



**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI YÖNTEMİ
İLE AA7075 LEVHALARIN BİRLEŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Büşra GÜROCAK
(162134102)**

**Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği
Danışman: Doç. Dr. Furkan SARSILMAZ**

TEMMUZ 2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE AA7075
LEVHALARIN BİRLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Büşra GÜROCAK
(162134102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 09.07.2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.07.2019

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Furkan SARSILMAZ (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi İlker TEMİZER (C.Ü.)

Doç. Dr. Engin ÜNAL (F.Ü.)

TEMMUZ-2019

ÖNSÖZ

Tez çalışması süresince her zaman hoşgörüsü ile karşılaştığım, kadro sınavları için çalıştığım süre zarfında manevi desteğini esirgemeyen ve tecrübeleri ile yanımda olan danışman hocam Doç. Dr. Furkan SARSILMAZ'a en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımı sürdürmeme yardımcı olan Doç. Dr. Engin ÜNAL'a, MKE Silah Fabrikasında görev alan İbrahim SALAR'a, numunelerin hazırlanması aşamasında bana yardımcı olan Doç. Dr. Fikret YILMAZ'a, analizlerimin bir kısmını gerçekleştirdiğim Erciyes üniversitesi teknoloji araştırma ve uygulama merkezinde uzman olan İhsan AKŞİT'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasından benden desteğini esirgemeyen Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesinde Arş. Gör. olan Oğuzhan PEKTEZEL'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Yaşam boyu maddi ve manevi desteklerini hissettiğim, her zaman yanımda olup beni hiç yalnız bırakmayan annem Yüksel GÜROCAK'a, babam Kadir GÜROCAK'a ve kardeşlerime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Büşra GÜROCAK
ELAZIĞ-2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	XI
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	2
1.1.1 Alüminyum Alaşımları Arasında SKNK	2
1.1.2 Alüminyum ve Magnezyum Arasında SKNK	8
1.1.3 Alüminyum ve Çelik Arasındaki SKNK	9
1.1.4 Alüminyum ve Bakır Arasında SKNK	10
1.2 Tezin Amacı	12
2. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARI	13
2.1 Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	14
2.2 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	15
2.2.1 Döküm Alüminyum Alaşımları	16
2.2.2 Dövme Alüminyum Alaşımları	16
2.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlem Özellikleri	19
2.4 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Çeşitli Endüstri Dallarında Kullanım Alanları	20
2.4.1 Otomotiv Endüstrisi	20
2.4.2 Gemi ve Taşımacılık Yapım Endüstrisi	21
2.4.3 Savunma ve Havacılık Endüstrisi	21
3. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAĞI	22
3.1 Katı Hal Kaynak Yöntemleri	22
3.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı	25

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI.....	30
4.1 Kaynak Yönteminin Tanımı	30
4.2 SKNK Yönteminin Uygulanışı.....	31
4.3 Kaynağın Başarısını Etkileyen Parametreler	34
4.4 Kaynağın Metalürjik Yapısı	36
4.5 SKNK Takımı.....	38
4.6 SKNK Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	40
4.7 SKNK Yönteminin Makine ve Ekipmanları	41
5. MATERYAL ve METOT	43
5.1 Giriş	43
5.2 Kaynak Öncesi İşlemler.....	43
5.2.1 Çalışmada Kullanılan Malzeme ve Özellikleri.....	43
5.2.2 Karıştırıcı Uçların Hazırlanması.....	44
5.2.3 Deneyler İçin Belirlenen Kaynak Parametreleri.....	46
5.3 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının Uygulanması.....	46
5.4 Metalografik İncelemeler	49
5.4.1 Mikro Yapı İncelemesi	50
5.5 Mekanik Deneyler	51
5.5.1 Mikro Sertlik Testi	51
5.5.2 Çekme Testi Deneyi	53
6. BULGULAR ve TARTIŞMA	55
6.1 Kaynak Bağlantılarının Mikro Yapı Değerlendirmesi	55
6.1.1 Devir Sayısının Etkisi.....	106
6.1.2 Uç Profilinin Etkisi.....	107
6.1.3 Dalma Mesafesinin Etkisi.....	108
6.2 Mekanik İncelemeler	109
6.2.1 Mikro Sertlik Özellikleri	109
6.2.2 Çekme Testi Performansı	114
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	125
KAYNAKLAR.....	127
ÖZGEÇMİŞ	132

ÖZET

Bu çalışmada Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yöntemi kullanılarak AA7075 serisi alüminyum alaşımı sac levhalarının kaynağı yapılmıştır. Çalışmada kullanılan AA7075 alaşımı güncel bir alaşım olup avantajları dahilinde bir çok alanda kullanılmaktadır. Avantajları doğrultusunda seçtiğimiz alüminyumun SKNK yöntemi ile birleştirme işlemi yapılırken takım dalma mesafesi, takım devri ve takım profili olmak üzere 3 parametre esaslı üzerinde durulmuştur. Toplamda 16 adet numune için kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. SKNK ile elde edilen 16 adet numunenin bağlantı bölgelerinde mekanik özellikler ve kaynak bölgesinin mikro yapı özellikleri incelenmiştir.

Analizler sonucunda çekme dayanımı, mikro sertlik ve mikro yapı özellikleri elde edilmiştir. Elde edilen verilerle SKNK kaynağının AA7075 alüminyum alaşımı üzerindeki kaynak kabiliyeti bu tez çalışmasında sunulmuştur.

Bu tez çalışması sonucunda işlem parametrelerinin, kaynak kalitesi üzerinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Kaynak işlemi sonrasında uygun devir sayısı, kaynak dalma mesafesi ve karıştırıcı uç profili kombinasyonlarında kaynak kalitesini arttırmak mümkün olabilmektedir. Elde ettiğimiz sonuçlar ile AA7075 alaşımının kaynağı için kullanılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı, ince kesitli metal malzemelerinin kaynağı sırasında yaşanan sorunlara çözüm getireceği düşünülmektedir. Bu doğrultuda yaşanan sorunlar minimum seviyeye çekilip maliyet, güvenilirlik, kalite vb. birçok konuda sektöre katkı sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı(SKNK), Alüminyum, Mekanik özellikler, Mikro yapı, Mikro sertlik.

SUMMARY

Joining of AA7075 Plates By Friction Stir Spot Welding

In this study, welding of AA7075 series aluminum alloy sheet plates was made by using friction stir spot welding (FRSW) method. AA7075 alloy used in the study is a current alloy which used in many areas within the advantages. In line with its advantages, while the joining process of the aluminum with FRSW method, 3 parameters are considered as tool plunge distance, tool speed and tool profile. A total of 16 samples were welded. The mechanical properties and the microstructural properties of the welded regions of the 16 samples obtained with FRSW were investigated.

As a result of the analyses tensile strength, micro hardness and microstructure properties were obtained. The welding capability of FRSW welding on AA7075 aluminum alloy is presented in this thesis.

As a result of this thesis, it has been determined that process parameters play an important role on welding quality. After the welding process, it is possible to increase the welding quality in suitable combinations of speed, plunge distance and mixer profile. With our results friction stir spot welding used for the welding of AA7075 alloy, is thought to solve the problems encountered during the welding of thin section metal materials. The problems experienced in this direction are minimized and cost, reliability, quality and so on. will contribute to the sector in many areas.

KeyWords: Friction Stir Spot Welding (FRSW), Aluminum, Mechanical Properties, Microstructure, Microhardness.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. 1200 rpm dönme hızı ve 4 s bekleme süresi kaynak koşulunda yapılan kaynağın boyuna kesiti ve üzerindeki mikro yapılar: (a) kaynak bölgesinin enine kesiti, (b) sırasıyla a da işaretli bölgelerin (A1-D) bölgelerinin büyütülmüş görünüşleri	4
Şekil 1.2. 800 rpm ve 0,5 mm (A) ve 1,0 mm (B) omuz dalma derinliği kaynak koşullarında konik pim (3mm uzunluk) ve içbükey bir omuz (15mm çap) kullanılarak üretilen kaynak bakır halka boyutu	11
Şekil 2.1. Alüminyum alaşımlarında elementlerin genel bileşimleri	16
Şekil 2.2. Al-Zn diyagramının Al köşesi.....	18
Şekil 3.1. Haddelme kaynağı.....	23
Şekil 3.2. Patlamalı kaynak: paralel konfigürasyon yerleştirme(A), ve patlayıcının patladığı durum(B).	24
Şekil 3.3. Sürtünme kaynağı: Dönen parça, temas yok (A); Sürtünme ısısı üretmek için parçalar temas haline getirilir(B); Dönme durdurulur ve eksenel basınç uygulanır(C); Kaynak oluşturulur(D).....	24
Şekil 3.4. Ultrasonik kaynak: Bindirme bağlantı için gereken ekipmanlar(A); Kaynak bölgesinin yakından görünüşü(B).....	25
Şekil 3.5. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanması.....	26
Şekil 3.6. SKK yönteminde kullanılan farklı profildeki kaynak uçları.....	28
Şekil 3.7. AA7075 çiftinin kaynak sonrası mikro yapısal bölgeleri.	29
Şekil 4.1. SKNK yönteminin şematik gösterimi.	31
Şekil 4.2. SKNK işleminin akış şeması.....	32
Şekil 4.3. SKNK yönteminin spor bir otomobilin arka kapılarına ve gövde panellerine uygulanması.....	34
Şekil 4.4. Malzeme akışını arttırmak için tasarlanan omuz geometrileri.....	35
Şekil 4.5. Çeşitli omuz geometrileri. a) Konveks geometrili omuz, b) Konkav geometrili omuz.	35
Şekil 4.6. SKNK eklemineki farklı bölgeler.	36
Şekil 4.7. IEB’de tane sınırlarında toplanan çökeltiiler	38
Şekil 4.8. Örnek SKNK takımları	39

Şekil 4.9. Sabit tip ve pres tipi SKNK makinesi	41
Şekil 4.10. Masa üstü SKNK makinesi	42
Şekil 4.11. SKNK robotları	42
Şekil 6.1. Mikro yapı fotoğrafı işlemi için kroki	55
Şekil 6.2. S4 numunesi omuz sağ 5x	56
Şekil 6.3. A) S4 numunesi omuz sağ 10x, B) S4 numunesi omuz sağ 20x.	56
Şekil 6.4. S4 numunesi omuz sol 5x.	58
Şekil 6.5. A) S4 numunesi omuz sol 10x, B)S4 numunesi omuz sol 20x.....	58
Şekil 6.6. S4 numunesi pim sağ alt 5x.	59
Şekil 6.7. A) S4 numunesi pim sağ alt 10x, B) S4 numunesi pim sağ alt 20x.....	59
Şekil 6.8. S4 numunesi pim sağ üst 5x.....	60
Şekil 6.9. A) S4 numunesi pim sağ üst 10x, B)S4 numunesi pim sağ üst 20x.	60
Şekil 6.10. S4 numunesi pim sol alt 5x.	61
Şekil 6.11. A) S4 numunesi pim sol alt 10x, B)S4 numunesi pim sol alt 20x.	61
Şekil 6.12. S4 numunesi pim sol üst 5x.	62
Şekil 6.13. A) S4 numunesi pim sol üst 10x, B)S4 numunesi pim sol üst 20x.....	62
Şekil 6.14. A) S4 numunesi orta sol 5x, B) S4 numunesi orta sağ 5x.	63
Şekil 6.15. S8 numunesi omuz sağ 5x.....	65
Şekil 6.16. A) S8 numunesi omuz sağ 10x, B) S8 numunesi omuz sağ 20x.....	65
Şekil 6.17. S8 numunesi omuz sol 5x.	66
Şekil 6.18. A) S8 numunesi omuz sol 10x, B) S8 numunesi omuz sol 20x.....	66
Şekil 6.19. S8 numunesi pim sağ alt 5x.	67
Şekil 6.20. A) S8 numunesi pim sağ alt 10x, B) S8 numunesi pim sağ alt 20x.....	67
Şekil 6.21. S8 numunesi pim sağ üst 5x.....	68
Şekil 6.22. A) S8 numunesi pim sağ üst 10x, B) S8 numunesi pim sağ üst 20x.	68
Şekil 6.23. S8 numunesi pim sol alt 5x.	69
Şekil 6.24. A) S8 numunesi pim sol alt 10x, B) S8 numunesi pim sol alt 20x.	69
Şekil 6.25. S8 numunesi pim sol üst 5x.	70
Şekil 6.26. A) S8 numunesi pim sol üst 10x, B) S8 numunesi pim sol üst 20x.....	70
Şekil 6. 27. A) S8 numunesi orta sol 5x, B)S4 numunesi orta sağ 5x.	71
Şekil 6.28. S10 numunesi omuz sağ 5x.....	72
Şekil 6.29. A) S10 numunesi omuz sağ 10x, B) S10 numunesi omuz sağ 20x.....	72
Şekil 6.30. S10 numunesi omuz sol 5x.	73

Şekil 6.31. A) S10 numunesi omuz sol 10x, B) S10 numunesi omuz sol 20x.....	73
Şekil 6.32. S10 numunesi pim sağ alt 5x.	74
Şekil 6.33. A) S10 numunesi pim sağ alt 10x, B) S10 numunesi pim sağ alt 20x.....	74
Şekil 6.34. S10 numunesi pim sağ üst 5x.....	75
Şekil 6.35. S10 numunesi pim sağ üst 10x, B) S10 numunesi pim sağ üst 20x.....	75
Şekil 6.36. S10 numunesi pim sol alt 5x.	76
Şekil 6.37. S10 numunesi pim sol alt 10x, B) S10 numunesi pim sol alt 20x.	76
Şekil 6.38. S10 numunesi pim sol üst 5x.	77
Şekil 6.39. S10 numunesi pim sol üst 10x, B) S10 numunesi pim sol üst 20x.	77
Şekil 6.40. A) S10 numunesi orta sol 5x, B) S10 numunesi orta sağ 5x.	78
Şekil 6.41. S11 numunesi omuz sağ 5x.....	79
Şekil 6.42. A) S11 numunesi omuz sağ 10x, B) S11 numunesi omuz sağ 20x.....	79
Şekil 6.43. S11 numunesi omuz sol 5x.	80
Şekil 6.44. A) S11 numunesi omuz sol 10x, B) S11 numunesi omuz sol 20x.....	80
Şekil 6.45. S11 numunesi pim sağ alt 5x.	81
Şekil 6.46. A) S11 numunesi pim sağ alt 10x, B) S11 numunesi pim sağ alt 20x.....	81
Şekil 6.47. S11 numunesi pim sağ üst 5x.....	82
Şekil 6.48. A) S11 numunesi pim sağ üst 10x, B) S11 numunesi pim sağ üst 20x.	82
Şekil 6.49. S11 numunesi pim sol alt 5x.	83
Şekil 6.50. A) S11 numunesi pim sol alt 10x, B) S11 numunesi pim sol alt 20x.	83
Şekil 6.51. S11 numunesi pim sol üst 5x.	84
Şekil 6.52. A) S11 numunesi pim sol üst 10x, B) S11 numunesi pim sol üst 20x.....	84
Şekil 6.53. A) S11 numunesi orta sol 5x, B) S11 numunesi orta sağ 5x.	85
Şekil 6.54. S13 numunesi omuz sağ 5x.....	86
Şekil 6.55. A) S13 numunesi omuz sağ 10x, B) S11 numunesi omuz sağ 20x.....	86
Şekil 6.56. S13 numunesi omuz sol 5x.	87
Şekil 6.57. A) S13 numunesi omuz sol 10x, B) S11 numunesi omuz sol 20x.....	87
Şekil 6.58. S13 numunesi pim sağ alt 5x.	88
Şekil 6.59. A) S13 numunesi pim sağ alt 10x, B) S13 numunesi pim sağ alt 20x.....	88
Şekil 6.60. S13 numunesi pim sağ üst 5x.....	89
Şekil 6.61. A) S13 numunesi pim sağ üst 10x, B) S13 numunesi pim sağ üst 20x.	89
Şekil 6.62. S13 numunesi pim sol alt 5x.	90
Şekil 6.63. A) S13 numunesi pim sol alt 10x, B) S13 numunesi pim sol alt 20x.	90

Şekil 6.64. S13 numunesi pim sol üst 5x.	91
Şekil 6.65. A) S13 numunesi pim sol üst 10x, B) S13 numunesi pim sol üst 20x.	91
Şekil 6.66. A) S13 numunesi orta sol 5x, B) S13 numunesi orta sağ 5x.	92
Şekil 6.67. S14 numunesi omuz sağ 5x.	93
Şekil 6.68. A) S14 numunesi omuz sağ 10x, B) S14 numunesi omuz sağ 20x.	93
Şekil 6.69. S14 numunesi omuz sol 5x.	94
Şekil 6.70. A) S14 numunesi omuz sol 10x, B) S14 numunesi omuz sol 20x.	94
Şekil 6.71. S14 numunesi pim sağ alt 5x.	95
Şekil 6.72. A) S14 numunesi pim sağ alt 10x, B) S14 numunesi pim sağ alt 20x.	95
Şekil 6.73. S14 numunesi pim sağ üst 5x.	96
Şekil 6.74. A) S14 numunesi pim sağ üst 10x, B) S14 numunesi pim sağ üst 20x.	96
Şekil 6.75. S14 numunesi pim sol alt 5x.	97
Şekil 6.76. A) S14 numunesi pim sol alt 10x, B) S14 numunesi pim sol alt 20x.	97
Şekil 6.77. S14 numunesi pim sol üst 5x.	98
Şekil 6.78. A) S14 numunesi pim sol üst 10x, B) S14 numunesi pim sol üst 20x.	98
Şekil 6.79. A) S14 numunesi orta sol 5x, B) S14 numunesi orta sağ 5x.	99
Şekil 6.80. S15 numunesi omuz sağ 5x.	100
Şekil 6.81. A) S15 numunesi omuz sağ 10x, B) S15 numunesi omuz sağ 20x.	100
Şekil 6.82. S15 numunesi omuz sol 5x.	101
Şekil 6.83. A) S15 numunesi omuz sol 10x, B) S15 numunesi omuz sol 20x.	101
Şekil 6.84. S15 numunesi pim sağ alt 5x.	102
Şekil 6.85. A) S15 numunesi pim sağ alt 10x, B) S15 numunesi pim sağ alt 20x.	102
Şekil 6.86. S15 numunesi pim sağ üst 5x.	103
Şekil 6.87. A) S15 numunesi pim sağ üst 10x, B) S15 numunesi pim sağ üst 20x.	103
Şekil 6.88. S15 numunesi pim sol alt 5x.	104
Şekil 6.89. A) S15 numunesi pim sol alt 10x, B) S15 numunesi pim sol alt 20x.	104
Şekil 6.90. S15 numunesi pim sol üst 5x.	105
Şekil 6.91. A) S15 numunesi pim sol üst 10x, B) S15 numunesi pim sol üst 20x.	105
Şekil 6.92. A) S15 numunesi orta sol 5x, B) S15 numunesi orta sağ 5x.	106
Şekil 6.93. A) S4 numunesine ait flash miktarı B) S10 numunesine ait flash miktarı.	108
Şekil 6.94. Mikro sertlik alınan noktalar.	109
Şekil 6.95. 7 numune için mikro sertlik grafiği.	110
Şekil 6.96. S15 numunesi üzerinden mikro sertlik alınan diğer noktalar.	111

Şekil 6.97. S15 numunesi mikro sertlik grafiği 2.....	112
Şekil 6.98. 10. Noktanın batıcı uç izi.	112
Şekil 6.99. 11. Noktanın batıcı uç izi.	113
Şekil 6.100. 12. Noktanın batıcı uç izi.	113
Şekil 6.101. S1 numunesi için yük-uzama eğrisi.	115
Şekil 6.102. Çekme testi sonrası kırılan S1 numunesi.	115
Şekil 6.103. S2 numunesi için yük-uzama eğrisi.	116
Şekil 6.104. Çekme testi sonrası kırılan S2 numunesi.	116
Şekil 6.105. S3 numunesi için yük-uzama eğrisi.	117
Şekil 6.106. Çekme testi sonrası kırılan S3 numunesi.	118
Şekil 6.107. S5 numunesi için yük-uzama eğrisi.	119
Şekil 6.108. Çekme testi sonrası kırılan S5 numunesi.	119
Şekil 6.109. S7 numunesi için yük-uzama eğrisi.	120
Şekil 6.110. Çekme testi sonrası kırılan S7 numunesi.	120
Şekil 6.111. S9 numunesi için yük-uzama eğrisi.	121
Şekil 6.112. Çekme testi sonrası kırılan S9 numunesi.	122
Şekil 6.113. S12 numunesi için yük-uzama eğrisi.	123
Şekil 6.114. Çekme testi sonrası kırılan S12 numunesi.	123

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. %99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri	15
Tablo 2.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması	17
Tablo 2.3. 7xxx Serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi.....	18
Tablo 2.4. 7075 Serisi alüminyum alaşımının mekanik özellikleri	18
Tablo 2.5. AA7075 Alüminyum alaşımının ısıtılma şartları ve sonrası mekanik özellikleri.....	19
Tablo 2.6. Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtılma işlemleri	20
Tablo 5.1. AA 7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi	44
Tablo 5.2. AA 7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	44
Tablo 5.3. Konik vida takımının özellikleri.....	45
Tablo 5.4. Üçgen piramit takımının özellikleri.....	45
Tablo 5.5. SKNK işlemi için parametreler	46
Tablo 6.1. Her numune için belirlenen noktalardan alınan mikro sertlik değerleri (HV)	109
Tablo 6.2. S15 numunesi için belirlenen noktalardan alınan sertlik değerleri (HV)	111
Tablo 6.3. Çekme testi uygulanan numuneler	114
Tablo 6.4. S1 numunesinin çekme testi sonuçları	115
Tablo 6.5. S2 numunesinin çekme testi sonuçları	117
Tablo 6.6. S3 numunesinin çekme testi sonuçları	118
Tablo 6.7. S5 numunesinin çekme testi sonuçları	119
Tablo 6.8. S7 numunesinin çekme testi sonuçları	121
Tablo 6.9. S9 numunesinin çekme testi sonuçları	122
Tablo 6.10. S12 numunesinin çekme testi sonuçları	123

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKNK	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
KHK	Katı Hal Kaynak
KB	Karıştırma Bölgesi
KDB	Kısmen Dövülmüş Bölge
IEB	Isıdan Etkilenen Bölge
TEB	Termomekanik Etkilenen Bölge
DKB	Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge
TM	Temel malzeme
DNK	Direnç Nokta Kaynağı

1. GİRİŞ

Küresel kaynak ve çevresel sorunların artmasından dolayı havacılık yapılarının, otomotiv gövdelerinin ve yüksek hızlı binek araçların vb. diğer yapıların ağırlıklarının azaltılmasına daha fazla önem verilmesi gerekmektedir. Daha hafif malzemelerin kullanılması ağırlığın azaltılması için önemli bir ölçüttür. Bu ölçüt dahilinde alüminyum alaşımı hafif, korozyona dirençli, özgül güç, darbe dayanımı ve yüksek geri dönüşüm gibi bir çok avantaj dahilinde uzay, havacılık ve otomotiv sektörü için kullanıma uygun malzemelerde ön plana çıkmaktadır [1].

Al alaşımlarında nokta kaynağı için kullanılan yöntemler dirençli nokta kaynağı ve perçinlemedir. Ancak bu yöntemlerden dirençli nokta kaynağı; yüksek enerji tüketimi, düşük üretim verimliliği, perçinleme ise kötü çalışma ortamı gibi birçok dezavantajı bulunmaktadır. Nokta kaynağı yöntemindeki gelişmelere rağmen kaynak bölgelerindeki mekanik ve mikro yapısal özellikler açısından herhangi bir iyileştirme yapılamamıştır [1]. Daha sonra Japonya’da bulunan Mazada şirketi, sürtünme karıştırma kaynağını (SKK) temel alarak sürtünme karıştırma nokta kaynağını (SKNK) önermiştir [1]. SKNK yöntemi bu şekilde zamanla çeşitli sektörlerde önemli başarılar elde etmeye başlamıştır. Elde edilen başarılarla birlikte nokta kaynağı yöntemleri arasında SKNK’nın potansiyel gücü artmaya başlamıştır. SKNK yöntemi otomobil modellerinden birinde kullanılarak yapılan çalışmada benzer olarak bilinen diğer nokta kaynaklarından enerji tüketimi açısından %90’dan fazla bir düşüş olduğu görülmüştür [2]. Birçok araştırmacı da SKNK yöntemine, mekanik özelliklerinin çok iyi olması, düşük bozulma, kullanım kolaylığı, düşük maliyet ve temiz çalışma ortamı gibi avantajlarından dolayı büyük ilgi gösterdi [2]. Elde edilen olumlu sonuçlar bu sürece dahil olan mekanizmaların daha derinden anlaşılması ihtiyacını doğurmuştur [2].

1.1 Literatür Taraması

Nispeten yeni bir üretim süreci olarak karşımıza çıkan SKNK yöntemi ile ilgili SKK'ya kıyasla sınırlı sayıda yayınlanmış araştırma çalışması bulunmaktadır. Ancak bununla birlikte konu ile alakalı birkaç çalışma, sempozyum ve konferanslarda tartışılmıştır [3]. Literatürde SKNK yöntemi ile yapılan çalışmaları 4 başlık altında incelenmiştir.

Bunlar [3];

- Alüminyum alaşımları arasında SKNK
- Alüminyum ve magnezyum arasında SKNK
- Alüminyum ve çelik arasındaki SKNK
- Alüminyum ve bakır arasında FSSW

1.1.1 Alüminyum Alaşımları Arasında SKNK

Alüminyum alaşımları arasında SKNK üzerine yıllar içinde birçok çalışma yapılmıştır. Uematsu ve arkadaşları, prob deliğini yeniden doldurabilen dış düz omuzdan ve içten içe çekilebilir bir probdan oluşan çift etkili takım kullanarak AA6061 T4 alaşımını birleştirmişlerdir. Kaynak bölgesinin mikro yapılarını, SKNK işlemi sırasında dinamik yeniden kristalleşmeye bağlı olarak ince yönlenmiş tanelerin gözlemlendiği TMZ (termodinamik etkilenmiş bölge) ve KB (karıştırılmış bölge) olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, temas bölgesinde gerilme mukavemetinin yeniden doldurma işlemi ile (refill) iyileştirildiğini bulmuşlardır [4].

Şenol Mert ve Sevda Mert çalışmalarında sektörde kullanılan Al içerikli malzemelerin genellikle direnç nokta kaynağı (DNK) yöntemiyle birleştirilmesinde sorunlar yaşandığını bu nedenle SKNK yönteminin özellikle otomotivde sıklıkla tercih edilen bindirme tipi kaynak yöntemine çok uyumlu birleştirmeler sağladığını çalışmalarında vurgulamışlardır. Ayrıca işlem parametrelerinden takım geometrisinin dışında takım devir sayısı, takım dalma derinliği ve bekleme süresinin bağlantının çekme mukavemeti üzerine çok önemli etkisi olduğunu tespit etmişlerdir [5].

