve yorulmaya karşı gösterdikleri özelliklerin daha iyi olduğu bilinmektedir. Havacılık ve otomobil endüstrisinde bu özelliklere sahip malzemeler önem arz etmektedir (Mishra et al., 2003).

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelere ilave edilen yüksek sertlikteki takviye elemanları malzemedeki aşınma direncini yükseltirler. Takviye elemanlarındaki grafit yapılar ise sistemde yağlayıcı özellik göstermektedir (Miracle, 2005).

Son zamanlarda; yüksek enerjili lazer ile ergitme, yüksek enerjili ışın yayındırma, plazma sprej, döküm ve SKP gibi birçok yüzey özelliklerini geliştirme tekniği kullanılarak, malzemelerin yüzeylerinde iyileştirme yapılarak kullanım ömürlerinde artış sağlanması amaçlanmaktadır (Mishra et al., 2003).

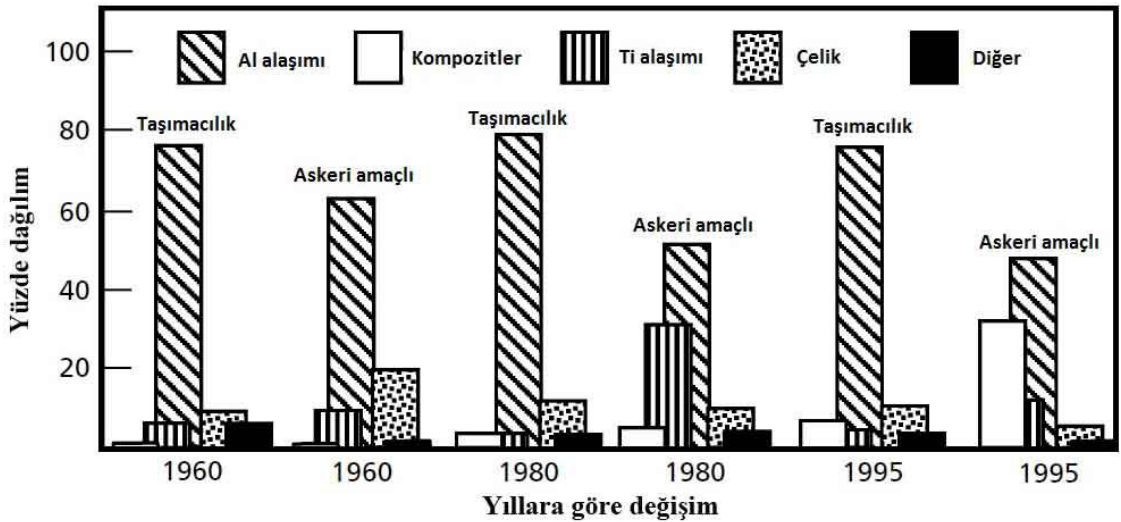
Bu çalışmada, Al 7075-T651 alaşımının yüzeyine SiC partiküllerinin SKP yöntemi ile takviye edilmesi ve oluşan yüzeydeki kompozit yapının aşınma davranışları incelenerek ömür analizi yapılması, farklı takım ilerleme hızı ve takım devir sayısı ile prosesin optimum parametresinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 20 – 40 – 56 mm/dk takım ilerleme hızlarında, 710 – 1000 – 1400 dv/dk takım devir hızlarında

takıma 2,5° tilt açısı verilerek ve SiC partikülleri kullanılarak SKP ile Al 7075 – T651 malzemenin yüzeyi geliştirilmiştir.

2. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Modern havacılık sanayinde malzeme dağılımı incelendiğinde (Şekil 2.1), alüminyumun büyük bir paya sahip olduğu görülebilir. Alüminyumun bu kadar büyük paya sahip olmasının nedenlerinden bazıları olarak; oldukça düşük maliyeti, düşük ağırlığının yanı sıra ısıl işlem ile yüksek dayanımlara sahip olabilmesi ve kolay üretilmesi sayılabilir. Dayanım/ağırlık oranı, kreyojenik özelliği ve üretilirliği ile alüminyum ve alaşımlarının özellikle havacılık sanayi için önemi büyüktür (Kaufman, 2000; Campbell, 2006).

Ayrıca ticari amaçlı kullanımlarda da alüminyum büyük oranda tercih edilmektedir. Yüksek korozyon direnci, gıda depolama amaçlı uygun olması, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği ile kolay geri dönüşüm gibi özellikleri, tercih edilmesi için neden oluşturmaktadır (Kaufman, 2000; Campbell, 2006).



Şekil 2.1. Uçak yapımında kullanılan malzemeler ve yıllara göre yüzde dağılımı (Campbell, 2006).

Alüminyum, 2,7 gr/cm³'lük düşük yoğunluğu ile çelik (7,83 gr/cm³) ve bakır (8,93 gr/cm³) gibi malzemelerin yaklaşık olarak 1/3'i kadar ağırlıktadır. Saf alüminyum ve alaşımları, ergime sıcaklığına kadar (657 °C) kararlı, yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptir. YMK yapısı birçok kayma düzlemine sahip olduğundan malzemeye şekil vermek oldukça kolaylaşır. Alüminyum içerisinde bakır, magnezyum, silisyum, çinko ve lityum elementleri çözünebilen bazı elementlerdir (ASM Handbook, 1992; Campbell, 2006). Bu elementlerin kullanımıyla alaşımlandırılan Alüminyum, saf formuna göre daha yüksek mukavemet değerlerine çıkabilmektedir.

2.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları üç ana başlık altında incelenir. Isıl işlenebilir dövme alüminyum alaşımları, ısıl işlenemez dövme alüminyum alaşımları ve döküm alüminyum alaşımları. Dövme alüminyum alaşımlara ait sınıflandırma Çizelge 2.1'de verilmiştir. Isıl işlem yapılamayan grup içerisinde, ticari saflıktaki alüminyum (1xxx), alüminyum-magnezyum serisi (3xxx), alüminyum-silisyum serisi (5xxx) vardır. 4xxx serisinde bulunan alaşımlardan bazıları ısıl işlem yapılabilir bazıları ise soğuk şekillendirilebilir (Campbell, 2006).

Çizelge 2.1. Dövme Alüminyum alaşımlarının gruplandırılması (Campbell, 2006).

Seriler	Al İçeriği veya Ana Alaşım Elementi
1xxx	En az %99.00
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Lityum
9xxx	Diğer elementler

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları dayanımları ısıtılma işlemiyle oldukça yüksek seviyelere çıkarılabilir. Bu alaşımlar; 2xxx serisi (Al-Cu ve Al-Cu-Mg), 6xxx serisi (Al-Mg-Si), 7xxx serisi (Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu) ve 8xxx serisidir (Al-Li). 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlar ısıtılma işlemiyle yüksek dayanıma sahip olmalarından dolayı havacılık sektöründe metal malzemeler arasında kullanımı en yaygın olanlarıdır. Al-Cu-Mg alaşımları (2xxx) ile Al-Zn-Mg-Cu alaşımları (7xxx) yüksek dayanımlarının yanında ergitme kaynağı ile birleştirilemezler. Özellikle havacılık endüstrisinde alüminyum alaşımlarının kaynak ile birleştirme uygulamalarına pek rastlanmamaktadır. Fakat son zamanlarda geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı ile ergitme kaynağı yapılamayan 2xxx ve 7xxx serisi alaşımların birleştirilmesi mümkün olmaktadır (Campbell, 2006).

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması yapılırken Alüminyum Topluluğu'na (*Aluminum Association*) ait sınıflandırma sisteminin kullanımı yaygındır. Bu sistemde 4 adet rakam kullanılır. İlk rakam alaşımı oluşturan esas elementi temsil eder. 7xxx serisindeki ilk rakam "7" Çinko alaşımını temsil etmektedir. İkinci rakam, esas alaşımdaki değişkenleri belirtmektedir. Bu değişkenler ise alaşım elementlerinin % 0.15-0.5 arasındaki eklenmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Üçüncü ve dördüncü rakamlar ise alaşıma eklenen özel alaşım elementlerini belirtir (ASM Handbook, 1992; Kaufman, 2000; Campbell, 2006).

2.2. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri

Alüminyum alaşımları istenilen mukavemet değerlerini elde etmeleri için farklı ısıtılma işlemleri uygulanır. Uygulanan ısıtılma işlemlere ait belirlenmiş kodlar vardır. Isıtılma işlemlere ait kodlar Çizelge 2.2'de verilmiştir.

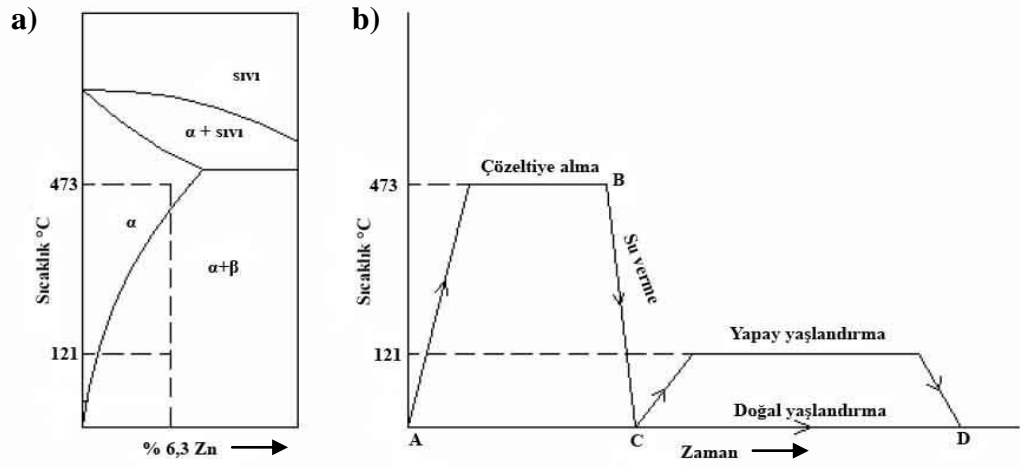
Çizelge 2.2. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemleri türleri (Kaufman, 2000; Campbell, 2006).

Kod	Uygulanan Isıl İşlem
F	Üretildiği gibi
O	Tavllanmış
H	Soğuk Şekillendirilmiş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığında soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığında soğutulmuş, soğuk şekil verilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış
T5	İmalat sıcaklığında soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
T65	Çözeltiye alınmış, su verilmiş, yapay yaşlandırılmış, gerilim giderilmiş
T651	Çözeltiye alınmış, su verilmiş, yapay yaşlandırılmış, % 0.5 - 2 oranında ürünü çekme ile gerilim giderilmiş
T7	Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlanma ile kararlı hale getirilmiş
T8	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş
T10	İmalat sıcaklığında soğutulmuş, soğuk şekil verilmiş ve yapay yaşlandırılmış

2.2.1. Çökeltme sertleşmesi ısı işlemleri

Alüminyum alaşımlarının ve diğer metal alaşımlarının birçoğunun dayanımını artırmak için kullanılan yöntemlerden birisi çökeltme sertleşmesidir. Çökeltme sertleşmesinin amacı, ısı işlemleri gören bir metalin biçim değiştirebilir ana fazı içinde, yoğun ve ince çökeltmiş parçacıklar dağılımı elde etmektir. Çökeltme parçacıkları aykırı yerleşim hareketine engel oluşturarak ısı işlemleri görmüş alaşımın dayanımını artırır (Kınikoğlu, 2001).

Çökeltme sertleşmesi ısı işlemlerinin kademeleri Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



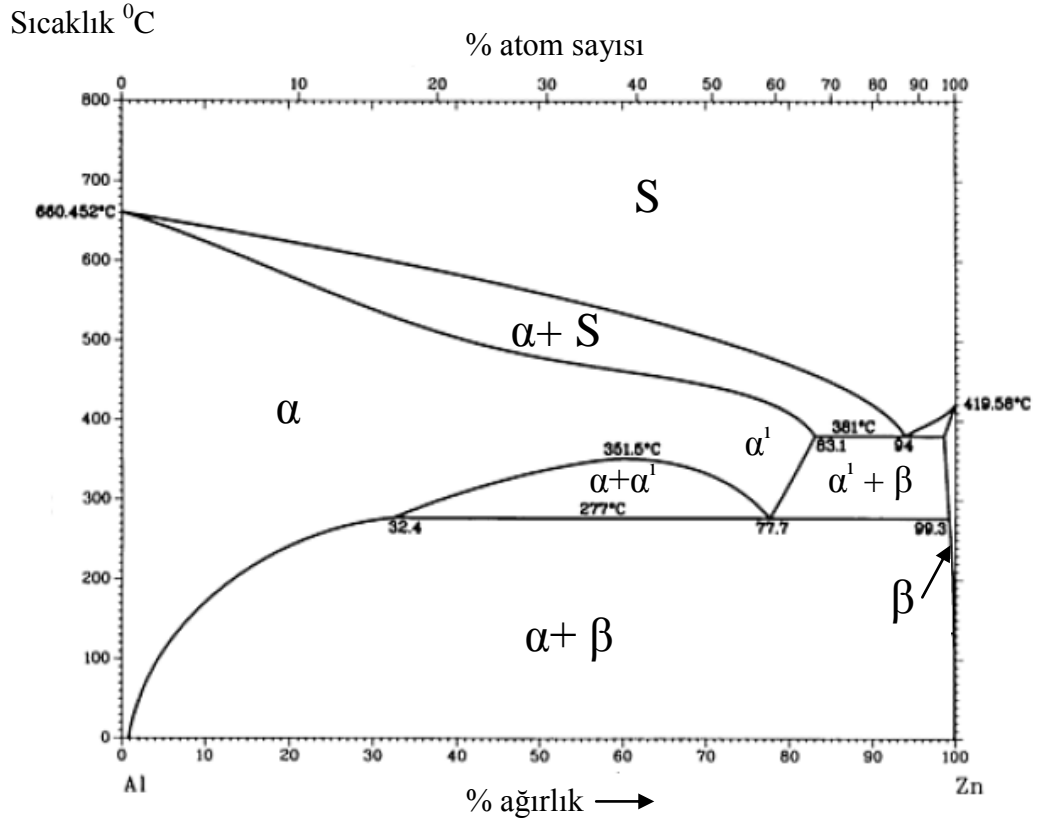
Şekil 2.2. Alüminyum – çinko alaşımına ait: a) denge diyagramı, b) yaşlandırma işleminin kademeleri.

2.2.1.1. Çözeltili alma

Çökeltme sertleşmesi sürecinde ilk basamaktır. Bu işleme bazen çözeltili alma da denir. Dövme veya döküm halindeki numune, katı ile eriyik hâl arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve tekbiçimli bir katı çözelti yapı elde edilinceye kadar bu sıcaklıkta bekletilir (Kınıkoğlu, 2001).

Al 7075 alüminyum alaşımında çözeltili alma sıcaklığı 460-473 °C'dir (Kaya, 2005).

Alüminyum-çinko ikili sistemine ait denge diyagramı Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Al-Zn denge diyagramı (ASM Handbook, 1992).

2.2.1.2. Su verme

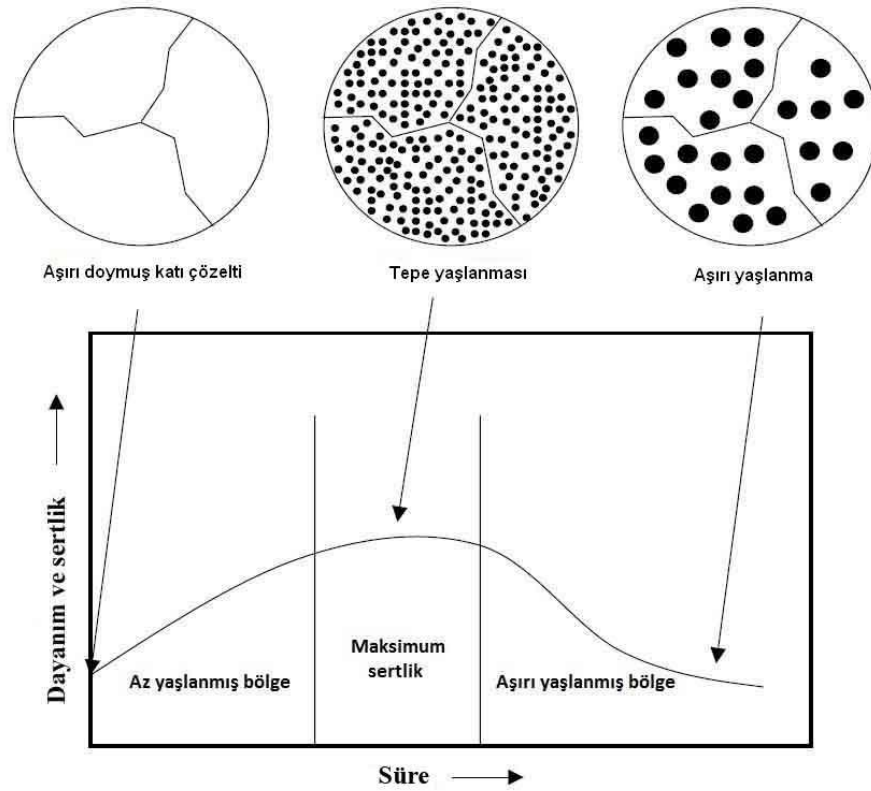
Çökeltme sertleşmesi sürecindeki ikinci basamak su verme işlemidir. Numune hızla daha düşük bir sıcaklığa, genellikle oda sıcaklığına soğutulur ve soğutma ortamı çoğunlukla oda sıcaklığındaki sudur. Su vermeden sonraki alaşım numunesinin yapısı aşırı doymuş katı çözeltilerdir (Kınıkoğlu, 2001).

2.2.1.3. Yapay yaşlandırma

İnce dağılmış çökeltilerin oluşabilmesi için çözeltiler ısı işlemi uygulanmış ve su verilmiş alaşım numunesini yaşlandırmak gereklidir. Çökeltme sertleşmesi sürecinin amacı, alaşım içinde ince ve dağılmış çökelti oluşturulmasıdır. Alaşımdaki ince çökelti, biçim değiştirme sırasında aykırı yerleşimleri ya çökelti kesmek ya da

etrafından dolanmak zorunda bırakarak onların hareketini engeller. Biçim değiştirme sırasında aykırı yerleşimlerin hareketlerinin sınırlanmış olması alaşımın dayanımını artırır (Kınıkoğlu, 2001).

Yaşlandırma işleminde yapıda oluşan çökeltilerin zamanla değişimi Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Çökelti sertleşmesi ısıl işleminde yaşlanma eğrisi (Campbell, 2006).

Yaşlandırma işleminde sıcaklığın artırılması, anafaz içerisinde çözülmüş olan eriyen atomların ayrışma hızını arttıracaktır; çökelti parçacıklarının oluşumu, teşvik edilen yayınma ile hızlanacaktır. Yaşlanma süresinin artırılması ise sıcaklıkla

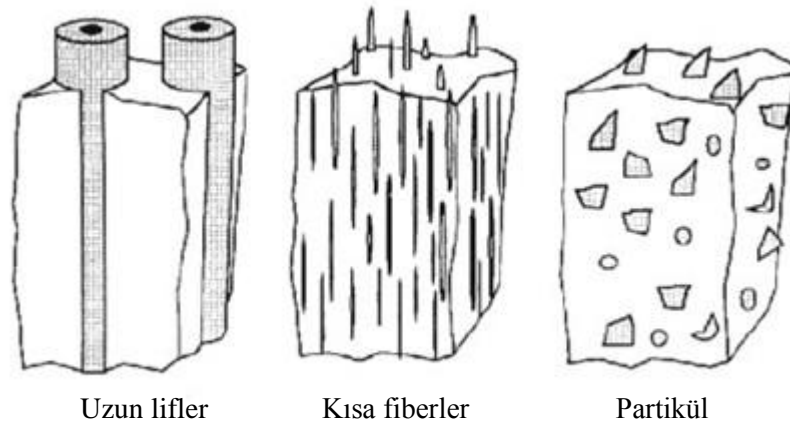
hızlandırılan yayınmanın devamına fırsat vererek çökelti miktarını arttıracaktır (Kaya, 2005).

2.3. Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemeler

Alüminyum esaslı kompozit malzemeler, özellikle adhezif aşınmanın olduğu, otomotiv sektöründe kullanılan silindir bloğu ve piston gibi parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Bu malzemelerin yüzeylerinde tribolojik bir katman olması aşınma dirençlerini yüksek kılmaktadır (Deuis, et al., 1996).

MMK malzemelere ilave edilen yüksek sertlikteki takviye elemanları malzemedeki aşınma direncini yükseltir. Takviye elemanlarındaki grafit yapılar ise sistemde yağlayıcı özellik göstermektedir (Miracle, 2005).

Kompozit yapılar ilave edilen takviye elemanına göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar; uzun liflerden oluşan takviye elemanlı, kısa fiberlerden oluşan takviye elemanlı ve partikül formunda takviye elemanlı kompozit malzemelerdir (Şekil 2.5). Takviye elemanına göre kompozit malzemeler değişik özellikler göstermektedir. Bu özellikler Çizelge 2.3'de özet halinde verilmiştir.



Şekil 2.5. Metal esaslı kompozit malzemelerin geometrik türleri (Kainer, 2006).

Kısa takviye elemanlı metal matrisli kompozit malzemeler, aşınmaya karşı gösterdiği direnç ve maliyetinin uygunluğundan aşınmanın söz konusu olduğu yerlerde tercih edilebilir.

Çizelge 2.3. Değişik takviye elemanlı MMK'lerin özellikleri (Kainer, 2006).

MMK Tipi	Dayanım Özellikleri	Elastisite Modülü	Yüksek Sıcaklıktaki Özellikleri	Aşınma	Maliyet
Kısa takviye elemanlı MMK	**	**	*	***	Düşük
Uzun fiber takviyeli MMK	**	**	**	*	Yüksek
Diğer fiberler	***	***	***	*	Yüksek

Metal matrisli kompozitler için kullanılan takviye elemanı partiküller, sürekli ve süreksiz fiberler ve lifli fiberlerdir. Takviye elemanlarının seçimi kompozit için büyük önem arz ettiğinden, takviye elemanlarının özelliklerinin de çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Fiberler yoğunluk, üretim kolaylığı, ısıl direnç, kimyasal uyumluluk gibi kısıtlara göre seçilmektedir. Özellikle uzay ve uçak sanayinde düşük yoğunluklu, yüksek mukavemet ve modüllü takviye elemanlarının kullanılması kaçınılmazdır (Özdin, 2006). Çizelge 2.4'de değişik takviye elemanlarına ait bazı özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.4. Takviye elemanları ve özellikleri (Kainer, 2006).