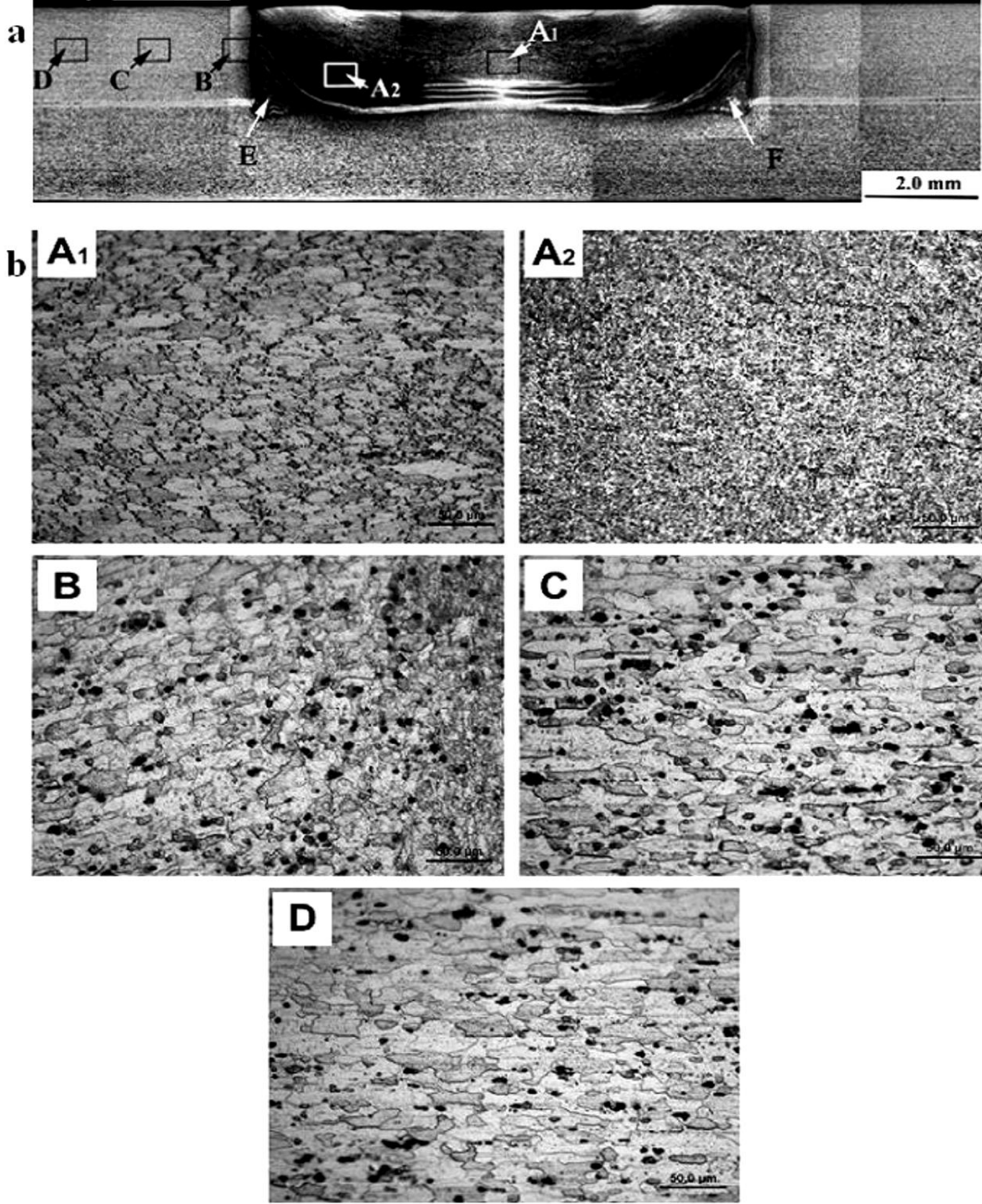
Frigaard ve arkadaşları AA6082 ve AA7108 plaka çiftlerinin sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasındaki gerilme oranını tahmin etmiş ve değerleri 1.6 ile 17 arasında olduğunu saptamışlardır. Saptanan gerilme oranları, sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında kullanılan takım dönme devrine dayanarak beklenenden düşük bir büyüklük değeri çıkmıştır. Bunu dayanak alarak, Frigaard ve arkadaşları tutarsızlığın karıştırma bölgesi içindeki karıştırıcı uç çevresi ve bitişik malzeme arasında kaymayı kolaylaştıran lokal erime ile ilişkili olduğunu ileri sürmüşlerdir [6].

Daha sonraki araştırmalarda, Bjørneklett ve arkadaşları AA7030 numunelerinin 330 °C/s'de ısıtma hızı ile ulaşılan ötektik sıcaklığında (475 °C), h partiküllerinin çözülmediğini ve kendiliğinden eritildiğini doğrulamışlardır. Buna karşılık, daha düşük bir ısıtma hızı (100 °C/s) uygulandığını 475 °C sıcaklığa ulaşıldığında tüm h parçacıklarının çözüldüğünü saptamışlardır. Bu sonuçlara dayanarak, ötektik sıcaklığa ulaşılmadan önce ikinci faz parçacıklarının çözünmesini sağlamak için sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında yüksek ısı girdilerinin kullanılması önerilmiştir [7].

Merzoug ve arkadaşları, X210 CR12 tipinde bir takım çeliği kullanarak AA6060-T5 üzerinde deneyler yapmışlardır. Takımın dönme hızı 1000 ila 2000 rpm arasında seçilmiştir. Çekme testleri, 1000 rpm'de ve 16 mm/dk'da üretilen numunenin, 25 mm/dk ve 2000 rpm'e göre daha kaliteli bir kaynağa sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Mikro sertlik, kaynak havuzundan uzaklaşırken maksimum değere yaklaştığını görülmüşlerdir [8].

Zhang ve arkadaşları, 1 mm kalınlığındaki AA5052-H112 takım ile kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Kaynaklarda yumuşama olduğu sonucuna varmışlardır. TEB bölgesinde ana malzemenin %47.5 bir değere karşılık gelen 19.2 HV gibi minimum bir sertlik değeri ölçülmüştür. Ek olarak, TEB ve KB'deki sertlik, sertlik dağılımını W-şekilli bir görünüm sergileyen eğri yeniden kristalleştirme sayesinde iyileştirilmiştir. Eklemlerin mukavemeti, artan takım dönme devri ile azalırken, verilen takımın bekleme süresinden ise neredeyse bağımsız olduğunu saptamışlardır [9].

Shen ve arkadaşları, 2 mm kalınlıkta AA7075-T6 plakaları kullanılmıştır. Takım dönme hızı 1500, 1750 ve 2000 rpm ve bekleme süresi 3, 4 ve 5s olarak değiştirilmiştir. AA7075-T6'nın yeniden doldurulmuş SKNK'nın mikro yapısını ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Kaynağın anahtar deliğini başarıyla yeniden doldurulduğunu, kaynağın mikro yapısını, genişlikteki tane boyutlarında ve Şekil 1.1'de gösterildiği gibi kalınlık yönlerinde farklılıklar gösterdiğini belirtmişlerdir [10].



Şekil 1.1. 1200 rpm dönme hızı ve 4 s bekleme süresi kaynak koşulunda yapılan kaynağın boyuna kesiti ve üzerindeki mikro yapılar: (a) kaynak bölgesinin enine kesiti, (b) sırasıyla a da işaretli bölgelerin (A1-D) bölgelerinin büyütülmüş görüntüleri [10].

Ek olarak kanca, boşluklar, bağlanma bağları ve eksik doldurma gibi malzeme akışına bağlı kusurları gözlemlemiştir. Kaynağın sertlik profili, makroskobik seviyede W şeklinde bir görünüm sergilemiştir. Sertlikteki değişimi, malzemedeki çökelme durumunun belirleyici bir rol oynadığı çeşitli faktörlerin kapsamlı etkilerine bağlı olduğu düşünülmüştür [10].

Shen ve arkadaşları, omuz çapı 10 mm olan içbükey bir profil yüksek hızlı çelik takımı (JIS, SKD61) kullanarak 2 mm kalınlığında AA6061-T4 alüminyum alaşımlı levhaları kaynak etmişlerdir. Birleşim en iyi, yüksek dönme hızında ve daha uzun bekleme süresi ile elde etmişlerdir. Kaynağın mikro yapıları, TM, IEB, TEB ve KB olmak üzere dört bölgeye ayrılmıştır, kaynakta dinamik yeniden kristalleşme ve çökeltilerin çözünmesi bulunmaktadır. Kanca geometrileri, dönme hızına ve bekleme süresine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Kanca oluşumu, aletin dikey olarak düşmeyen basınca bağlı olduğu düşünülmüştür. Malzeme yukarıya doğru ekstrüzyona tabi tutulmuştur ve etkili kaynak genişliği, dönme hızının ve bekleme süresinin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, tabakaların Vickers sertlik profili, W şeklinde ya da baş aşağı V şeklinde bir görünüm sergilemiştir. IEB ve TEB'in çevresinde minimum sertlik 46.7 HV'ye ulaşmış ve kaynağın her bölgesinde farklı Vickers sertliği varyasyonu, zorlanma işleminin kapsamlı etkilerine, güçlendirme fazının çözünmesine ve tane boyutlarındaki değişime bağlanmıştır [11].

Tozaki ve arkadaşları, farklı çaplara sahip 3.7, 3.1 ve 2.4 mm olan 10 mm omuz çapına sahip takımı kullanarak 2 mm kalınlığındaki AA6061-T4 plakaları SKNK yöntemi ile kaynak etmişlerdir. Takımlar yüksek hızlı çelikten (Japon Endüstri Standardı (JIS), SKD61) yapılmıştır ve standart bir metrik M 3.5 sol dişe sahiptir. 20 mm/dk sabit takım dalma hızı ve üst plaka yüzeyinin altına 0.2 mm omuz dalma derinliği uygulanmıştır. Ayrıca, takım dönme hızları 2000, 2500 ve 3000 rpm ve kaynak süreleri de 0.2, 1 ve 3 s olarak değişmiştir. Kaynakların mikro yapılarının karıştırıcı pim ucu uzunluğuna, takım dönme hızına ve kaynak süresine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ve artan karıştırıcı pim ucu uzunluğu ile gerilme kayma dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir [12].

Badarinarayan ve arkadaşları, tavlanmış AA5083 tabakalarına iki farklı kalınlıktaki 1,64 ve 1,24 mm takım ile birleştirmişlerdir. Takımın omuz çapı 12 mm olan içbükey bir profile ve 1,6 mm pim uzunluğuna sahiptir. İki farklı pim geometrisi silindirik ve üçgen pimdir. Takım pimi geometrisinin kancayı önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır. Silindirik pim ile yapılan kaynakta, kanca yavaş yavaş yukarı doğru hareket eder, daha sonra karıştırma bölgesini atlar ve kaynak tabanına doğru aşağıya doğru işaret eder. Oysa üçgen pim ile yapılan kaynakta, kanca karıştırma bölgesine doğru yönlendirilir ve çok kısa bir plato ile sona erdiği gözlemlenir [13].

Wang ve Lee, 1 mm kalınlıktaki AA6061-T6 alaşımları karıştırıcı takım ile kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlarında, kayma-kesme yükleme koşulları altında, başarısızlığın pim yuvasının orta kısmındaki KB yakınında başladığını ve başarısızlığın yuvanın çevresi boyunca yayıldığını tespit etmişlerdir. İlk boyun alma ve kesmenin başladığı yer, çentik ucuna yakın yerde saptanmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağındaki kırılmalar kaynak bölgesinin yanındaki TEB'de başlamıştır. Ayrıca, sertlik ana metal ile TEB arasındaki sınıra yaklaşıldığında azalır, daha sonra TEB'de en aza indirgenir ve TEB'i geçtikten sonra sertlik yavaş yavaş KB sertliğine yükselir [14].

Buffa ve arkadaşları, 1.5 mm kalınlığındaki AA6082-T6 alüminyum alaşımları kullanmışlardır. 52 HRC sertliği ile karakterize edilen, 1020 °C'de söndürülmüş H13 takım çeliği kullanmışlardır. Omuz çapı 15 mm, 40 mm'lik bir konik pim, 7 mm'lik bir ana çapa, 2.2 mm'lik küçük çapa ve pim yüksekliği 2.6 mm olan bir takım kullanılmışlardır. SKNK yöntemi ile elde edilen kaynak bağlantıları başarıyla elde edilmiştir [15].

Wang ve arkadaşları, 300µm kalınlığında ticari olarak saf AA1050-H18 plakalarına kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçları, kesme makası yükleme koşulları altında, başarısızlığın pim yuvasının orta kısmındaki KB yakınında başladığını ve başarısızlığın yuvanın çevresi boyunca yayıldığını göstermektedir. Testler sonucunda sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile elde edilen bağlantılardaki kırıklar kaynak dikişlerinin yanında bulunan TEB bölgesinde saptanmıştır [16].

Yuan ve arkadaşları, iki takım kullanarak 1 mm kalınlığındaki AA6016-T4 plakalarına SKNK işlemini uygulamışlardır. Kaynakları üretmek için geleneksel bir takım (CP) ve merkez dışı bir takım (OC) kullanmışlardır. Orta pimli CP aleti, 10 mm çapında bir içbükey omuza ve 4,5 mm'lik bir kök çapına ve 3 mm'lik bir uç çapına ve 1,5 mm uzun adımlı bir spiral pime sahiptir. OC takımı ise aynı içbükey omuz şekline ve çapına sahip ve ucu merkez dışı 0,8 mm uzunluğunda yarım küre biçimli pim özelliğine sahiptir. Her iki alet de Densimet tungsten alaşımından üretilmiştir. Sonuçlar, takım dönme hızının ve dalma derinliğinin kesme ayırma yüklerini derinden etkilediğini göstermiştir [17].

Thoppul ve Gibson, nokta kaynaklar üretmek için AA6111-T4 levhalarını kullanmışlardır. Mikro yapısal çalışmalardan, kaynak süresinin artırılması, hem takım nüfuziyet derinliğini hem de katman eklemleri arasındaki bağlantı alanını arttırdığı çalışmada açıkça görülmektedir [18].

Su ve arkadaşları, AA5754 ve AA6111 tabakalarının Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağını, bir kaynak süresi olan veya olmayan pürüzsüz bir takım kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bir kaynak süresi uygulandığı ya da uygulanmayan pürüzsüz bir takım kullanılarak yapılan nokta kaynaklarda, birbirine karışmadığını gözlemlememişlerdir. Ayrıca nokta kaynağında kaynak süresi boyunca farklı karışımların oluşmasını, dönen pimin üzerine üst (AA5754) ve alt (AA6111) plaka malzemelerinin dahil edilmesinden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir [19].

Babu ve arkadaşları, takım geometrisi ve kaynak işlem parametrelerinin eklem oluşumuna etkilerini araştırmak için alüminyum kaplı plakaları olan ve olmayan katmanlar halinde ve 3 mm kalınlığında AA2014-T4 ve T6 levhalarına kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Süreç içerisinde kullanılan parametreleri, kaynak genişliği, kanca yüksekliği, eklem gücü ve kırılma modu arasında iyi bir orantı gözlemlemişlerdir. Ayrıca alüminyum kaplı katmanlarının ve baz metal temper durumunun varlığının eklem oluşumunda ve eklem kuvvetinde önemli bir etkisi olmadığını bulmuşlardır [20].

Pathak ve diğerleri, farklı takım dönme devirleri, dalma derinlikleri ve bekleme sürelerini dikkate alarak ayrıca dairesel ve konik pimli takımlarını kullanarak AA5754 plakalarına kaynak işlemini gerçekleştirmişlerdir. Farklı dönme hızlarında dairesel ve konik pimli aletler kullanılarak yapılan nokta kaynağı sırasında malzeme-takım ara yüzünün yakınında simetrik sıcaklık profilleri gözlemlemişlerdir. Tepe sıcaklığı, takım dönme hızındaki ve bekleme süresindeki artışla beraber artış göstermiştir. Takım geometrisi, sıcaklık dağılımı da benzer koşullar altında olduğu gibi, dairesel pimli bir takım, konik pimli bir takımdan daha fazla ısı ürettiği gözlemlenmiştir. Kaynaklanmış numuneler ile birlikte kesme testi, takımın dönme hızının, dalma derinliğinin ve bekleme süresinin etkilerini gösterir. Her iki takım için, kesme yükünün söz konusu parametrelerdeki artışla birlikte artması ortak bir izlenim olmuştur [21].

1.1.2 Alüminyum ve Magnezyum Arasında SKNK

SKNK işlemi, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde kullanılan magnezyum ile alüminyum kaynağında başarıyla kullanılmıştır.

Suhddin ve arkadaşları, Al alaşımı AA5754 ile Mg alaşımı AZ31'i başarıyla kaynağını gerçekleştirmişlerdir. Mikro yapı analizleri, karıştırma bölgesindeki tane yapısı gelişiminin, tane sınırındaki difüzyon, ara yüzey difüzyonu ve dinamik yeniden kristalizasyondan etkilendiğini ve bunun sonucunda kaynak merkezinde Al₁₂Mg₁₇'nin ince tanelerden elde edildiğini göstermiştir. Mg/Mg benzer kaynağın sertlik profili, W şeklinde bir görünüm sergilerken, düşük sertlik değerleri hem Mg/Mg hem de Al/Al benzer kaynaklarının TEB ve IEB bölgelerinde ortaya çıkmıştır. Al/Mg kaynağında, Al₁₂Mg₁₇ ve Al₃Mg₂'den oluşan karakteristik bir ara yüzey tabakası tespit edilmiştir. Hem Mg/Mg hem de Al/Al benzeri kaynakların, Al/Mg kaynağa göre önemli ölçüde daha yüksek kesme mukavemeti, arıza enerjisi ve yorulma ömrü tespit edilmiştir. Al/Al kaynağı Mg/Mg kaynağından biraz daha düşük bir kesme kayma kuvveti sergilerken, Al/Al kaynağı daha yüksek arıza enerjisine ve yorulma ömrüne sahip olduğu saptanmıştır [22].

Chowdhury ve arkadaşları, 2 mm kalınlığındaki ticari AZ31B-H24 Mg alaşımı ve AA5754'ü kaynaklamak için SKNK işlemini kullanmışlardır. Kaynak için H13 çeliğinden yapılmış bir takım kullanmışlardır. 2,8 mm'lik bir pim uzunluğu, 2000 dev/dk takım dönme hızı, 3 mm/sn'lik bir takım dalma hızı, 15 mm/sn'lik bir takım çıkarma oranı, 0,2 mm'lik omuz dalma derinliği ve 2 saniye kaynak süresi kullanılmıştır. Mikro yapı analizi sırasında Al₁₂Mg₁₇ ve Al₃Mg₂ gibi intermetalik bileşikler tespit edilmiştir. Mg/Mg kaynağının mikro sertlik profili W şeklinde bir görünüm sergilemiştir, sertlik kademeli olarak anahtar deliği yönüne doğru artmıştır [23].

Chowdhury ve arkadaşları, SKNK için 2 mm kalınlığındaki ticari AZ31B-H24 Mg alaşımı ve AA5754-O Al alaşımli levhaların seçildiği bir çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Sürtünme karıştırma noktası kaynaklı Al/Mg ve Mg/Al kaynak bölgelerinde Al₁₂Mg₁₇ ve Al₃Mg₂ intermetalik bileşiklerden oluşan kendine ait bir ara yüzey tabakası gözlemlenmiştir. Kaynak işleminin iyi bir şekilde gerçekleşmediği kaynak bağlantılarında intermetalik bileşiklerin oluşma derecesinin düştüğünü belirtmişlerdir [24].

Ayrıca, intermetalik bileşik katmanını 30'un varlığından dolayı Al / Mg ve Mg / Al yapışkan karışımlarının karıştırma bölgesinde HV90 ile 125 arasında değerler ile çok daha yüksek bir sertlik gözlemlenildi. Hem Mg / Al hem de Al / Mg kaynağı iyi olan, Al / Mg kaynağı iyi olmayan kaynağa göre kayma dayanımı ve başarısızlık enerjisine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [24].

Choi ve arkadaşları, genel takım çeliğinden (SKD11) yapılmış bir sap, omuz ve bir pimden oluşan takımla 6K21 Al alaşımı ve AZ31 Mg alaşımını SKNK yöntemi ile kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Takımın omuz çapı, pim çapı, pim yüksekliği ve kaynak eğim açısı sırasıyla 13,5 mm, 9,5 mm, 0,5 mm ve 0° dir. Elde edilen sonuçlar, Al ve Mg alaşımlı eklemler arasındaki ara yüzde intermetalik bileşiklerin (IMC'ler) oluşumunu gözlemlenmiştir. Bu intermetalik bileşikler, Al substratı üzerinde oluşturulmuş Al_3Mg_2 ve Mg substratı üzerinde oluşturulmuş $Al_{12}Mg_{17}$ olarak ortaya çıkarılmıştır. Ek olarak, IMC tabakasının kalınlığı, takım dönme hızı ve süresi arttıkça artmış ve eklemlerin kuvvetleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. İntermetalik bileşikler katmanının önemli kalınlıkları, eklemlerin mekanik özelliklerini ciddi şekilde bozmaktadır. Al ve Mg alaşımlı eklemin maksimum çekme kayma kırılma yükü yaklaşık 1,6 kN'dir, ancak intermetalik bileşiklerdeki (IMC'ler) çatlaklar nedeniyle, takım dönme hızı ve süresi arttıkça yük değerinin azaldığı gözlemlenmiştir [25].

1.1.3 Alüminyum ve Çelik Arasındaki SKNK

Chen ve arkadaşları, 1 mm kalınlığında AA6111-T4 Al ve DC04 düşük karbonlu çelik sacını SKNK yöntemi ile kaynak etmişlerdir. Takım, malzemenin akışını iyileştirmek için bir kaydırma profiline sahip 11 mm çapında bir çelik omuza ve 1 mm uzunluğunda ve 3 mm çapında bir konik uca sahiptir. Takımların yörüngesel yolunun yarıçapı, çelik yüzey üzerinde 8 mm çapında süpürülmüş bir alan üreten 2.5 mm değerindedir. İnce Al ve çelik otomotiv sacı arasında 1 saniyelik bir kaynak süresi içinde endüstriler tarafından istenen hedef süre olan yüksek kaliteli sürtünme nokta kaynakları üretmişlerdir [26].

Sun ve arkadaşları, 12 mm çapında içbükey bir omuz geometrisine sahip, yumuşak çelikten yapılmış 4 mm çapında bir takım kullanarak 1 mm kalınlığında ticari AA6061 Al alaşımını SKNK yöntemi ile kaynağını gerçekleştirmişlerdir. Kaynakları ürettikten sonra Al/Fe ara yüzü ile birlikte bariz bir intermetalik bileşik (IMC) tabakası gözlemlemişlerdir. Ayrıca kayma gerilmesi yükünün maksimum 3607 N değerine ulaşabileceğini gözlemlemişlerdir. Pim uzunluğunun kaynak özellikleri üzerinde çok az etkisi olduğu, bu da takım ömrünün bu yeni nokta kaynağı tekniği ile önemli ölçüde uzatılabileceğini saptamışlardır [27].

Bozzi ve arkadaşları, tungsten-renyum alaşımı (W25Re) olarak işlenmiş bir takım kullanarak, galvanize edilmiş IF-çelik bir tabakaya (2.0 mm kalınlıkta) AA6016 (1,2 mm kalınlıkta) levhalarını SKNK yöntemi ile kaynağını gerçekleştirmişlerdir. İntermetalik bileşikler tabaka kalınlıkları, dönme hızı ve nüfuziyet derinliği ile artış göstermiştir. Ayrıca, kaynak mukavemetini arttırmak için intermetalik bileşiklerin gerekli görüldüğünü de fark etmişler, ancak intermetalik bileşik katmanı çok kalın ise çatlaklar kırılğan intermetalik bileşikler katmanı üzerinden kolayca başlayıp yayıldığını belirlemişlerdir [28].

1.1.4 Alüminyum ve Bakır Arasında SKNK

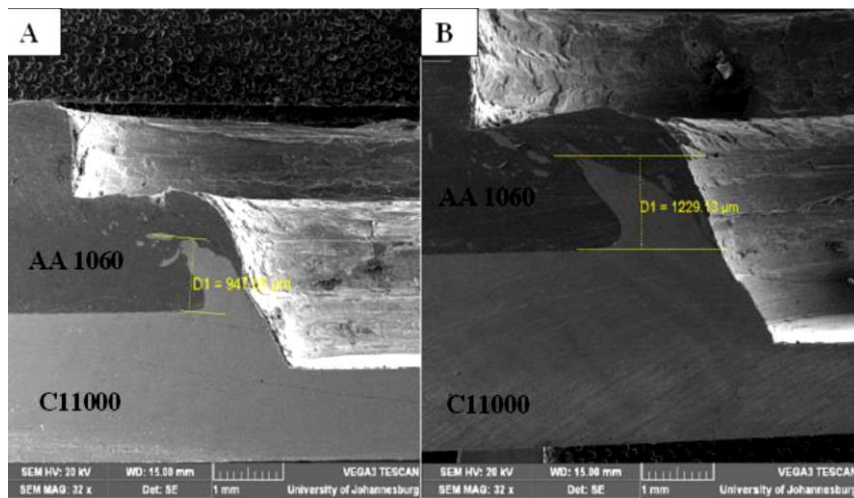
Bu bölümde de SKNK yöntemi kullanılarak alüminyum ve bakır alaşımlarının kaynak edilmesi açısından yürütülen ve yayınlanan çalışmaları özetlenmektedir.

Özdemir ve arkadaşları, 20 mm omuz çaplı bir alet ve 5 mm çaplı bir pim kullanarak, 2, 8, 4 ve 5 mm olmak üzere üç farklı dalma derinliği kullanarak sürtünme karıştırma noktası kaynağını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca nokta kaynaklar, 10 saniye kaynak süresi olan 1600 rpm devir hızı kullanılarak üretilmiştir. Makroskobik kusur içermeyen nokta kaynaklar üretmişlerdir ve Al / Cu ara yüzüne yakın bakır kısmındaki taneler bakır bazlı metallere daha ince yapıdadır. Tane boyutlarındaki fark, ara yüze yakın tanecikleri deforme eden dönen pimin etkisine ve tanelerin ısı girişine bağlı olarak bakır metalin karıştırılma bölgesinde tekrar kristalleşmesine bağlanmıştır. Ayrıca, yapılan EDS analizleri, ara yüzde oluşturulan sert ve kırılğan intermetalik bileşiklerin AlCu, Al₂Cu ve Al₄Cu₉ oluşumunu ortaya koymuştur. Çekme kayması testi sonuçları, 2.8 mm dalma derinliğinde zayıf sonuçlar verdiğini, 4 mm dalma derinliğinde ise 5 mm'ye göre en yüksek kayma gerilmesi değerlerini göstermiştir. Ayrıca, pimin deliğinin alt bölgesinde (Cu malzemesinde) dönen pimin girdiği ısı girişi nedeniyle arttığını da belirtmişlerdir [29].

Ayrıca, dalma derinliği arttıkça, tane boyutunun küçüldüğünü, bunun 5 mm dalma derinliği için Cu tarafında daha yüksek sertliğe ve 5mm dalma derinliği için Cu'nun daha dağınık ve seçici şekilde nüfuz etmesine bağlı olarak, daha yüksek sertlik değerlerinin olduğunu belirtmiştir. Al tarafında da aynı şekilde elde edilmiştir [29].

R. Kaçar, H. Ertek Emre, H. Demir ve S. Gündüz yaptığı çalışmada ilave kaynak teli ve koruyucu gaz gerektirmeden kaynaklanması çok zor olan Al-Cu-Al malzeme çiftini SKNK yöntemi ile birleştirilmişlerdir. Ayrıca Bakır ara tabaka kullanarak SKNK birleştirmelerin mekanik özellik performansının iyileştiğini belirlemişlerdir [30].

Öte yandan Heideman ve arkadaşları, AA 6061-T6 ve oksijensiz Cu malzemelerine SKNK yöntemi ile kaynak ederek metalurjik analizler yapmışlardır. 10 mm omuz çapına, 4 mm pin çapına sahip ve önceden sertleştirilmiş bir H13 takım çeliği kullanılarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. İki farklı dalma derinliği kullanılmıştır: 0 ve 0,13 mm, 3 ve 6 saniyelik kaynak süreleri ve 1000-2000 dev/dk arasında değişen devir hızları kullanmışlardır. Dalma derinliği, dönme hızı ve takım uzunluğunun kaynakların gücünü etkileyen ana faktörler olduğunu belirtmişlerdir. Güçlü kaynak bölgelerinde intermetalik bir ara yüz tespit edilmemiştir. Sadece bağ hattı boyunca bağlanmayan küçük parçacıklar biçiminde bileşikler tespit edilmiştir. Heideman ve arkadaşları ayrıca, spot deliğin anahtar deliğinin her iki tarafında görünen bir Cu halkası ile dikey bir kesitini göstermişlerdir. Cu görüntüleri farklı işlem parametreleri kullanarak yapılan ölçümlerdeki halkalar, Şekil 1.2'de gösterilmektedir [31].



Şekil 1.2. 800 rpm ve 0,5 mm (A) ve 1,0 mm (B) omuz dalma derinliği kaynak koşullarında konik pim (3mm uzunluk) ve içbükey bir omuz (15mm çap) kullanılarak üretilen kaynak bakır halka boyutu [31].

Şimdiye kadar Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynakları (Al / Cu) üretmek için takım geometrisi ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu konusunda yayınlanmış fazla bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, işlemin ticarileşmesini sağlamak için sürtünme karıştırma nokta kaynak işlemi kullanılarak alüminyum ve bakır arasında nokta kaynakları üretmek için takım geometrisinin ve işlem parametrelerinin optimizasyonu üzerinde başarılı bir şekilde çalışmalar yapılması önemlidir [31].

1.2 Tezin Amacı

SKNK yönteminin geniş bir uygulama alanının olması ve buna ek olarak Al ve benzeri hafif alaşımlar için kullanıma uygun olması birçok birleştirme yöntemi arasında avantajlarının çok olmasından kaynaklanmaktadır. SKNK yönteminde, malzemelerin ergimiş olması gerekmez. Böylece ısıdan etkilenen geniş metalurjik değişimler sınırlıdır. Bu yöntemde ortaya çıkan ısının az olmasından dolayı bu ısının neden olduğu deformasyon riskleri azalır. SKNK yöntemi ile tüketilen enerji, kaynak takımı için kullanılan servo motorlara gereken elektrik gücü kadardır. Yüksek elektrik akımlarına ihtiyaç duyulmaz. Böylece işletme maliyetlerini azaltır ve güç maliyetinde yaklaşık %95 oranında azalma olur. Tozsuz ve dumansız bir kaynak yöntemi olduğu için çevre dostudur. Kaynak süresi kısadır. İşlem bölgesinde temizliğe ihtiyaç duyulmaz. Birleştirilecek parçaların oksidasyon risklerine karşı koruyucu gaz atmosferine gerek yoktur [5]. Birçok avantajı beraberinde getiren SKNK yöntemi bu tezde çalışılmaya değer görülmüştür. İki levhanın bindirme tipte birleştirilmesi için, önceden belirlenmiş parametreler altında kaynak bölgesinde optimum mukavemet değerlerinin elde edilmesi planlanırken metalurjik iç yapıda homojen bir mikroyapının elde edilmesi amaçlanmıştır. Özellikle ergitmeli yöntemlerle birleştirilmesi zor olan çinko içeren alüminyum serilerinden AA7075, birçok yöntemle kıyasla daha avantajlı bir şekilde SKK işlemi ile birleştirilirken, bu alaşımın SKNK yönteminde birleştirilmesi hususunda literatürel çalışmaların az olması ve uygulanan bu yöntemin özellikle sanayide yaygın kullanılan direnç kaynağına alternatif olarak ülkemizin hem savunma sanayisi, hem de otomotiv sanayisine yenilik getirmesi açısından ülke menfaatlerine katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

2. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARI

Alüminyum üzerine çalışmalar, ilk kez 18. yüzyılın sonları ve 19. yüzyılın başlarında gerçekleştirilmiştir. Dalton, Davy, Berzelius, Orsted ve Lavoiser gibi ünlü isimler alüminyum ve bileşikleri üzerine çeşitli çalışmalar yapmışlardır. 1807 yılında Sir Humprey Davy, bu alüminyum bileşikleri içerisinde bir metal bağlı olduğunu iddia edip buna alüminyum adını vermiştir. 19. Yüzyılın sonlarına doğru alüminyum üretimi için çeşitli kimyasal yöntemler geliştirilmiştir. 19. Yüzyılın sonunda da alüminyum elde etmek için sulu çözeltilerden elektroliz yöntemine başvurulmuştur ancak başarısız olmuştur. 1900 yıllarının başında, endüstri alanında meydana gelen gelişme alüminyum metali ve alaşımlarını demir-çelik alaşımlarında sonra ikinci sıraya yerleştirmiştir. Bu yükselmenin sebebi ise alüminyum malzemesinin üstün mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Alüminyumun sahip olduğu karakteristik özellikler, alüminyum çok yönlü yapıp mühendislik malzemelerinden biri haline getirmiştir. Alüminyum çelik ile kıyaslandığında çok daha hafiftir. Çeliğin mukavemeti alüminyuma göre daha yüksek olsa da, kesit arttırılarak çeliğe eşdeğer bir mukavemet elde edilebilir. Belirtilen özellikler doğrultusunda alüminyumun hem hafif hem de mukavemet olarak iyi olması birçok konstrüksiyonda avantajlar elde etmesini sağlamaktadır. Literatür ışığında elde edilen bilgiler doğrultusunda doğru şekilde yapılan bir yapı tasarımında çelik yerine alüminyum kullanılması durumunda %50 den fazla hafiflik sağlanmaktadır [32].

Alüminyum, hafiflik ve yüksek mukavemet özelliklerinin yanında elektriği iyi bir şekilde iletir. Bunun yanında ısı iletkenlik, ışık yansımaları, soğuk ve sıcak şekillendirebilme kolaylığı, bazı alaşımlarının çökelme yoluyla sertleştirilebiliyor oluşu, son olarak yumuşak ve sünek olması gibi özellikleri sıralanabilir. Bugün tüm dünyada alüminyum ve alaşımları büyük miktarlarda üretilen ve yüksek ticari değeri olan bir malzeme grubu haline gelmiştir. Alüminyum ve alaşımları avantajları dahilinde birçok sektörde önemli rol oynamaktadır. Uçak ve otomotiv sanayisinde, hemen hemen imalat sanayisinin her dalında kullanılmaktadır. Avrupa Alüminyum Birliği, taşımacılık sektörünün alüminyum üreticileri için en büyük platform olduğunu bildirmektedir. Özellikle hava taşıtları, otomobiller ve gemi sektörü alüminyum alaşımları için en önemli kullanım alanlarıdır [32].

Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları, döküm ve dövme alüminyum alaşımlarıdır. Bu alaşımların birçok türü gemi yapım endüstrisinde, uzay ve uçak araçları yapımında ve taşıt imalat endüstrisinde yer almaktadır [32].

2.1 Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Alüminyum periyodik cetvelde 3A grubunda yer almaktadır. Atom ağırlığı 26,981538 g/mol, atom numarası 13'dür. Alüminyum, yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısına sahiptir. -269 °C'den ergime sıcaklığı olan 658 °C'e kadar kararlı bir hal gösterir. Bu sıcaklıklar arasında fiziksel dönüşüm göstermez. Alüminyum metali aktif olduğundan dolayı havadan kolay etkilenir ve üzerinde Al_2O_3 filmi oluşur. Bu film incedir ve alüminyum metalini yüksek sıcaklıklarda korozif etkilerden korur. Alüminyum metalinin saflık derecesi arttıkça ergime derecesi yükselir [32].

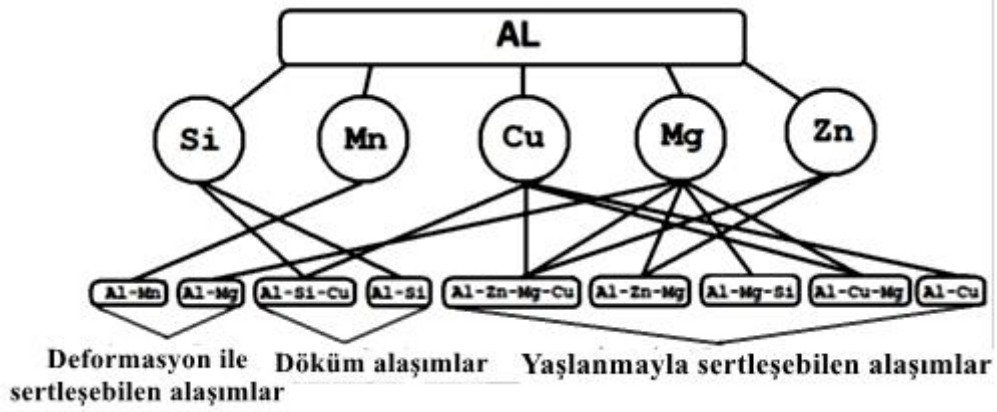
Yüksek saflıktaki alüminyum teknik saflıktaki alüminyum ile kıyaslanırsa, yüksek saflıktaki alüminyum çok daha yumuşak ve plastik yapıdadır ve mekanik mukavemeti de daha düşüktür. %99,25 oranında alüminyum içeren bir metalin elastik modül değeri 71000 N/mm²'dir. Saf alüminyumun ise elastik modülü 67000 N/mm²'dir. Alüminyum metalinin saflığı arttıkça sertliği düşer. Yapılan deneyler doğrultusunda ise alüminyumun çekme mukavemeti artan saflık derecesi ile düşmektedir. Çekme testi sonra kopan malzemenin kesit yüzeyinin küçülmesi de yüksek saflıktaki alaşımlarda daha fazladır. Tablo 2.1'de %99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri bulunmaktadır [32].

Tablo 2.1. %99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri [32].

Sembol	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Kristal Yapısı	YMK
Erime Noktası	660 °C
Yoğunluğu (Oda sıcaklığında)	2.7g/cm ³
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-320 °C
Buharlaştırma Noktası	2450 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	23.5 µm m ⁻¹ K ⁻¹
Özgül Isısı	0.224 cal/g (100 °C'de)
Gizli Ergime Isısı	94 cal/g
Çekme Mukavemeti	40-100 N/mm ²
Akma Mukavemeti	10-30 N/mm ²
Elastite Modülü	72 x 10 ³ N/cm ²
Kayma Modülü	27 x 10 ⁵ N/cm ²
% Uzama	45
% Kopma Uzaması	30-40
Sertlik	20 (HV)
Çentik Darbe Tokluğu	100 J/cm ²
Elektrik İletkenliği	% 59.5 IACS
Elektrik Direnci	2.65 x 10 ⁻⁸ ohm metre
Katılma Esnasın Kendini Çekme	% 6.7
Yansıtıcılık	Tungsten flamadan gelen beyaz ışık için %90

2.2 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları üretim yöntemlerine göre döküm ve dövme alaşımları olmak üzere ikiye ayrılır. Dövme alüminyum ve alaşımları dört basamaklı bir sayı ile ifade edilir. Alüminyuma eklenen metale göre dört rakamdan oluşan bir sınıflandırma kullanılmaktadır. Birinci rakam alüminyuma eklenen esas metali ifade eder. Tablo 2.2’de bu sınıflandırmaya ait detaylı bir tablo bulunmaktadır. Dövme alaşımlarında, kütük olarak dökülen alaşım plastik şekil verme yöntemiyle üretilmektedir. Döküm alaşımlarında, sıvı halde bulunan her türlü bileşim ve özellik ayarı yapılmış alaşım doğrudan ürün kalıbına dökümü yapılarak üretimi gerçekleştirilir. Döküm ve dövme alaşımları element bileşimlerine göre alt sınıflara ayrılmaktadır. Şekil 2.1’de bu sınıflandırmaya ait görsel bulunmaktadır [32].



Şekil 2.1. Alüminyum alaşımlarında elementlerin genel bileşimleri [32].

2.2.1 Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımları genellikle pres döküm, kum döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak üretimi yapılır. Bu alaşımlar yüksek fiziksel özelliklere sahiptir ve işlenmeye son derece elverişlidir. Isıl işlem, dövme alüminyum alaşımlarına yaygın olarak uygulansa da döküm alaşımlarının bir kısmına da başarıyla uygulanmaktadır. Döküm alaşımları kaynak edilebilir aynı zamanda mukavemet ve korozyon özellikleri de iyidir. Döküm alaşımları kimyasal bileşimleri, dövme alaşımlarından oldukça farklıdır. Döküm alaşımlar %5-12 oranlarında silisyuma sahiptir. Döküm alaşımları, silisyumun ötektik reaksiyon vermesinden dolayı besleme kabiliyeti, alaşımın akıcılığı ve mukavemeti artar. Magnezyum elementi %0.3-1 arasında ısıl işlem uygulanabilen malzemeleri eklenerek mukavemeti artırır. Bakır %1-4 arasında eklenerek yüksek sıcaklık direncini artırır. Çinko elementi de yaşlanma amaçlı olarak malzemeye eklenir. Titanyum (Ti) ve bor (B) tane küçültücü olarak döküm alüminyum alaşımlarına eklenir. Stronsiyum (Sr) ve sodyum (Na) ötektik yapıyı modifiye etmek için kullanılırlar. Diğer özellikleri kontrol etmek amacıyla ise krom (Cr) ve kalay (Sn) gibi elementler ilave edilebilir [32].

2.2.2 Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar adından da anlaşılacağı üzere haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi plastik şekil verme yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Dört rakam ile ifade edilen dövme alaşımlarında ilk rakam içerdiği temel alaşımı simgelemektedir. Son iki rakam ise %99.00 değerinin noktadan sonraki rakamları ifade eder [32].

Soldan ikinci rakam ise özel olarak eklenen katkı elementlerini ifade eder ve 1’den 9’a kadar değişebilir. 1xxx dizisi %99.00 oranındaki saf alüminyumı temsil eder. 2xxx’den 8xxx’e kadar olan dövme alaşımlarında, ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam değişimleri ifade eder. Son iki rakamın herhangi bir özel anlamı yoktur. Isıl işlem uygulanabilirliği olarak da sınıflandırılan dövme alüminyum alaşım serileri ısıl işlem durumları ve içerdiği alaşım grupları Tablo 2.2’de verilmiştir [32].

Tablo 2.2. Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması [32].

Alaşımsız alüminyum	1xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum bakır alaşımı	2xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum mangan alaşımı	3xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum silisyum alaşımı	4xxx	Yaşlandırılmaz
Alüminyum magnezyum alaşımı	5xxx	Yaşlandırılmaz
Alüminyum-silisyum-magnezyum alaşımı	6xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum çinko alaşımı	7xxx	Yaşlandırılabilir
Alüminyum ve diğer elementler (lityum vs.)	8xxx	Yaşlandırılabilir
Boş	9xxx	

Alüminyum alaşımlarına ilave edilen diğer metaller mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlar. Alüminyum alaşımlarının üretiminde en fazla bakır, mangan, magnezyum, silisyum ve çinko kullanılır. Bu metaller istenilen özellikteki ürünü elde etmek için alüminyum alaşımına, tek veya bileşik olarak eklenebilir. İlave edilen elementler sonucunda oluşan alüminyum alaşımının mukavemeti daha yüksektir [32].

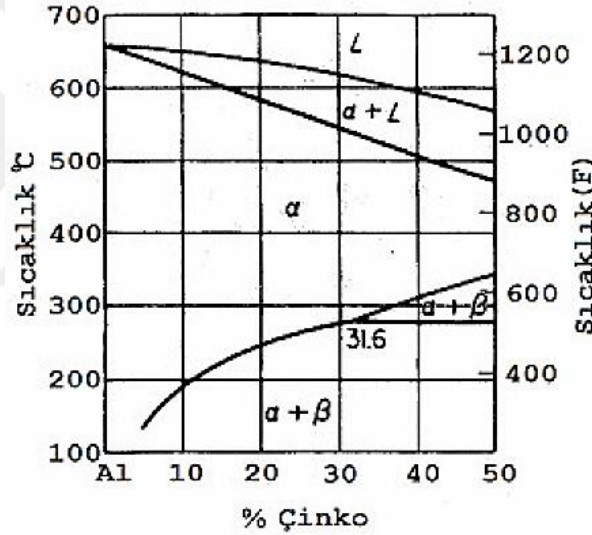
2.2.2.1 7xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

7xxx serisi alüminyum alaşımları (7075, 7050, 7049, vs.) %1 ve %8 oranları arasında çinko ve az miktarda magnezyum içermektedir [33]. Ana alaşım elementi olarak kullanılan çinko ve küçük bir miktar eklenen Mg malzemenin ısıl işlemle birlikte sertleşmesini sağlar [32]. Bu serideki alüminyum alaşımları mekanik özellikler açısından yüksek bir dayanım göstermektedir. Aynı zamanda bu seride ki alaşımlara ısıl işlem uygulanabilir. 7xxx serisi alüminyum alaşımları uygulama alanı olarak uçakların gövde yapımı, tavan vinçleri, vidalı makine parçaları, kamyon kasaları, roket ve savunma sanayi parçalarının imali gibi alanlarda kullanılmaktadır. Tüm alaşımlar içerisinde en yüksek dayanıma sahip olan 7xxx alüminyum alaşımlarında gerilme korozyon çatlaklarına az rastlanır [32,33].

Bu alaşımların imal edilmesi zordur. Dolayısıyla şekillendirme işlemini ergitme ısı işleminden hemen sonra yapılması gerekir [32,33]. Tablo 2.3'te 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi ve Şekil 2.2'de Al-Mg-Zn alaşımının faz diyagramı verilmiştir.

Tablo 2.3. 7xxx Serisi alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi [32].

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Zr	Al
AA7010	0.12	0.15	1.5-2.0	0.10	2.1-2.6	0.05	0.05	5.7-6.7	0.11-0.17	Kalan
AA7178	-	-	2.0	-	2.7	0.23	-	6.8	-	Kalan
AA7049	-	-	1.6	-	2.4	0.16	-	7.7	-	Kalan
AA7050	0.40	0.50	1.2-2.0	0.30	2.1-2.9	0.18	-	5.1-6.1	0.15	Kalan



Şekil 2.2. Al-Zn diyagramının Al köşesi [32].

Tablo 2.4'te ise 7075 Serisi alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 2.4. AA7075- T6 Serisi alüminyum alaşımının mekanik özellikleri [34].

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (Brinel) min-max
T6	460-505	530-570	10	150

2.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlem Özellikleri

Isıl işlem katı durumdaki bir metalin veya alaşımın yapı ve özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan kontrollü soğutma ve ısıtma işlemlerinin tamamına denir. Isıl işlemin hangi amaçla yapıldığı, ısıl işlem uygulanacak malzemenin üretim yöntemine ve cinsine bağlıdır. Alüminyum alaşımlarında ısıl işlem genellikle çökeltme (yaşlanma) ile yapılır ve bu işlem ile alaşımın sertliğini ve mukavemetini arttırmak amaçlanır. Yaşlandırma yöntemi kısaca istenen yüksek mukavemet özellikleri için, aşırı doymuş çözüldü bir miktar elementin veya bileşiğin çökeltilmesidir. Tablo 2.5'te T6 ısıl işlem uygulanan ve ısıl işlem uygulanmayan AA7075 serisi alüminyum alaşımının yaşlandırma sertleşmesi sonucunda elde edilen mekanik özellikteki iyileşmeler verilmektedir. Çökeltme işlemi ile mukavemeti ve sertliği artırılabilen malzemeler “ ısıl işlem uygulanabilir”, diğer Al alaşımlarına ise “ ısıl işlem uygulanamaz” olarak bilinir. Isıl işlem uygulanamayan alaşımlara soğuk işlem veya katı eriyikle sertleştirme yapılabilir. Malzemenin yumuşatılması için ise her iki alaşımda da ısı girdisi kullanılır. Özellikle 2000 serisi ve 7000 serisi alüminyum alaşımlarına yüksek mekanik özellikleri, ısıl veya termomekanik işlemlerle kazandırılır [32]. Bu tür alaşımlara mekanik özellikleri arttırmak için yapılan ısıl işlemler Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.5. AA7075 Alüminyum alaşımının ısıl işlem şartları ve sonrası mekanik özellikleri[32].

Malzeme Isıl İşlem	Çöz. Alma Sıcaklığı	Yaşlandırma İşlem Şartları	Kayma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Sertlik (HV)
7075- T6	465 °C	120 °C de 24 saat	350	570	160
7075-0	Isıl İşlemsiz	Isıl işlemsiz	150	225	65

Tablo 2.6. Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler[32].

Sembol	Açıklaması
T1	Ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekil verilmiş parçalar soğutulduktan sonraki doğal yaşlandırma
T2	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaşlandırma
T3	Çözeltiye alma ısı işlemleri, soğuk şekillendirme ve doğal yaşlandırma
T4	Çözeltiye alma ısı işlemleri ve doğal yaşlandırma
T5	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra yapay yaşlandırma
T6	Çözeltiye alma ısı işlemleri ve yapay yaşlandırma
T7	Çözeltiye alma ısı işlemleri ve stabilizasyon (aşırı yaşlandırma)
T8	Çözeltiye alma ısı işlemleri, soğuk şekillendirme ve yapay yaşlandırma
T9	Çözeltiye alma ısı işlemleri, yapay yaşlandırma ve soğuk şekillendirme
T10	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından yapay yaşlandırma

2.4 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Çeşitli Endüstri Dallarında Kullanım Alanları

2.4.1 Otomotiv Endüstrisi

Günümüzde, alüminyumun kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde en iyi ilerleme, otomotiv endüstrisinde gerçekleşmektedir. Otomobilde görülen birçok bileşen alüminyum malzemesinden yapılmaktadır. Korozyon direnci, artırılmış yakıt verimi, kullanımı ve yeniden dönüştürülmesi gibi çevresel problemlerden dolayı uygulamalarda artışa gidilmektedir. Motor blokları, şaft ve tekerlek jantları, ön ve arka süspansiyon elemanları gibi temel yapısal bileşenlerin tamamının alüminyumdan üretilmesi; ısı eşanjörleri, radyatör ve klima birimleri gibi geleneksel bileşenleri bütünlemektedir. Alüminyum kullanmak yakıt verimi sağlar ancak bunun yanında önemli bir diğer etken emniyettir. Otomobil tasarımında alüminyumun temel fiziksel karakteristikleri; çarpışmalarda daha iyi performans göstermenin yanında kazaların çoğunu önlemeye de olanak sağlar. Alüminyum mukavemet-ağırlık oranı, daha iyi enerji absorpsiyonu sağladığından daha büyük araç parçalarının tasarımı için imkân sunmuştur [35].

2.4.2 Gemi ve Taşımacılık Yapım Endüstrisi

Deniz taşımacılığındaki yeni gelişmelerle birlikte alüminyumun gemi yapımında kullanılması, hızlı feribot projelerinde önemli ilerlemelere olanak sağlamıştır. Nakliye firmaları kar amacıyla verimli, hızlı ve az tamir bakımı gerektiren gövdesi alüminyumdan oluşan hızlı feribotların yapımını araştırmaktadırlar. Hızlı feribot olarak ifade edilen terim büyük yolcu yükü ve kargoları yüksek hızda taşıyan küçük gemiler ve tek veya çok bölmeli gemileri ifade etmektedir. İhtiyaç doğrultusunda alüminyumun düşük ağırlık-yüksek mukavemet oranı ve korozyona dayanıklı olması gibi özellikleri yüksek hızlı deniz taşıt uygulamalarında gelişmelere imkân sağlamıştır. Otomotiv endüstrisinde olduğu gibi taşımacılık endüstrisinde de avantajları doğrultusunda parça tasarımları çoğunlukla alüminyum malzemesi ile üretilmektedir. Örneğin; Buhar hatları, ısıtma sistemi demiryolu vagonları, yüksek sıcaklık ve mukavemet özelliği sebebiyle 5054 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır [35].

2.4.3 Savunma ve Havacılık Endüstrisi

Bu endüstride bazı uygulamalar için ısıtma işlem yapılamayan yüksek mukavemete sahip 5xxx serisi kullanılırken, bazılarında ısıtma işlem yapılabilen üstün mekanik özelliklere sahip alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Örneğin; Mermiler 2019 ve 2219 serisi alüminyum alaşımlarından üretilmektedir. Geniş bir sıcaklık aralığında yüksek mukavemet özellikleri veren alüminyum alaşımları ise havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Bu alaşımlar; 2219, 2014, 2090, 2024, 7075'dir. Bu ana malzemeler yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [35].

3. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAĞI

Dövme alüminyum alaşımlarından ısıtıl işlem yapılamayan 1xxx, 3xxx ve 5xxx alaşımlarına gaz korumalı ark işlemleri ile kolay bir şekilde kaynak yapılabilir. Isıtıl işlem yapılabilen 2xxx ve 4xxx serisi alaşımlar ise özel ark kaynak teknikleri ile kaynak edilebilir. Ancak ısıtıl işlem yapılabilen yüksek mukavemetli 7xxx serisinden 7075 ve 7178 serilerinin kaynağında problemler yaşanmaktadır. 7075 serisi ve 7178 serisi alüminyum alaşımlarında ısıdan etkilenen bölgede (IEB) sertlik değeri, kaynak edilen ana metale göre daha fazladır. Bu alaşımlar kaynak edildiklerinde sıcak çatlama meydana gelme olasılığı oldukça yüksektir. Bunun yanında 7005 ve 7039 alaşımları kaynak işlemi için özel olarak üretilmişlerdir ve kaynak kabiliyetleri oldukça iyidir [32].