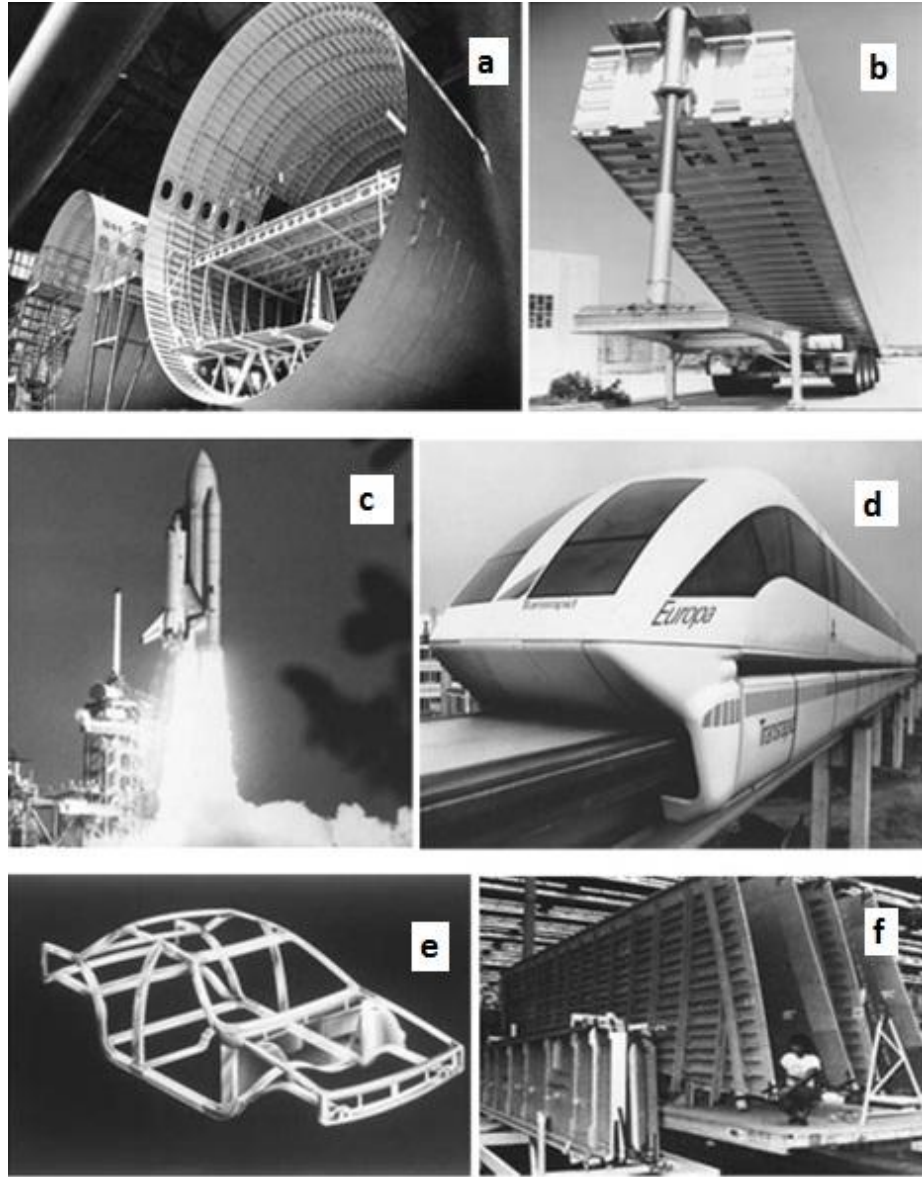
Parça Özellikleri	SiC	Al ₂ O ₃	AlN	TiB ₂	TiC	BN
Kristal Çeşidi	hekz.	hekz.	hekz.	hekz.	kübik	hekz.
Ergime Noktası [°C]	2300	2050	2300	2900	3140	3000
Elastisite Modülü	480	410	350	370	320	90
Yoğunluk [g cm ⁻³]	3.21	3.9	3.25	4.5	4.93	2.25
Isı iletim katsayısı [W m ⁻¹ K ⁻¹]	59	25	10	27	29	25
Termal genişleme katsayısı [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	4.7-5.0	8.3	6.0	7.4	7.4	3.8

Yaygın olarak kullanılan takviye elemanlarından biri olan silisyum karbür fiberlerin oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve rijitliğini koruma özelliği bor fiberlerden daha iyidir. Ergimiş alüminyumun SiC fiberler üzerindeki etkisi de bor fiberlere göre çok düşüktür. Bu nedenle alüminyum matrislerin takviyelendirilmesinde kullanılan bor filamanları SiC ile kaplanır. Bor fiberlere benzer bir yöntemle üretilen silisyum karbürler uzun kristalli yapıya sahip olmalarına rağmen, yüzeyleri bor fiberlerinkinden daha düzgündür. SiC fiberlerin yanında metal matrisli kompozitlerde SiC partiküllerde kullanılır. Bu SiC fiberler $20 - 51 \times 10^{-6}$ m çapında ve 30 m uzunluğunda üretilirler. SiC partiküllerle üretilen kompozitlerin önemli bir avantajı, ekstrüzyon, haddeleme, kalıpta dövme ve presleme gibi plastik şekil verme tekniklerinin, partiküllerde mekanik bir hasar meydana getirmeden uygulanabilmesidir (Şahin, 2000).

2.4. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Alüminyum ve alaşımlarının; korozyon direnci, ısı iletkenliği, elektrik iletkenliği, dayanım/ağırlık oranı, kırılma tokluğu, kreyojenik direnci, işlenebilirliği ve geri dönüştürülebilirliği gibi karakteristik özellikleri birçok uygulama için tercih edilmesine neden olmaktadır (Kaufman, 2000). Son yıllarda özellikle kompozit malzemelerin yaygınlaşması ile alüminyum esaslı kompozit malzemelerin kullanım oranı artmıştır. Alüminyum ve alaşımlarına takviye elemanı ilavesi ile çok daha yüksek dayanımlı malzemeler elde edilebilmektedir (İpek, 2005; Dasgupta, 2005; Mahmoud, 2010).

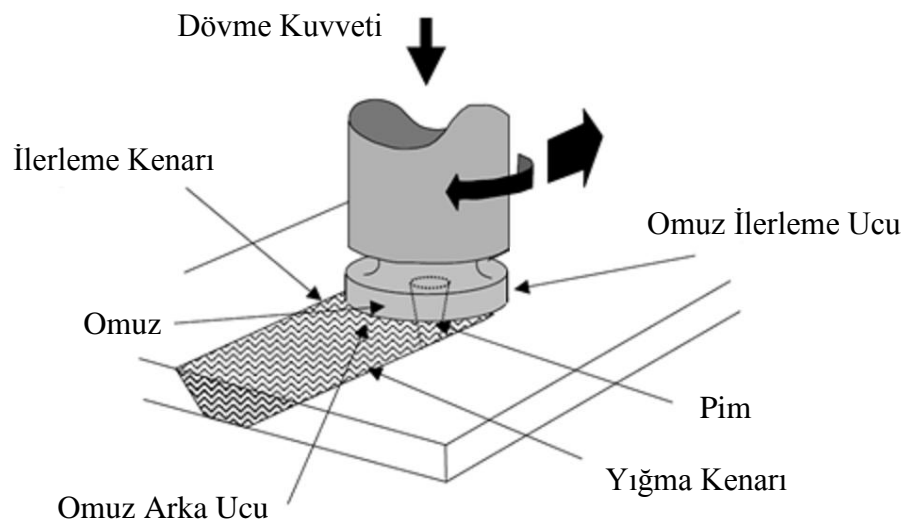
Alüminyum ve alaşımlarının endüstrideki kullanım alanlarına, Şekil 2.6'da bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 2.6. Alüminyum ve alaşımlarının endüstrideki kullanım alanları: a) uçak içyapıları, b) tır damperleri, c) uzay aracı roketleri, d) yüksek hızlı trenler, e) otomotiv konstrüksiyonları, f) uçak konstrüksiyonları (Kaufman, 2000).

3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİ (SKP)

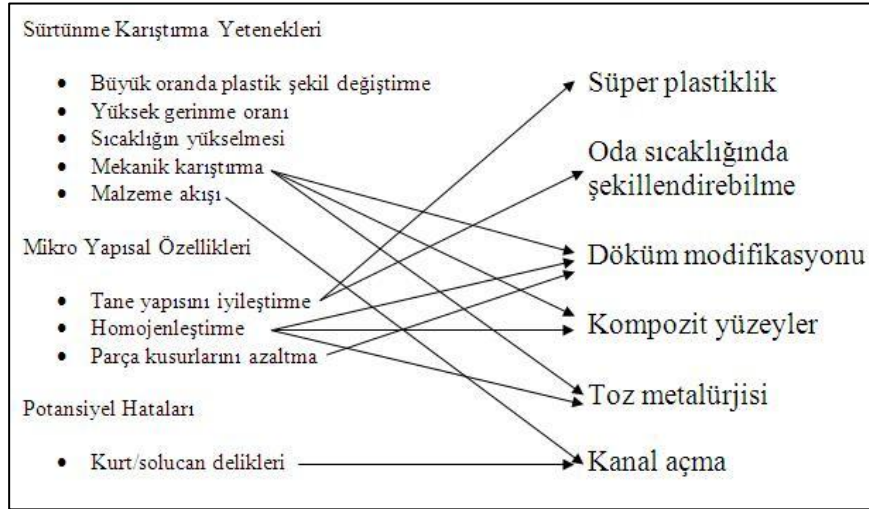
Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) olarak bilinen katı faz kaynak yöntemi, 1991 yılında İngiltere de bulunan Kaynak Enstitüsü tarafından (TWI) bulunmuştur. SKK yöntemi, son yıllarda metal birleştirme prosesi alanında geliştirilmiş en etkili yöntemdir. Yeşil teknoloji olarak da nitelendirilen bu yöntem; enerji verimliliği, çevre dostu olması ve çok yönlü olması ile diğer kaynak yöntemlerine göre tercih sebebi olmaktadır. Diğer konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre çok daha az enerji sarf etmektedir. Herhangi bir koruyucu gaz kullanmaya gerek kalmadığından çevre dostudur. Kaynak işlemi için başka dolgu malzemelerine gerek duyulmamaktadır (Mishra, 2005). Öncelikle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak edilebilmesi üzerinde çalışılmıştır. SKK çalışma prensibi oldukça basittir ve Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir. SKK özel olarak pim ve omuz kısmı tasarlanmış bir takımın, belirlenmiş takım ilerleme hızı ve takım devir sayısı ile birleştirilmek istenen iki levha veya plakanın birleştirilecek kenarları boyunca malzemeye daldırılması ve kenar doğrultusu boyunca ilerlemesidir (Mishra, 2005).



Şekil 3.1. SKK/SKP'nin şematik olarak gösterilmesi (Campbell, 2006).

Takımın iki temel amacı vardır: iş parçasının ısınmasını sağlamak ve malzemenin akışını sağlayarak prosesi gerçekleştirmek. Takım ile iş parçası arasındaki sürtünme ve malzemede meydana gelen plastik deformasyon sonucu iş parçasının ısı artar. Bölgesel ısının artması ile malzeme pim etrafında yumuşamaya başlar ve takımın devir sayısı ile ilerleme hızına bağlı olarak pim önünden pimin arka kısmına doğru malzeme transferi gerçekleşir. Bu duruma, malzeme katı eriyik halde işlem gördüğü için, katı faz kaynak işlemi denilmektedir. SKK prosesi esnasında, yükselen sıcaklık ile malzeme plastik deformasyona uğramakta, sonuç olarak iyi ve eş eksenli yeniden kristalleşmiş taneler oluşmaktadır. SKK prosesi ile taneleri iyileşmiş malzemenin aynı zamanda mekanik özellikleri de iyileşmektedir (Mishra, 2005).

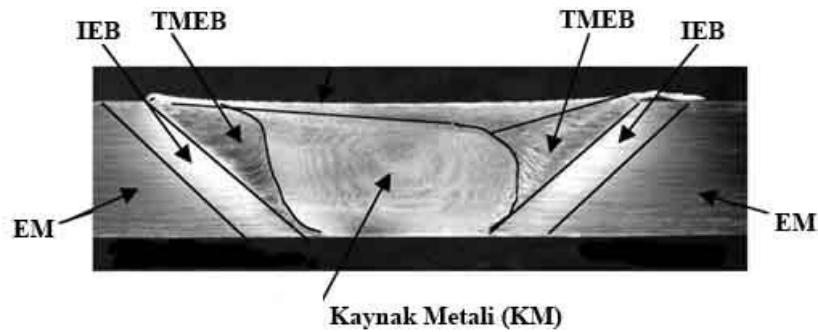
Sürtünme Karıştırma Prosesi (SKP), SKK yönteminden yola çıkarak Mishra ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Prosesin geliştirilme amacı, malzemenin mikro yapısal olarak iyileştirilmesidir. Yöntemin amacı belirli bir devir sayısına sahip takımın malzemeye daldırılması ve bölgesel mikro yapı modifikasyonunun yapılması ile belirli özelliklerin artırılmasıdır. Örneğin, ticari olarak kullanılan 7075 alüminyum alaşımının bu yöntem ile süper plastik özelliklerinin arttığı belirlenmiştir. Bundan başka, yüzeyde kompozit yapı elde edilmesinde, toz metalurjisi ile üretilen alüminyum alaşımlarının homojenleştirilmesinde, metal matrisli kompozit yapıların mikro yapılarının modifikasyonunda ve döküm alüminyum alaşımlarının özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Proses amaçlı kullanım alanları Şekil 3.2’de gösterilmiştir (Mishra and Mahoney, 2007).



Şekil 3.2. Sürtünme Karıştırma Prosesinin kullanım alanları (Mishra and Mahoney, 2007).

3.1. Sürtünme Karıştırma Prosesinde Malzemede Oluşan Bölgeler

Literatürde SKK/SKP ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalarda temel olarak oluşan dört bölgeden bahsedilmiştir (Şekil 3.3). Bunlar sırasıyla; esas metal, ısıdan etkilenmiş bölge, termo mekanik etkilenmiş bölge ve kaynak metalidir. Kaynak metaline bazı yayınlarda, “ karışım bölgesi”, “kaynak dolgusu” gibi tanımlarda yapılmıştır.



Şekil 3.3. SKP uygulanmış malzemede oluşan bölgeler (Mishra and Mahoney, 2007).

3.1.1. Esas metal (EM)

Bu bölge ne ısıdan ne de mekanik deformasyondan etkilenmiştir. Dövme alaşımlarında esas metal bölgesi, tipik hadde yapısındadır ve taneler uzundur (Kaluç ve Taban, 2007).

3.1.2. Isıdan etkilenmiş bölge (IEB)

Bu bölgede mekanik deformasyon yoktur; ancak kaynak sırasında ortaya çıkan ısı, malzeme özelliklerini etkilemektedir. Isıdan etkilenmiş bölge olarak tanımlanır. IEB, optik mikroskopta incelendiğinde, ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde gözlenenin aksine, esas metalden farklı görülmemektedir. Yaşlandırılmış ya da mekanik olarak sertleştirilmiş alaşımlarda bu bölge çok sert değildir. Aşırı yaşlandırma ve tavlama, IEB'nin iç yapısına benzer etkiler yapar (Kaluç ve Taban, 2007).

3.1.3. Termo mekanik etkilenmiş bölge (TMEB)

Bu bölge takımın etkisi ile plastik deformasyona uğramıştır ve kaynak ısısından etkilenir. Kaynak işlemi zaman zaman termo mekanik etkilenmiş bölgede, yerel olarak yeniden kristalleşme ve uzun tanelerin kıvrılmasına neden olmaktadır. Konuyla ilgili yapılan ilk çalışmalarda bu bölge iki alt bölge olarak ele alınmış olmasına karşın son yapılan çalışmalar diğer metallerin ve alaşımların SKK yöntemi ile birleştirilmesinde farklı davranışlar gösterdiklerini bunun da alüminyumdan farklı olduğunu ortaya koymuşlardır. Zira alüminyum yüksek sıcaklıklarda yeniden kristalleşme göstermeden farklı davranışlara sahip olabilmektedir. Diğer metallerde, yeniden kristalleşme bölgesi sınırları görülmez ve tüm TMEB yeniden kristalleşmiş olarak görülür. Saf titanyum, β – titanyum alaşımları, ostenitik paslanmaz çelikler ve bakır gibi metaller ısı etkisi ile faz dönüşümü olmadan gerinmesiz kendi kendilerine yeniden kristalleşme gösterirler. Ferritik yapılu çelikler ve Ti6Al4V gibi $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarında ısı etkili faz dönüşümleri ile mikro yapının anlaşılması çok daha zordur ve IEB/TMEB sınırı çok belirgin değildir (Kaluç ve Taban, 2007).

3.1.4. Kaynak metali (KM)

Kaynak metali, TMEB içinde yeniden kristalleşmiş ince taneli bölgedir. Aslında bu tanımlama tam olarak bilimsel olmamasına karşın bunun yerine konacak bir terim bulunamadığından geniş ölçüde kabul görmüş ve teknik terminolojiye bu şekilde geçmiştir. Şekil 3.3'de de görüleceği üzere takım omzunun hemen altında farklı tane yapısında oluşmuş ve kesin hatları ile görülen TMEB'in bir bölümü olan bölgedir. Bazı araştırmacılar kaynak metalindeki küçük yeniden kristalleşmiş tanelerin, yoğun alt taneleri ve dislokasyonları da içerebileceğini belirtmişlerdir. Yöntem değişkenleri, takım geometrisi, iş parçası sıcaklığı ve malzemenin ısıl iletkenliğine bağlı olarak değişik biçimlerde kaynak yapıları gözlenmektedir (Kaluç ve Taban, 2007).

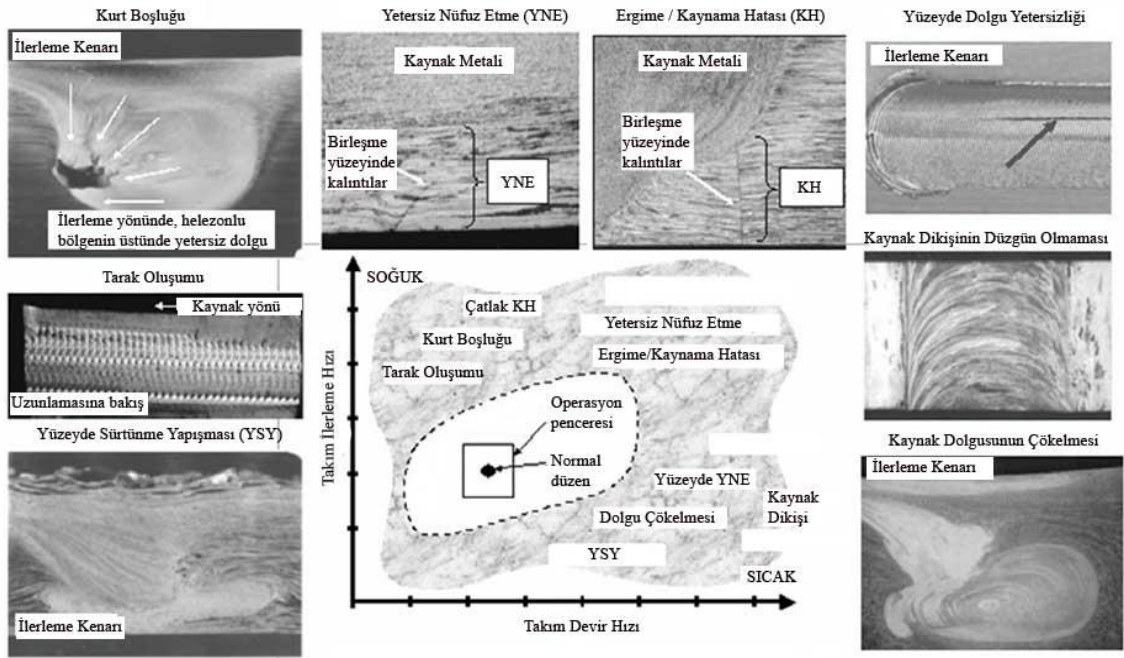
3.2. SKP Yöntemi Sonucunda Oluşabilecek Hata Türleri

SKK yönteminde meydana gelen karakteristik kusurlar, metalin akış formuna ve pim-omuz geometrisi ile ilişkilidir. Şekil 3.4'de SKK yöntemi sonucunda proses parametrelerine göre oluşan hata türlerini göstermektedir.

Oluşan yapıyı 4 bölgeye ayırabiliriz. Yüzeyin hemen altındaki kısım 3. bölge, ilerleme kenarının altındaki kısım 1. bölge, pim ucunun temas ettiği kısım 4. bölge ve yığılma kenarının altındaki kısım ise 2. bölge'dir.

Sıcak proses koşulları altında, orantısız metal akış formu ve kaynak karışım bölgesinde metal çökmesi oluşması gözlenir. 3. bölgeden ilerleme kenarının altında bulunan bölge 1. bölgeye aşırı miktarda metal akışı sağlanır. Bu durumda herhangi bir boşluk oluşmasa da bu bölgelerde (TMEB, IEB) ısının artması ile mekanik özelliklerin düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca aşırı yüksek proses sıcaklıklarında ise kök-akışı (root-flow) meydana gelmektedir. Bunun sonucunda fazla miktarda ergimiş metal 4. bölgeye iletilecek ve pim-omuz ucuna aşırı miktarda ergimiş metal nüfuz edecektir. Bu durum ile ilintili olarak malzemenin bağlantı mukavemeti ve yorulma ömründe düşüş meydana

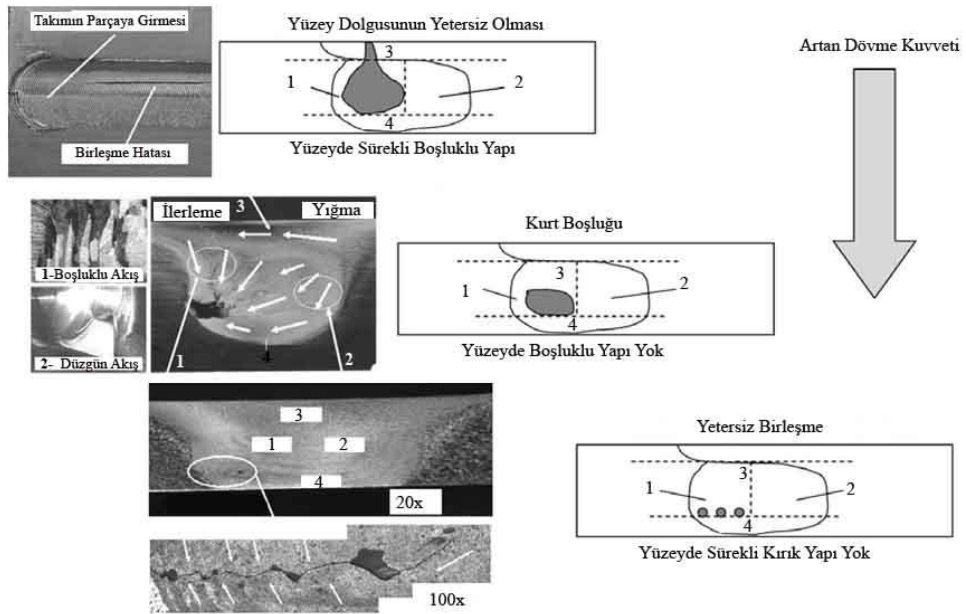
gelecektir. Çok yüksek proses sıcaklıklarında, yüzeydeki 3. bölgede ergimiş metal ile pim-omuz arasında adhezif etki görülür, yüzeyde sürtünme yapışması ve yırtılmalar oluşabilir. Yüksek sıcaklıklarda, 3. bölgeden pim-omuz alt kısmına doğru katı eriyik durumundaki metal akışı gözlenir. Bu durumda katı eriyik haldeki metalin bu akış yolunu izlemesi ile akışta orantısız bir durum oluşur ve diğer bölgeleri de etkiler, ayrıca dövme basıncının da düşmesine neden olur (Mishra and Mahoney, 2007).