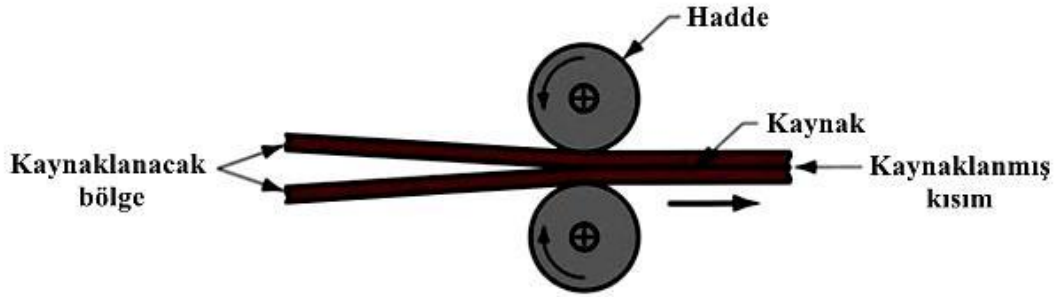
3.1 Katı Hal Kaynak Yöntemleri

Parçaların yüzeylerinin birleştirilmesi için sadece basınç ve ısı gereklidir. Eğer hem ısı hem de basınç kullanılıyorsa tek başına ısı malzeme yüzeylerini eritmeye yeterli değildir. Bazı katı hal kaynak (KHK) yöntemleri için zaman da bir faktördür. Bu yöntemlerde ilave bir metal kullanılmaz. Her bir KHK yöntemi, temas yüzeylerinde bağ oluşturmak için kendine özgü yöntemi vardır. Kaliteli bir kaynak işlemi için iki yüzeyin çok temiz ve atomsal bağa izin verecek kadar çok yakın bir fiziksel temasta olması gerekir. Toplamda 8 adet katı hal kaynak yöntemi bulunmaktadır [36]. Bunlardan bazıları;

- **Dövme kaynağı:** Kaynak edilecek kısımların sıcak dövme işlem sıcaklığına kadar ısıtılıp daha sonra çekiç vb. aletlerle birbirine dövüldüğü kaynak yöntemi, imalat teknolojisinin gelişmesinde tarihsel bir öneme sahiptir. Bu yöntem demircilerin iki metal parçayı kaynak yapmayı öğrendiği M.Ö 1000'e kadar dayanmaktadır. Günümüzde bazı çeşitleri hariç ticari açıdan bir önemi yoktur [36].

- **Soğuk kaynak:** Temiz temas yüzeyleri arasına oda sıcaklığında yüksek basınç uygulayarak gerçekleştirilen katı hal kaynak yöntemidir. Temizleme işlemi birleştirmeden önce genellikle yağ giderme veya fırçalama ile yapılır. Isı uygulanmaz ancak deformasyondan dolayı parça sıcaklığı yükselir. Metallerden en az biri sünek malzeme olmalıdır. Yumuşak alüminyum ve bakır soğuk kaynak için idealdir. Elektriksel bağlantıların yapımı uygulama alanlarındandır [36].

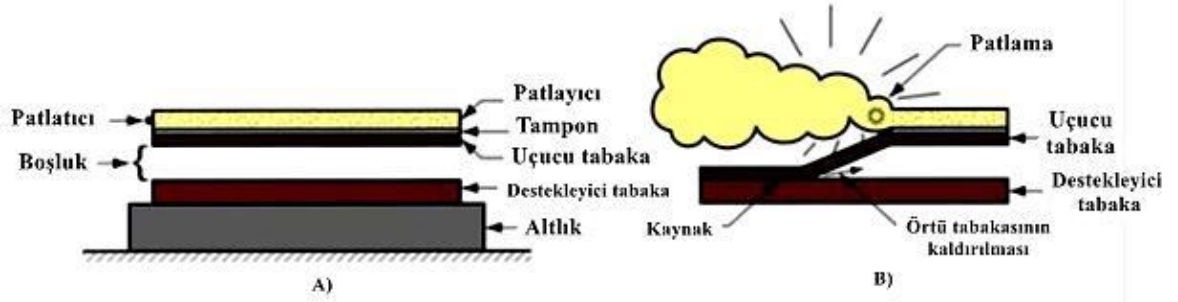
- **Haddeleme kaynağı:** Isı ile veya ısı olmadan birleştirme için gerekli basıncın merdaneler aracılığı ile uygulandığı katı hal kaynak yöntemidir. Malzemeler işlem öncesinde ısıtılırsa sıcak haddeleme kaynağı, eğer dış ısı yoksa soğuk haddeleme kaynağı denir. Şekil 3.1’de haddeleme kaynağı yöntemi gösterilmiştir [36].



Şekil 3.1. Haddeleme kaynağı [36].

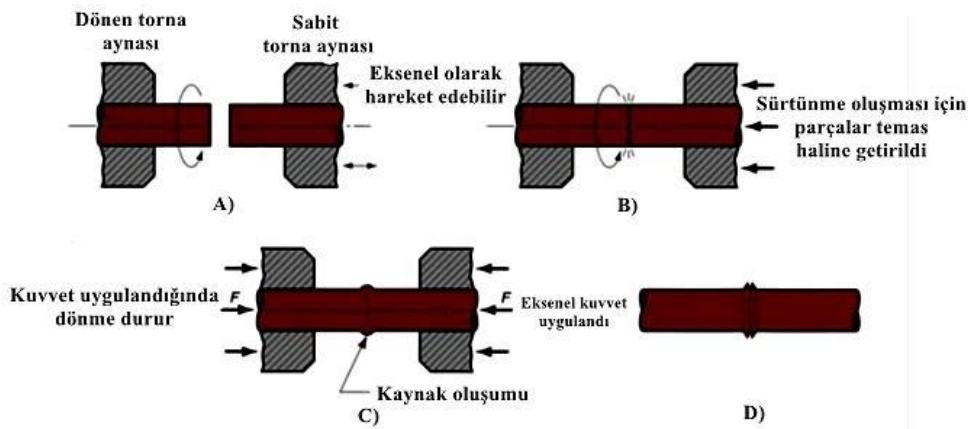
- **Difüzyon kaynağı:** Genellikle kontrollü bir atmosferde, difüzyon birleşiminin oluşması için yeterli süre, ısı ve basınç kullanılan katı hal kaynak yöntemidir. Yüzeylerde oluşan plastik deformasyon minimum seviyededir. Birincil birleşme mekanizması katı hal difüzyonudur ve bu difüzyon için gereken süre birkaç saniyeden birkaç saate kadar uzayabilir [36].

- **Patlamalı kaynak:** Yüksek hızlı patlama iki metal yüzeyi hızlı bir şekilde birleştirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde ilave bir metal malzeme kullanılmaz, dışarıdan bir ısı ilavesi olmaz ve difüzyon oluşmaz. Kısa bir sürede gerçekleşir. Metaller arasındaki bağ, dalgalı bir ara yüzey mekanik kilitlemesiyle sonuçlanır. İki farklı metalin birleştirilmesinde özellikle de büyük yüzeyler halinde olan bir metalin diğerinin üzerine kaplanması için kullanılır [36]. Şekil 3.2’de patlamalı kaynağının şematik gösterimi bulunmaktadır.



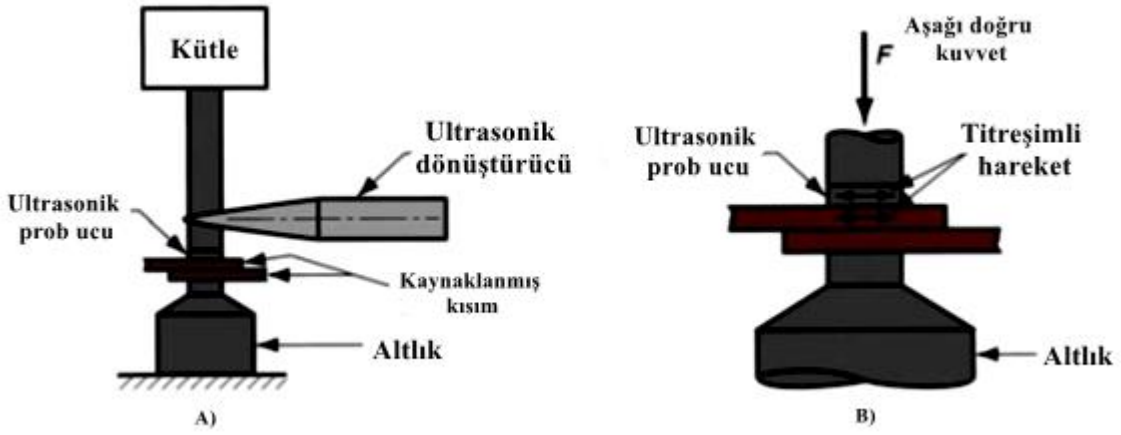
Şekil 3.2. Patlamalı kaynak: paralel konfigürasyon yerleştirme(A), ve patlayıcının patladığı durum(B) [36].

• **Sürtünme kaynağı:** Kaynak, iki malzemenin basınçla birlikte sürtünme ısısı oluşturarak gerçekleştirilir. Doğru bir şekilde yapıldığında temas yüzeylerinde erime meydana gelmez. Ek metal dolgu malzemesi, dekapan ve koruyucu gaz kullanılmaz. İşlem, dar bir ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) oluşturur. Farklı metal alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılabilir. Ticari işlemler için geniş bir uygulama alanı vardır ve otomasyona ve seri üretime uygundur. Sürtünme kaynağının sürekli tahrik sürtünme kaynağı ve atalet sürtünme kaynağı olmak üzere iki türü vardır. Sürekli tahrikli sürtünme kaynağı parçalardan biri ara yüzeyde sürtünme ısısı oluşturmak üzere sabit parçaya doğru sabir bir dev/dk'da döndürülür. Uygun ısı işlem sıcaklığında dönme durdurulur ve parçalar uygulanan basınç ile birleştirilir. Atalet sürtünme kaynağı ise dönen parça önceden belirlenmiş bir hızda dönen bir volana bağlıdır. Volan tahrik sisteminden ayrılır ve parçalar birbirine bastırılır be şekilde kaynak işlemi sonlanmış olur [36]. Şekil 3.3'te sürtünme kaynağının şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.3. Sürtünme kaynağı: Dönen parça, temas yok (A); Sürtünme ısısı üretmek için parçalar temas haline getirildi (B); Dönme durdurulur ve eksenel basınç uygulanır (C); Kaynak oluşturulur (D) [36].

- **Ultrasonik kaynak:** İki parçanın bir arada tutulup birleştirmek üzere ara yüzeye ultrasonik frekansta titreşimsel kayma gerilmelerinin uygulandığı katı hal kaynağı yöntemidir. Bu titreşim hareketi teması sağlamak için yüzeylerdeki mevcut tabakaları kırar ve metalürjik bağı oluşturur. Yüzeylerin ısınmasına rağmen, sıcaklıklar maximum sıcaklığın altında kalır. Bu yöntemde ek metal, dekapan ve koruyucu gaz kullanılmaz. Çoğunlukla bakır ve alüminyum gibi yumuşak metallerin bindirme tipi bağlantısı ile sınırlı kalır [36]. Şekil 3.4'te ultrasonik kaynağın şematik gösterimi bulunmaktadır.

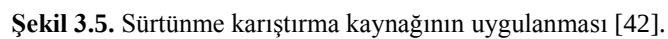


Şekil 3.4. Ultrasonik kaynak: Bindirme bağlantı için gereken ekipmanlar(A); Kaynak bölgesinin yakından görünüşü(B) [36].

3.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ilk olarak 1970 yıllarında plastıklere uygulanan kaynak yöntemlerinden biridir. Ancak 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsünde (TWI: The Welding Institute) alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi için yeni bir yöntem olarak geliştirilen ve avantajlarının çok olması sebebiyle birçok araştırmacı tarafından halen kullanılan bir katı hal kaynağı yöntemi haline gelmiştir [37,38]. Kaynak işlemi gerçekleştirilirken SKK yöntemi herhangi bir boşluk, çatlak veya deformasyon meydana gelmeden kaynak yapmanın çok zor olduğu malzemelerde kaynak yapmayı basitleştirmiştir. Birçok sanayi sektörü bu yöntemi kullanmak için çeşitli pilot çalışmalar yürütmektedir [39].

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin temel esası, özel olarak tasarlanmış uca ve omuza sahip dönen bir takımın alın altına dayanmış iki plaka malzemesinin içine belli bir devirde dönerek dalması ve birleştirme çizgisi boyunca ilerlemesi ile gerçekleşmektedir. Yöntemin uygulanışını Şekil 3.5’ te şematik olarak gösterilmektedir.



26

Belli bir devirle dönen karıştırıcı ucun çevresinde malzeme akışı karıştırıcı ucun arka kısmında ise malzeme ile dönen takım ucu arasında izafi bir dönüş meydana gelmektedir. Bu şekilde herhangi bir ek malzemeye gerek kalmadan dönen bir takım aracılığı ile birleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Birleştirilen malzeme, doğal katı faz halindedir [40].

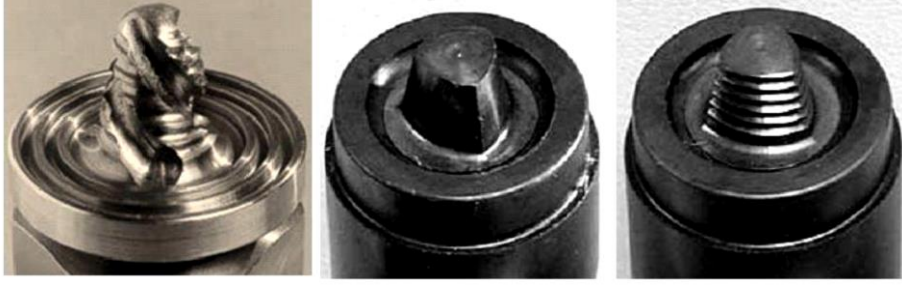
SKK yönteminde ergime sonucu oluşan herhangi bir kaynak hatası veya mekanik özellik kaybı mevcut değildir. Diğer katı hal kaynağı yöntemleri ile kıyaslandığında çekme, çarpılma, eğilme gibi durumlar bulunmamaktadır. Bu yöntemde ısı kaynağının %83'lük kısmı omuz tarafından üretilirken geriye kalan ısı kaynağı ise pim ucu tarafından üretilmektedir. Kaynağın dayanımını arttırmak için kaynak açısı değiştirilebilir aynı zamanda farklı profilde uçlar kullanılabilir [41].

SKK yönteminde kaynak bölgesindeki kaliteyi etkileyen belirli parametreler vardır. Bu parametreleri kullanılan malzeme için optimum değerler belirlenerek en homojen yapıyı elde etmek mümkündür. Kaynak işlemi sonrasında kaynak bölgesinde oluşan iç atomik yapı malzemenin mekanik özellikleri için belirleyici faktördür. Atomik yapıdaki tanelerin ince olması mekanik özelliklerin yüksek olduğunu gösterir [41].

SKK'da kaynak kalitesini etkileyen parametreler şunlardır [43] ;

- a) Kaynak hızı
- b) Karıştırıcı ucun devir hızı
- c) Kaynak hızının devir hızına oranı
- d) Omuz baskı kuvveti
- e) Batıcı uç geometrisi

Kaynak hızı ve karıştırıcı ucun devir hızı kaynak kalitesini etkileyen esas parametrelerdendir. Kaynak hızı ve karıştırıcı ucun devir aralığının çok geniş bir aralıkta seçilmesi mümkündür. Yapılan genel çalışmalara bakıldığında düşük kaynak hızı (ilerleme hızı) ve yüksek karıştırıcı ucun devri ile daha iyi kaynak kalitesi elde edilmiştir. Esas olan metal malzemenin yeteri miktarda ısınmasıdır. Sürtünme karıştırma kaynağının başarılı bir şekilde gerçekleşmesinde batıcı ucun geometrisi de büyük önem arz etmektedir. Takım ucu profili ve boyutu, malzeme akışı ve kaynak bölgesinde ısı oluşumu gibi kaliteyi etkileyen faktörlerdir. Şekil 3.6'da SKK yönteminde kullanılan belli başlı profilde kaynak uçları gösterilmiştir [40].



Şekil 3.6. SKK yönteminde kullanılan farklı profildeki kaynak uçları [40].

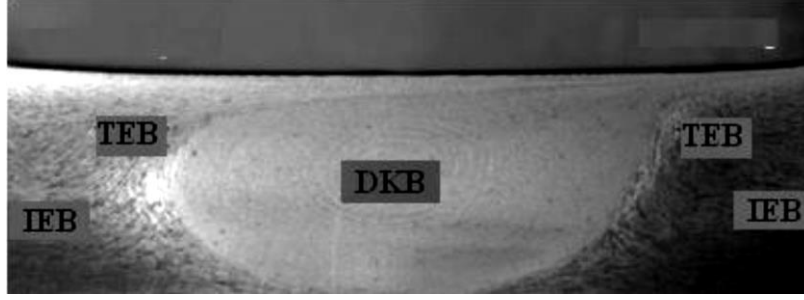
Sürtünme karıştırma kaynağında, esas olarak kalın levhaların birleştirme işlemlerinde, kaynak bölgesinde boşluk oluşumunu gidermek veya azaltmak ve işlem verimliliğini yükseltmek için dinamik süpürme hacminin (karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin) statik hacime oranı önemli bir faktördür. Bu oranı arttırmak ise batıcı ucun profillerinde değişiklikler yaparak mümkündür dolayısıyla batıcı uç çevresinde ve altında malzeme akış yolunu genişleterek malzemenin kaynak bölgesinin içerisinde kalması sağlanır. Bu amaçla, ince levhalar için geliştirilmiş olan geleneksel silindirik batıcı ucun yerine kalın levhaların kaynağında, hacminin yaklaşık %60-70'i boşaltılmış olan konik uç kullanılmaktadır. Kaynak bölgesindeki kaliteyi arttırmak için batıcı ucun geometrisini ve boyutunu kaynaklanacak levhanın kalınlığına göre ve kaynağın türüne göre seçilmelidir [40]. Kaynak işleminden sonra malzemeyi incelemeye aldığımız da kaynak bölgesinde 3 bölgenin oluştuğu gözlemlenmektedir. Bunlar;

- Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB): Yoğun plastik deformasyonun olduğu ve yüksek sürtünme sıcaklıklarının meydana geldiği bölge olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgede daha ince yönlenmiş taneler mevcuttur [40].

- Termomekanik etkilenen bölge (TEB): Yüksek sıcaklık ve deformasyona maruz kalan bölgeyi temsil etmektedir. Ana metalin tanelerinin kaynak merkezinden bu bölgeye ekstrüze edilmesinden dolayı yoğun bir dövme olayı meydana gelmektedir. Karıştırma sırasında oluşan ısı bu bölgenin mikro yapı ve mekanik özelliklerini değiştirir ve sonuçta deformasyona uğrayan taneler, uzamış ve yassılaştırmış taneler haline gelmektedir [44].

- Isıdan etkilenen bölge (IEB): Kaynak metal malzemesine daha yakın ve ısıdan etkilenmeyen ana metal malzemesine komşu olan bölgedir. Bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmez [40].

Yukarıda belirtilen bölgeler Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. AA7075 çiftinin kaynak sonrası mikro yapısal bölgeleri [45].

Yöntemin üstünlükleri ve sınırları; Sürtünme karıştırma kaynağı enerji tasarrufu sağlayan basit bir işlem olduğundan kaynak işlemi ucuzdur. İşlem gerçekleştirilirken dolgu tellerine ve gazdan korunan kaynak banyosuna ihtiyaç yoktur. Verimi yüksektir ve az bir bakım gerektirir. Yüksek bağlantı mukavemetleri elde etmek için ısıl işlem uygulayarak elde edilir. Klasik ergitme kaynak yöntemleriyle kıyaslandığında ince malzemelerin ($>0,5\text{mm}$) kaynağında göstermiş olduğu yüksek kaynak hızıyla, kalın malzemelerin kaynağında ise ergitme kaynak yöntemiyle ancak iki paso ile yapılan kaynakları tek paso da gerçekleştirmesi açısından daha üstündür ve bununla beraber SKK ile çift yönlü kaynak yapmak da mümkündür. SKK yöntemi diğer yöntemlerle kıyaslandığında üstünlüğü olduğu gibi sınırları da vardır. Örneğin bazı alaşımların tek pasolu kaynak işleminde kaynak hızı diğer ark kaynaklarından daha düşüktür. Eğer %100 nüfuziyet isteniyorsa parçaların arka kısmından da kaynak edilmesi gerekmektedir. Parçaların katı olarak çok iyi bağlanmaları gerekir. Ancak bu durum malzemelerde artık gerilmeler ortaya çıkarmaktadır. Başlangıç ve bitiş plakaları kullanılmayan kaynak işlemlerinde, başlangıçta oluşan istenmeyen kalitesiz dikiş görünümü ile kaynak sonrasında pimin yukarı çıkması sonucunda anahtar deliği oluşur. Bu deliğin tamiri hidrolik olarak geri çekilebilen takımlar ile yapılabilir ancak pahalı bir uygulamadır. SKK yöntemi uygulanırken genellikle doğrusal ve uzun dikişler halinde ekonomiktir ancak dairesel hareketler yapmak pek mümkün değildir. Robotik sistemler ile bu sorun giderilebilir fakat hâlihazırda pahalı bir çözümdür [40].

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI

4.1 Kaynak Yönteminin Tanımı

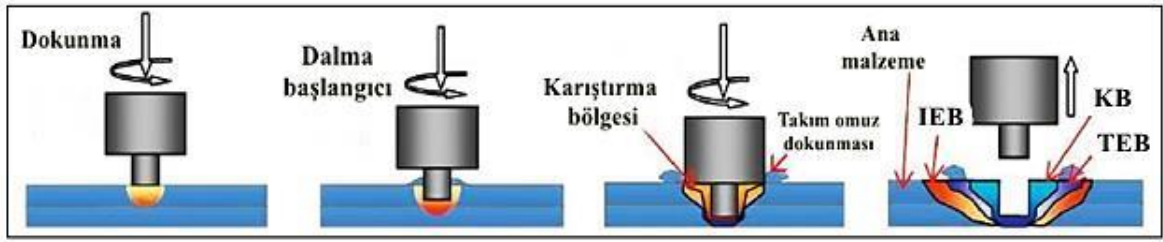
Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan, alüminyum saçlarının elektrik direnç nokta kaynağında yaşanan sorunlardan kurtulmak için geliştirilen, sürtünme karıştırma kaynağından türetilmiş bir yöntemdir. SKK yöntemindeki çizgisel kaynak dikişinin yerine SKNK yöntemi noktasal olarak dikiş üretir. Alüminyum, çelik ve magnezyum saçlara başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [5]. İlk olarak 2000 yıllarında literatüre girmiş olan SKNK yöntemi, elde ettiği başarılı sonuçlar ile günümüzde kaynak teknolojisi konusundaki son gelişmelerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır [35].

Son yıllarda birçok sektörde alışagelmış çelik saçlarının kullanımı yerine daha hafif ancak yüksek mukavemetli alaşımların kullanılması yönünde kararlar alınmaktadır. Örneğin; otomobil gövde yapımı ve kapalı panellerde, bagaj kapağı, motor kapağı gibi, arabanın birçok bölgesinde alüminyum alaşımı saçları ya da daha ince kesitlerde yüksek mukavemetli çelik saçlar kullanılır. Bu şekilde araç gövde ağırlığı azaltılıp ağırlığın azaltılması otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu sağlamaktadır [33]. SKNK yöntemi bu şekilde hafif alaşımların (alüminyum vb.) kullanımında kolaylıklar sağlayan yenilikçi ve özgün bir yöntemdir. SKNK yöntemi ile gerçekleştirilen ilk çalışmalar, alüminyum alaşımlarına uygulanmasının araştırılması ve geliştirilmesi üzerine olmuştur. Bunların beraberinde SKNK yöntemi ileri yüksek dayanımlı çeliklerin kaynağında hem çelik ihtiyacını sağlayan firmalara hem de otomobil kullanıcılarına teknik olarak mükemmellikler sunmuştur [37]. Kawasaki Ağır Endüstrisi (KHI) tarafından geliştirilen SKNK yöntemi sırasında malzemede ergime olmaması çarpılmaları minimum seviyeye çekmiş ve daha iyi özellikte bağlantılar elde edilmiştir. Yöntem uygulama sırasında duman ve ısın oluşturmaması, koruyucu gaz, tel, toz veya elektroda ihtiyaç duyulmaması, çevre dostu olması, yöntemle harcanan yatırım maliyetinin düşük olması, enerji tasarrufu sağlaması ve otomasyona olan uyumluluğundan dolayı Amerikan otomotiv sanayisinde büyük ilgi görmüştür. Bu yöntem Ford tarafından denenmiş olup bu teknolojiyi geliştirmek için birçok çalışmalar gerçekleştirmektedir [34].

4.2 SKNK Yönteminin Uygulanışı

Şematik olarak Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, SKNK işleminin aşamaları şöyle tanımlanabilir [2]:

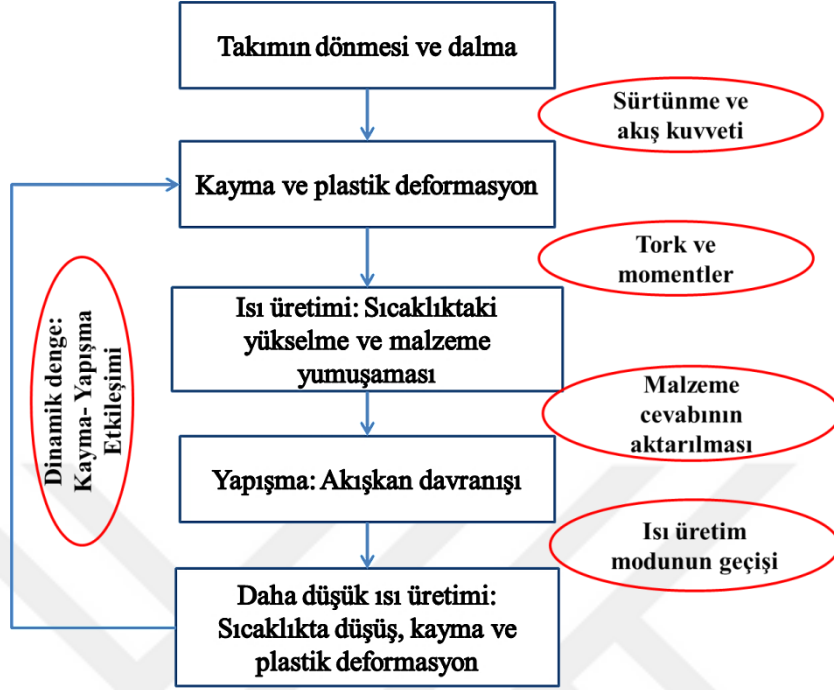
- Takımın piminin malzemeye dokunması,
- Dalma başlangıcı,
- Belirli bir bekleme süresi ile takımın dalma işlemini gerçekleştirmesi,
- Takımın geri çekilmesi.



Şekil 4.1. SKNK yönteminin şematik gösterimi [2].

SKNK yönteminde dairesel yüzeylerden biri üzerine merkezlenmiş çıkıntılı bir pim ile birlikte silindirik şekilde dönen bir takım, önceden belirlenmiş bir dalma derinliğinde üst üste bindirilmiş levhaların yüzeyinden içine doğru belirli bir oranda daldırılmaktadır. Takım malzemeye daldıktan sonra meydana gelen sürtünme ısısı, temas edilen metalin viskozitesini artırarak gerek çevresel gerekse eksenel doğrultuda malzeme akışına neden olur. Isı yayılımı, kaynak süresi ile birlikte karıştırma işlemi boyunca devam eder. Yüzeye temas eden omuz bölgesi karıştırıcı takım piminin yaptığı gibi malzemeyi yumuşatarak akıcı özellik kazanmasını sağlar ve böylece halka şeklinde kaynak havuzunun oluşmasını sağlar. Kaynak süresinin ardından takım hızlı bir şekilde geri çekilir. Bu sayede takım omuzu tarafından uygulanan dövme basıncı, pim etrafında halka şeklinde bir katı hal birleştirme formunun oluşmasına yol açmaktadır ve parçalar sorunsuz bir şekilde birleştirilmektedir. SKNK yöntemi sırasında malzemede ergime olmaması çarpılmaları azaltırken, oksidasyonun sürtünme sırasında minimize edilmesiyle de koruyucu gaz ihtiyacı olmadan gözeneksiz ve daha mukavim bağlantılar elde edilir [46].

Şekil 4.2’de SKNK işleminin akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.2. SKNK işleminin akış şeması [2].

Yukarıda SKNK yönteminin süreci hakkında temel bir akış diyagramı verilmiştir. Diyagramdaki her bir aşama kapsamlı bir şekilde aşağıdaki maddelerde açıklanmıştır;

- Dönen takım, iş parçasının üst yüzeyine dokunmaya başladığında, dönme ve dikey hareketi, temel malzemenin ara yüz sürtünmesi (dinamik) ve (verim/akış) kuvvetiyle karşılanır [2].
- Dokunduktan sonra, takım dikey hareketi ile üretilen iş parçasının yüzey konturu üzerinde teğet bir kayma ile iş parçası içine dalmaya devam eder. Direnç kuvvetlerine ve takım geometrisine bağlı olarak, tork ve momentler meydana gelir. Bu tork ve momentler ara yüzde ve iş parçası malzemesinde termal girişlere yol açar [2].
- Sürtünme kuvveti ve dağılmış deformasyon enerjisi nedeniyle ısı oluşumu, takım-iş parçası ara yüzünün çevresindeki sıcaklığı yükseltir. Daha yüksek sıcaklıkta, akış gerilimindeki düşme nedeniyle malzemede yumuşama meydana gelir [2].
- Ana malzemenin verim/akış gücündeki düşme ile ilgili bir diğer önemli faktör, yüksek sıcaklıklar nedeniyle gerilimi azaltıcı maddenin dışında sertleştirilebilir veya ısıl işlem görebilen alaşımlar için güçlendirici ikinci faz parçacıklarının çözünmesi olabilir [2].

- Malzeme tepkisindeki geçiş (sert katıdan yumuřatılmıř veya dūřuk mukavemetli visko-plastik tepkiye), yapıřma ara yūz kořullarında bařlayabilir. Ara yūzdeki etkileřim modunun, tam kayma kořullarından kısmi kayma ve yapıřma kořullarına, būyūk bir kayma kesimi, yani kayma ve yapıřma ara yūz kořullarının bir arada bulunması ile kaydıęı dūřūnūlebilir. Bu aynı zamanda sistemin torkunda ve momentlerinde deęiřikliklere yol açabilir [2].

- İş parçası içindeki yumuşatılmış bōlge, termal davranışına (iletkenlik, kapasite vb.) bağlı olarak kendisini oluşturmaya devam ederse, yapışma modunun oranı da artabilir [2].

- Ana ısı giriřinin sūrtūnmeden kaynaklandıęı varsayılarak [2-5, 20], arabirimdeki yapıřma modunun oranının artması sūrtūnme ısı giriřini azaltacaęından, toplam ısı giriřinin bir miktar dūřmesi beklenebilir [2].

- Yapıřma kořulları sırasında, deformasyon enerjisinin daęılması nedeniyle oluřan ısı giriřinin, sūrtūnmeli ısı giriřinin dūřen kısmını arttırabileceęi ve dengeleyebileceęi iddia edilebilir [2].

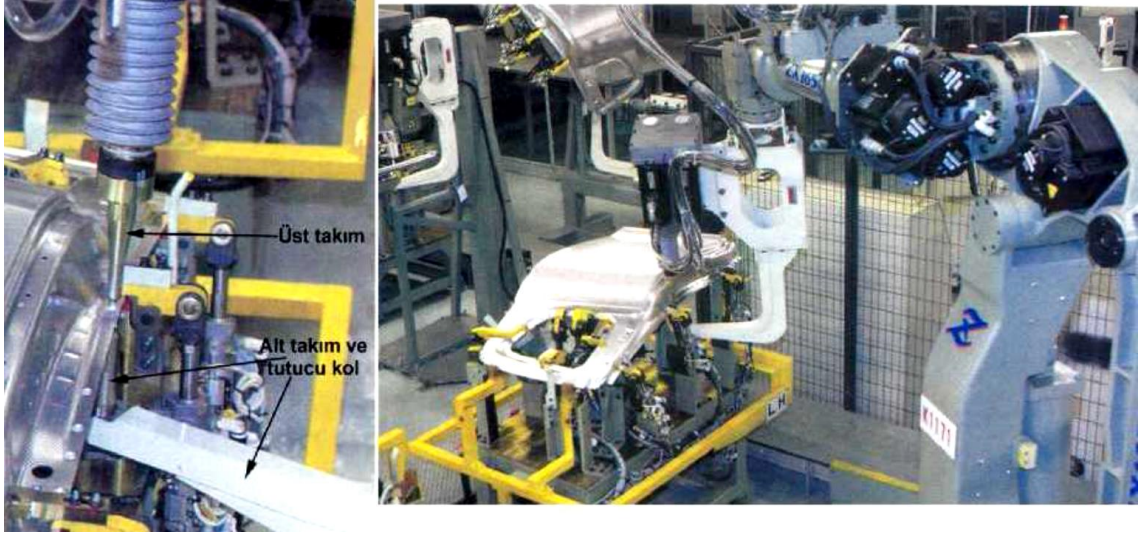
- Ancak, yapıřma kořulları sadece iř parçası malzemesi önemli ölçūde yumuřatıldıęında geçerli olabileceęinden, sistemin genel enerji giriři gereksinimleri azaltılabilir. Bu varsayım, sistemin torkunda dūřmenin deneysel olarak gözlemlenen etkisiyle desteklenebilir [2].

- Toplam ısı giriřindeki bu kūuk dūřūřle, takım ile iř parçası arasındaki ara yūzey etkileřimi için kayma modunun oranı artabilir [2].

- Yukarıdaki maddeler ıřıęında, kavramsal bir mekanizma açısından, ilk geçici sūreden sonra, iřlem ve sistem parametreleri deęiřmezse bu kořulların bir tūr dinamik denge geliřtirebileceęi varsayılabilir [2].

- Bōylece belirli bir sūre parametreleri kūmesi için, belirli sıcaklık ve ilgili akıř alanı belirlenir. Bu alanlar iyi bit kaynak ūretmek için yeterliyse, mevcut sistem parametreleri için iřlemin optimize edildięi sōylenir [2].

SKNK yōntemini ilk geliştiren aynı zamanda ilk kullanan Japon otomobil şirketi, yōntemin uygulanması için özel olarak geliştirdiği kaynak robotunu kullanarak spor model otomobillerin motor kaputlarını ve arka kapılarının ūretimini gerçekleştirmektedir. şekil 4.3'te ūretilen robotun uygulama sırasındaki gōrseli bulunmaktadır [35].



Şekil 4.3. SKNK yönteminin spor bir otomobilin arka kapılarına ve gövde panellerine uygulanması [35].

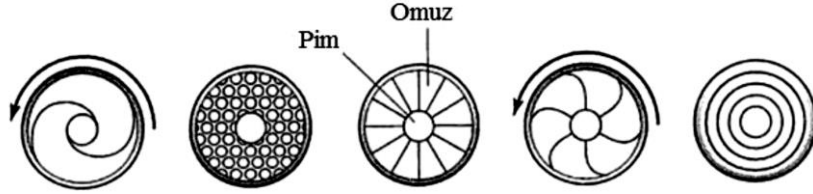
4.3 Kaynağın Başarısını Etkileyen Parametreler

SKNK yönteminin başarısını etkileyen temelde 5 parametre mevcuttur. Bunlar [37];

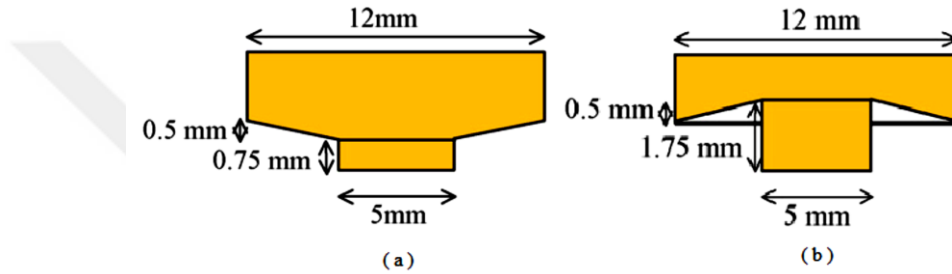
- a) Takım Geometrisi
- b) Takımın Devir Sayısı
- c) İlerleme hızı
- d) Dalma Derinliği
- e) Kaynak Süresi.

a) Takım Geometrisi: Bu parametre kaynak edilecek parçaya temas edecek olan bölgenin kesitini meydana getirir. Kaynağı gerçekleştirilecek malzemenin boyutları göz önünde bulundurularak yeterli sürtünmenin oluşması gerekmektedir. Takım geometrisi de bu ısıyı meydana getirecek önemli bir parametredir. Takım geometrisi, oluşturduğu sürtünme ısı ile kaynak havuzunu meydana getiren ve yumuşak malzemeyi kaynak bölgesinin dışına çıkmasına engel olan bir parametredir. Üst üste bindirilen iki malzemeyi olabildiğince iyi karıştırması ve karıştırma işlemi boyunca, karışımın daha iyi gerçekleşmesi, özellikle takım pimi karışıma maksimum seviyede yarı akışkan malzeme dahil etmesi ve karıştırma işleminin sürekliliğini sağlaması gerekir. Takıma ait omuz geometrisi gibi özellikler de kaynak kalitesini etkilemektedir. Takımın omuz kısmı, kaynak gerçekleşirken malzemeye temas ederek sürtünme oluşturur. Sürtünme sonucu oluşan ısı SKNK işlemi için yeterli seviyede olması gerekir [2].

Literatürde farklı geometrilerde omuz çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te takım omuz geometrileri görülmektedir [2].



Şekil 4.4. Malzeme akışını arttırmak için tasarlanan omuz geometrileri [35].



Şekil 4.5. Çeşitli omuz geometrileri. a) Konveks geometrili omuz, b) Konkav geometrili omuz [35].

b) Takımın Devir Sayısı: Kaynak takımı, kaynak edilecek iki malzeme arasında bir sürtünme ısısı oluşturmalıdır. Oluşan sürtünme ısısı malzemelerin yumuşamasını sağlar ve yumuşayan iki malzeme arasındaki malzeme akışı belirli bir devir ile dönen takım hareketi ile mümkündür. Bu malzeme akışının iyi seviyelerde olması takım devrine bağlıdır. Takımın devri arttıkça takımın çevresel hızında da artış olacaktır bu da sürtünme hızını artırır. Dolayısıyla takım devri arttıkça daha kısa sürede kaynak gerçekleşir. Ancak kaynak edilen malzemenin ergime sıcaklığı, sertliği vb. özellikleri ve buna uygun olarak seçilen takımın özellikleri birbirini dengeleyecek şekilde olmalıdır. Devir sayısının artması sürtünme hızını artırır ancak kaynak edilen malzeme için optimum değerler, literatürdeki değerlere ya da deneme yanılma yoluyla belirlenen değerlere göre seçilmelidir [37].

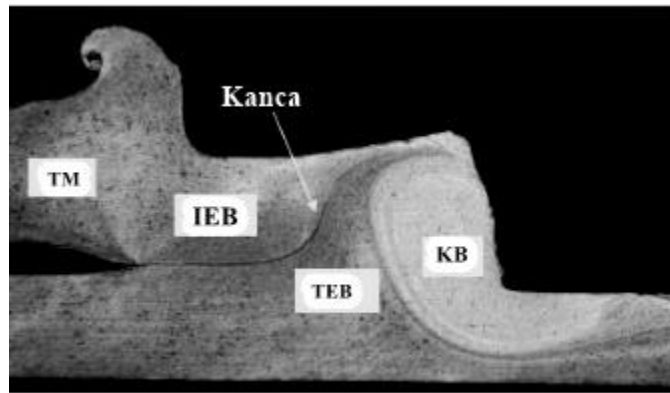
c) İlerleme Hızı: Diğer parametrelere kıyasla kaynak kalitesini en az etkileyen parametre dalma hızıdır. Parametre mm/dk cinsinden belirtilir. Takım kaynak edilecek malzeme yüzeyinden belirlenen dalma derinliğine kadar olan noktaya kadarki ilerleme hızıdır [37].

d) Dalma Derinliği: Karıştırıcı ucun omuz tabanının malzemeye temas ettiği noktadan malzemeye dik doğrultuda, malzemenin içine doğru belirli bir ilerlemede dalma yaptığı son noktaya kadarki mesafedir. Takımın omuz kısmının malzeme içine doğru bir miktar dalması ile sonlanır [37].

e) Kaynak Süresi: Malzeme içerisine dalma işlemi gerçekleştikten sonra takım, kaynak edilecek malzemeyi yumuşatarak akıcılık kazandırır ve bu sırada iki malzemenin karışması için takım dalma noktasında belirli bir süre bekletilmesi gerekir. Bu süreye kaynak süresi denir. Bu süre boyunca belirli bir devirde dönen takım ile malzeme arasında sürtünme meydana gelir ve bu sürtünme sonucu oluşan ısı malzemeyi yumuşatır ve akışkan hale gelmesini sağlar. Sürtünme sonucu oluşan ısıнын yayılımı karıştırma aşaması boyunca geçen süre içerisinde devam eder. Malzeme içerisinde daldırılan takımın omuz bölgesi de malzemeyi yumuşatarak kaynak havuzu oluşturur. Bu sırada yumuşamış malzemenin hacmi kaynak havuzunu doldurur. Karıştırıcı takım piminin üzerindeki helisel kanallar yardımı ile de karışarak kaynak bölgesinin dayanımı artar [37].

4.4 Kaynağın Metalürjik Yapısı

Tanelerin ve çökeltilerin mikro yapısal karakterizasyonuna dayanarak, bir SKNK eklemünde tipik kaynak bölgesi bir Karıştırılmış Bölgesi (KB), Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB), Isıdan etkilenen bölge (IEB) ve Temel Malzeme (TM) olmak üzere 4 bölgeden oluşur [32]. Bu bölgeler, Şekil 4.6'daki makrografta işaretlenmiştir.



Şekil 4.6. SKNK eklemindeki farklı bölgeler [47].

a) Karıştırma Bölgesi (KB)

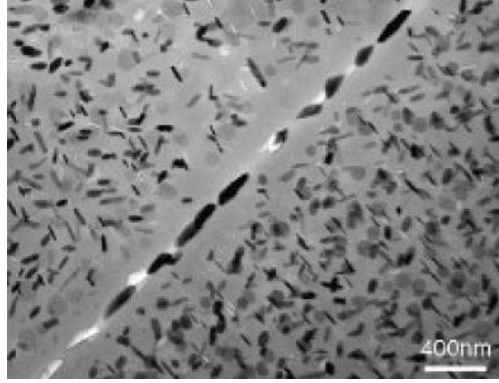
Plastik deformasyonun fazla olduğu ve yüksek sürtünme sıcaklıklarının olduğu kaynağın merkezinin olduğu bölgedir. SKNK sırasında yoğun plastik deformasyon ve sürtünme ısı, karıştırılan bölge (KB) içinde yeniden kristalize edilmiş, ince taneli bir mikro yapı oluşmasına neden olur. Aynı zamanda bu bölgede dislokasyon yoğunluğu daha düşüktür. Kaynak işlemi sırasında karıştırılmış bölge, sıvımsı olduğu varsayılabilir kadar plastikleştirilir veya yumuşatılır [2].

b) Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB)

SKNK işlemine özgü, ana malzeme ile karıştırılmış bölge arasında termomekanik etkilenen bölge denilen bir geçiş bölgesi vardır. TEB'de sürecin hem sıcaklık hem de deformasyon etkileri yaşanır, ancak KB'deki etkilerden daha az oranda görülür. Ana metalin tanelerinin kaynak merkezinden bu bölgeye taşınmasıyla yoğun bir dövme işlemi olmaktadır. Karıştırma esnasında açığa çıkan ısı bu bölgenin mekanik ve mikro yapı özelliklerini değiştirir. TEB bölgesinde deformasyona uğramış uzun ve yassılaştırmış taneler bulunmaktadır [2,32].

c) Isıdan Etkilenen Bölge (IEB)

Deformasyonun hiçbir önemli etkisinin olmadığı, sadece sıcaklık etkilerinin yaşandığı TEB'in ötesindeki bölge, ana malzemeye göre mikro yapısal değişimler de göstermektedir. Bu bölgeye ısıdan etilenen bölge IEB denir [2]. Isıl işlem görmüş alüminyum alaşımları için sıcaklığın 250 °C 'nin üzerinde yükseldiği bölge olarak tanımlanabilir. 250 °C 'ye kadar taneler esas malzemenin özelliklerini göstermektedir. Ancak 250 °C aşıldığı zaman bölgede tane büyümesi ve tane sınırlarında çökelti meydana gelir [32]. Şekil 4.7'de duruma ait görsel bulunmaktadır.



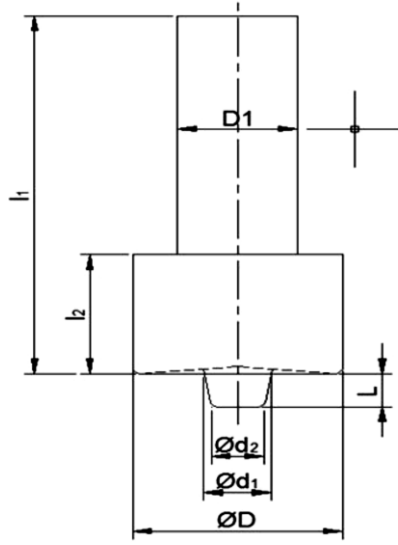
Şekil 4.7. IEB’de tane sınırlarında toplanan çökeltiler [32].

d) Temel Malzeme (TM)

Kaynak metalinden oldukça uzakta olan bu bölge çok düşük sıcaklıklara maruz kaldığından plastik deformasyondan etkilenmemektedir. Dolayısıyla mikro yapı özelliklerinde herhangi bir değişme veya dönüşüm meydana gelmemektedir [32].

4.5 SKNK Takımı

SKNK yönteminde, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen döner takımlar kullanılır. Alüminyum alaşımları için yüksek karbonlu çeliklerden üretilen takımlar ve bazı yüksek hız çeliklerinden üretilmiş takımlar kullanılır. Bunun yanında günümüzde bakır ve paslanmaz çeliklerin kaynağında yüksek sıcaklıklarda yüksek aşınma direncine sahip sert karbür takımlar kullanılır. SKNK yönteminde kullanılan karıştırıcı takımın “Karıştırıcı Uç ve Omuz” olarak iki önemli bölgesi mevcuttur. Bu bölgeler kaynak sırasında kaynak edilecek malzeme ile sürekli temas halindedir. Farklı şekillerde karıştırıcı uç ve omuz geometrileri mevcuttur. Karıştırıcı takım genel olarak silindirik bir takım merkezinde yer alan vida, üçgen, konik veya özel profilde tasarlanmış takım ucuna sahiptir. Bu farklı profildeki karıştırıcı uç pimleri kaynak esnasında malzemeyi yumuşatarak akıcı hale getirir ve aynı zamanda malzemenin taşınmasında ve ekstrüzyonunda önemli rol oynamaktadır. Şekil 4.8’de örnek bir SKNK takımı gösterilmiştir [37].



Şekil 4.8. Örnek SKNK takımları [32,36].

ØD: Omuz Çapı

ØD₁: Sap Çapı (mm)

Ød₁: Konik Ucun Büyük Çapı

Ød₂: Konik Ucun Küçük Çapı

L: Uç Boyu (mm)

l₁: Takım Boyu (mm)

l₂: Omuz Boyu (mm).

Karıştırıcı ucun omuz ve pim profilleri gelişi güzel tasarımı yapılmaz. Kaliteli kaynak işlemi elde etmek için, farklı tasarımlara ve profillere ihtiyaç vardır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminde birleştirme kalitesini etkileyen en önemli faktörler, karıştırıcı ucun profili ve diş formudur. Bu faktörlere bağlı olarak kaynak kalitesinde iyileşmeler yapılabilir. Bu nedenle kullanılan malzemeye bağlı yapılacak işleme göre en uygun ve ideal sonuçları verecek karıştırıcı ucu seçmek önemlidir. Karıştırıcı uç tasarımı, kaynak bölgesindeki akışkan metalin akış yolunu kolaylaştıracak bir tasarımda olmalıdır [32].

Karıştırıcı uç omuz bölgesinin genişliği de önemli bir faktördür. Malzemenin ön ısıtmasını sağlayan omuz bölgesi kaynak sırasında yüksek basınçlara maruz kalarak alttan yukarı doğru taşınan malzemenin yüzeye belirli aralıklarla sıvanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Diğer yandan; omuz bölgesi karıştırma işlemi sonucu viskoz hale gelen ve dışarı doğru çıkmak isteyen metalin kaçışını engeller [32].

4.6 SKNK Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

SKNK yöntemi diğer katı hal kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında avantajı olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur.

SKNK avantajları [34];

- Aynı veya farklı malzemelerin birleştirilebilir olması,
- Düşük enerji tüketmesi,
- Malzeme tasarrufu ve düşük bakım maliyet gereksinimi,
- Kaynak parametrelerinin kolay kontrol edilmesi,
- Basit parça tasarımı,
- Manuel ya da otomasyona uygun olması,
- Yüzey hazırlığı gerektirmemesi,
- Ana metal özelliklerine yakın değerler elde edebiliyor olması.

SKNK dezavantajları [34];

- Parçaların geometrik şekli ile sınırlı olması,
- Kaynak edilen parçalarda deformasyon ve distorsiyon meydana gelmesi,
- Kaynak için kullanılan makine ve ekipmanlar açısından ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması,
- Kesite bağlı motor gücü ihtiyacı gibi problemler dezavantaj olarak görülebilir.

4.7 SKNK Yönteminin Makine ve Ekipmanları

SKNK yöntemi robot ve otomasyon sistemlerine yatkınlığı sayesinde, otomasyona kolayca entegre edilip geliştirilmiştir. Bu sayede kısa işlem süresi ile kaliteli bağlantılar elde edilmiştir. Alüminyum malzemeleri için SKNK kaynağı uygulanırken makine ve ekipmanlar, Amerika'nın Wisconsin şehrinde yer alan FSL (Friction Stir Link) firmasından tedarik edilmiştir. FSL firması geliştirdiği StirWare yazılımı ile SKK ve SKNK yöntemlerinin bütünleşmesine fırsat sağlamıştır. Yazılım, donanım ve kaynak işlem parametrelerinin geliştirilmeye açık olması standart endüstriyel robotların kullanılmasına olanak sağlamıştır. SKNK yönteminde kullanılan makineler işin temelinde benzer kontrol sistemlerine sahiptir ancak bazen mekanik donanımlar açısından farklılıklar gösterebilir.

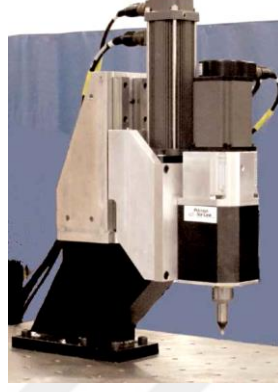
SKNK yöntemi temelinde toplamda 4 farklı makine tasarımı mevcuttur; Masa üstü, Sabit tipte, Pres tipi ve Robot gibi makineler kullanılmaktadır [44].

Sabit Tip ve Pres Tipi SKNK Makineleri: Pres tipi SKNK makinesi, araştırma ve geliştirme amaçlı çalışmalarda ve seri üretimin olduğu yerlerde kullanılabilir. Sabit tip ve pres tipi SKNK makineleri seri üretimde kullanabilmek için bir robot ile entegre etmek gerekir. Bu makineler kaynak noktasını oluşturacak özel dayanak sistemleri vardır. Şekil 4.9'da sabit tip ve pres tipi SKNK makineler gösterilmiştir [34].



Şekil 4.9. Sabit tip ve pres tipi SKNK makinesi [34].

Masa Üstü SKNK Makinesi: Araştırma ve geliştirme amaçlı olup küçük hacimli çalışmalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Seri üretimde kullanabilmek için otomatik bir sistem ile cihaz entegre edilebilir. Şekil 4.10'da masa üstü SKNK makinesi gösterilmiştir [34].



Şekil 4.10. Masa üstü SKNK makinesi [44].

SKNK Robotları: Büyük hacimli ve karmaşık geometriye sahip olan parçaların çok sayıda üretimi söz konusu olduğundan SKNK robotları idealdir. Bilgisayar kontrollü SKNK tabancası herhangi tipte bir robota monte edilebilir. Bu tabanca iki adet servo motor ile donatılmıştır. Motorlardan biri eksenel hareket için diğeri ise takımın dönmesi için gereklidir [44]. Şekil 4.11'de SKNK robotları gösterilmiştir.



Şekil 4.11. SKNK robotları [44].

5. MATERYAL ve METOT

5.1 Giriş

Alüminyum alaşımları, geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde birçok problem ile karşılaşmaktadır. Bu doğrultuda birçok araştırmacı bu problemlere çözüm olması açısından alternatif kaynak yöntemleri üzerine çalışmalara başlamıştır. Katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemi ise avantajları dahilinde bu problemlere çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde SKNK yöntemi üzerine yapılan çalışma sayısı sınırlıdır. Bu nedenle çalışmamızda birçok endüstride avantajlarından dolayı çoğunlukla tercih edilen AA7075 serisi alüminyum alaşımlarının SKNK yöntemi ile kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen 3 farklı parametre için 16 adet numune elde edilmiştir. Birleştirilen numuneler için literatüre uygun mikroyapı ve mekanik testler yürütülmüştür. Hasara uğrayan 2 numune haricinde kalan 14 adet numuneden 7 tanesi bağlantı mukavemetlerini incelemek amacı doğrultusunda çekme testi için ayrılmış, diğer 7 tanesi ise mikro sertlik ve mikro yapı incelemesi için kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen veri ve bulgular literatür ışığında değerlendirilmiştir.

5.2 Kaynak Öncesi İşlemler

5.2.1 Çalışmada Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Yapılan çalışmada SKNK işlemi, AA7075 serisi alüminyum alaşımı sac levhalar için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan AA7075 serisi alüminyum alaşımı levhaları 4 mm kalınlığında olup 100cm×10cm boyutlarında ticari olarak temin edilmiştir. Daha sonra 100mm×25 mm ebatında kesilerek dört köşesi freze ile düzeltilmiştir. AA7075 serisi alüminyum alaşımı sac levhanın kimyasal bileşenleri Tablo 5.1’de, mekanik özellikleri ise Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1. AA7075-T6 alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimi [48].

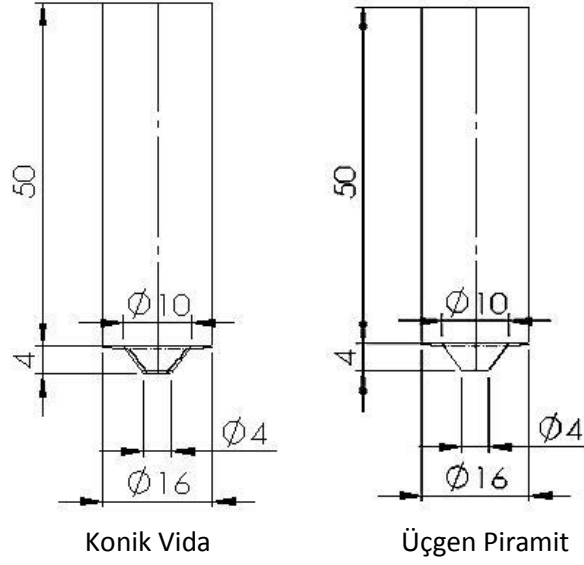
Cu	Zn	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Ti	Diğer	Al
1.20	5.10	2.10	0.40	0.30	0.50	0.18	0.20	0.15	Kalan
2.00	6.10	2.90	maks.	maks.	maks.	0.28	maks.		