Şekil 3.4. Proses parametrelerine bağlı oluşan hata türleri (Mishra and Mahoney, 2007).

Soğuk proses sıcaklığı koşulları altında, solucan deliği hatası meydana gelebilir. Bu durum ilerleme kenarının altındaki 1. bölgede dolgu metalinin yetersiz olmasından kaynaklanan bir hatadır. Bu hatanın giderilmesi, dövme kuvvetinin artmasına bağlıdır. Çok düşük dövme kuvvetlerinde, yüzeyin tamamen kapanmaması, süreksizliğin oluşması ve aralıklı biçimde 1. ile 4. bölgelerin ara yüzeyinde ufak boşlukların oluşması gibi hatalar görülür.

Dövme kuvveti ve pim-takım omzu geometrisi tasarımı, prosesin sınır koşullarını, sistem kısıtlarını ve kaynak bölgesindeki metal akışını etkilediği için önemli parametrelerdir. Dövme kuvvetini kontrol altında tutarak yapılan çalışmalarda yapıda meydana gelen boşlukların, dövme kuvveti ile ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 3.5). Bu hatalar; yüzeyde oluşan süreksizlikler, solucan boşlukları ve düzensiz aralıklarla oluşan küçük boşluklardır (Mishra and Mahoney, 2007).



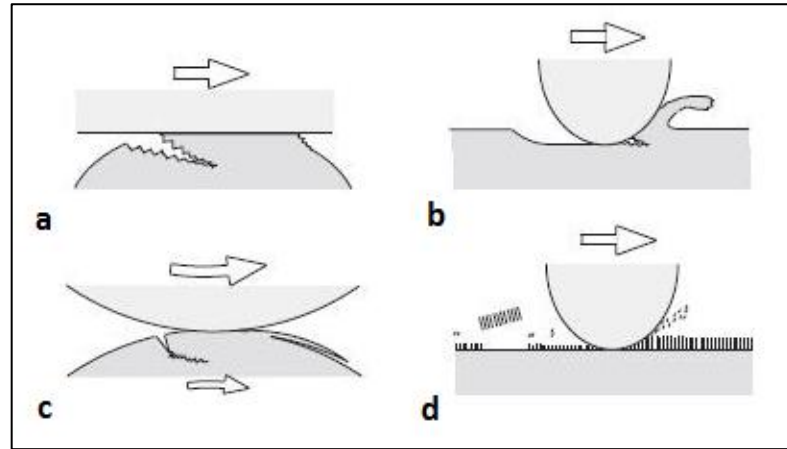
Şekil 3.5. Dövme kuvvetinin yapıdaki hatalara etkisi (Mishra and Mahoney, 2007).

4. AŞINMA

Aşınma, birbiri ile temas halinde bulunan yüzeylerden malzeme kaybının oluşmasıdır. Birçok makine parçasının ömrünün ve performansının azalması, aşınmaya bağlı bir problemdir. Aşınma bu bakımdan endüstriyel alanda büyük bir sorun teşkil etmektedir.

4.1. Aşınma Mekanizmaları

Kabul edilmiş dört çeşit aşınma mekanizması mevcuttur ve detaylı açıklamaları alt bölümlerde verilmiştir (Şekil 4.1).

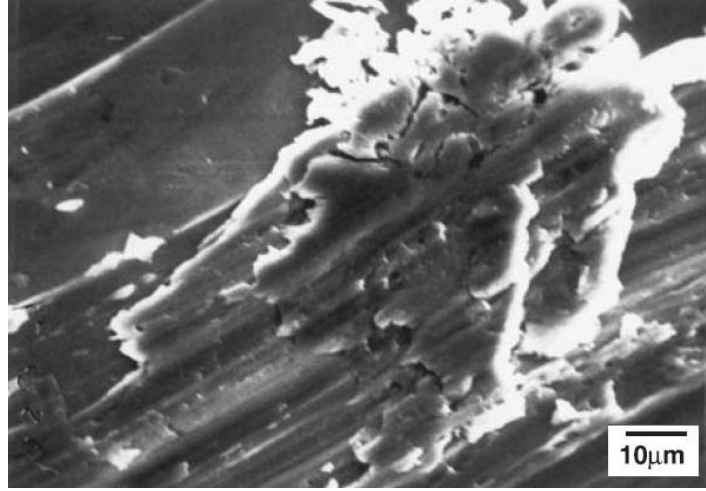


Şekil 4.1. Aşınma türleri: a) adhezif aşınma, b) abrazif aşınma, c) yorulma aşınması, d) korozyon aşınması (Bhushan, 2000).

4.1.1. Adhezif aşınma

Birbirine göre izafi hareket eden iki yüzeyin temas halinde olması ve adhezif yapışma direnci oluşturacak kadar plastik teması sağlaması durumunda temas yüzeyinde

büyük bir plastik deformasyon meydana gelir. Temas yüzeyindeki büyük plastik deformasyon sonucunda, çatlak oluşumu başlar ve büyür. Çatlak temas yüzeyine ulaştığı zaman aşınma parçacığı oluşur ve adhezif transfer tamamlanır (Şekil 4.1a). Bu tür aşınma, temas yüzeyinde yeteri kadar yapışma meydana getirdiğinden adhezif aşınma adını almıştır (Bhushan, 2000).



Şekil 4.2. Adhezif aşınma bölgesinden bir görüntü (Bhushan, 2000).

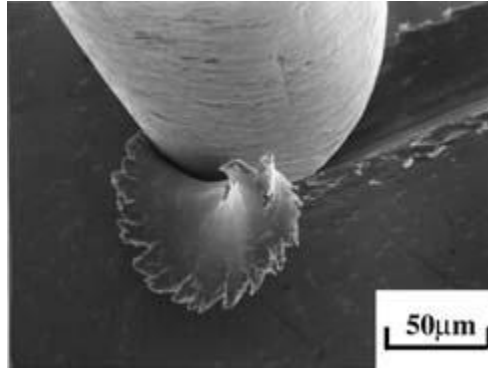
Adhezif aşınma sonucunda yüzeylerden kopan parçalar hareket halindeki yüzeyler arasında kalır ve katman oluştururlar (Şekil 4.2).

Temas yüzeylerindeki pürüzlülükler birbirine temas eder ve temas alanını artırır. Pürüzlülüklerin temas ettiği bu noktalarda fiziksel ya da kimyasal yolla bağ kurularak yapışma meydana gelir. İzafi hareket eden iki yüzeyde temas yerlerinden kopmalar meydana gelir. Yatak sarması, adhezif aşınmaya örnek verilebilir (Can, 2006).

4.1.2. Abrazif aşınma

Birbirine göre eğimli veya kıvrımlı temas halinde kenetlenmiş iki yüzeyin temas ara yüzeyinde hareketleri esnasında çizik meydana gelecektir. Çizik oluşması sonucunda yüzeyden bir miktar malzeme kaybı ve diğer yüzeye göre mekanik özellikleri zayıf olan yüzeyde kanallar meydana gelecektir (Şekil 4.1b). Bu tür aşınma mekanizmasına abrazif aşınma adı verilir (Bhushan, 2000).

Kırılma tokluğu yüksek olan yumuşak metaller, hatta seramikler kayma esnasında sert parçacıklar tarafından plastik akışa uğratılırlar. Kırılma tokluğu düşük olan gevrek malzemelerde, yüzey pürüzlülükleri kırılarak madde kaybına uğrarlar (Can, 2006).



Şekil 4.3. Abrazif aşınma (Bhushan, 2000).

Metal şekillendirmede yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemleri esasen abrazif aşınmaya dayanmaktadır. Şekil 4.3’de gösterildiği gibi sert parçacıkların yumuşak metale batması da abrazif aşınmaya neden olabilmektedir (Can, 2006).

4.1.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, titreşim zorlamalarında yorulma kırılması hasarı şeklinde ortaya çıkar. Şekil 4.1c'de şematik olarak gösterilmiştir. Yorulma aşınması değişken, tekrarlı yüklemeler sonucunda meydana gelir. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Sonuçta, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu da, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine neden olur (Buytoz, 2004).

4.1.4. Korozyon aşınması

Kimyasal veya korozyon aşınma, kayma işleminin korozif ortamda olması durumunda meydana gelir. Hava, içinde bulunan oksijen korozif etki oluşturur. Oksijen metal yüzeyinde oksit tabakası oluşturur ve temas eden parçalarla bu oksit tabakası aşınır (Şekil 4.1d). Ortamdaki oksijenin sürekli bulunmasından dolayı bu işlem de devamlı meydana gelir (Can, 2006).

5. LİTERATÜR TARAMASI

Bilimsel veri tabanları incelendiğinde, Alüminyum ve alaşımlarına SKK/SKP yöntemi uygulanmış birçok çalışma olduğu görülmektedir. Kaynak ve işlem parametrelerine bağlı olarak mikro yapısal ve mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Proses amaçlı yapılan çalışmalarda, genellikle incelenen malzeme yüzeyinde kompozit bir yapı elde etmek ve bu yapının aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Farklı malzemelerde ve farklı takviye elemanları kullanılarak işlem parametrelerine bağlı yapısal değişimlerin incelendiği bilimsel çalışmalar mevcuttur.

Ma et al. (1996) araştırmalarında, SiC partikül takviyeli 2024 alüminyum alaşımı kompozitlerin adhezif aşınma davranışlarını incelemiştir. Matris olarak ortalama büyüklüğü 60 µm olan 2024 alüminyum alaşımı tozları ve takviye elemanı olarak ortalama büyüklükleri 3.5, 10 ve 20 µm olan α-SiC partikülleri kullanılmıştır. Partikül takviyeli kompozitler hacimce % 0, 15, 20 ve 30 oranlarında SiC_p ile takviye edilmiş ve toz metalürjisi tekniği kullanılarak üretilmiştir. Yapılan sertlik deneyleri sonuçları; kompozitlerin sertliğinin, SiC partiküllerinin hacim oranının artmasıyla arttığını, ancak SiC partikül boyutlarının artmasıyla azaldığını göstermiştir. Alüminyum alaşımının aşınma özellikleri, SiC partiküllerinin eklenmesiyle belirli bir şekilde iyileşmiş ve kompozitlerin aşınma direnci yüksek yük altında takviyesiz alaşımının yaklaşık iki katı olmuştur. SiC partiküllerinin malzemedeki hacimsel oranının artmasıyla, kompozitlerin aşınma direncide artmıştır.

Şahin (1996), yaptığı çalışmada, silisyum karbürle kaplı sürekli bor elyaflardan oluşan alüminyum esaslı kompozit malzemeleri sıkıştırılmalı sıvı metal emdirilmesi tekniği ile üretmiş ve mikro yapıları tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemiştir. Bu kompozitler ve matrisin oda sıcaklığında çekme deneyleri yapılmıştır. Elyaf eksen doğrultusunda tek yönde takviyeli 0° ve iki yönde takviyeli 0/90° olarak

test edilmiştir. Çekme deney sonrası kırılma yüzeyleri de SEM altında incelenmiştir. Boylamasına takviye edilen bu elyafların, matrisin çekme dayanımını elyaf içeriğine bağlı olarak önemli oranda artırdığını göstermiştir. Tek yönde takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, iki yönde takviyeli kompozitlerden daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Keza, matristen elyafa yük transferi sağladığı için, elyaf ve matris arasında yeterince bağ kuvvetinin olduğu gözlenmiştir.

Mishra et al. (2003), SKP yöntemini kullanarak Al 5083 alaşımının yüzeyinde SiC partiküllerini kullanarak kompozit bir yapı elde etmeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları çalışmada oluşan yeni yapının katman kalınlığını 50 ile 200 μm aralığında ölçmüşlerdir. SiC partiküllerinin homojen dağıldığını ve oluşan yeni yapı ile esas malzeme arasındaki bölgenin mükemmel bağlandığını belirtmişlerdir. Homojen partikül dağılımı gösteren bölgelerde esas metale göre yaklaşık 2 kat sertlik artışı olduğunu tespit etmişlerdir.

Lim et al. (2003) çalışmalarında, Mg temelli ve SiC partikülleri ile takviye edilmiş kompozitlerin aşınma davranışını incelemiştir. Deneyler pim-disk olmak üzere 10 ve 30 N yükleri altında 0,2-5 m/sn kayma hızlarında sertleştirilmiş takım çeliğine karşı yapılmıştır. Kompozitler düşük yük altında biraz iyi aşınma direnci göstermiş fakat SiC partiküllerinin aşınma direnci üzerine etkisi artan yükte olmamıştır. Aşınmış bölgelerin SEM analizleri sonucunda, yapıda; abrazyon etkiler, oksitlenme, tabakalaşma ve adhezif etkiler görülmüştür.

İpek (2005), dökümle üretilmiş, ağırlıkça %10,15 ve 20 B₄C partiküllü (4147Al/B₄C) kompozitleri ve ağırlıkça %20 SiC partiküllü (Al/SiC) kompozitleri kuru deney şartları altında araştırmış ve aşınma davranışlarını kıyaslamıştır. Al matris alaşımının aynı aşınma şartlarında şiddetli abrazyon-adhezif aşınmada iken Al/B₄C kompozitlerinde hafif oranlı adhezif aşınma gözlenmiştir. B₄C partikülünün matris tarafından ıslanabilirliğinin kompozitin aşınma direnci ve aşınma mekanizmasıyla doğrudan ilişkili olduğu gözlenmiştir. Al/B₄C ile Al/SiC 'ün aşınma dirençleri kıyaslandığında Al/SiC 'ün aşınma direncinin daha yüksek olduğu; aynı aşınma şartlarında Al/B₄C normal aşınma durumunda iken Al/SiC 'ün aşınmasında sadece hafif adhezif aşınma izi görüldüğü rapor edilmiştir.

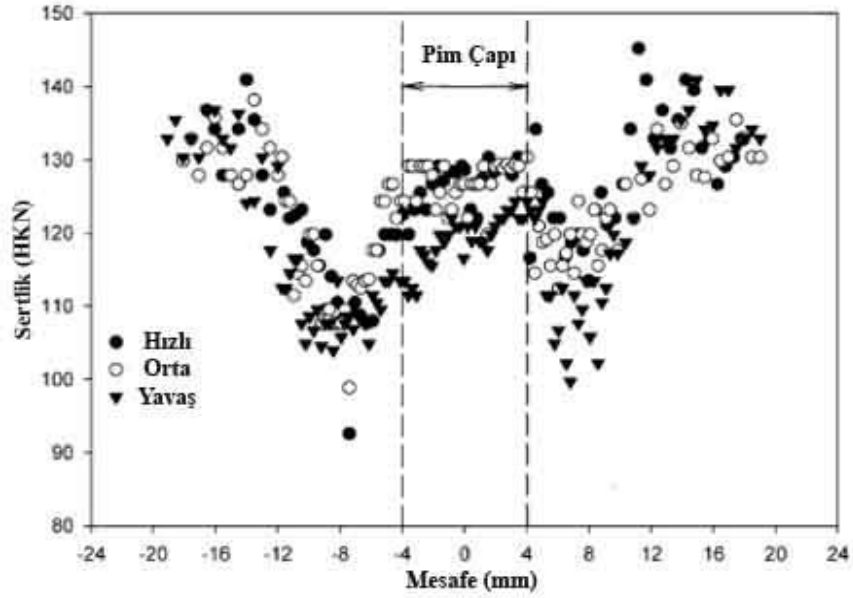
Mahmoud et al. (2010) yaptıkları çalışmada, alüminyum esaslı bir malzemenin yüzeyine açılan kanallara, SiC ve Al₂O₃ partikülleri farklı oranlarda konularak, sabit takım ilerleme hızı ve takım devir sayısı kullanılarak sürtünme karıştırma prosesini uygulamışlardır. Partikül cinsi ve partiküllerin takviye edildiği hacimsel orana bağlı olarak aşınma davranışını incelemişler, aşınma deneylerini 5 ve 10 N yük altında gerçekleştirmişlerdir. Yapılan incelemelerin ardından, değişik partiküllerin kullanıldığı ve farklı oranlarda takviye edildiği proseslerde, partiküllerin homojen olarak dağıldığını gözlemlemişlerdir. 5 N yük kullanılan aşınma deneyleri sonucunda, %80 SiC + %20 Al₂O₃ oranlarında takviye elemanı kullanılmasının en iyi aşınma davranışını ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. 10 N yük kullanıldığında ise partikül türünün aşınma davranışlarını çok etkilemediği ve takviyesiz malzemenin aşınma davranışının takviyeli malzemenin aşınma davranışına çok yakın değerlerde çıktığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca partikül ilavesi ile genel sertliğin arttığı ve sürtünme katsayısı değerinin düştüğünü belirtmişlerdir.

Zahmatkesh et al. (2010), Al2024-T4 alaşımını SKP yöntemini kullanarak malzemenin tribolojik özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Sabit takım devir sayısı 800 dv/dk ve takım ilerleme hızı 25 mm/dk olmak üzere proses parametrelerini kullanmışlardır. Mikro yapısal incelemelerde tane boyutlarının daha homojen ve iyi olduğunu saptamışlardır. Sertlik testleri sonucunda SKP uygulanmış malzemenin karışım bölgesindeki sertlik değerlerinin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Aşınma deneylerini kuru ortamda, 10 N yük kullanarak, aşındırıcı olarak çapı 5 mm olan AISI 52100 çelik bilye ile gerçekleştirmişlerdir. Aşınma deneyleri sonucunda ise SKP uygulanmış malzemenin uygulanmamış malzemeye oranla aşınma davranışının daha iyi olduğunu ve sürtünme katsayısının %30 azaldığını belirtmişlerdir.

Literatür incelemelerinde, SKK/SKP uygulanmış malzemelerin proses sonrasındaki sertlik dağılımları ayrıca araştırılmıştır.

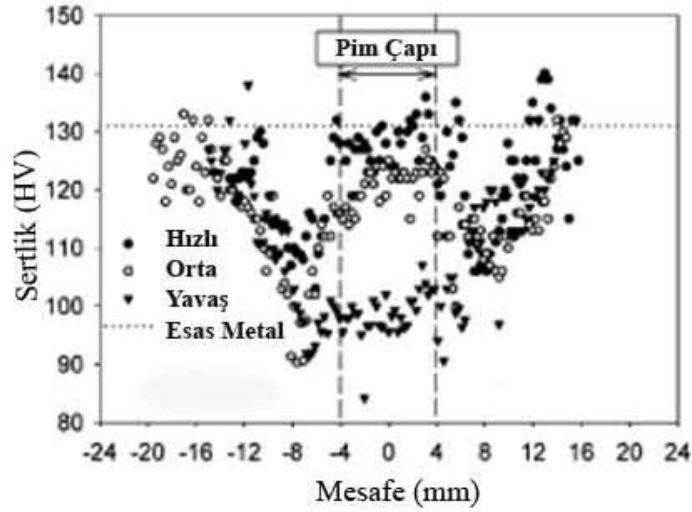
Yang et al. (2004), 2024 – T351 ve 2524 – T351 alüminyum alaşımlarına SKK yöntemini uygulamışlardır. 2024 – T351 ile 2524 – T351 alaşımlarının her ikisinde de

SKK prosesi sonrasında, kaynak yapılan bölgelerde malzemenin ilk sertlik değerine göre düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Sertlik dağılımı incelendiğinde (Şekil 5.1), W harfine benzer bir şekil ortaya çıkmıştır. Kaynak işleminin gerçekleştiği, omuz çapının genişliği kadar bir bölgede sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. Sertlik düşüşünün nedeni ise takım dönmesi ile ilerlemesi esnasında sürtünmeden dolayı oluşan ısı girdisi etkisiyle olduğu belirtilmektedir.



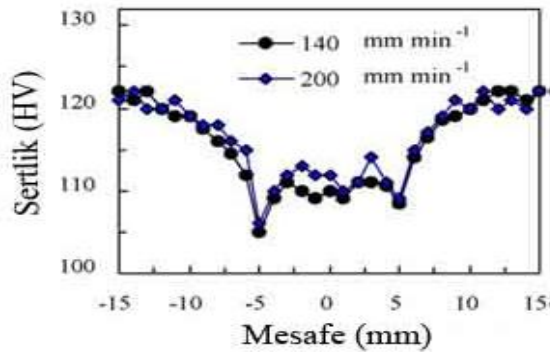
Şekil 5.1. SKK uygulanmış 2024 - T351 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Yang et al., 2004).

Yang et al. (2004), 2524 – T351 alüminyum alaşımına da SKK yöntemini uygulamışlardır. 2024 – T351 alaşımında çıkan sonuca benzer bir sonuç elde etmişlerdir. Takım ilerleme hızını değiştirerek, farklı hızlardaki SKK yöntemini uygulamışlar ve sertlik dağılımlarını incelemişlerdir. Elde edilen sertlik değerleri esas malzemenin sertlik değerine göre düşük çıkmıştır (Şekil 5.2). Takım ilerleme hızı azaldıkça enerji girdisinin artması ile elde edilen sertlik değerleri, takım ilerleme hızının yüksek olduğu durumlara göre düşük çıkmaktadır.



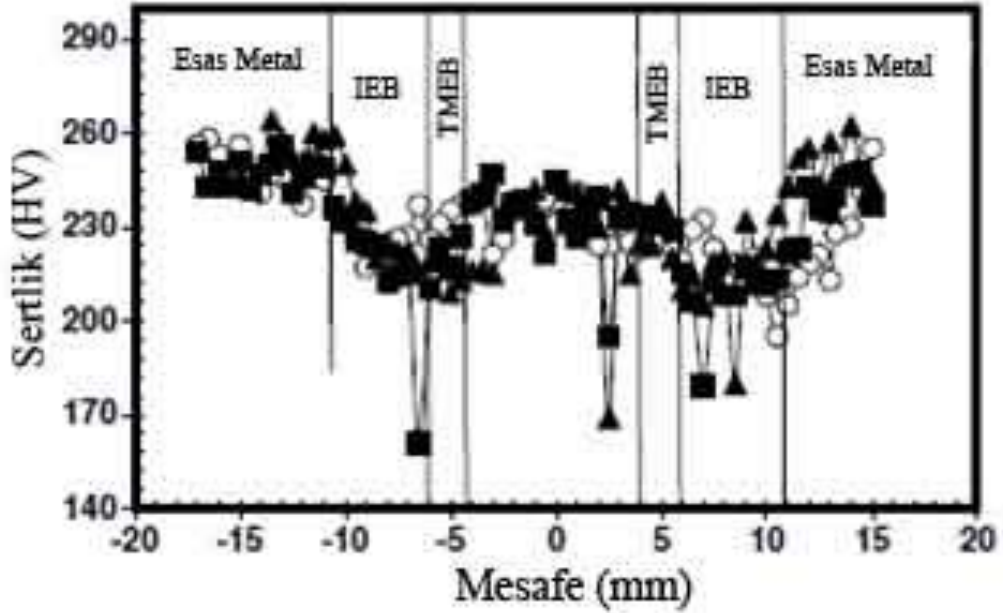
Şekil 5.2. SKK uygulanmış 2524 - T351 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Yang et al., 2004).

Chen et al. (2006), 2219 – T6 alüminyum alaşımına SKK yöntemini uygulamışlardır. Yöntem sonrasında sertlik dağılımı incelendiğinde (Şekil 5.3), kaynağın uygulandığı bölgede sertlik düşüşü görülmektedir. Farklı takım ilerleme hızları ile inceleme yapılmış ve 200 mm/dk takım ilerleme hızı ile yapılan yöntemdeki sertlik değerleri 140 mm/dk takım ilerleme hızı ile yapılan yöntemden daha yüksek değerlerde çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.3. SKK uygulanmış 2219 - T6 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Chen et al., 2006).

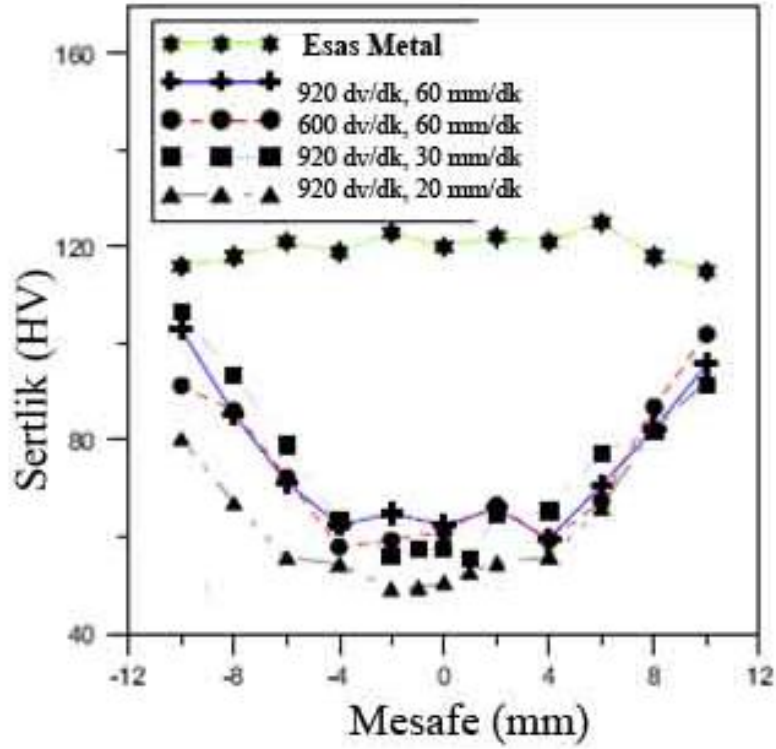
Uzun (2007), yaptığı bir çalışmada, toz metalurjisi ile üretilmiş 2124/SiC alaşımında SKK yöntemini uygulamıştır. SKK yönteminde kullanılan takımın omuz çapı 18 mm'dir. Sertlik dağılımı incelendiğinde, yaklaşık olarak takım omuz çapı uzunluğundaki bir bölgede sertlik düşüşünün olduğu görülmektedir. Bunun nedeni takım omzu ile malzeme arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısının açığa çıkmasıdır. Açığa çıkan ısı ile malzemenin içyapısındaki meydana gelen değişiklikler sonucunda sertlik düşüşü görülmektedir.



Şekil 5.4. SKP uygulanmış 2124/SiC alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Uzun, 2007).

Hwang et al. (2008), yaptıkları çalışmada 6061 – T6 alüminyum alaşımından plakaları SKK yöntemini kullanarak birleştirmişlerdir. Birleştirme işleminden sonra, SKK uygulanmış bölgenin sertlik dağılımları incelendiğinde yöntem sonrasında malzemenin sertliğinin düştüğü görülmektedir (Şekil 5.5). Yaptıkları çalışmada kullandıkları takım omuz çapı 12 mm'dir. Sertlik dağılımı grafiği incelendiğinde, kaynak bölgesinden başlayıp takım omuz çevresine yakın bir bölgede sertlik düşüşü

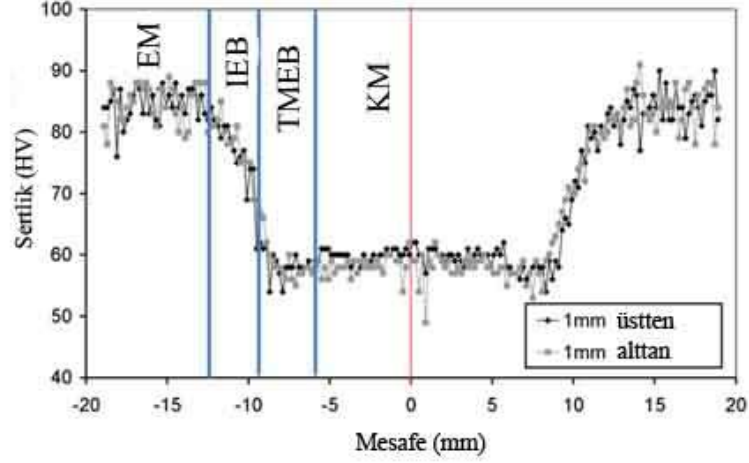
görülmektedir. Takım omuz çapı uzunluğundan, merkezden dışarıya doğru uzaklaştıkça sertlik değerlerinin arttığı bunun nedeninin ise bu bölgelerde ısı etkisinin azalmasıdır.



Şekil 5.5. SKK uygulanmış 6061 - T6 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Hwang et al., 2008).

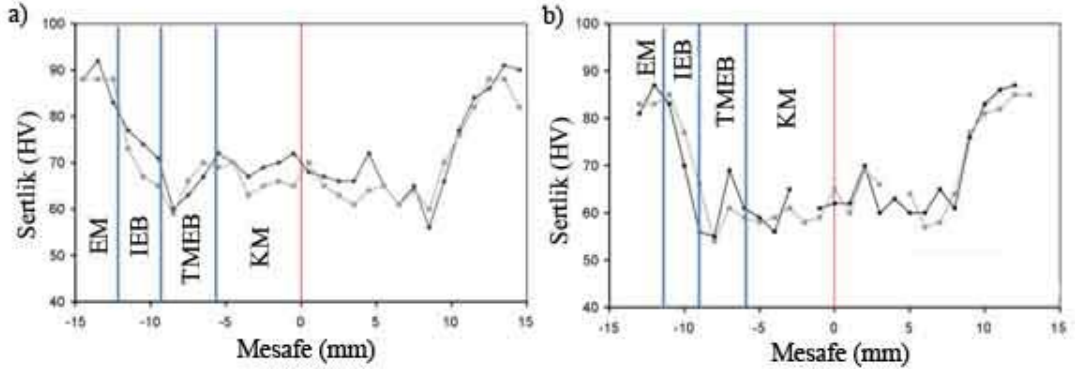
Chen et al. (2009), yaptıkları çalışmada 6063 – T5 alüminyum alaşımını kullanarak SKK/SKP uygulamışlardır. Kullandıkları malzemede hem SKK yöntemini kullanarak malzemenin kaynak bölgesini hemde SKP'yi kullanarak seramik partikül ilavesi ile elde ettikleri kompozit yapıyı incelemişlerdir. SKK ve SKP'de kullandıkları takım aynıdır ve takım omuz çapı 12.7 mm'dir. SKK uygulanmış alüminyum alaşımının sertlik dağılımı Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Dağılım incelendiğinde sertlik düşüşünün yaklaşık olarak takım omuz çapı genişliğinde olduğu görülmektedir. SKK yönteminin uygulandığı malzemenin merkezinden itibaren bakıldığında takım omuz yarıçapı genişliğinden daha büyük kısımlara doğru gidildikçe sertlik değerinin arttığı

görülmektedir. Bunun nedeni ısı etkisinin takım omzunun alt kısmı ile omuz etrafını etkilemesidir. Karışım bölgesindeki sertlik dağılımı incelendiğinde hemen hemen aynı sertlik değerlerinden oluşan düzlemsel bir bölge görülmektedir.



Şekil 5.6. SKK uygulanmış 6063 – T5 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımı (Chen et al., 2009)

Chen et al. (2009) yılındaki çalışmalarında ayrıca 6063 – T5 alüminyum alaşımında SKP uygulayarak B₄C partikülleri ilavesi ile kompozit bir yüzey elde etmek istemişlerdir. Seramik partikül ilavesi ile yaptıkları çalışmaları sonucunda yapıdaki sertlik dağılımını incelemişlerdir (Şekil 5.7a ve Şekil 5.7b). Partikül ilavesi ile sertlik dağılımı incelendiğinde, karışım bölgesindeki sertlik değerleri esas malzemede sertlik değerinden düşük çıktığı görülmektedir. Seramik partikül ilavesine rağmen karışım bölgesinde sertlik düşüşü görülmektedir. Partikül ilavesiz yöntem ile partikül ilaveli yöntem kıyaslandığı takdirde; kaynak bölgesindeki sertlik dağılımları incelenirse, partikül ilavesiz yöntemdeki dağılım partikül ilaveli yöntemdeki dağılıma göre daha lineer bir gidiş göstermektedir. Partikül ilavesi ile kaynak bölgesindeki sertlikler partiküllerin bulunduğu bölgelerde yüksek çıkmıştır. Bu sebeple partikül ilavesi ile kaynak bölgesindeki sertlik dağılımında inişli çıkışlı bir eğri görülmektedir.

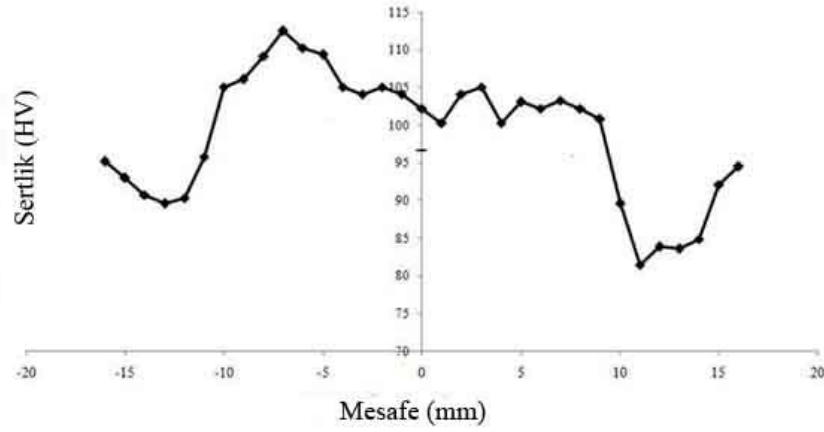


Şekil 5.7. SKP uygulanmış 6063 – T5 alüminyum alaşımının: a) % 6 B₄C ilaveli, b) % 10.5 B₄C ilaveli durumlarının sertlik dağılımları (Chen et al., 2009).

Şekil 5.7 a’da % 6 B₄C partikülleri ilavesi ile SKP uygulanmış, Şekil 5.7b’de ise % 10.5 B₄C partikülleri ilavesi ile SKP uygulanmış 6063 – T5 alüminyum alaşımına ait sertlik dağılımları görülmektedir. İlave edilen partikül oranı artmasına rağmen aynı sertlik değerleri her iki şekilden de görülmektedir.

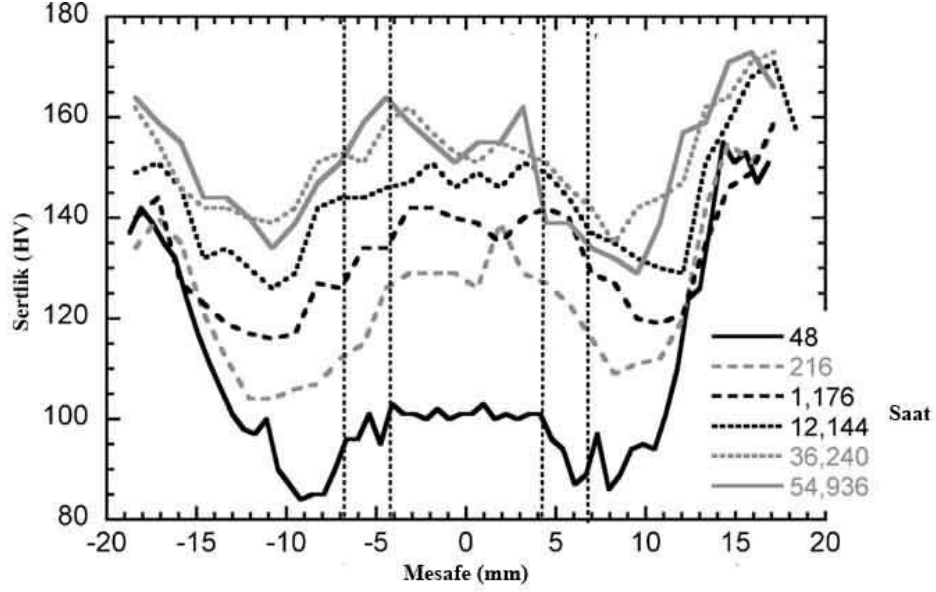
Zahmatkesh et al. (2010), yılında yaptıkları çalışmada 2024 – T4 alüminyum alaşımını SKP yöntemi ile malzemenin yüzey özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. SKP uygulanmış malzemenin sertlik dağılımları incelendiğinde (Şekil 5.8), takım omuz çapının malzemede mekanik deformasyon meydana getirdiği bölgede sertlik değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Yapılan çalışmada, çalışmayı yapan kişilerin belirttiğine göre işlem görmemiş malzemenin sertlik değeri ~ 95 HV değerinde iken proses sonrasındaki sertlik değeri ise ~110 HV değerlerine çıktığı belirtilmiştir. Sertlik dağılımının verildiği şekil incelendiğinde, takım omuz çapı olan 25 mm’lik bölgeye denk gelen kısımda sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. 25 mm’den geniş bölgeye doğru gittikçe sertlik değerinin arttığı görülmektedir. Yukarıda verilen diğer yayınlara ait sertlik dağılımları incelendiğinde, verilen sertlik dağılımları omuz çapından oldukça büyük bir bölgeyi göstermektedir. Bu çalışmada ise omuz çapından bir miktar daha uzaklığa kadar olan kısım verilmiş, daha geniş bir bölge verilmemiştir. Bu çalışmada kullanılan 2024- T4 alüminyum alaşımının sertlik değeri ASM

Handbook'tan incelendiğinde ise yaklaşık 125 HV değerinde olduğu görülmektedir. Fakat araştırmadaki yazarların belirttiğine göre esas malzemenin sertlik değerinin yaklaşık 95 HV olduğudur. Diğer araştırmalardaki sertlik dağılımlarında, ısıl işlemlili ve ısıl işlemsiz malzemeler ile seramik partikül ilaveli ve ilavesiz malzemelerin hepsinde karışım bölgesindeki genel sertlik değerlerinin esas malzemeye göre düşük olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.8. SKP uygulanmış 2024 - T4 alüminyum malzemesine ait sertlik dağılımı (Zahmatkesh et al., 2010).

Fuller et al. (2010), yaptıkları çalışmada 7050 – T7651 ve 7075 – T651 alüminyum alaşımlarına SKK yöntemini uygulamışlar ve ardından belirli sürelerde doğal yaşlandırarak malzemelerin dayanımlarını ölçmüşlerdir. SKK uygulanmış 7075 – T651 alüminyum alaşımının yaşlandırma süresine bağlı olarak sertlik değerlerinin değişimi Şekil 5.9’da verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda yapay yaşlandırma işleminin süresi arttıkça malzemenin sertlik değerlerinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 5.9. SKK uygulanmış 7075 - T651 alüminyum alaşımının yaşlandırma süresine bağlı olarak sertlik dağılımı (Fuller et al., 2010).

Literatür taramaları göz önüne alındığında, ısı işlem ile mekanik özellikleri iyileştirilmiş alüminyum alaşımlarına SKK/SKP uygulanması sonrasında malzemelerin mekanik özelliklerinde bir düşüş olduğu görülmektedir. Sertlik değerlerinin düşmesinin nedeni, literatürlerde de belirtildiği üzere, yapı içerisindeki ısı işlem sonrasında oluşmuş küçük boyutlardaki çökeltilerin SKK/SKP işlemi sonrasında büyümesidir. Küçük boyuttaki çökelmiş tanelerin büyümesi ile malzemedeki mekanik özellikler düşmekte bu durum sonucunda da sertlik değerleri düşmektedir.

Literatürde ele alınan konulardan biriside, alüminyum alaşımlarına seramik partiküllerin takviye edilmesidir. Takviye edilen seramik partiküller, malzemenin aşınma davranışlarını olumlu yönde etkileyerek, malzemenin aşınma oranlarını düşürmektedirler.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Al 7075-T651 alüminyum alaşımından blokların yüzeylerine sürtünme karıştırma prosesi ile SiC partikülleri geçirilerek, proses parametrelerinin mikro yapıya ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Alüminyum alaşımından bloklara farklı devir ve ilerleme hızları uygulanarak yüzey geliştirme işlemi uygulanmıştır. Bu proses işleminde kullanılan malzemeler, cihazlar ve prosesin nasıl yapıldığı, numunelerin metalografik hazırlama ve inceleme süreçleri ile aşınma davranışlarının incelenmesi bu bölümde açıklanmıştır.

6.1. Deney Malzemeleri ve Cihazı

Sürtünme karıştırma prosesinde işlem yapılacak malzeme ve karıştırıcı uç malzemesi ile bunlara proses öncesinde yapılan işlemler aşağıda tanıtılmıştır.

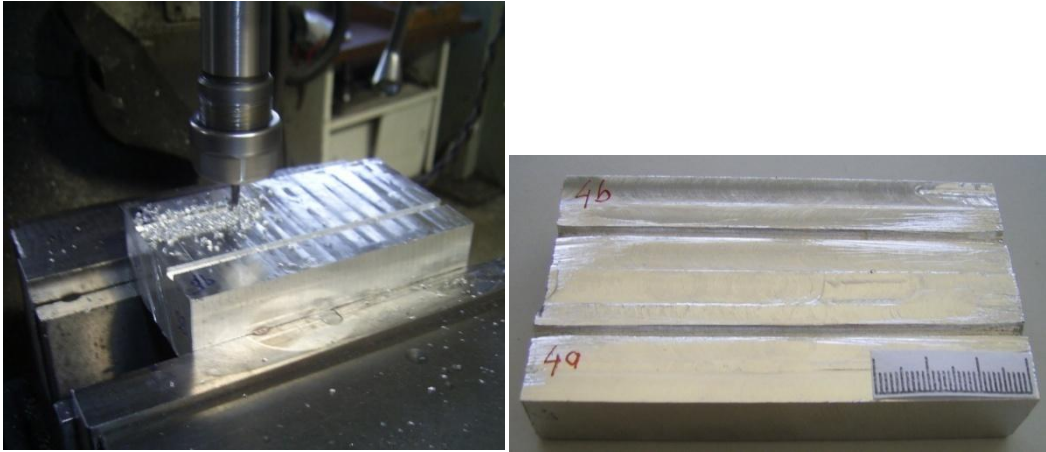
6.1.1. Esas malzeme

Deneysel çalışmalar için Çizelge 5’de kimyasal bileşimi verilen, haddelenmiş Al 7075-T651 alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemeye sırasıyla çözelti ısıl işlemi, su verme, yapay yaşlandırma ve gerilim giderme işlemleri uygulanmıştır.

Çizelge 6.1. Al 7075 alaşımına ait % ağırlıkça kimyasal bileşim.

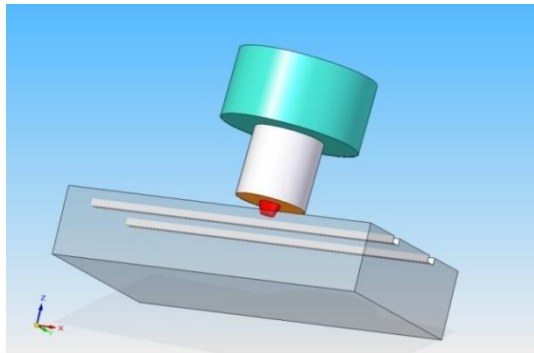
	Mg	Si	Ti	Zr	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Al
% ağırlık	2,2	0,04	0,02	0,1	0,01	0,01	0,09	2,1	6,3	89,13

Bu alalımdan 20x50x100 mm ebadında numuneler kesilip yüzepleri freze ile düzeltilmiştir. Şekil 6.1’de gösterildiği üzere, işlem yapılacak yüzeyde son olarak SiC tozunu yerleştirebilmek için 2x3x100 mm ebadında her bir numuneye uzunluğunca 2 adet kanal, freze tezgâhında açılmıştır.



Şekil 6.1. Malzemelere: a) freze tezgahında kanallar açılırken, b) kanal açılmış durumda.