Tablo 5.2. AA7075-T6 alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri [49].

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (Vickers) min-max
T6	460-505	530-570	10	150-155

5.2.2 Karıştırıcı Uçların Hazırlanması

AA7075 plakalar kaynak edilirken tercih edilen takım da fazlasıyla önem arz etmektedir. Kullanılan takım kaynak edilecek malzemeden daha sert ve aşınmaya dirençli olması gerekir. Bu nedenle deneylerde K100 kalıp çeliği kullanılmıştır. Konik vida ve üçgen piramit olmak üzere iki farklı geometride işlenen pimler, freze adaptörüne çakı yerine takılan karıştırıcı uçların yüksek sürtünme basıncı ve sürtünme ısısı altında viskoz hale gelen alaşımı deneyin sonuna kadar uygun parametrede karıştırması beklenir. Bunun için imal edilen uçlara mukavemet kazandırmak amacı ile ısıtıl işlem uygulanmıştır. Kullanılacak takım, yüksek devirlerde yapılacak kaynak işlemlerinde uçların ve profillerinin pürüzsüz bir şekilde malzeme akışını kolaylaştırması gerekmektedir. Şekil 5.1’de karıştırıcı uçların teknik resimleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında kullanılan karıştırıcı uç boyutları.

Konik vida ve üçgen piramit profilindeki takımların özellikleri Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Konik vida takımının özellikleri.

Uç Profilleri	Karıştırıcı Uç Malzemesi	Konik vida diş sayısı	Yüzey özellikleri	Omuz Tipi
Konik vida	K100	Max 2 ad. geniş hatveli konik diş	En az 1000 HV lik sertlikte ısıtıl işlem görmüş ve taşlanmış	1 mm derinlikte iç konkav

Tablo 5.4. Üçgen piramit takımının özellikleri.

Uç Profilleri	Karıştırıcı Uç Malzemesi	Üçgen Piramit Özellikleri	Yüzey özellikleri	Omuz Tipi
Üçgen piramit	K100	3 yüzeyli kökten uca doğru 6 mm yükseklikte konik piramit	En az 1000 HV lik sertlikte ısıtıl işlem görmüş ve taşlanmış	1mm derinlikte iç konkav

5.2.3 Deneyler İçin Belirlenen Kaynak Parametreleri

Numuneler, literatür verileri göz önüne alınarak kaynak işlem öncesi parametreleri belirlendi. Takım omuz dalma mesafesi, takım devri ve takım ucu profili olmak üzere 3 adet kaynak parametresi üzerinden kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

Seçilen parametreler, gerçekleştirilecek deneyler göz önünde bulundurularak 16 adet deney kombinasyonu oluşmuştur. İlgili SKNK işlemi için parametreler Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

Kaynak için hazırlanan numuneler ayırt edici olması adına S1, S2, ... S16 şeklinde adlandırılmıştır.

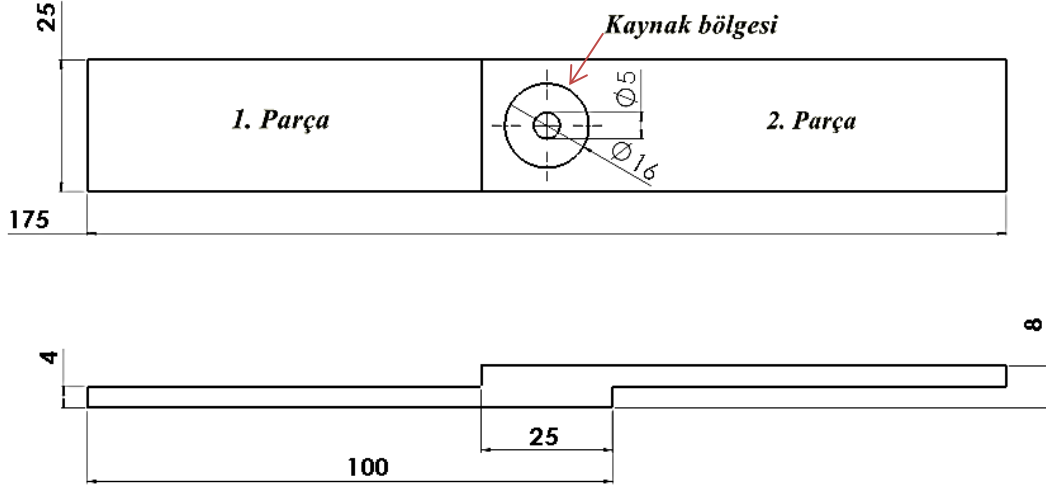
Tablo 5.5. SKNK işlemi için parametreler.

Deney	Takım Omuz Dalma Mesafesi (mm)	Takım Devri (mm/dk)	Kaynak Süresi (sn)	Takım Ucu Profili	Numune
1	2	1500	5	Konik vida	S1
2	2	1500	5	Üçgen piramit	S2
3	2	2500	5	Konik vida	S3
4	2	2500	5	Üçgen piramit	S4
5	2	2000	5	Konik vida	S5
6	2.25	1500	5	Üçgen piramit	S6
7	2.25	1000	5	Konik vida	S7
8	2	2000	5	Üçgen piramit	S8
9	2	1000	5	Konik vida	S9
10	2.25	2500	5	Üçgen piramit	S10
11	2.25	1500	5	Konik vida	S11
12	2.25	1000	5	Üçgen piramit	S12
13	2.25	2000	5	Konik vida	S13
14	2.25	2000	5	Üçgen piramit	S14
15	2.25	2500	5	Konik vida	S15
16	2	1000	5	Üçgen piramit	S16

5.3 Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının Uygulanması

4 mm kalınlığındaki alüminyum plakalar 100mm×25mm boyutlarında frezelenerek çapak ve kirden arındırılmıştır. Daha sonra üst üste bindirilen çiftler, 25mm²'lik bir bindirme alanı ile dalma noktası markalanmıştır. SKNK yönteminin uygulanacağı nokta bindirme alanının tam merkezi olarak seçilmiştir.

Kaynak sonrasında 175mm×25mm×8mm boyutlarında numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin teknik resmi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. 175mm×25mm×8mm boyutundaki numunenin teknik resmi.

SKNK işlemi için 3 eksenli programlanabilir CNC makinası kullanılmıştır. Her bir numuneye karşılık gelen kaynak parametre değerleri CNC makinasının program dilinde yazılmıştır ve kaynak işlemi dışarıdan bir müdahale olmadan gerçekleştirilmiştir.

İki adet AA7075 serisi alüminyum sac levha üst üste konumlandırılarak mengeneyle sabitlenmiştir. Takım ucu, bindirme alanının tam merkezine gelecek şekilde ayarlanıp parçanın son konumu belirlenmiştir. Numune kaynağa hazır hale geldikten sonra her bir numune için kaynak parametrelerine bağlı olarak programı yazılıp kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3’te görüldüğü üzere takım belirlenen dalma sınırına kadar numuneye daldırılarak 5 sn’lik kaynak süresi boyunca karıştırma işlemini gerçekleştirmiştir. Şekil 5.4’te parçanın kaynak edildikten sonra geri çekilme işleminin görseli bulunmaktadır. Şekil 5.5’te ise kaynak edilen tüm parçaların kaynak sonrası görselleri bulunmaktadır.



Şekil 5.3. SKNK daldırma ve karıştırma işlemi.



Şekil 5.4. SKNK geri çekilme işlemi.



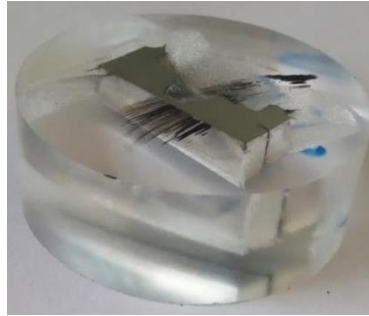
Şekil 5.5. Kaynak sonrası elde edilen numuneler.

5.4 Metalografik İncelemeler

Malzemenin kaynak sonrası sertliğini ve mikro yapısal özelliklerini incelemek için belirli metalografik incelemeler yapılmıştır. Kaynaklanan numuneler kaynak merkezi dikkate alınarak kesilmiştir. Mikro yapı fotoğrafları ve mikro sertlik işlemleri için kesilen numuneler inceleme öncesi kaynak bölgesi yukarıda kalacak şekilde parça pozisyonlandırılıp Şekil 5.6’da gösterilen bakalit cihazında bakalitesi alınmıştır. Bakalitesi alınmış numune Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Bakalit cihazı.



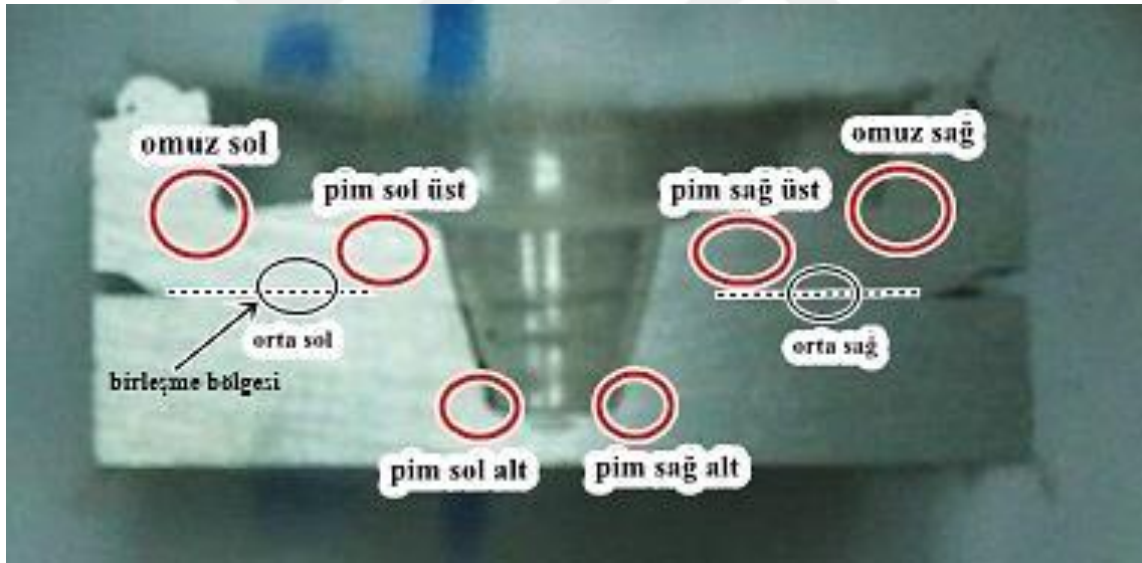
Şekil 5.7. Bakalit alınmış numune.

Bakalitesi alınan numune ilk olarak 240 meshlik kaba zımparadan geçirilmiştir. Bu sayede bakalitin dışına taşan talaşlar kaldırılmıştır. Numune üzerinde gerçekleştirilecek mikro sertlik deneyi için yüzeyin temiz olması yeterlidir ancak mikro yapı fotoğraflarını almak için numune yüzeyinin çok iyi şekilde parlatılması gerekir. Bunun için numuneler sırasıyla 800, 1200, 2000, 4000 meshlik zımparalama ardından uygun çuha ile 3µm boyutunda elmas pasta ve son işlem olarak 1µm’luk pasta ve alümina solüsyondan geçirilerek numuneler parlatılmıştır.

Mikroyapısal değişimleri mikroskop altında görebilmek için parlatılmış numunelere, alüminyum alaşımlarının dağlanması yaygın kullanılan “Keller dağlayıcı” uygulanmıştır. Keller asit çözeltisi, nitrik asit (HNO_3), hidroklorik asit (HCl), hidroflorik asit (HF) ve sudan oluşmaktadır. Keller ayıracını oluşturan asitlerin oranı; 5ml HNO_3 , 3ml HCl , 2ml HF ve 190 ml su.

5.4.1 Mikro Yapı İncelemesi

SKNK yöntemi ile birleştirilen AA7075 serisi alüminyum alaşımı levhaların gerekli parlatma ve dağlama işlemi gerçekleştirildikten sonra numuneler mikro yapı fotoğraflarını almak için hazır hale gelmiştir. Numunede toplam 8 noktadan optik görüntüler alınmıştır. Şekil 5.8’de kırmızı ile gösterilen bölgelerden 5x, 10x ve 20x büyütmelerde, siyah ile gösterilen bölgeler de ise 5x büyütmede fotoğraflar alınmıştır.



Şekil 5.8. Optik fotoğraf alınan bölgeler.

Optik testlerin gerçekleştirildiği cihazın markası Leica DM LM’dir. Manuel olarak kullanılan cihaz 5x, 10x, 20x, 50x ve 100x boyutlarda görüntüler elde edebilmektedir. Şekil 5.9’da cihaza ait görsel bulunmaktadır.



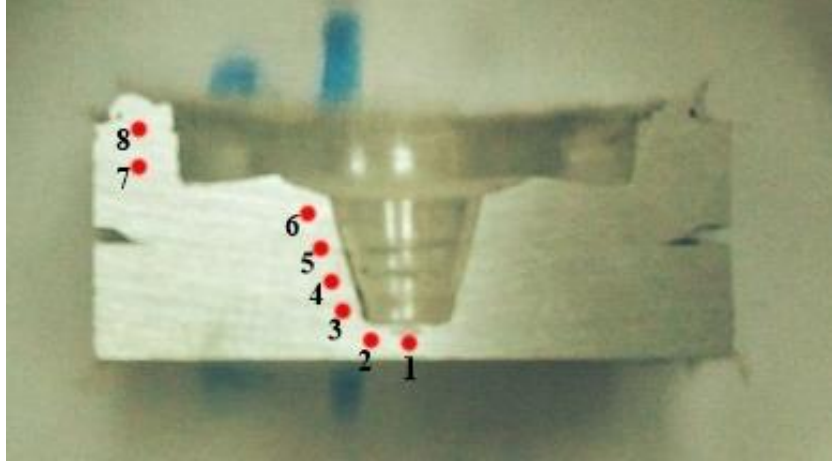
Şekil 5.9. Mikro yapı incelemesinde kullanılan optik mikroskop.

5.5 Mekanik Deneyler

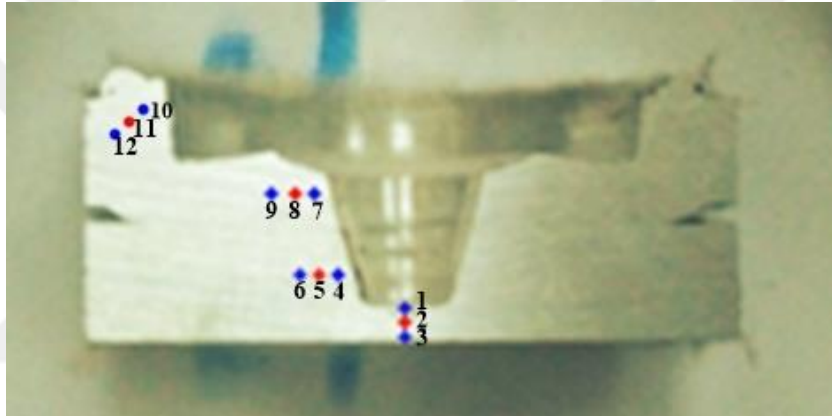
AA7075-T6 serisi alüminyum alaşımlarına uygulanan SKNK işlemi sonrası malzemenin mekanik özelliklerinin incelemek amacıyla çekme testi ve mikro sertlik testleri yapılmıştır.

5.5.1 Mikro Sertlik Testi

Sertlik genel tanımıyla malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirençtir. Bu tanım doğrultusunda bir malzemenin sertliği ölçülürken kendisinden daha sert bir malzemenin uğrattığı deformasyona bağlı olarak ölçümü yapılır [50]. Bu amaç doğrultusunda malzemenin sertlik değerlerini elde etmek için, numuneler kaynak bölgesi ortada kalacak şekilde kesilip bakaliti alınır ve sonrasında parlatılarak mikro sertlik analizleri için hazır hale getirilir. 7 numune için yapılacak mikro sertlik analizinde Şekil 5.10'da gösterilen noktalardan toplamda 8 noktadan ölçüm alınmıştır. S15 numunesi üzerinden Şekil 5.11'de gösterilen 6 noktadan ekstra olarak ölçüm alınmıştır.



Şekil 5.10. Yedi Numune için mikro sertlik alınan noktalar.



Şekil 5.11. S15 üzerinden sertlik alınan diğer noktalar.

Mikro sertlik testi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Batıcı uç yükünün ağırlığı ise 300 gr olarak seçilmiştir. İşlem belirlenen noktalarda 10 sn bekletilmiştir. Ölçümlerde Vickers (HV) sertlik ölçüm birimi kullanılmıştır. Alınan sonuçlar tablo oluşturularak not edilmiştir. Daha sonra bu değerler bilgisayar ortamına aktarılarak MATLAB programı yardımıyla mikro sertlik grafikleri çizilmiştir.

Mikro sertlik testlerinin gerçekleştiği cihaz; Emcotest DuraScan10'dur. Şekil 5.12'de cihaza ait görsel bulunmaktadır. Cihaz dokunmatik ekran kontrol paneline ve 3 turetli manuel ölçüme sahiptir [51].



Şekil 5.12. Mikro sertlik testinde kullanılan cihaz.

5.5.2 Çekme Testi Deneyi

Çekme testi, metalik veya metalik olmayan malzemelerin mukavemetlerini belirlemek için kullanılan mekanik malzeme muayene yöntemlerinden biridir. Çekme testleri genel olarak malzemenin dayanımını belirlemek amacıyla yapılır. Çekme testinde numuneler, sürekli artan bir statik çekme zorlanmasına maruz bırakılır ve numunenin çekmeye karşı gösterdiği dayanım araştırılır. Test sonucunda akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı, elastik modülü ve yüzde uzama değerleri tespit edilir [32].

TS138-A standartlarına göre hazırlanan numuneler mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla çekme testine maruz bırakılmıştır. INSTRON marka 5984 model çift kolonlu zemin tipi çekme testi cihazı ile toplamda 7 adet numune için test gerçekleştirilmiştir [52].

Çekme deneyleri için kullanılan çift yön etkili zemin tipi çekme testi cihazı 380 V çalışmaktadır. Cihaz iki ayrı bölgeden maksimum 15 ton (150 kN) ve 1 ton (10 kN)'a kadar test yapabilmektedir. Çalışma için 15 tona kadar test yapan bölüm tercih edilmiştir. Test cihazına entegre edilmiş bilgisayar sisteminde çekme değerleri anlık olarak görülmektedir. Cihaz çekme, basma, kesme, soyma, döngüsel, eğme, bükülme ve yırtılma testlerini kolayca yapabilmeye esnekliğine sahiptir. Şekil 5.13'te cihaza ait görsel bulunmaktadır [52].



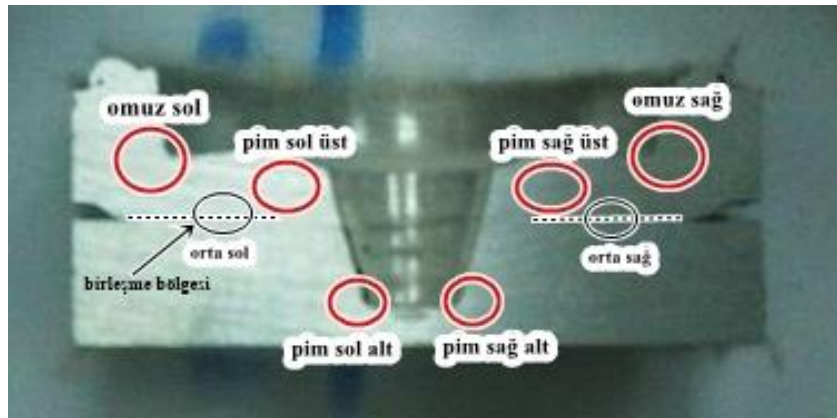
Şekil 5.13. Çekme testi cihazı.

6. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan 4 mm kalınlığındaki AA7075 serisi alüminyum saç levhaların kaynağı, sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak sonrasında elde edilen numunelerden 7 tanesi çekme testi geriye kalan 7 tanesi mikro sertlik ve mikro yapı testleri için kullanılmıştır. Gerçekleştirilen testler sonrasında elde edilen veriler göz önüne alınarak malzemenin mekanik özellikleri (dayanım, sertlik vb.) ve mikro yapı özellikleri (tanelerdeki yapısal değişimler) incelenmiştir. Mekanik ve mikro yapısal özelliklerine göre incelenen numuneler yorumlanırken değişken olarak belirlenen kaynak parametreleri esas alınmıştır.

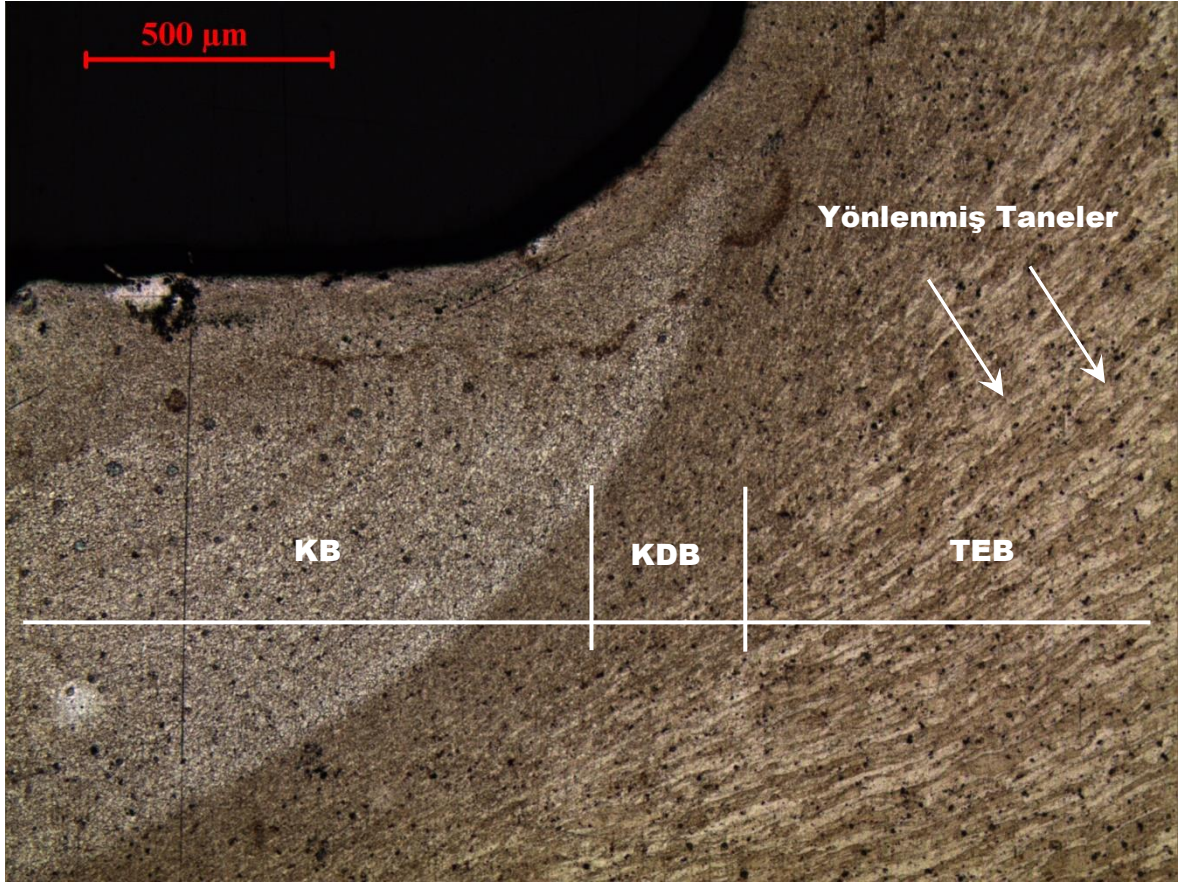
6.1 Kaynak Bağlantılarının Mikro Yapı Değerlendirmesi

Şekil 6.1’de verilen görselde her numune için optik fotoğrafların alındığı bölgeler kodlanmış bir şekilde verilmektedir. Siyah halkalar ile gösterilen bölgeler için 5x, kırmızı halka ile gösterilen bölgeler için 5x, 10x ve 20x boyutlarda fotoğraflar alınmıştır. Optik fotoğraflarda takım piminin girdiği nokta; pim sol alt, pim sağ alt, pim sol üst ve pim sağ üst bölgeleri, orta sol ve orta sağ, takım omuzu ile temas halinde olan bölgeler; omuz sol ve omuz sağ bölgelerinde deformasyon çizgileri fotoğraflanmak istenmiştir. Isı ile temas halinde bulunan noktalarda tanelerde küçülme, ısıdan etkilenen bölgelerde yassılaştırmış ve uzayan taneler görmek ve aynı zamanda sürtünme karıştırma nokta kaynağı sebebiyle tanelerde yönelmelerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

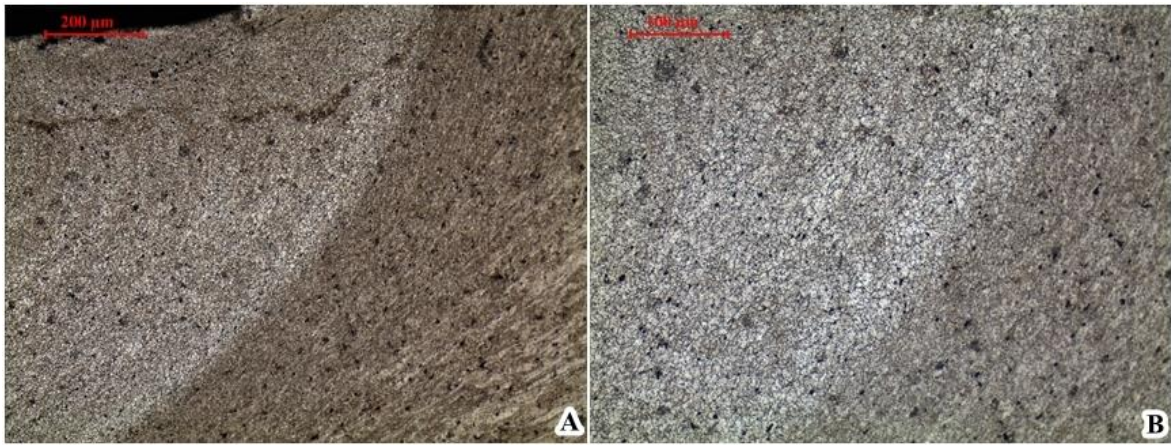


Şekil 6.1. Mikro yapı fotoğrafı işlemi için kroki.

S4 numunesine ait Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere omuz sağ bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğraflar bulunmaktadır. Şekil üzerinde yönlenmiş taneler oklarla belirtilmiştir.



Şekil 6.2. S4 numunesi omuz sağ 5x.

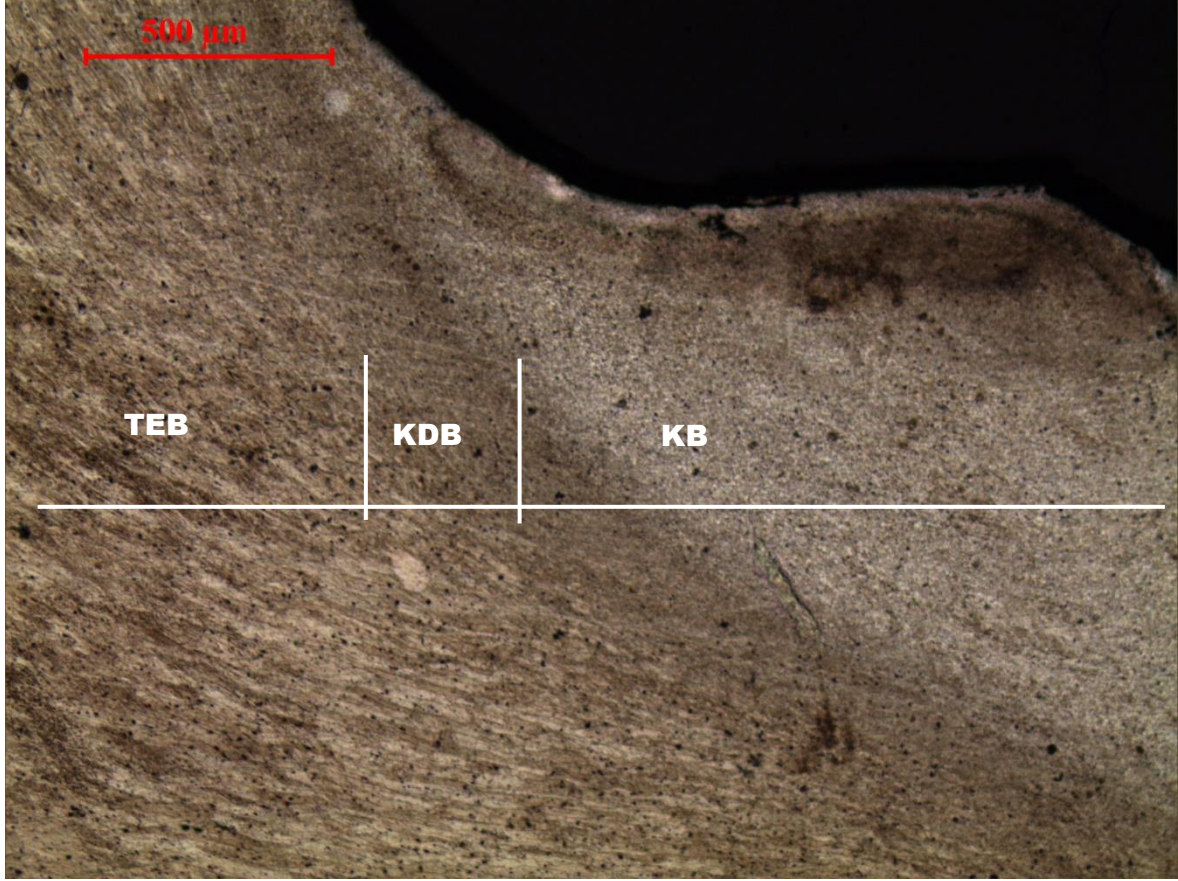


Şekil 6.3. A) S4 numunesi omuz sağ 10x, B) S4 numunesi omuz sağ 20x.

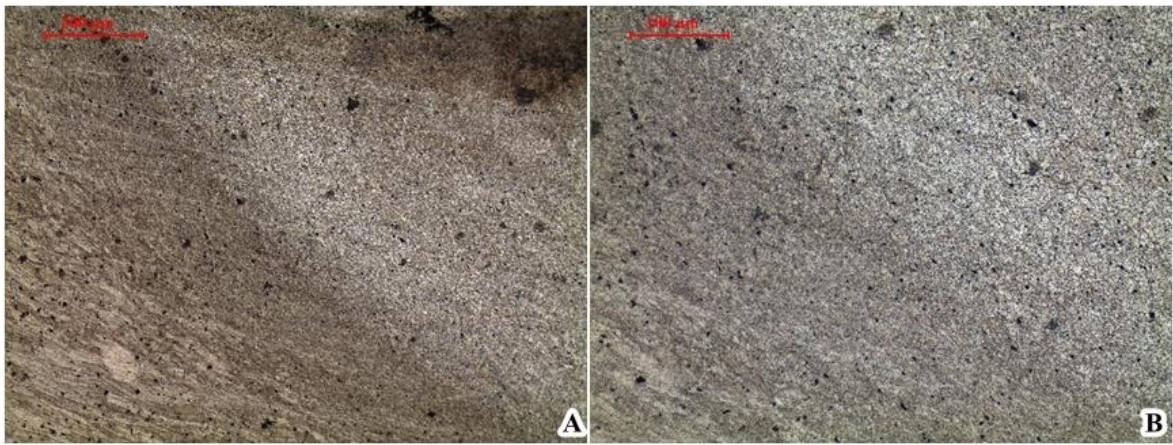
Şekil 6.2’de görüldüğü üzere birleşme bölgesinde takımın oluşturduğu ısı ve dövme etkisiyle oluşan mikroyapısal değişiklikler göze çarpmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SKNK işlemine maruz kalmış malzemelerde 4 farklı bölge bildirilmiştir. Mevcut çalışmamızda bütün numunelerde birbirinden farklı karakterde 4 bölgenin varlığı ortaya çıkmıştır. Bunlar sırasıyla ucun temas ettiği sıcaklığın ve dövmenin en fazla görüldüğü karıştırma bölgesi (KB) onun hemen bitişiğinde kısmen dövülmüş bölge (KDB), ve bu bölgeye komşu ucun dönmesine bağlı olarak deformasyon çizgilerinin olduğu termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve son olarak temel malzeme (TM) olarak tanımlayabiliriz.

Özellikle SKNK ve SKK yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların mikro yapı bölümü incelendiğinde KDB bölgesi net olarak çalışmalarda değinilmemiştir. Ancak mevcut çalışmamızda bu bölge KB bitişiğinde dar bir alanda kısmen dövülmüş bölge (KDB) olarak tespit edilmiştir.

S4 numunesine ait Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere omuz sol bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır. Şekil 6.4'te de Şekil 6.2'de tanımlanmış bölgeler göze çarpmaktadır.

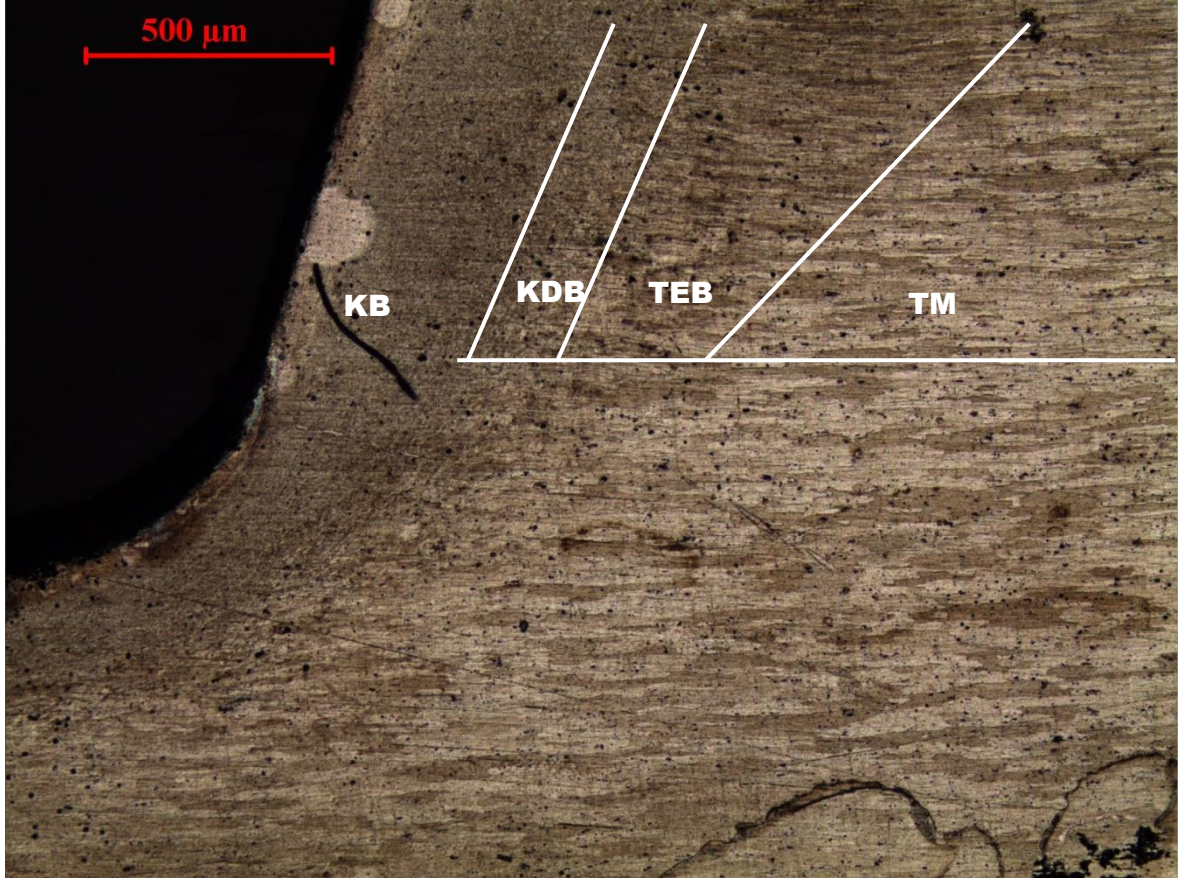


Şekil 6.4. S4 numunesi omuz sol 5x.

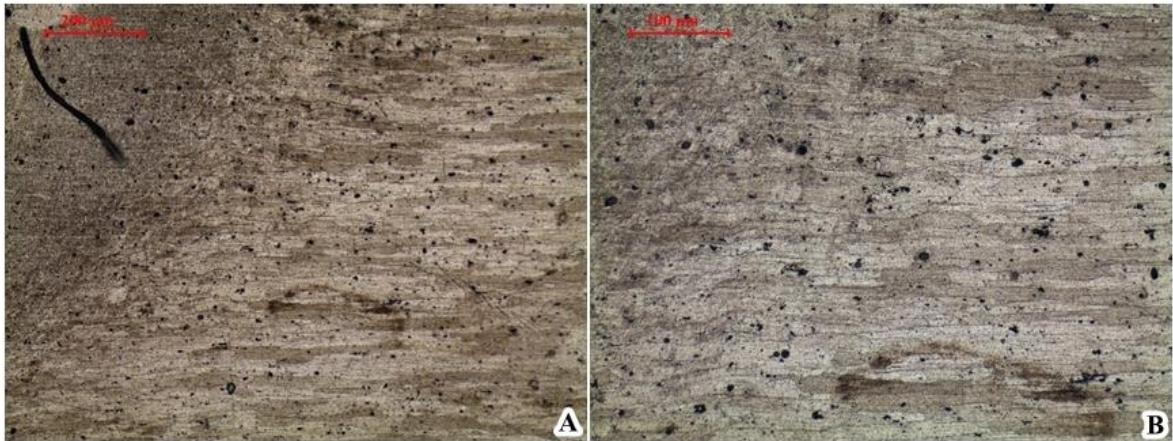


Şekil 6.5. A) S4 numunesi omuz sol 10x, B)S4 numunesi omuz sol 20x.

S4 numunesine ait Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır. Pim sağ alt bölgesinden alınan Şekil 6.6 görselinde KB, KDB, TEB ve omuz bölgelerinde tanımlanamamış TM bölgesinin varlığı da göze çarpmaktadır.

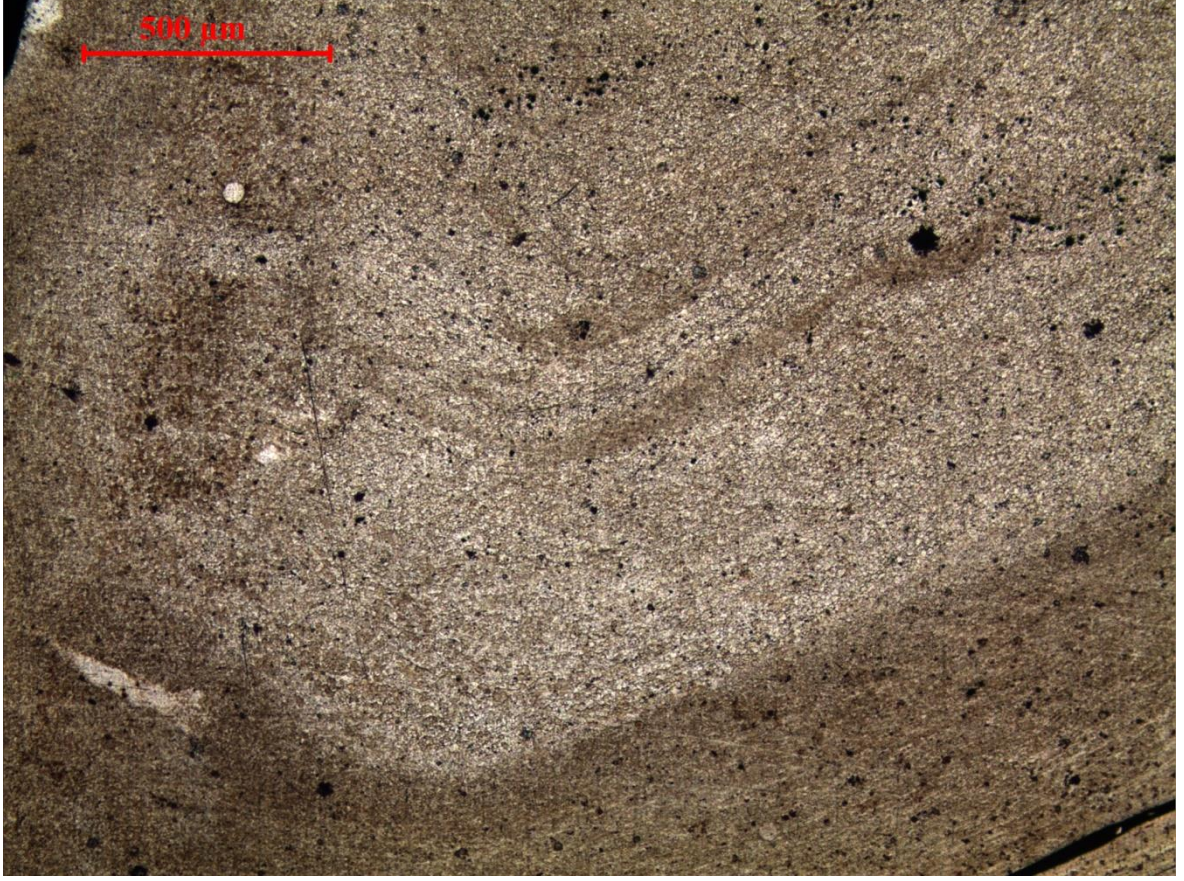


Şekil 6.6. S4 numunesi pim sağ alt 5x.

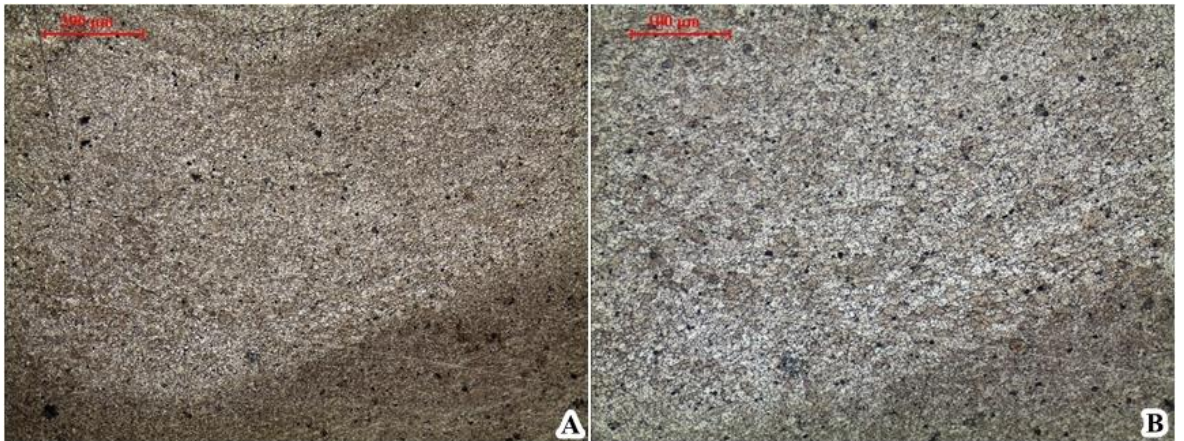


Şekil 6.7. A) S4 numunesi pim sağ alt 10x, B) S4 numunesi pim sağ alt 20x.

S4 numunesine ait Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

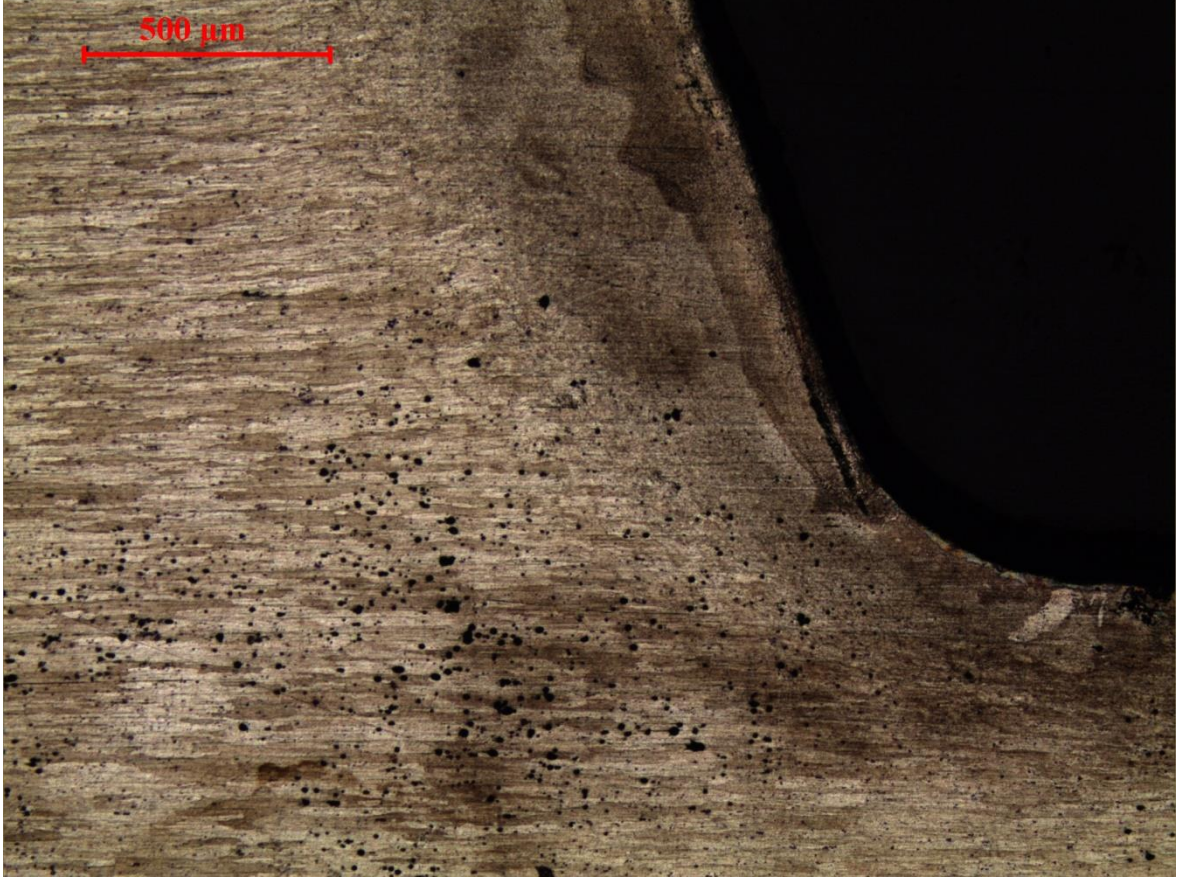


Şekil 6.8. S4 numunesi pim sağ üst 5x.

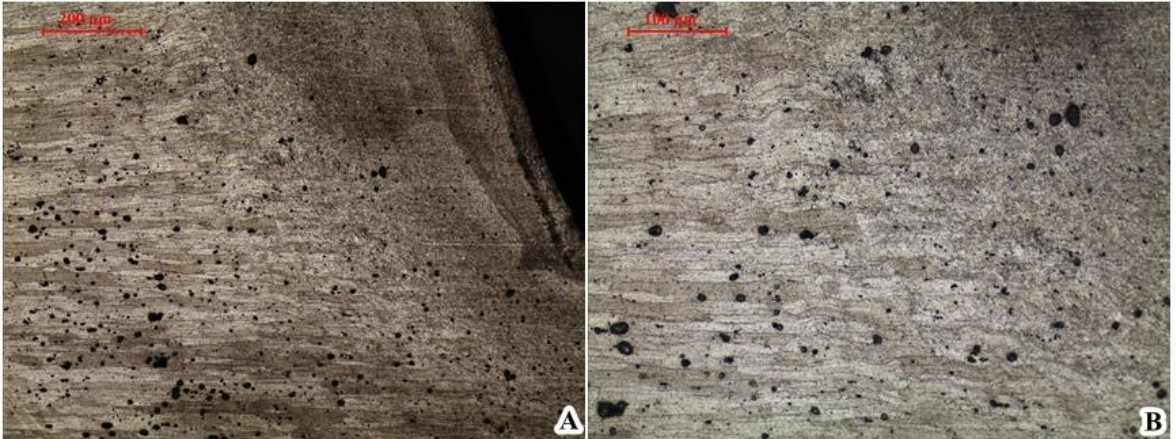


Şekil 6.9. A) S4 numunesi pim sağ üst 10x, B)S4 numunesi pim sağ üst 20x.

S4 numunesine ait Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 6.10. S4 numunesi pim sol alt 5x.

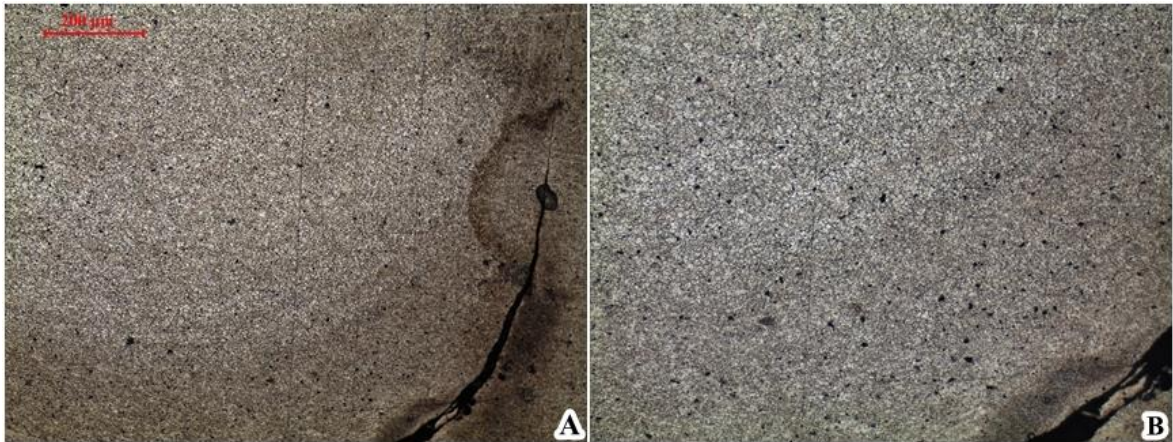


Şekil 6.11. A) S4 numunesi pim sol alt 10x, B)S4 numunesi pim sol alt 20x.

S4 numunesine ait Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere pim sol üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır. Şekil 6.12 görselinde dövmenin etkisi ile incelmış taneler göze çarpmaktadır.

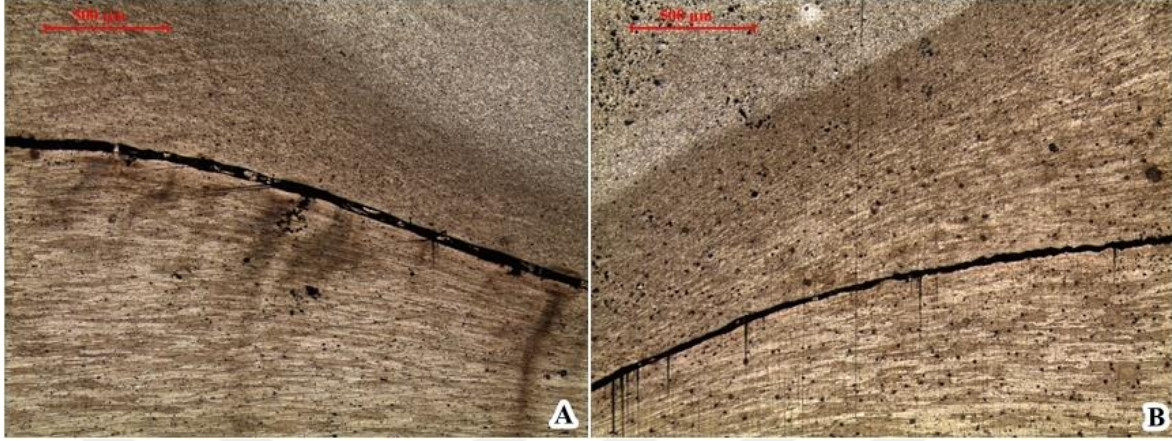


Şekil 6.12. S4 numunesi pim sol üst 5x.



Şekil 6.13. A) S4 numunesi pim sol üst 10x, B) S4 numunesi pim sol üst 20x.

S4 numunesine ait Şekil 6.14'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere numunenin birleşme bölgesinden alınmış 5x büyütmedeki optik fotoğrafı bulunmaktadır.