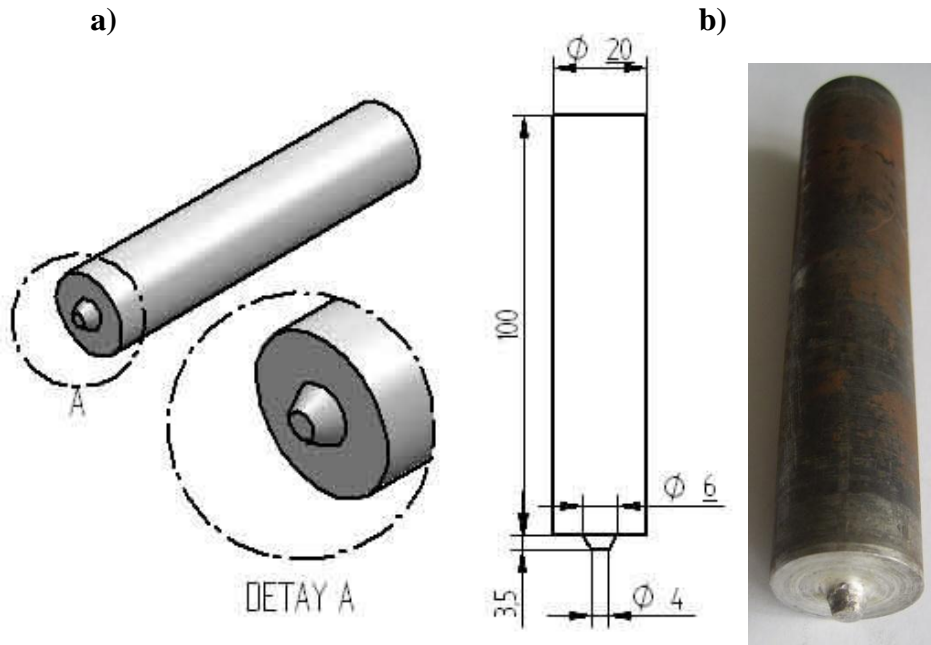
Proseste kullanılan esas malzeme ve karıştırıcı ucun bir arada şematik gösterimi Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Uygulamaya ait şematik gösterim.

6.1.2. Karıştırıcı uç

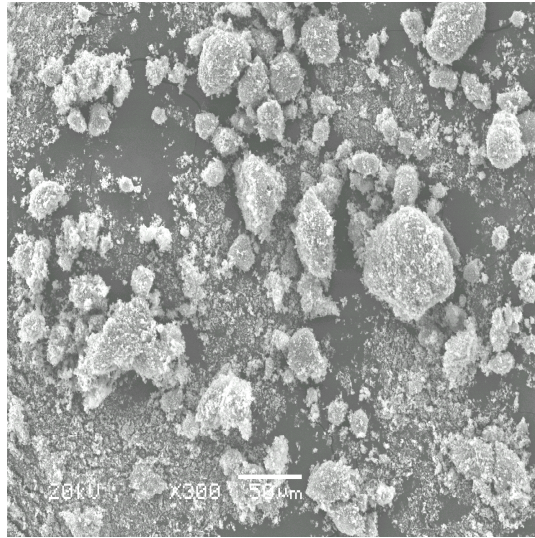
Prosesi gerçekleştirmek için kullanılan uç AISI 4130 çeliğidir. Takım ucundaki pim kısmı konik profile sahiptir ve dış açılmamıştır. Sürtünme karıştırma prosesini gerçekleştirmeden önce karıştırıcı uç 850 °C'de 50 dakika tavlansın ve hemen ardından yağda su verme işlemi yapılmıştır. Son sertlik değeri 450 HV olarak ölçülmüştür. Karıştırıcı ucun geometrisi ve boyutları Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Prosesine ait: a) boyutsal ölçüler, b) karıştırıcı uç.

6.1.3. Takviye edilecek toz

Proses esnasında takviye elemanı olarak kullanılacak partiküller Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Boyutları yaklaşık 10 ile 60 μm aralığında değişen %99.8 saflıktaki β fazı SiC tozları kullanılmıştır.



Şekil 6.4. Takviye elemanı olarak kullanılan SiC partikülleri, 300x.

6.1.4. Tezgah

MMF Makine Mühendisliği Bölümü Takım Tezgâhları Laboratuvarı'nda bulunan TOS Olomouc marka 4 kW gücündeki freze tezgâhında SKP işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Sürtünme karıştırma prosesinde kullanılan freze tezgahı.

6.2. Proses Parametreleri

Sürtünme karıştırma prosesi için 6 adet numune hazırlanmış ve bu numuneler 3 farklı takım ilerleme hızı ile 3 farklı takım devir sayısına tabi tutularak proses tamamlanmıştır. Çizelge 6.2’de proses parametreleri verilmiştir.

Çizelge 6.2. Proses parametreleri.

Devir Sayısı (dv/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)		
	20	40	56
1400	1. Numune	2. Numune	3. Numune
1000	4. Numune	5. Numune	6. Numune
710	7. Numune	8. Numune	9. Numune

6.3. Metalografik Çalışmalar

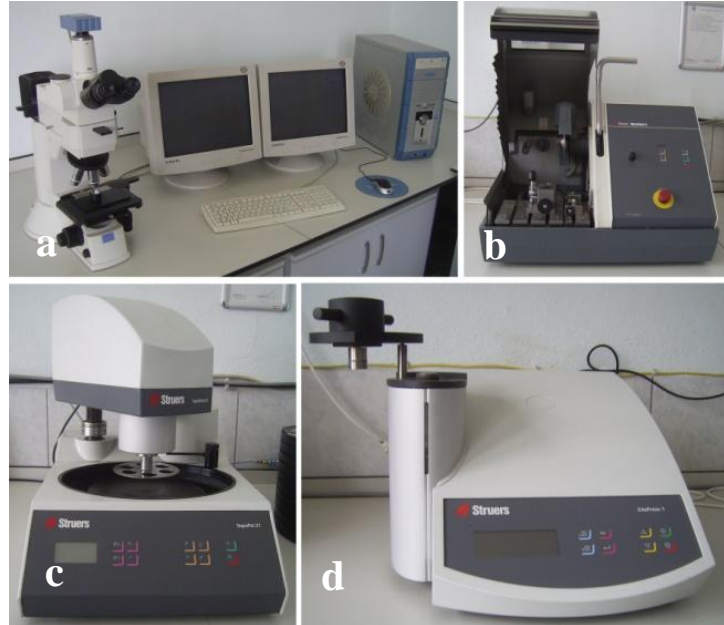
Sürtünme karıştırma prosesi tamamlandıktan sonra malzemeleri metalografik olarak incelemek için karıştırıcı ucun ilerleme yönüne dik gelecek şekilde numunelerden kesitler alınmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Metalografik çalışmalar için kesiti alınan numune.

Makro yapı ve mikro yapı incelemeleri için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi MMF Makine Mühendisliği Bölüm laboratuvarındaki cihazlar kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak numuneler sırasıyla; kesme işlemi için Struers Discotom-5 marka cihaz (Şekil 6.7b), zımparalama ve parlatma işlemleri için Struers Tegrapol-21 marka cihaz (Şekil 6.7c), kalıplama işlemi için Struers CitoPress-1 marka cihaz (Şekil 6.7d), mikro yapı incelemeleri ve yüzey karakteristik özelliklerini inceleyip kayıt edebilmek amacıyla Nikon-ECLIPSE L150 marka görüntü alma sistemi (Şekil 6.7a) kullanılarak hazırlanmıştır. Ayrıca JEOL-JSM 5600LV marka taramalı elektron mikroskobu kullanılarak metalografik çalışmalar tamamlanmıştır.

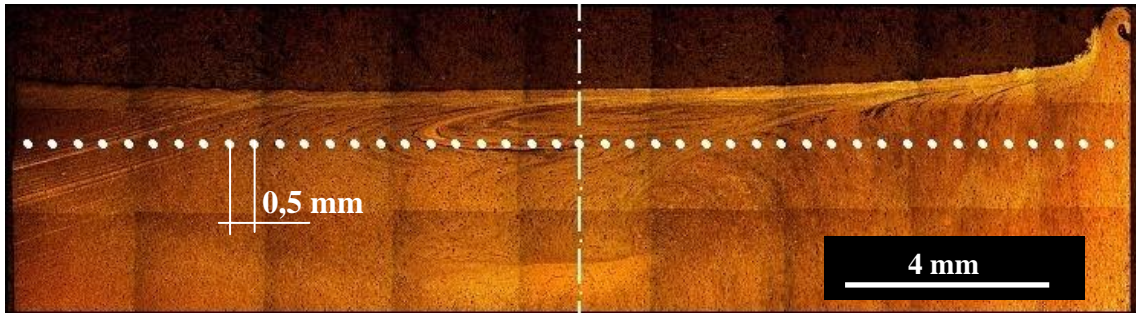
Yapısal incelemeler için Struers Tegra-Pol-21 cihazında, 200 mesh kademesinde Struers MD Piano ile zımparalama ve $3\mu\text{m}$ 'luk Struers DP-Suspension ile beraber Struers MD Plus çuha kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Dağlama işlemi için Keller ayracı (95 ml su, 1 ml HF, 1.5 ml HCL, 2,5 ml HNO_3) kullanılmıştır.



Şekil 6.7. Metalografik numune hazırlama cihazları: a) görüntü analizörü, b) kesme cihazı, c) parlatma ve zımparalama cihazı, d) kalıplama cihazı.

6.4. Mikro Sertlik Ölçümleri

Mikro sertlik ölçümleri ESOGÜ MMF Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Şekil 6.9 a’da gösterilen FUTURE-TECH marka FM-700 model cihazında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma prosesi uygulanan numunelerin takım ilerlemesi yönüne dik gelecek biçimde kesitleri alınmıştır ve numunelerin işlenmiş yüzeyinin 1 mm altında olacak şekilde yüzeye paralel bir doğru boyunca 500 µm’lik aralıklarla mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır (Şekil 6.8). Ölçümlerde 100 gr yük 15 sn süre kullanılmıştır.



Şekil 6.8. Mikro sertlik ölçümlerinin yapılış düzeni.

6.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

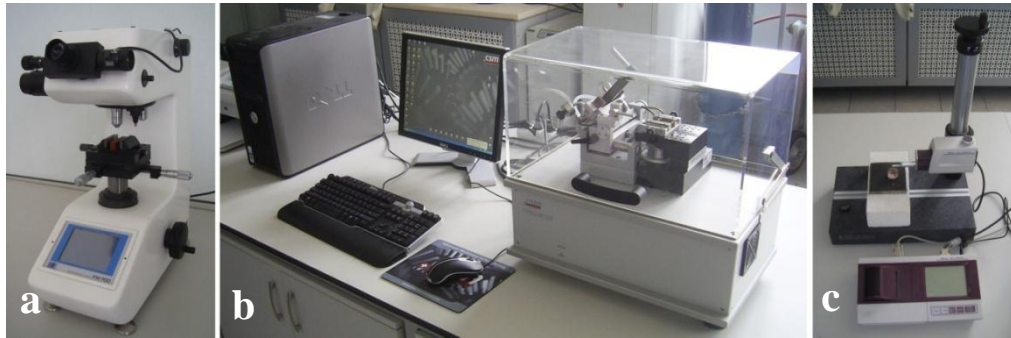
Aşınma deneylerini yapmadan önce karıştırıcı ucun ilerleme yönüne dik gelecek şekilde kesitler alınan numunelerin yüzeyleri hafif zımparalanarak ardından da parlatılarak numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ESOGÜ MMF Makine Mühendisliği Bölümünün laboratuvarında bulunan Mitutoyo SJ-400 cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.9c). Aynı cihaz ile aşınma deneyleri sonrasında da aşınma bölgesinin profili elde edilmiştir.

6.6. Aşınma Deneyleri

İncelenmek için kesitleri alınan numunelerin işlenmiş yüzeyleri zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra yüzey pürüzlülük değerleri de ölçülüp aşınma deneylerine geçilmiştir. Aşınma deneyleri ESOGÜ MMF Makine Mühendisliği Bölüm laboratuvarında bulunan CSM marka aşınma cihazında kuru ortamda gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.9b). Aşınma deneyi parametreleri Çizelge 6.3’de verilmiştir. Aşınma cihazına bağlı bulunan yazılım ve donanım sistemleri ile deney sonunda aşınma oranı, sürtünme katsayısı değerleri de elde edilmiştir.

Çizelge 6.3. Aşınma deneyi parametreleri.

Aşınma Şekli	Lineer Durum	Veri Toplama Ortam	10 Hz
Aşınma Mesafesi	4 mm	Aşındırıcı Malzeme	Hava
Maks. Lineer Hız	2,5 cm/s	Aşındırıcı Boyutu	100Cr6
Yük	2 N	Aşındırıcı Geometri	3 mm
Toplam Mesafe	20 m		Küre



Şekil 6.9. Deneylerde kullanılan bazı cihazlar: a) sertlik ölçüm cihazı, b) aşınma deney sistemi, c) yüzey profil ölçüm cihazı.

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

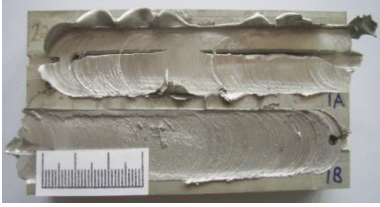
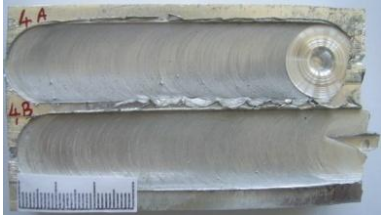

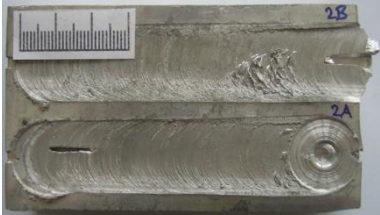
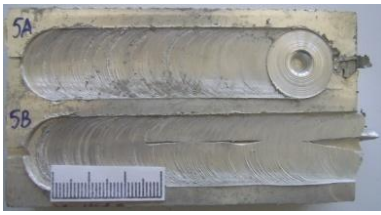

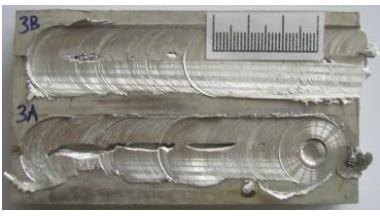
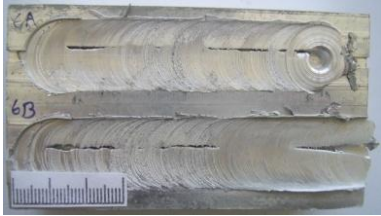

Bu bölümde yapılan deney ve ölçümlerin sonuçları ile elde edilen sonuçların analizleri yer almaktadır.

7.1. Görsel İnceleme Sonuçları

Sürtünme karıştırma prosesi uygulanan numunelerin yüzeyleri incelendiğinde, yüzeylerin deney parametrelerine bağlı olarak farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Çizelge 7.1’de deney parametreleri olan ilerleme hızı ile takım devir sayısına bağlı olarak numunelerin yüzey makro resimleri görülmektedir. Çizelge 7.1a’da 2.5°’lik tilt açısı uygulanmamış geri kalan tüm numunelerde tilt açısı uygulanmıştır

Çizelge 7.1’deki makro resimler incelendiğinde, takım ilerleme hızı arttığında, işlem öncesinde numunelerin üzerine açılan kanalların işlem esnasında yumuşak formdaki metal ile tamamen doldurulamadığı görülmektedir. Bunun nedeni ise işlem esnasında yüksek ilerleme hızında bölgesel sıcaklığın, düşük ilerleme hızlarına göre daha düşük olması ve artmaması, bu durumun yumuşak form halindeki metalin hareketini zorlaştırması olarak açıklanabilir. Hareket etmesi zorlaşan yumuşak form halindeki metal daha az plastik deformasyona uğramaktadır. Bunun sonucunda da katı eriyik halindeki metal açılan kanalı yüksek ilerleme hızlarında tamamen dolduramamaktadır. Takım devir sayısı arttığında ise takımın her devrinde takıma verilen tilt açısının yardımı ile de malzeme plastik deformasyona zorlanmaktadır (Şekil 7.1). Takımın devri esnasında takımın omzunun uç kısmı malzeme üzerinde dövme etkisi meydana getirmektedir. Devir sayısı arttıkça plastik deformasyon miktarının da artmasına yol açmaktadır. Takımın omuz kısmı ilerledikçe, plastik deformasyon miktarının artması ile malzemeyi daha çok deforme ederek, ilerleme yönünde malzemeyi daha çok kenarlara yığmaktadır. Ayrıca işlem esnasında yapılan gözlemler sonucunda yüksek ilerleme hızı ve yüksek takım devirlerinde açılan kanallara yerleştirilen SiC partiküllerinin takımın dönme yönüne bağlı olarak kanalın dışına çıkarak kenara yığıldığı görülmüştür.

Çizelge 7.1. Sürtünme karıştırma prosesi uygulanmış numunelerin takım devir sayısı ve takım ilerleme hızına bağlı olarak üstten görüşleri.

İlerleme Hızı	Takım Devir Sayısı		
	1400 (dv/dk)	1000 (dv/dk)	710 (dv/dk)
20 (mm/dk)			
40 (mm/dk)			
56 (mm/dk)			



Şekil 7.1. Sürtünme karıştırma prosesi uygulanmış 1 nolu numune, a) tilt açısı uygulanmamış, b) tilt açısı uygulanmış.

Takım ilerleme yönüne verilen $2,5^\circ$ tilt açısı ile takımın arka omuz kısmı malzeme üzerinde dövme etkisi yaparak plastik şekil vermeyi kolaylaştırmaktadır (Shafiei-Zarghani et al., 2009; Zahmatkesh et al., 2010; Mahmoud et al., 2010). Bu açı verilmediği takdirde, prosesi gerçekleştirebilmek için takımı malzeme içerisine bir miktar daldırmak gerekmektedir. Bu durumda da Şekil 7.1a'da görüldüğü gibi takımın malzemeye girip ilerleme yapması halinde malzemeyi takımın kenarlarına yığması söz konusudur.

7.2. Makro Yapı İnceleme Sonuçları

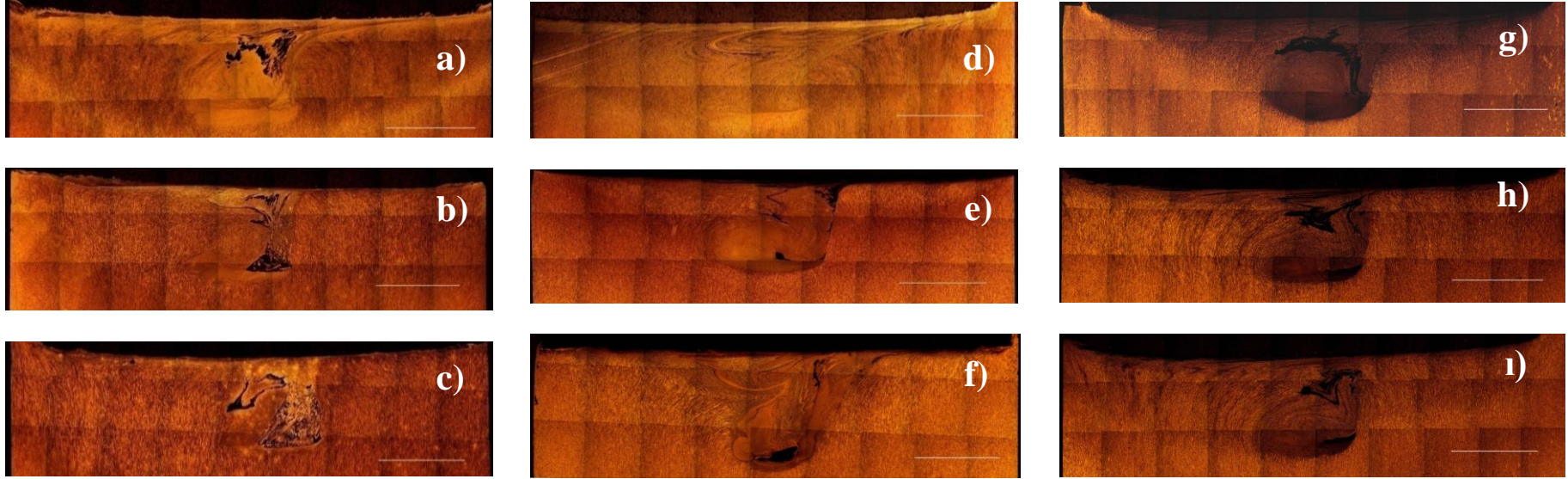
Al 7075 – T651 alüminyum alaşımı 20, 40 ve 56 mm/dk takım ilerleme hızı ile 1000, 1400 ve 710 dv/dk takım devir sayısı parametreleri kullanarak sürtünme karıştırma prosesi uygulanmıştır. Proses uygulanan numuneler prosesin uygulandığı yöne dik şekilde kesilerek incelenmiştir. Kesilen numuneler dağlanarak yapının belirginleşmesi sağlanmıştır.

Şekil 7.2'de kesilmiş ve dağlanmış numunelere (numunelerin hepsi tilt açısı ile işlenmiştir) ait makro görüntüleri içermektedir. Görüntüler incelendiğinde metal akış formu, kaynak dolgusu ve ısıdan etkilenen bölgeler görülebilmektedir.

Şekil 7.2a, Şekil 7.2b ve Şekil 7.2c'deki görüntüler 1400 dv/dk takım dönme hızı ile proses uygulanmış numunelerdir. İlerleme hızları 20, 40 ve 56 mm/dk'dır ve sırasıyla a,b,c kodlu görüntülerdir. Görüntüler incelendiğinde, takım ilerleme hızı arttıkça yapıdaki boşluk oranının da arttığı görülebilmektedir. Oluşan boşluklar özellikle pim ucu bölgesinde meydana gelmektedir. Takım ilerleme hızı arttıkça, malzemeye giren ısı miktarı ve malzemeye uygulanan plastik deformasyon miktarı azaldığından ötürü, özellikle pim ucu bölgesinde, takım ilerlerken pimin arka kısmında oluşan bölgeye katı eriyik metal akışının azaldığını ve dolayısı ile pim ucu bölgesinde boşluklu yapının oluştuğu düşünülmektedir. Bölüm 3.2'de, SKK yöntemi sonucunda oluşabilecek hata türlerinden bahsedilmiştir. SKK yöntemi esnasında yapıdaki boşluklu bölgelerin takım tarafından uygulanan dövme kuvveti ile bağlantılı olduğu Mishra ve Mahoney (2007) tarafından yapılan çalışmada bahsedilmiştir ve Bölüm 3.2'de de bu konu anlatılmıştır. Dövme kuvvetinin artması ile yapıda oluşabilecek boşlukların azaldığı, dövme kuvvetinin azalması ile de boşluklu yapının sürekliliği ve artması, Mishra ve Mahoney tarafından belirtilmiştir. Takım ilerleme hızı arttıkça takımda meydana gelecek gerilme artacaktır ve işlem için kullanılan tezgâhın zorlanıp titreşimli çalışması söz konusudur. Tezgâhın titreşimli çalışması durumunda, dövme kuvvetinin sabit kalmadığını ve böylece takım ilerleme hızının arttığı durumlarda boşluklu yapı oluşma riskinin arttığı söylenebilir.

Makro görüntüler incelendiğinde, bazı bölgelerde SiC partiküllerinin kümeleştiği ve homojen dağılmadığı görülmektedir. Bu durumun kullanılan uç profili ve metal akış formundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bütün görüntüler incelendiğinde, Şekil 7.2d'de verilen görüntüde, SiC partiküllerinin homojen dağıldığını ve görüntüye ait proses parametrelerinin (1000 dv/dk takım dönme hızı ile 20 mm/dk takım ilerleme hızı) homojen yapı elde etmek için optimum değerler olduğunu söyleyebiliriz.

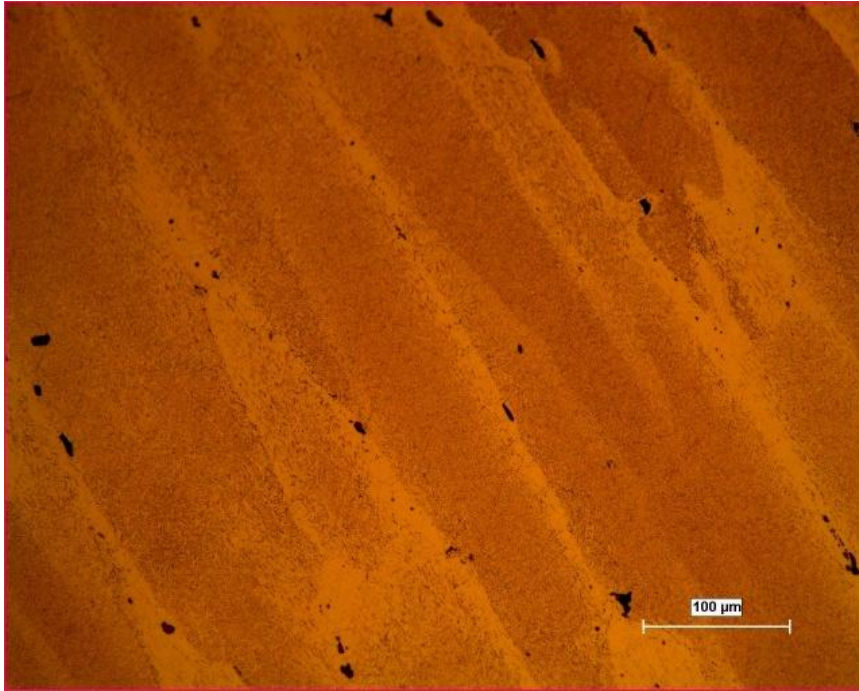
Takım devir hızı 710 dv/dk olduğu durumda (Şekil 7.2 g,h,ı), yapı içerisine SiC tozlarının geçtiği ve takım ilerleme hızı ile yapı içerisinde oluşan kurt boşluklarının 1400 ile 1000 dv/dk ile yapılan numunelere oranla daha da azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.2. Numunelerin makro resimleri, dağlanmış (Keller ayracı), 50x , a) Numune 1 (1400 dv/dk, 20 mm/dk), b) Numune 2 (1400 dv/dk, 40 mm/dk), c) Numune 3 (1400 dv/dk, 56 mm/dk), d) Numune 4 (1000 dv/dk, 20 mm/dk), e) Numune 5 (1000 dv/dk, 40 mm/dk), f) Numune 6 (1000 dv/dk, 56 mm/dk), g) Numune 7 (710 dv/dk, 20 mm/dk), h) Numune 8 (710 dv/dk, 40 mm/dk), f) Numune 9 (710 dv/dk, 56 mm/dk).

7.3. Mikro Yapı İnceleme Sonuçları

Sürtünme karıştırma prosesi uygulanmış ve uygulanmamış Al 7075 – T651 alüminyum alaşımı malzemelerin mikro yapı incelemelerinden önce malzemeler Keller ayracı ile dağlanmıştır. Kullanılan malzemeye ait mikro yapı Şekil 7.3’de verilmiştir.

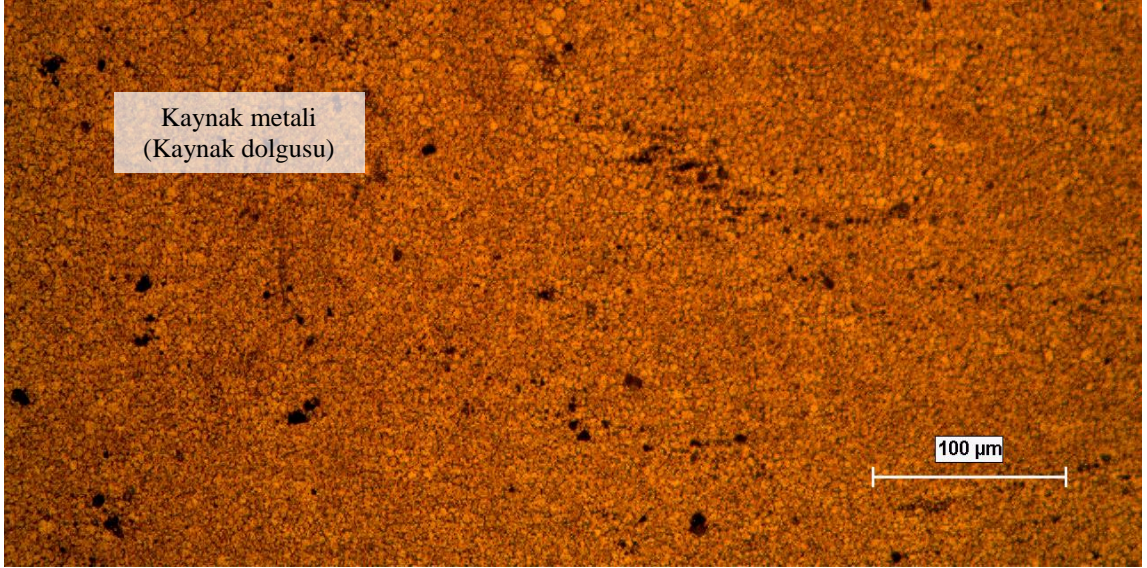


Şekil 7.3. Haddelenmiş Al7075-T651 alaşımı, dağlanmış (Keller), 200x.

Mikro yapı görüntüsü incelendiğinde, tanelerin hadde yönünde uzama gösterdiği ve yaklaşık; uzunluğunun 500 µm ve eninin 100 µm olduğu tespit edilmiştir.

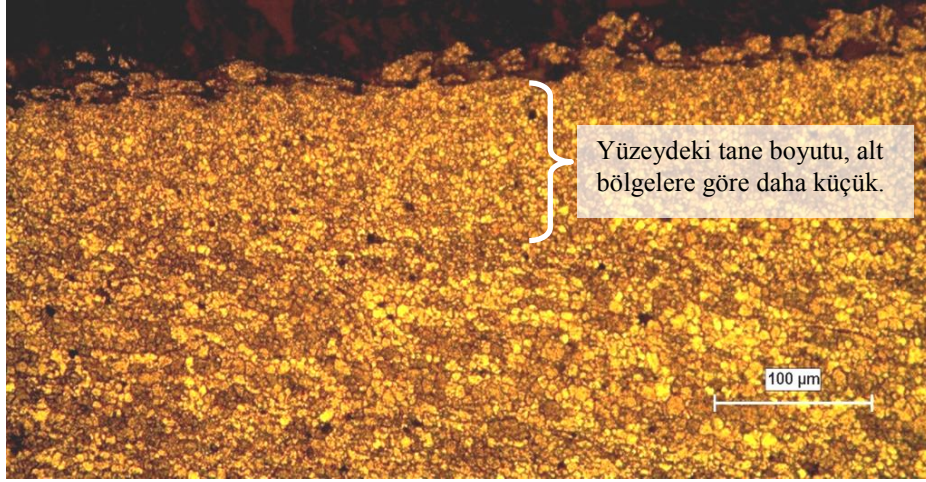
SKP uygulanmış malzemelerde mikro yapı inceleme sonrasında 4 bölge tespit edilmiştir; esas metal (EM), ısıdan etkilenmiş bölge (IEB), termo mekanik etkilenmiş bölge (TMEB) ve kaynak metali (KM).

Proses uygulanmış malzemelerin tane boyutunun, pimin temas ettiği bölgede, (kaynak kısmının tam orta bölgesinde) normal boyutlarına göre çok daha küçük olduğu görülmektedir. Bu bölge kaynak metali ya da kaynak dolgusu olarak adlandırılır. Kaynak dolgusunun olduğu bölge proses esnasında pimin hareketi ile mekanik olarak deformasyona uğramakta ve taneler parçalanmaktadır. Sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık artışı ile bu bölgede dislokasyonların olduğu kısımlarda çekirdeklenmeler meydana gelir. Bu çekirdeklenmelerden yeniden kristalleşmiş taneler meydana gelmektedir (Su et al., 2003; Olea et al., 2007;). Yeniden kristalleşmiş taneler oldukça küçük ($\sim 4 \mu\text{m}$) boyutlardadır (Şekil 7.4).



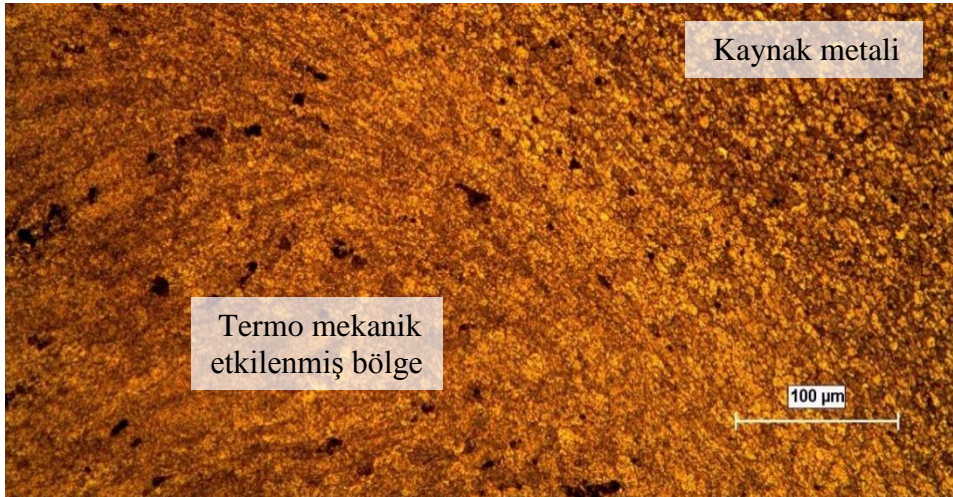
Şekil 7.4. SKP uygulanmış 5 nolu numune , dağlanmış (Keller), 200x.

Yapılan mikro yapı çalışmalarında, malzemenin yüzeye yakın kısımlarında tane boyutlarının iç kısımlara göre daha küçük boyutta olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun ise takımın omuz kısmının dövme etkisi yaparak yüzeye yakın kısımlardaki tanelerin deformasyona uğrayıp boyutlarının küçülmesine neden olduğunu söyleyebiliriz (Şekil 7.5).



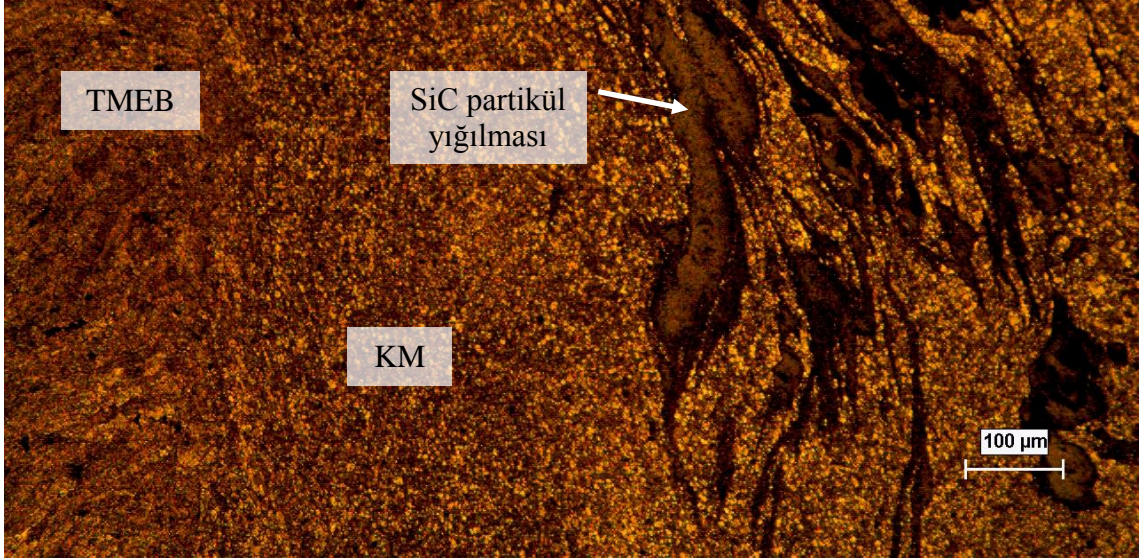
Şekil 7.5. SKP uygulanmış 1 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.

Termo mekanik etkilenmiş bölgede ise taneler plastik deformasyon nedeniyle deforme olmuşlar ve boyutları $\sim 25 \mu\text{m}$ 'dir (Şekil 7.6). Su et al. (2003) ve Olea et al. (2007) tarafından bu bölgede kaynak metaline göre dislokasyon yoğunluğunun daha fazla olduğu belirlenmiştir.

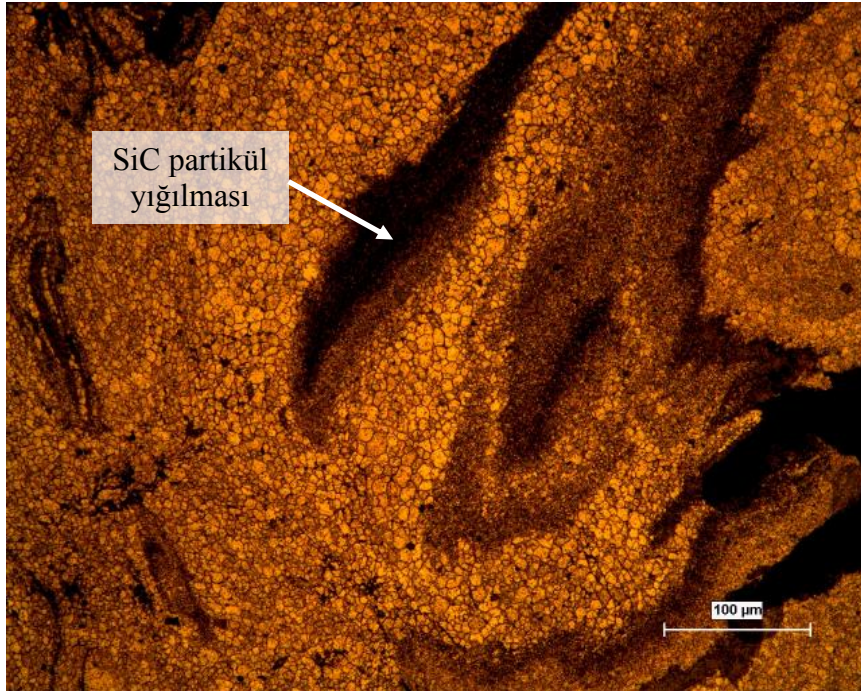


Şekil 7.6. SKP uygulanmış 1 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.

Mikro yapı incelemelerinde SiC partiküllerinin yapı içerisinde çeşitli bölgelerde yığıldığı görülmektedir (Şekil 7.7 ve Şekil 7.8).

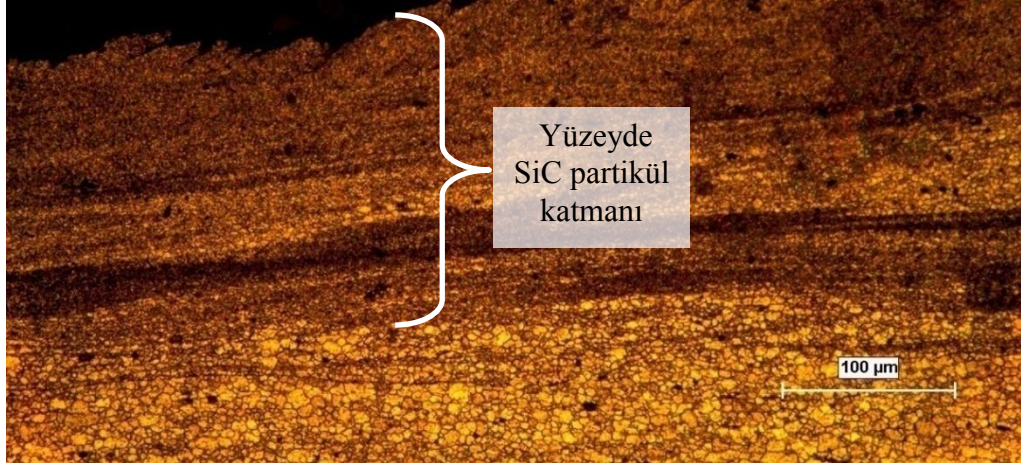


Şekil 7.7. SKP uygulanmış 1 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.

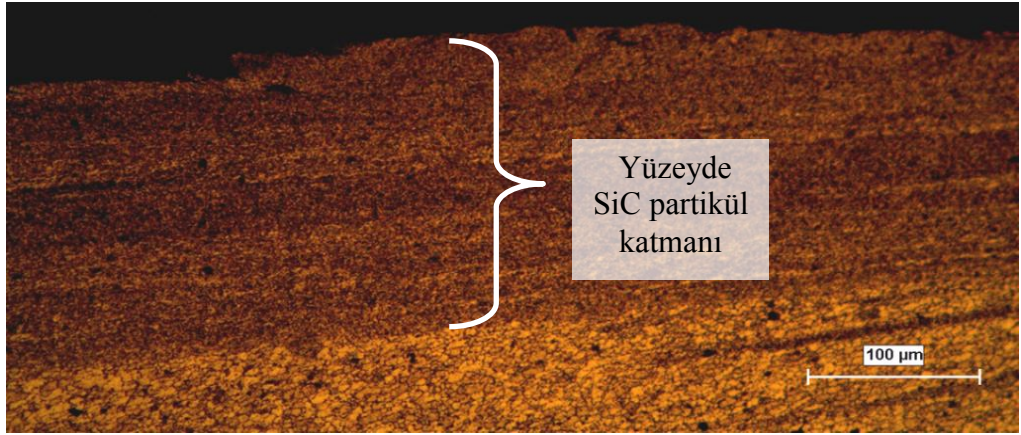


Şekil 7.8. SKP uygulanmış 2 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x

Sürtünme karıştırma prosesi sonrasında malzemelerin proses uygulanan yüzeylerine yakın kısımları incelendiğinde, $\sim 150 \mu\text{m}$ genişliğinde SiC partiküllerinin dağılımı gözlenmektedir (Şekil 7.9 ve Şekil 7.10). Fakat bu dağılım malzemenin bütün üst yüzeyine yakın kısımda görülmemektedir. Bunun nedeni ise proses uygulanırken özellikle yüksek takım ilerleme hızı ve yüksek takım dönme hızlarında, malzemelerin üst kısımlarına açılan kanallardaki SiC partikülleri takımın hareketi ile etrafa yayılmasıdır.

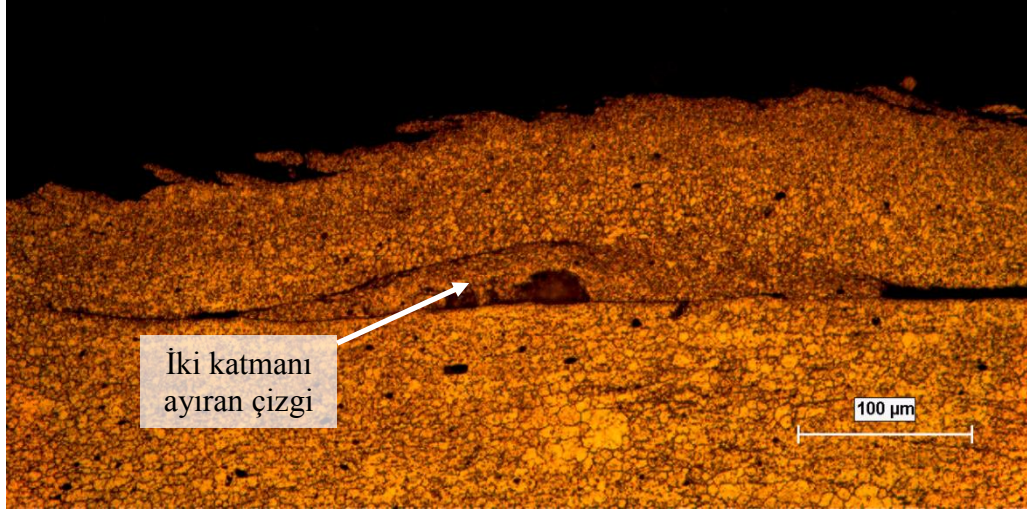


Şekil 7.9. SKP uygulanmış 2 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x



Şekil 7.10. SKP uygulanmış 6 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x

Şekil 7.11’de gösterilen, 3 nolu numune, 1400 dv/dk takım dönme hızı ile 56 mm/dk takım ilerleme hızına sahiptir. 3 nolu numunenin mikro yapısı incelendiğinde, yüzeye yakın kısımda iki ayrı tabakanın birbiri üstüne yapıştığı görülmektedir. Yüksek devir hızlarında yüzeyde sürtünme yapışması meydana getirmektedir (Bkz. Bölüm 3.2). Ayrıca pim ucu bölgesinde ve kaynak metali bölgesinde yüksek ilerleme hızından ve düşük dövme kuvvetlerinden dolayı boşluklu yapının oluştuğu söylenebilir (Şekil 7.12).

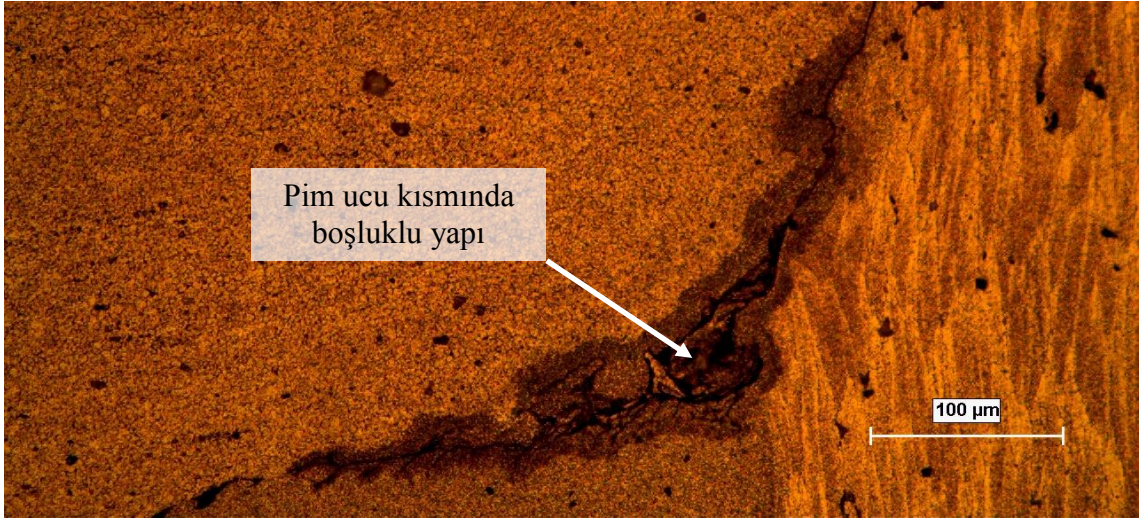


Şekil 7.11. SKP uygulanmış 3 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x

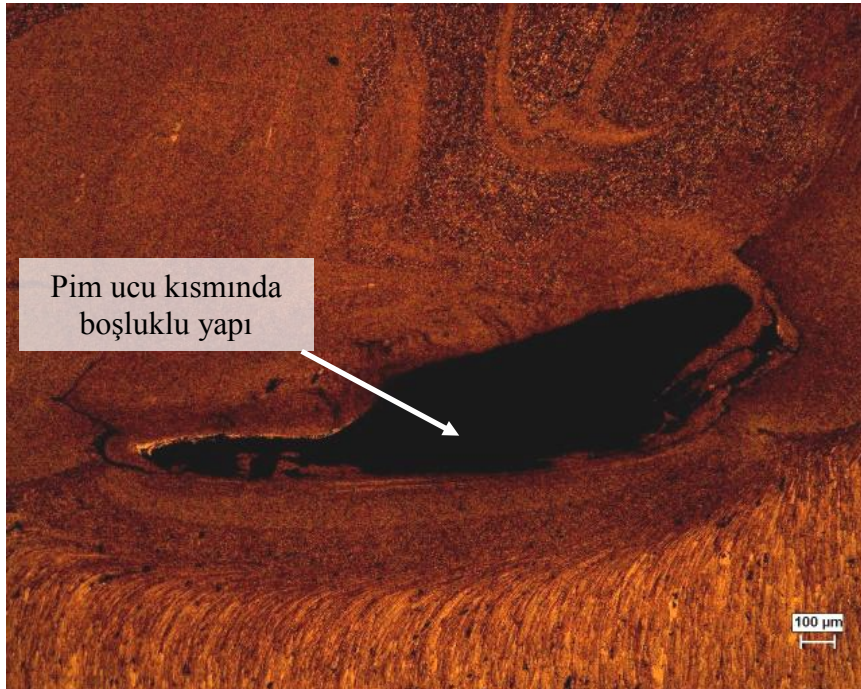


Şekil 7.12. SKP uygulanmış 3 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x

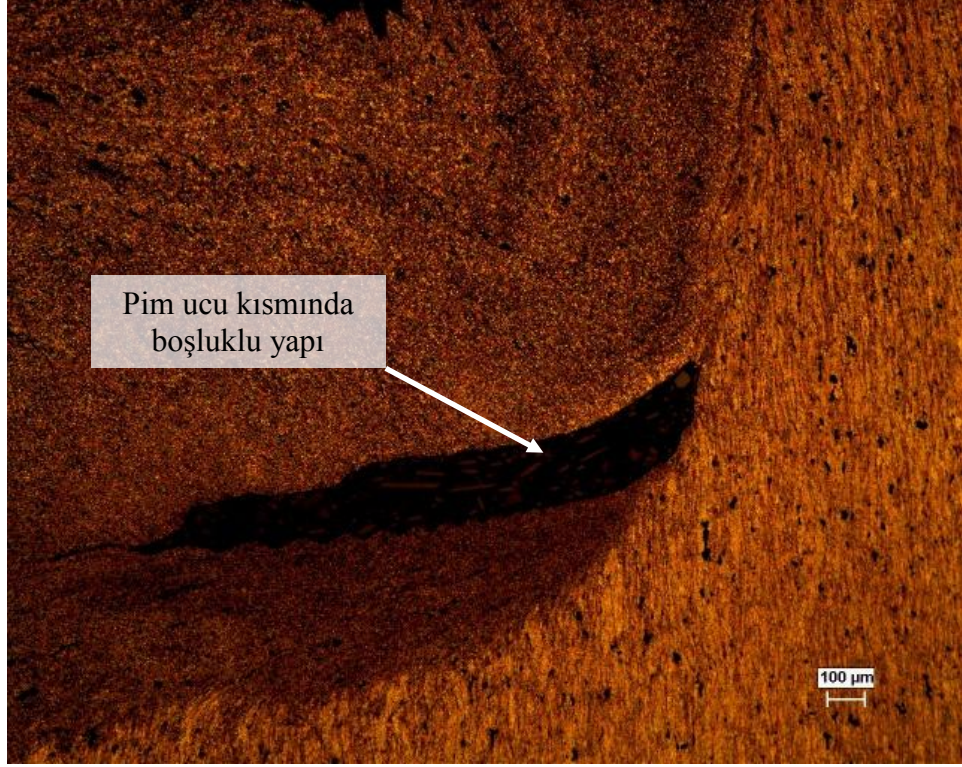
5 ve 6 nolu numunelerin pim ucu kısımlarında ise boşluklar gözlenmektedir (Şekil 7.13 ve Şekil 7.14).



Şekil 7.13. SKP uygulanmış 5 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.



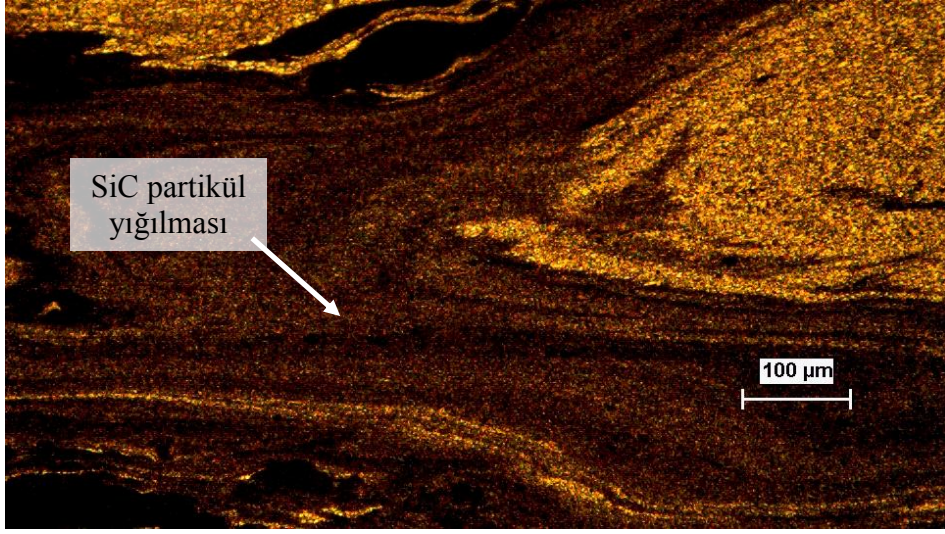
Şekil 7.14. SKP uygulanmış 6 nolu numune, dağlanmış (Keller), 50x.



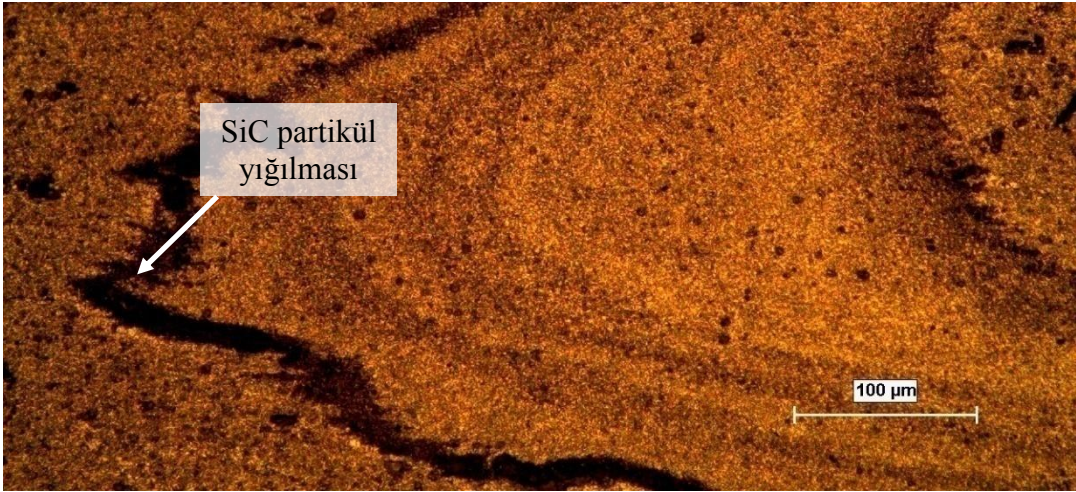
Şekil 7.15. SKP uygulanmış 9 nolu numune, dağlanmış (Keller), 50x.

Şekil 7.15’de 710 dv/dk ’da işlem görmüş malzemeye ait pim ucu kısmındaki kurt boşluğu gösterilmektedir. Devir sayısı 1000 ile 1400 olan diğer numunelerdeki kurt boşlukları ile kıyaslandığında 710 dv/dk ’da oluşan kurt boşluğunun daha ufak olduğu görülmektedir. Devir sayısı azaldıkça mikro yapıda oluşan yapısal kusurların azaldığı görülmektedir.

4 ve 7 nolu numunelerde hiçbir boşluk gözlenmezken, 4 nolu numunede az bir miktarda SiC partiküllerinin yığılması (Şekil 7.17) ve 7 nolu numunede 4 nolu numuneye oranla daha fazla SiC yığılması gözlenmiştir (Şekil 7.16).



Şekil 7.16. SKP uygulanmış 7 nolu numune, dağlanmış, (Keller), 100x.



Şekil 7.17. SKP uygulanmış 4 nolu numune, dağlanmış (Keller), 200x.

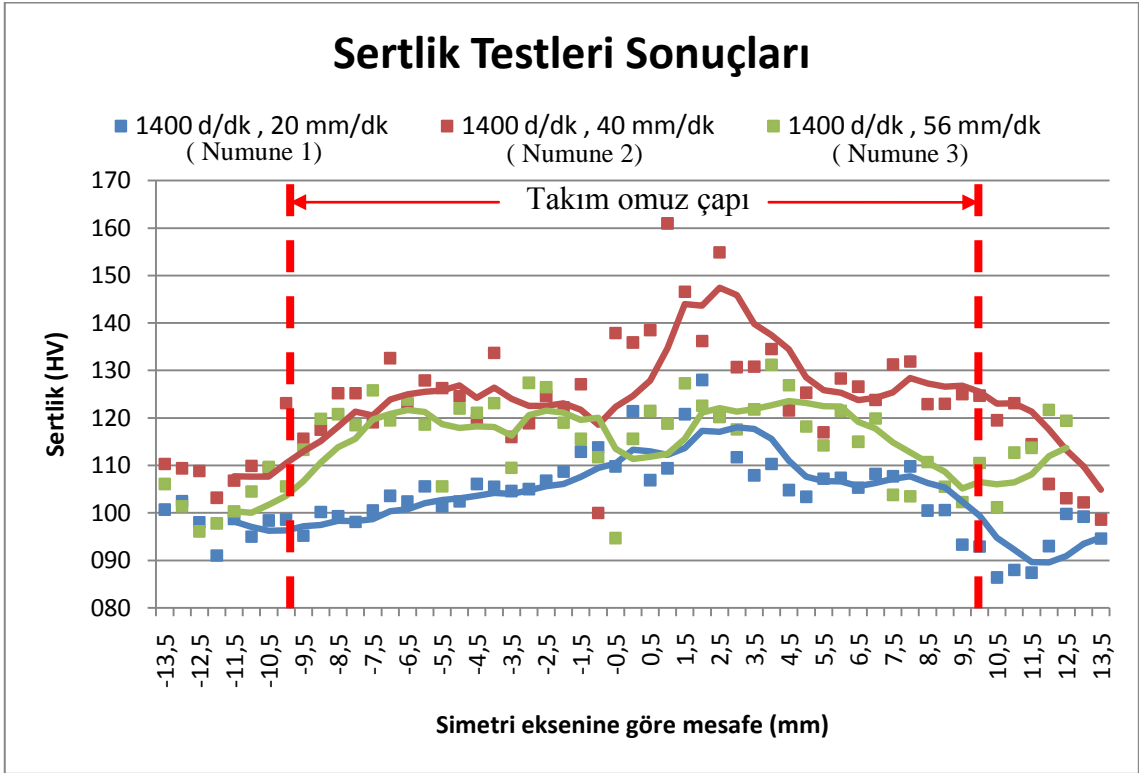
7.4. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

Al 7075-T651 alaşımının SKP uygulanmadan önceki sertlik değeri 170 HV'dir. Proses parametrelerine bağlı olarak proses sonrasındaki numunelerin sertlik dağılımları Şekil 7.18, Şekil 7.19 ve Şekil 7.20'da verilmiştir.

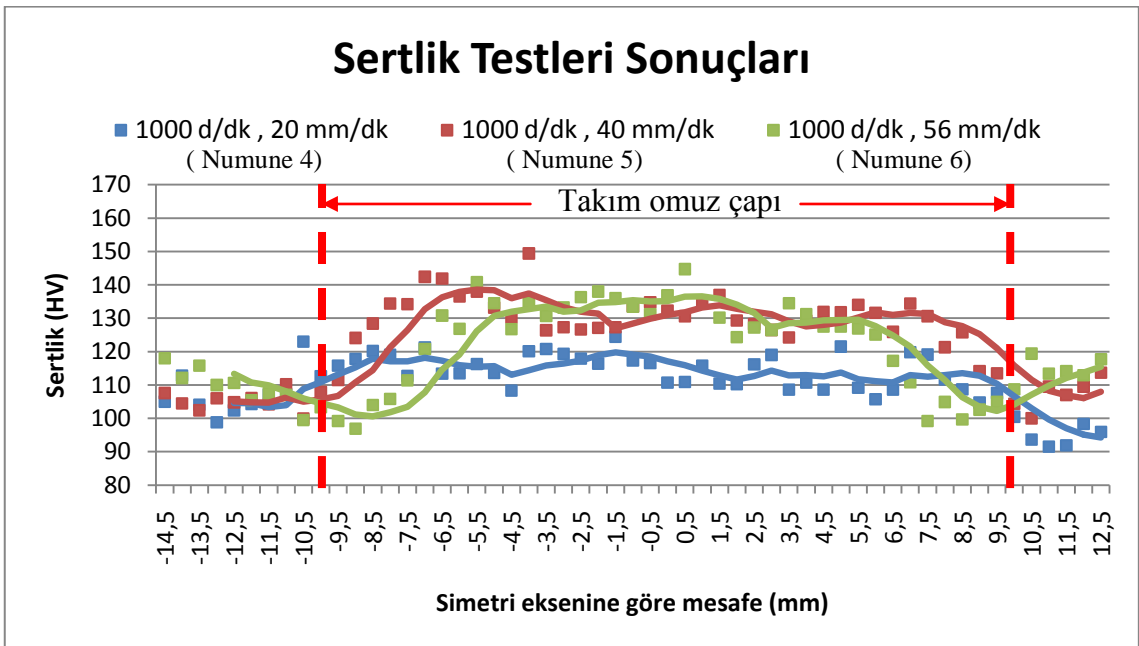
Proses sonrasında numuneye ait sertlik dağılımları incelendiğinde, sertlik değerleri esas malzemenin sertlik değerine göre düşük çıkmaktadır. Deneylede kullanılan alüminyum alaşımı numuneler çözelti ısıtma işlemi, su verme ve yapay yaşlandırma işlemleri görmüştür. Daha önceden yapılan çalışmalarda, çözelti ısıtma işlemi uygulanmış malzemelerde SKK işlemi uygulanması ile ölçülen sertlik değerleri, aynı malzemelerin SKK işlemi uygulanmamış bölgelerindeki sertlik değerlerinden düşük olduğu belirtilmiştir (Chen et al., 2006,2009; Hwang et al., 2008; Moreira et al., 2009).

Sertlik dağılımları incelendiğinde numunelere ait bütün eğriler benzerlik göstermektedir. Takım omuz genişliği civarında sertliğin düştüğü, esas metale doğru olan kısımda ise sertlik artışı görülmektedir. Takım omuz genişliği bölgesinden malzemenin SKK işlemi uygulanmış bölgenin merkezine doğru gidildikçe, sertlik değerlerinin bir miktar arttığı görülmekte ve bu sertlik artışı esas malzeme sertliği değerlerine kadar ulaşmamaktadır (Şekil 7.18, Şekil 7.19, Şekil 7.20).

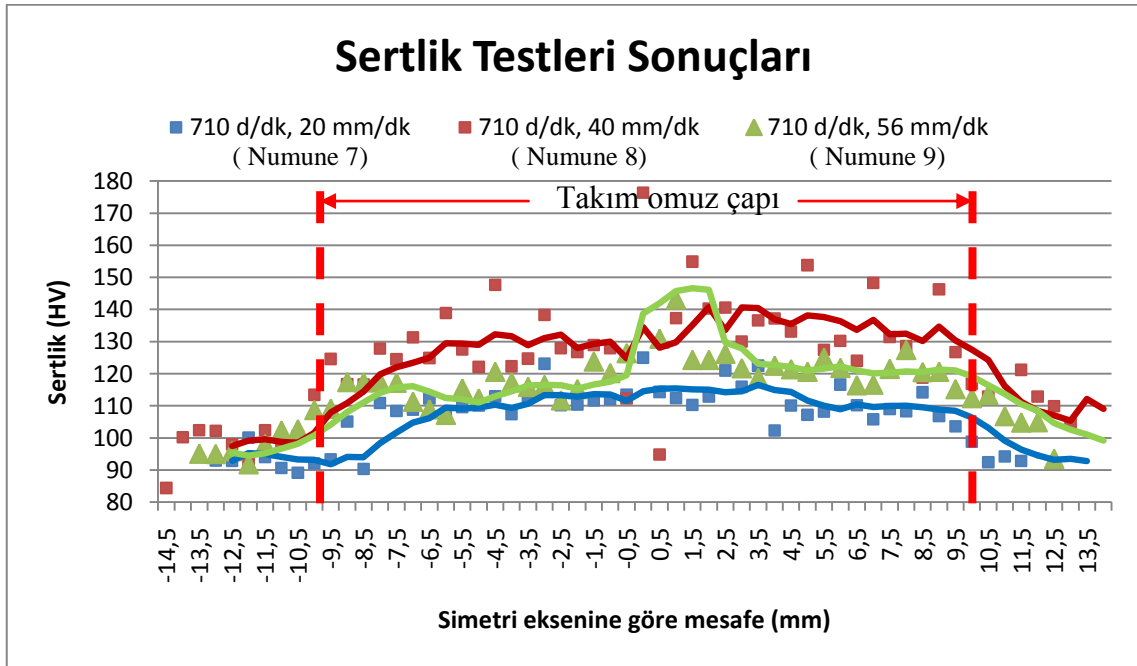
Çökelme sertleşmesi ısıtma işlemi yapılmış bir malzemedeki SKK yöntemi uygulanması ile sertlik değerlerinin düşmesi, çökelme sertleşmesi ısıtma işlemi ile çökelmiş vaziyetteki küçük çökeltilerin, SKK yönteminden kaynaklanan ısının etkisi ile büyümesi sonucudur (Kaya, 2005; Binal, 2006).



Şekil 7.18. 1,2 ve 3 nolu numunelere ait sertlik ölçüm sonuçları.



Şekil 7.19. 4,5 ve 6 nolu numunelere ait sertlik ölçüm sonuçları.



Şekil 7.20. 7,8 ve 9 nolu numunelere ait sertlik ölçüm sonuçları.

Takım omuz genişliğinden iç kısımlara doğru sertliğin artması, SiC partikülleri ve bölgede oluşan plastik deformasyon sonucudur.

Şekil 7.18'de, aynı devir hızına sahip (1400 dv/dk) farklı ilerleme hızları uygulanmış numunelerin sertlik dağılımları görülmektedir. 20 mm/dk takım ilerleme hızındaki numunenin en düşük sertlik dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, düşük ilerleme hızında malzemeye giren ısının artması ve çökelti boyutunun artarak malzemede sertliğin düşmesidir. 40 mm/dk ilerleme hızındaki malzemenin ise en yüksek sertliğe sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise 20 mm/dk ilerleme hızındaki malzemeye göre daha az ısı girdisi ile daha hızlı soğuyarak sertliğinin artmasıdır. Ayrıca 56 mm/dk ilerleme hızındaki malzeme ilerlemesi esnasında devir hızının da yüksek olması nedeni ile (1400 dv/dk) SiC tozlarının bir miktarının takım omzunun etrafına yayılması ile genel bir sertlikte 40 mm/dk ilerleme hızına sahip malzemeye göre sertlik değişiminde fazla bir artış görülmemektedir.

Şekil 7.19’da ki eğrilerde ise yine aynı devir hızına (1000 dv/dk) sahip farklı ilerleme hızları uygulanmış numunelerin sertlik dağılımları görülmektedir. 20 mm/dk ilerleme hızına sahip numune en düşük sertlik değerine sahiptir ve nedeni fazla ısı girdisinden kaynaklanmaktadır. 40 ile 56 mm/dk ilerleme hızına sahip numunelerin ise sertlik değerleri birbirine yakın ve 20 mm/dk’lık ilerleme hızına sahip numuneden yüksektir. Bunun nedeni 40 ile 56 mm/dk ilerleme hızında az ısı girdisi olup daha hızlı soğuyarak sertlik değerlerinin artmasıdır. Fakat bu durumda 56 mm/dk’lık ilerleme hızına sahip numunenin en yüksek sertlik değerine sahip olması beklenirken 40 mm/dk’lık ilerleme hızına sahip numune ile hemen hemen aynı sertlik değerleri ölçülmüştür. Bunun nedeni ise yüksek ilerleme hızında SiC tozlarının takım omuzu etrafına dağılmasıdır.

710 dv/dk takım devir hızında işlenmiş numunelerde, 1400 ile 1000 dv/dk’lık devir hızlarına sahip numunelerdeki gibi aynı sertlik dağılım özelliklerine sahip olduğu elde edilen grafikten görülmektedir (Şekil 7.20).

7.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

Aşınma deneyleri öncesinde numunelerin aşındırılacak yüzeylerinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

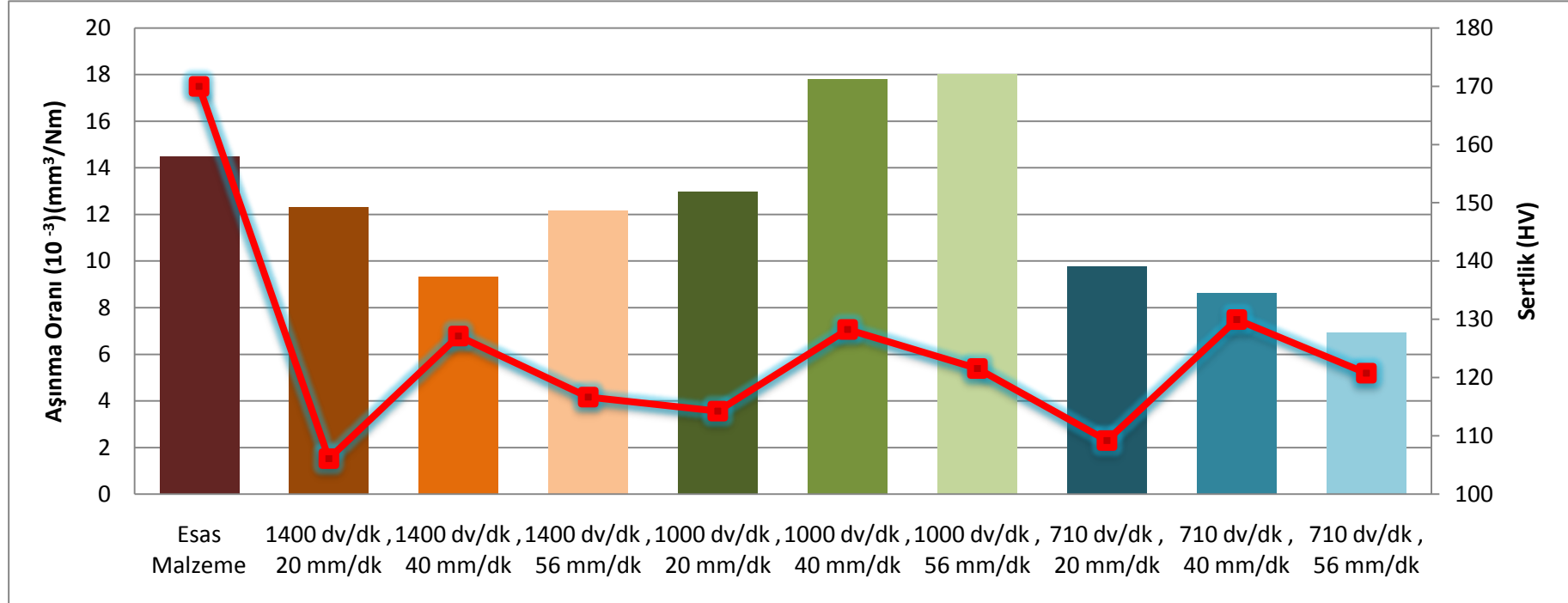
7.6. Aşınma Deney Sonuçları

Aşınma deneyleri sonucunda, aşınma deney sistemi tarafından elde edilen sürtünme katsayılarının ortalama değerleri, ortalama sertlik değerleri, aşınma oranları ve aşınma öncesinde yüzeyden alınan yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Aşınma deneyleri öncesinde ve sonrasında ölçülen bazı değerler.

	Esas Malzeme	20 mm/dk	40 mm/dk	56 mm/dk
Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	0,43	1400 dv/dk		
		0,47	0,38	0,40
		1000 dv/dk		
		0,40	0,40	0,41
		710 dv/dk		
Ortalama Sertlik Değerleri (HV)	170	1400 dv/dk		
		106,11	127,13	116,67
		1000 dv/dk		
		114,24	128,25	121,57
		710 dv/dk		
Aşınma Oranları (mm^3/Nm) $\times 10^{-3}$	14,48	1400 dv/dk		
		12,3	9,33	12,17
		1000 dv/dk		
		12,99	17,81	18,02
		710 dv/dk		
Yüzey Pürüzlülük Değerleri (R_a)	0,04	1400 dv/dk		
		0,05	0,12	0,07
		1000 dv/dk		
		0,05	0,05	0,14
		710 dv/dk		
		0,19	0,14	0,11

Şekil 7.21’de proses sonrasındaki malzemelere ait aşınma oranları ve ortalama sertlik değerleri bir arada verilmiştir. Şekil incelendiğinde, 1000 dv/dk’da 40 ve 56 mm/dk’lık proses parametrelerine sahip iki numune hariç diğer numunelerde, esas malzemeye oranla aşınma oranları düşmüştür. Sertlik değerlerine bakıldığında ise esas malzemenin sertlik değeri diğer tüm numunelere oranla yüksektir. Proses sonrasında numunelerde sertlik düşüşü görülmektedir. Sertlik değerlerinin düşmesi ile 5 ve 6 nolu numuneler hariç diğer numunelerde aşınma oranlarının yükselmediği görülmektedir. 5 ve 6 nolu numunelerde, mikroyapısal hatalar ve ilave edilen tozun aşınma bölgesinde



Şekil 7.21. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelere ait, aşınma oranları ve ortalama sertlik değerleri.

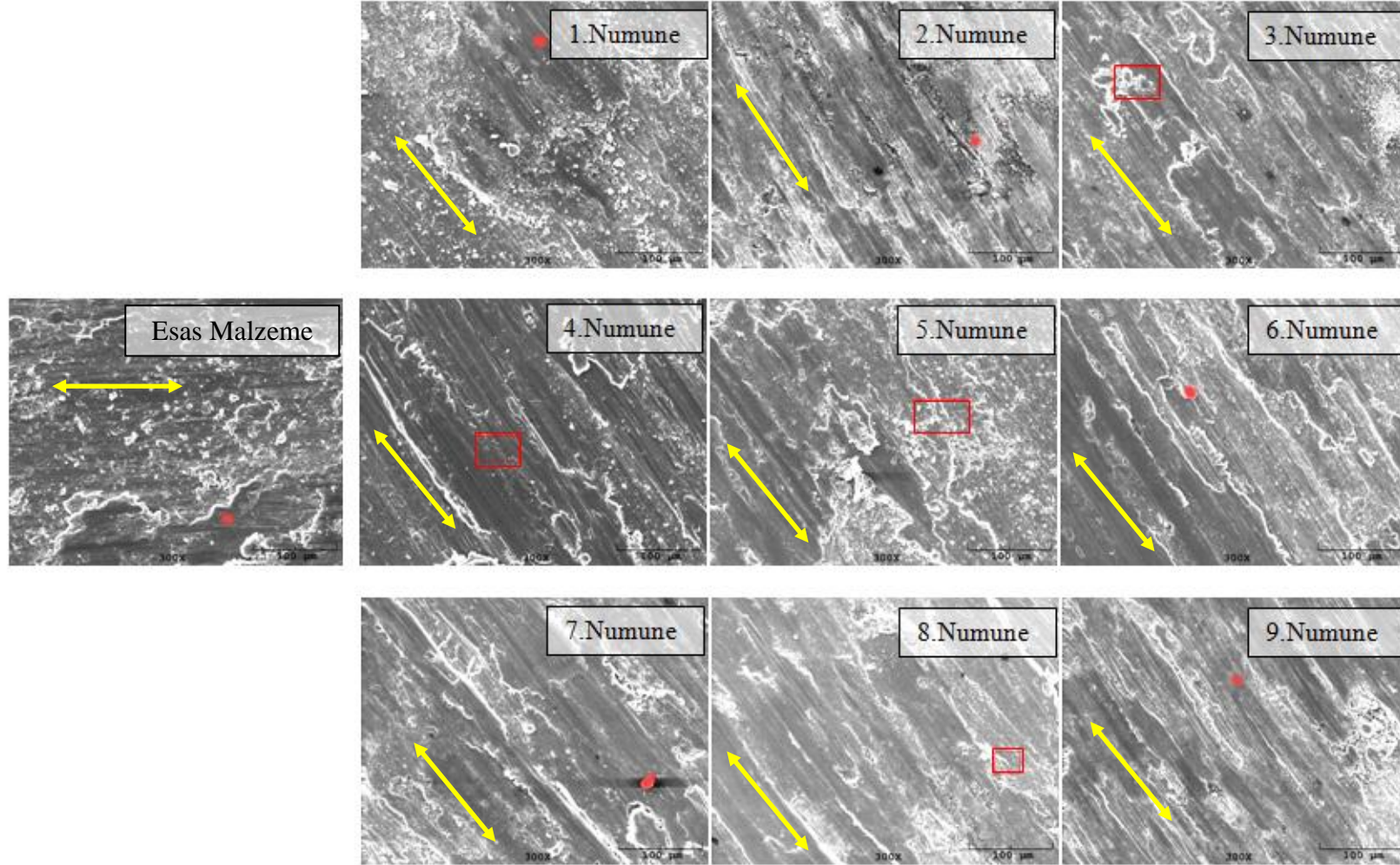
homojen dağılmamasından kaynaklanan sorunlardan dolayı aşınma oranlarının esas malzemeye oranla yüksek çıktığı düşünülmektedir. Diğer numunelerde ise ilave edilen SiC partikülleri aşınmaya karşı direnci arttırmış ve aşınma oranlarının düşük çıkmasını sağlamıştır.

Numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, aşınma deneyi esnasında aşındırıcı 100Cr6 kürenin aşınma doğrultusunda git-gel hareketi sonucunda yüzeylerde delaminasyon oluşturduğu söylenebilir (Şekil 7.22). Aşınmış yüzeylerde adhezif aşınma etkileri görülmektedir.

EDS analizlerinin yapıldığı bölgeler, Şekil 7.22’de görüntülerin üzerinde kırmızı renk ile belirtilmiştir. EDS analizleri, aşınmış bölgelerde meydana gelebilecek kimyasal reaksiyonların, malzemedan kopan ya da malzemeye takviye edilmiş partiküllerin tespiti için yapılmıştır. Aşınmış profil içerisinde farklılık gösteren bölgelerden analizler yapılmış ve bu analiz sonuçları Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Aşınmış malzemelerin EDS analizleri sonucunda elde edilen değerler.

	Malzeme Kod Numaraları									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al	89,2	53,8	71,3	84,4	89,4	86,1	86,7	75,3	62,4	76,2
Zn	5,23	3,93	6,54	2,25	4,92	4,02	4,65	6,99	3,4	3,93
Mg	2,38	1,55	1,82	2,25	2,31	2,41	2,22	1,5	1,52	1,96
Si	-	32,2	2,86	0,37	-	-	2,2	4	16,6	3
O	3,18	8,36	19,7	6,42	3,26	7,41	4,19	8,09	16	14,8
C	-	-	-	-	-	-	-	4,05	-	-



Şekil 7.22. SKP uygulanmış malzemelerin aşınmış profillerinin SEM görüntüleri (300x).

8. SONUÇLAR

Al7075 – T651 alüminyum alaşımının belirlenen parametrelerde SKP yöntemi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Sürtünme karıştırma prosesi uygulanan malzemelerin üst yüzeyleri, 56,40 mm/dk ilerleme ve 1400 dv/dk devir hızlarında deforme olmaktadır.
- Sürtünme karıştırma prosesi uygulanırken takıma verilen 2,5°'lik açı ile yüzey düzgünlüğü sağlanmıştır.
- Deneylerde kullanılan 1000 dv/dk takım devir hızı ve 20 mm/dk takım ilerleme hızı ile 710 dv/dk takım devir hızı ve 20 mm/dk takım ilerleme hızı, yapısal incelemeler sonucunda boşluksuz birer yapı elde edebilmek için seçilebilecek proses parametreleri olarak belirlenmiştir.
- SKP uygulanmış malzemelerde ölçülen ortalama sertlik değerleri esas malzemeye göre daha düşük (106-130 HV arasında) elde edilmiştir. SKP uygulanmış malzemelerde ısı girdisi ile önceden ısı işlemi görmüş malzemedeki çökelmiş ince tanelerin büyümesi ile malzemedeki sertliğin düştüğü söylenebilir.
- 20 mm/dk ilerleme hızına göre 40 ve 56 mm/dk ilerleme hızlarında, sabit devirde sertliğin artış gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni takım ilerleme hızı arttıkça ısı girdisinin azalması ve malzemenin daha çabuk soğuyarak sertleşmesidir. Takım ilerleme hızları arasında sertlik dağılımları incelendiğinde, en düşük sertlik değerleri en düşük takım ilerleme hızına sahip proses parametrelerinin uygulandığı durumlarda elde edilmiştir.

- Aşınma oranları incelendiğinde, esas malzemeye göre 5 ve 6 nolu numuneler aşınma oranları yüksek, diğer numunelerin ise düşük çıkmıştır. 5 ve 6 nolu numunelerin aşınma oranlarının yüksek olması, aşınma bölgelerindeki SiC tozlarının oranının az olması (Çizelge 7.3) ve homojen dağılmaması (Şekil 7.2) ile mikro yapısal kusurlarının çok olmasıdır.
- En iyi aşınma oranı 710 dv/dk takım devir hızı ile 56 mm/dk takım işleme hızında işlenen numunede görülmüştür.
- Çizelge 7.3 incelendiğinde, aşınma sonrasında aşınmış bölgenin EDS analizi sonucunda, malzemenin kimyasal yapısında bulunmayan O elementinin bulunduğu görülmektedir. Bu element Al elementi ile reaksiyona girerek Al_2O_3 oksit formunu oluşturur. Bhushan (2000)' a göre aşınma bölgesindeki oksitler kimyasal olarak malzemedeki farklı veya oksitler aşınma bölgesinde malzeme ile aşındırıcı bilye arasında üçüncü eleman durumunda ise aşınmayı ve sürtünmeyi olumlu yönde etkileyebilir.
- Proses sonrasında yapılan sertlik ölçümleri sonucunda, sertlik dağılımları esas malzemeye oranla daha düşük çıkmasına rağmen aşınma oranları 5 ve 6 nolu numuneler hariç diğer numunelerde düşük çıkmıştır. Sertliğin düşmesi ile aşınma davranışlarında da bir düşüş olduğu söylenemez.
- Malzemeye takviye edilen seramik partiküller ile malzemedeki aşınma direnci arttırılmıştır.
- SEM görüntüleri incelendiğinde genel aşınmanın adhezif olduğu ve bazı bölgelerde aşınma doğrultusunda hafif kanalların açılması sonucunda ise bu bölgelerde abrazyon etkilerinin olduğu düşünülmektedir.

Isıl işlem yapılmış alüminyum alaşımlarının SKP/SKK işlemi sonrasında sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. SKP işleminde takviye elemanı olarak kullanılan seramik partiküller ise karışım bölgesinde bir miktar sertliği, IEB bölgesindeki sertlik değerlerine göre arttırmaktadır. SiC gibi seramik partikül ilavesi ile elde edilen kompozit malzemelerin aşınma davranışları incelendiğinde, SiC ilave edilmemiş malzemeye oranla aşınma davranışlarının iyileştiği görülmektedir. İlave edilen seramik partiküller malzemenin aşınma direncini arttırmaktadır. Chen ve arkadaşları 2009 yılındaki bir çalışmada, ısıl işlem görmüş bir alüminyum alaşımına SKP/SKK işlemi uygulandıktan sonra tekrar çökelme sertleşmesi ısıl işlemi yapıldığı durumda, eski sertlik değerlerine ulaşabildiğini yaptıkları deneyler sonrasında raporlamışlardır. Bu durumda, ısıl işlem görmüş bir alüminyum alaşımına SKP yöntemi ile seramik partikül ilavesi yapılarak aşınma davranışlarının iyileştirilebileceği ve ardından çökelme sertleşmesi ısıl işlemi yapılarak eski sertlik değerlerine döndürülebildiği yapılan çalışmalar sonrasında ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında, SKP uygulanmış malzemelerdeki azalan sertlik değerlerini, SKP uygulanmadan önceki sertlik değerlerine döndürmek için herhangi bir ısıl işlem yapılmamıştır. Çalışmanın amacı, SKP uygulanmış malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek ve aşınma davranışlarını incelemektir. Yapılan çalışmada, SiC partikül takviyesi ile SKP uygulanmış Al 7075-T651 alaşımının aşınma davranışlarının iyileştirilebildiği belirlenmiştir.

9. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Bhushan, B. (Ed.), 2000, Modern Tribology Handbook I, CRC Press, 755p.
- Binal, A., 2006, AA2024-T3 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özelliklere etkileri, Yüksek Lisans Tezi, OGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 130 s. (yayımlanmamış).
- Buytoz, S., 2004, AISI 4340 çeliğinin nitrürasyon ve GTA kaynak ile yüzey modifikasyonu işlemleri sonrası mekaniksel davranışlarının araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 187 s. (yayımlanmamış).
- Campbell, F.C., 2006, Manufacturing Technology For Aerospace Structural Materials, Elsevier Ltd., 600p.
- Can, A.Ç., 2006, Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi Ltd. Şti., 317s.
- Chen, X.G., Silva, M., Gougeon, P. and Georges, L.S., 2009, Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6063-B₄C metal matrix composites, Materials Science and Engineering, 518, 174-184.
- Chen, Y., Liu, H. and Feng, J., 2006, Friction stir welding characteristics of different heat-treated-state 2219 aluminum alloy plates, Materials Science and Engineering, 420, 21-25.
- Dasgupta, R. and Meenai, H., 2005, SiC particulate dispersed composites of an Al- Zn- Mg-Cu alloy: Property comparison with parent alloy, Materials Characterization, 54, 438-445.
- Deuis, R.L., Subramanian, C. and Yellup, J.M., 1997, Dry sliding wear of aluminium composites-A review, Composites Science and Technology, 57, 415-435.
- Fuller, B.C., Mahoney, W.M., Calabrese, M., Micono, L., 2010, Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds, Materials Science and Engineering A, 527, 2233-2240.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hwang, Y.M., Kang, Z.W., Chiou, Y.C. and Hsu, H.H., 2008, Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 778-787.
- Ipek, R., 2005, Adhesive wear behaviour of B₄C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites (Al/ B₄C-Al/ SiC), *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 71-75.
- Kainer, U.K., 2003, *Metal Matrix Composite*, WILEY- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 314 p.
- Kaluç, E. Ve Taban E., 2007, Sürtünen Eleman ile Kaynak (SKK) Yöntemi, *Makine Mühendisleri Odası, Ankamat Matbaacılık Ltd. Şti.*, 227s.
- Kaufman, J.G., 2000, *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, United States of America, *Asm International®*, 248p.
- Kaya, I., Al 7075 Alaşımının Şekillenme ve Isıl İşleme Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 83s. (yayımlanmamış).
- Kınıkoğlu, N.G., 2001, *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Literatür Yayıncılık, 855 s.
- Lim, C.Y.H., Lim, S. C. and Gupta, M., 2003, Wear behaviour of SiC_p-reinforced magnesium matrix composites, *Wear*, 255, 629-637.
- Ma, Z.Y., Liang, Y.N., Zhang, Y.Z., Lu, Y.X., Bi, J., 1996, Sliding wear behaviour of SiC particle reinforced 2024 aluminium alloy composites, *Materials Science and Technology*, 12, 751-756.
- Mahmoud, E.R.I, Takahashi, M., Shibayanagi, T. and Ikeuchi, K., 2010, Wear characteristics of surface-hybrid-MMCs layer fabricated on aluminum plate by friction stir processing, *Wear*, 268, 1111-1121.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Miracle, D.B., 2005, Metal matrix composites – From science to technological significance, *Composite and Science Technology*, 65, 2526-2540.
- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., 2005, Friction Stir Welding and Processing, *Materials Science and Engineering*, 50, 1-78.
- Mishra, R.S. and Mahoney, W.M. (Ed.), 2007, Friction Stir Welding and Processing, United States of America, Asm International®, 353p.
- Mishra, R.S., Ma, Z.Y. and Charit, I., 2003, Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite, *Materials Science and Engineering*, 341, 307-310.
- Moreira, P.M.G.P., Santos, T., Tavares S.M.O, Richter-Trummer, V., Vilaça, P. and Castro P.M.S.T., 2009, Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6, *Materials and Design*, 30, 180-187.
- Nunes, R., 1992, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, United States of America, Asm International®, 3469 p.
- Olea, C.A.W., Roldo, L., Santos J.F. and Strohaecker, T.R., 2007, A sub-structural analysis of friction stir welded joints in an AA6056 Al-alloy in T4 and T6 temper conditions, *Materials Science and Engineering*, 454-455, 52-62.
- Özdin, K., 2006, Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli kompozitlerin üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 134s. (yayımlanmamış).
- Shafiei-Zarghani, A., 2009, Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produce by friction stir processing, *Material Science and Engineering*, 500, 84-91.
- Shafiei-Zarghani, A., Kashani-Bozorg, S.F. and Zarei-Hanzaki, A., 2009, Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stir processing, *Materials Science and Engineering*, 500, 84-91.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Stachowiak, G.W. (Ed.), 2005, *Wear Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons Ltd., 458p.
- Su, J.Q., Nelson, T.W., Mishra, R. and Mahoney, M., 2003, Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminum, *Acta Materialia*, 51, 713-729.
- Şahin, Y., 1996, Sürekli B(SiC) elyafla takviyeli alüminyum matriksli kompozit malzemelerinin mikroyapısı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, *Endüstriyel Teknoloji*, 2, 41-46.
- Şahin, Y., 2000, *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara, 424 s.
- Uzun, H., 2007, Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite, *Materials and Design*, 28, 1440-1446.
- Yang, B., Yan, J., Sutton, M.A., Reynolds, A.P., 2004, Banded microstructure in AA2024-T351 and AA2524-T351 aluminum friction stir welds Part I. metallurgical studies, *Materials Science and Engineering A*, 364, 55-65.
- Zahmatkesh, B., Enayati, M.H. and Karimzadeh, F., 2010, Tribological & microstructural evolution of friction stir processed Al2024 alloy, *Materials and Design*, 31, 4891-4896.