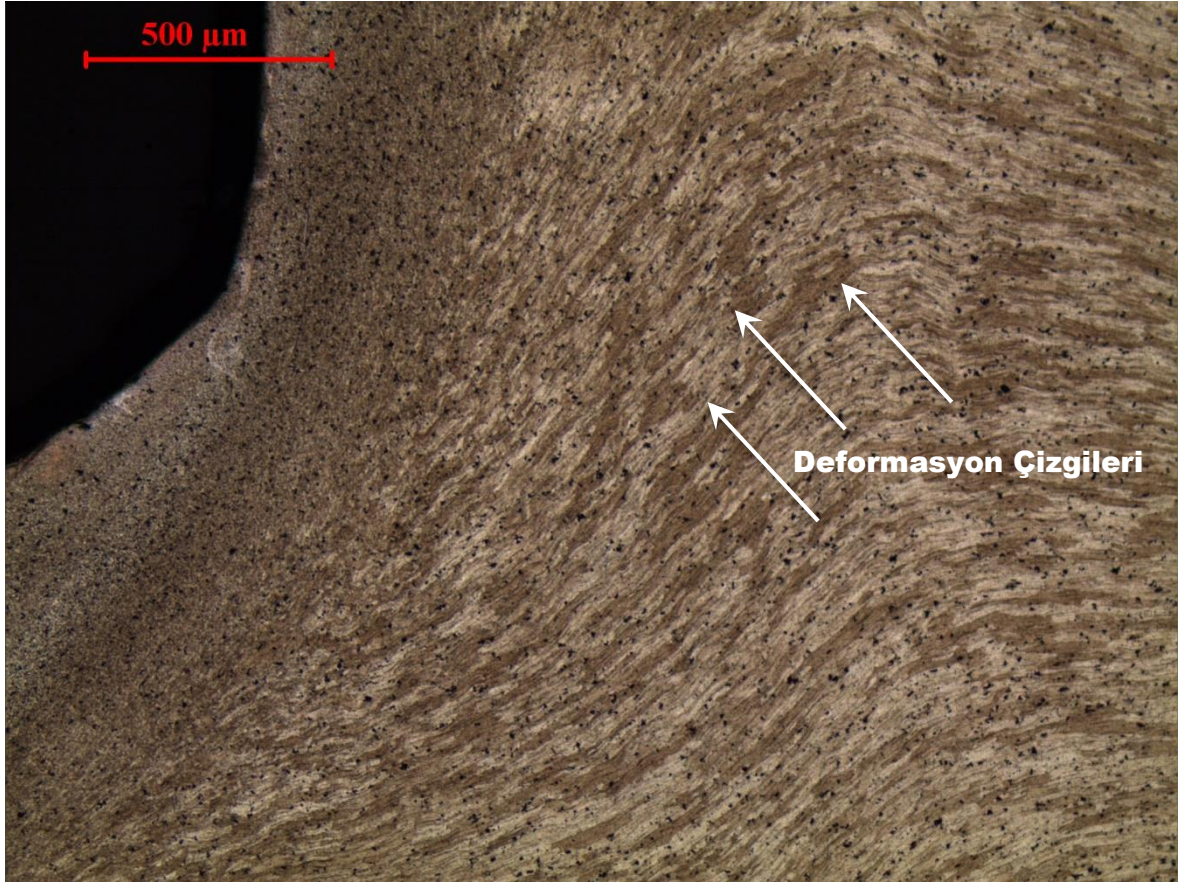
Şekil 6.14. A) S4 numunesi orta sol 5x, B) S4 numunesi orta sağ 5x.

Numunelerin toplamda 8 farklı bölgeden optik fotoğrafları alınmıştır. Şekil 6.2'den Şekil 6.14'e kadar sırasıyla S4 numunesinin mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. Belirli bölgelerden alınan fotoğraflar incelendiğinde, Şekil 6.2'de ilgili 3 bölge sınırlarıyla birlikte görülmektedir. Şekil incelendiğinde ince taneli yapıların mevcut olduğu KB bölgesi ile yönlendirilen tanelerin bulunduğu TEB bölgesi birbirinden net bir şekilde ayrılmaktadır. Bunların arasında kalan ve literatür de daha önce tespiti yapılamayan kısmen dövülmüş bölge (KDB) ortaya çıkmıştır. KB bölgesi ince tanelerden oluşan bir bölge olup, kaynak sırasında karıştırıcı takım ile direkt teması sonucu sürtünme sıcaklığı altında meydana gelen aşırı deformasyon ve şiddetli ekstrüzyonun bir sonucu olarak oluşmaktadır. Bu bölgede dövme etkisi ile taneler ana malzemenin tanelerine kıyasla incelmektedir. Bu bölgenin bitişiğinde ortaya çıkan ve daha koyu görünen kısmen dövülmüş bölge (KDB) ise önceki çalışmalarda vurgulanmamış olmasına karşın bizim bütün mikro yapı incelemelerinde özellikle omuz bölgesinde genişleyip, pime doğru inildikçe daralan bir sınır sergilemiştir. Bu durumun nedeninin özellikle SKNK işlemlerinde uç bulunduğu noktada belirli bir kaynak süresinde beklediği için lokal sıcaklığın diğer SKK yöntemlerine göre daha yükselmesi beklenir. Bunun neticesinde yapmış olduğumuz mikro yapı incelemelerinde bütün numunelerin KB bitişiğinde TEB'e nazaran ısıya ve kısmi dövmeyle maruz kalan bir ara bölge oluşumu söz konusudur.

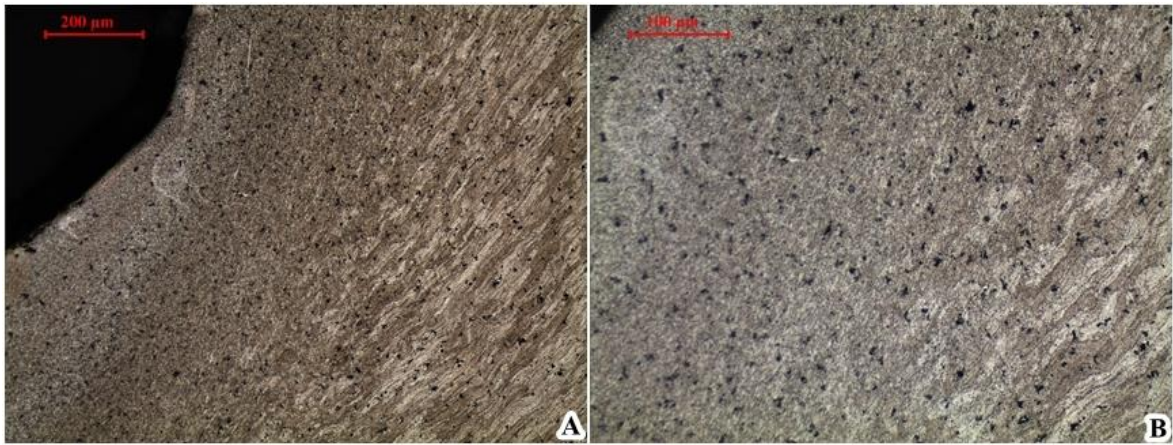
Nitekim yüksek sürtünme ısısına maruz kalan omuz bölgesinden pim bölgesine inerken bu bölgenin sınırlarının daralmış olması sıcaklıkla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. TEB bölgesinde ise KB ve KDB de oluşan şiddetli ekstrüzyon ve tanelerin dövülmesi ile takımın dönüş yönüne uygun termomekaniksel mikroyapısal bir dönüşüm meydana gelmektedir. Özellikle bu bölgede ısı etkisi ile tanelerinde irileşme ve bitiğik bölgelerin şiddetli plastik deformasyonu sonucu tane yönlenmeleri ve deformasyon bantlarının oluşumu görülmüştür. Bu durum tanelerin irileşerek deforme olmasına ve yassılaşmasına sebep olmaktadır.



S8 numunesine ait Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sağ bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır. Şekil 6.15’te deformasyon çizgileri ok ile gösterilmiştir.

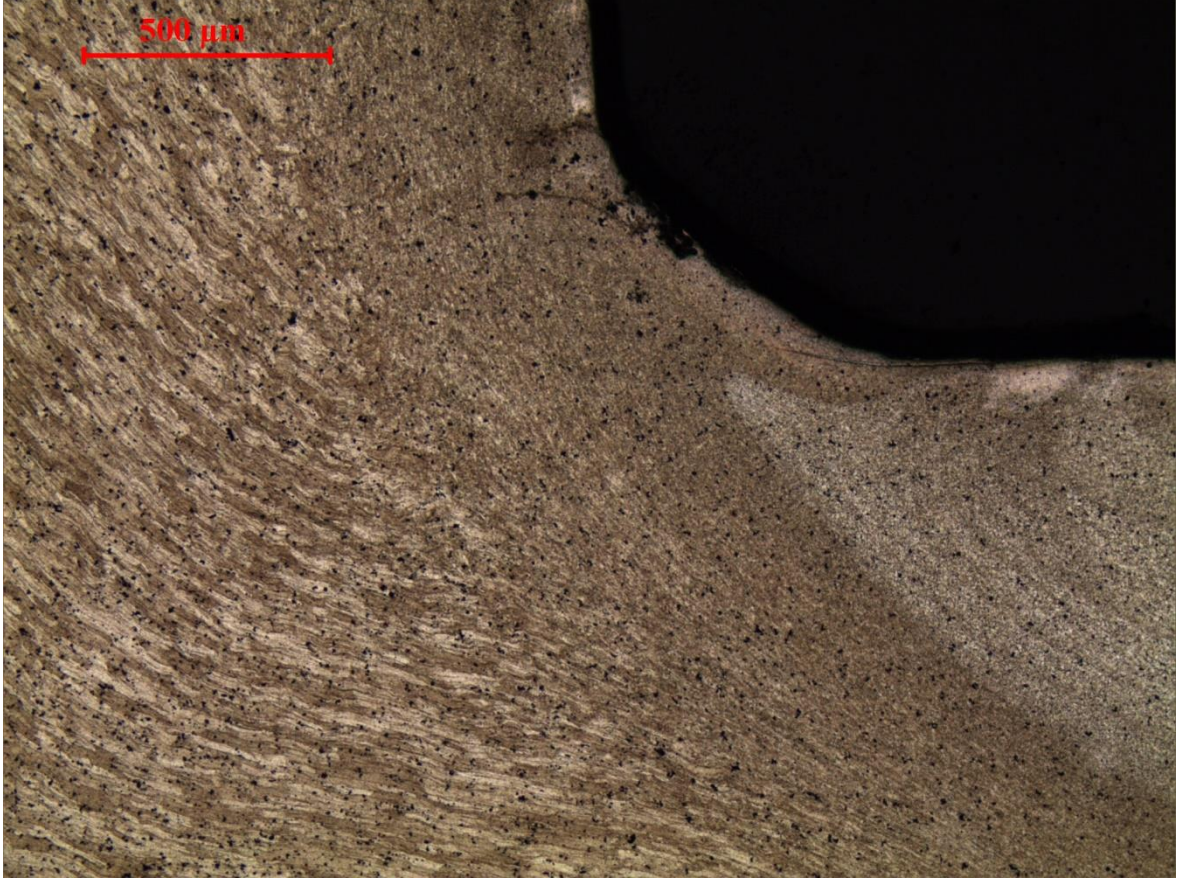


Şekil 6.15. S8 numunesi omuz sağ 5x.

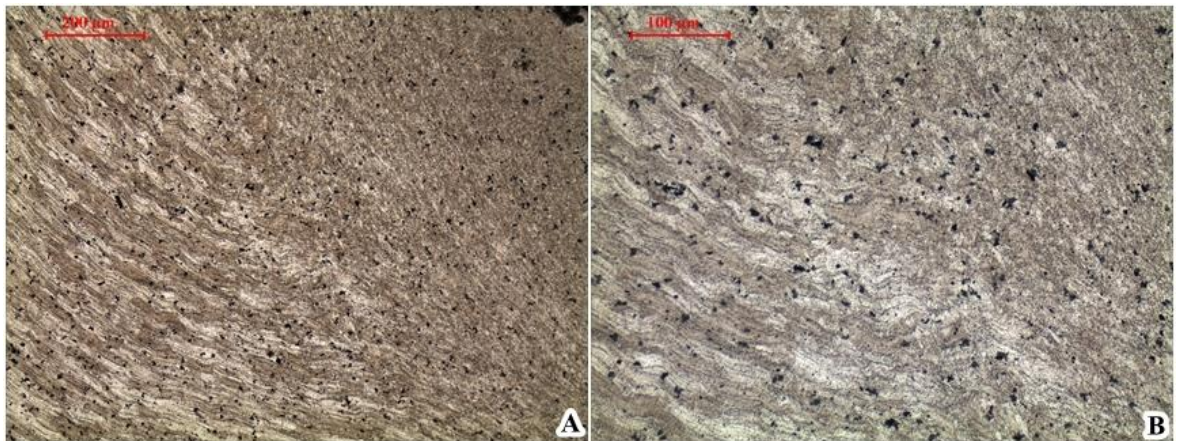


Şekil 6.16. A) S8 numunesi omuz sağ 10x, B) S8 numunesi omuz sağ 20x.

S8 numunesine ait Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sol bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

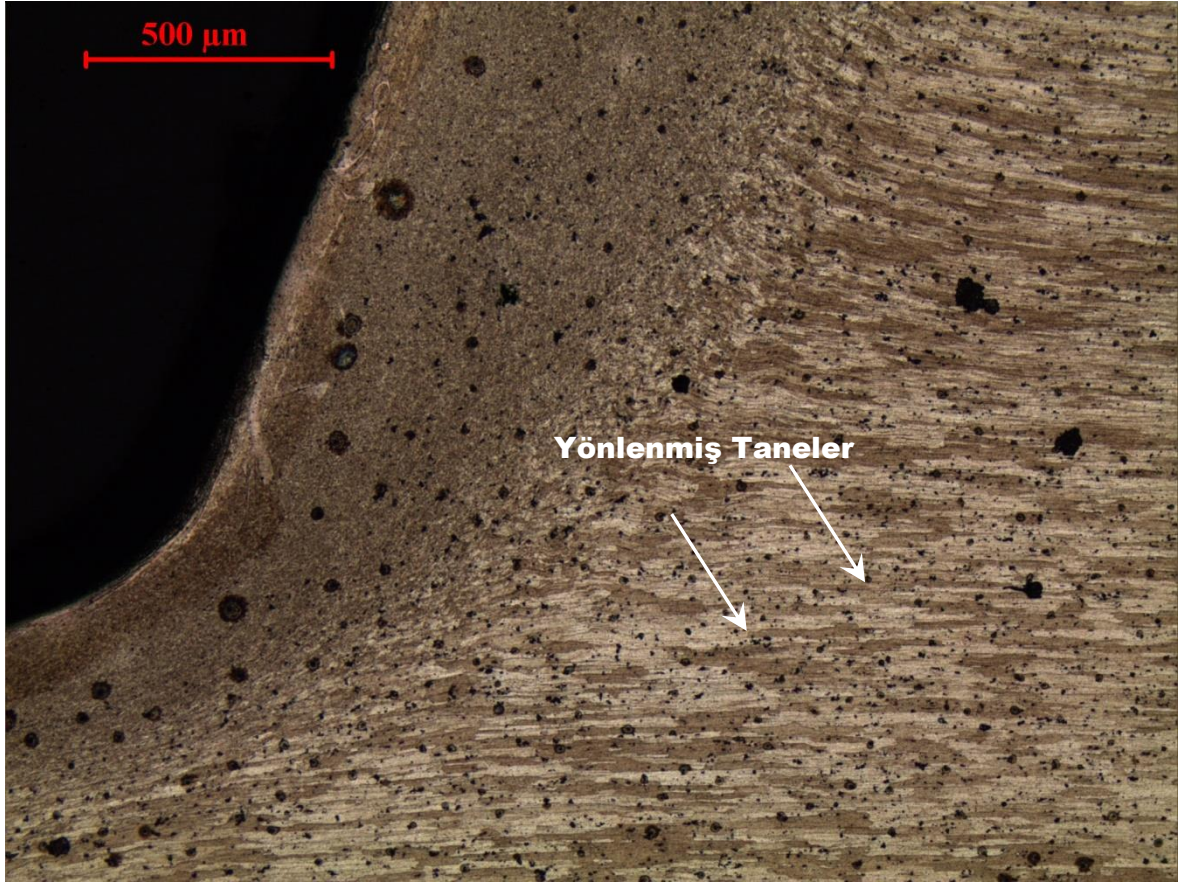


Şekil 6.17. S8 numunesi omuz sol 5x.

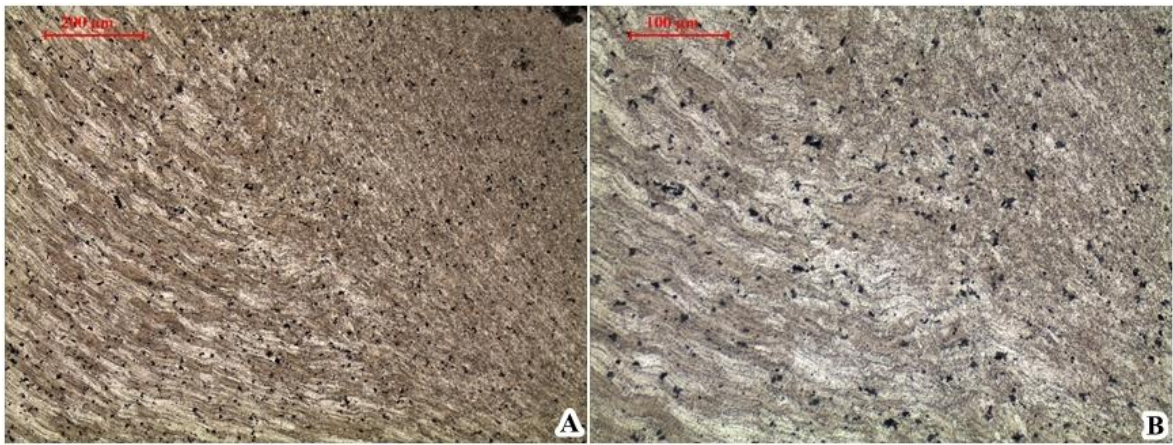


Şekil 6.18. A) S8 numunesi omuz sol 10x, B) S8 numunesi omuz sol 20x.

S8 numunesine ait Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

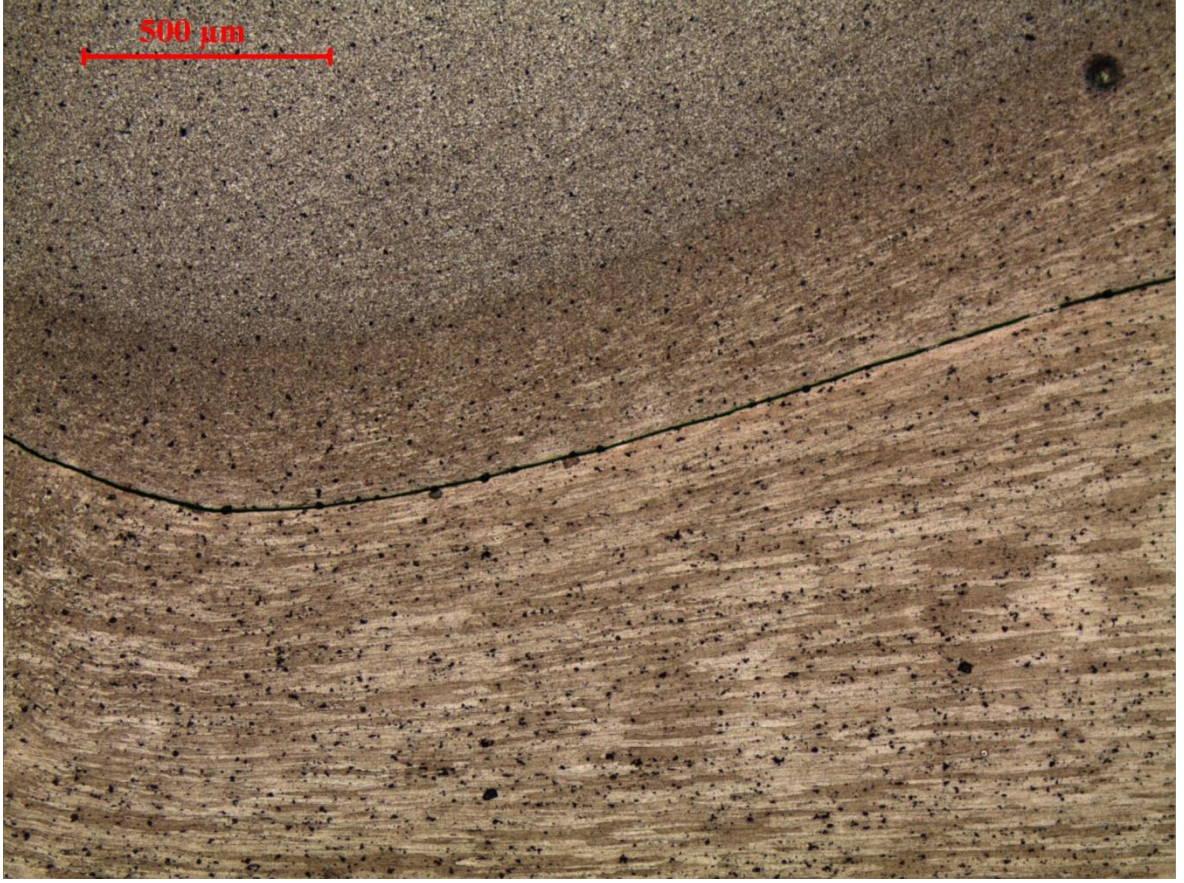


Şekil 6.19. S8 numunesi pim sağ alt 5x.

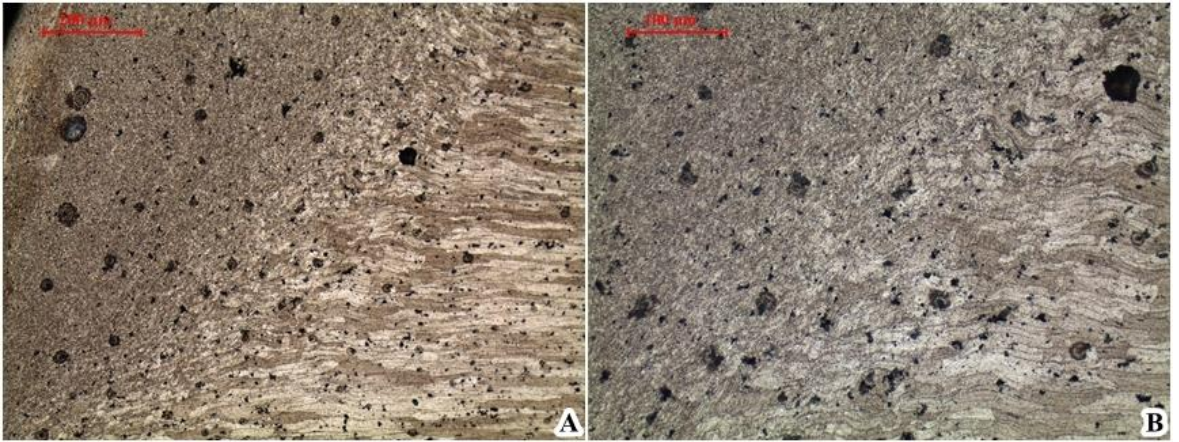


Şekil 6.20. A) S8 numunesi pim sağ alt 10x, B) S8 numunesi pim sağ alt 20x.

S8 numunesine ait Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 6.21. S8 numunesi pim sağ üst 5x.

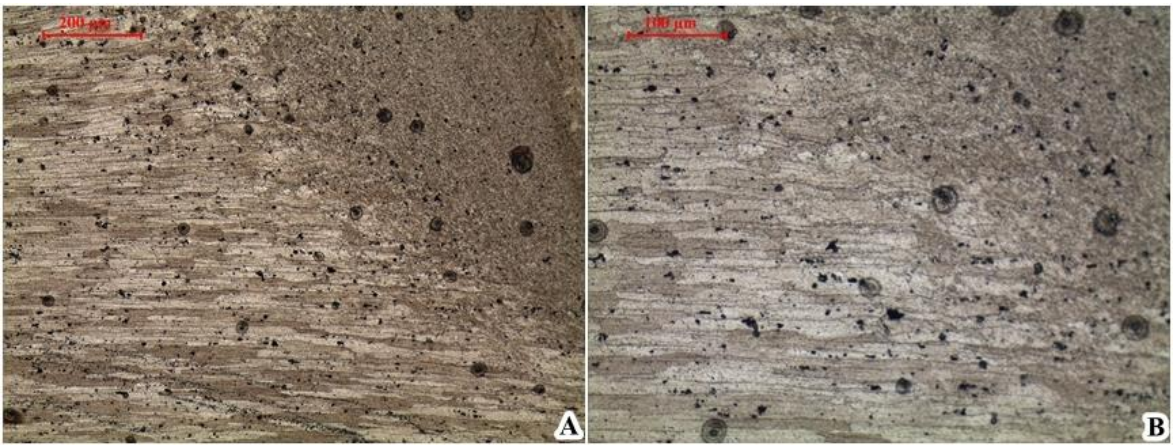


Şekil 6.22. A) S8 numunesi pim sağ üst 10x, B) S8 numunesi pim sağ üst 20x.

S8 numunesine ait Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere pim sol alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

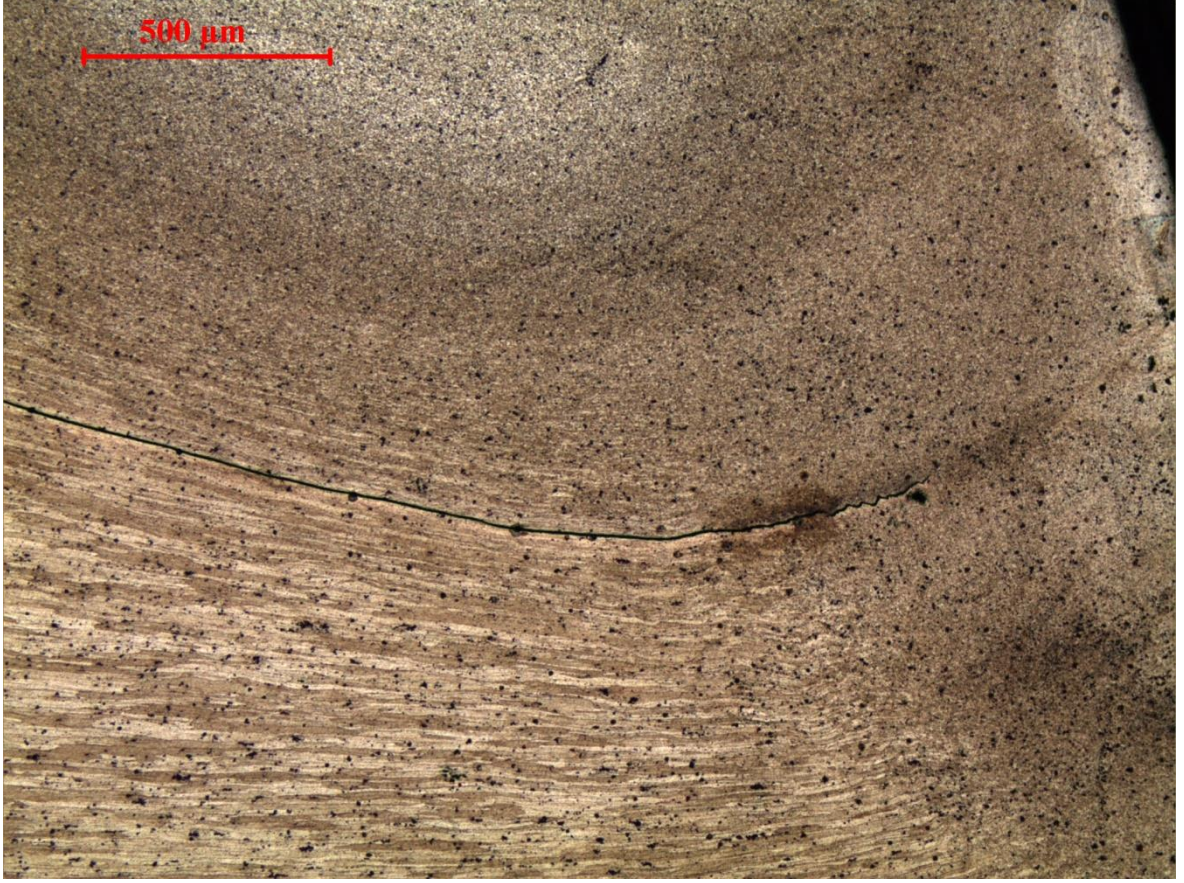


Şekil 6.23. S8 numunesi pim sol alt 5x.

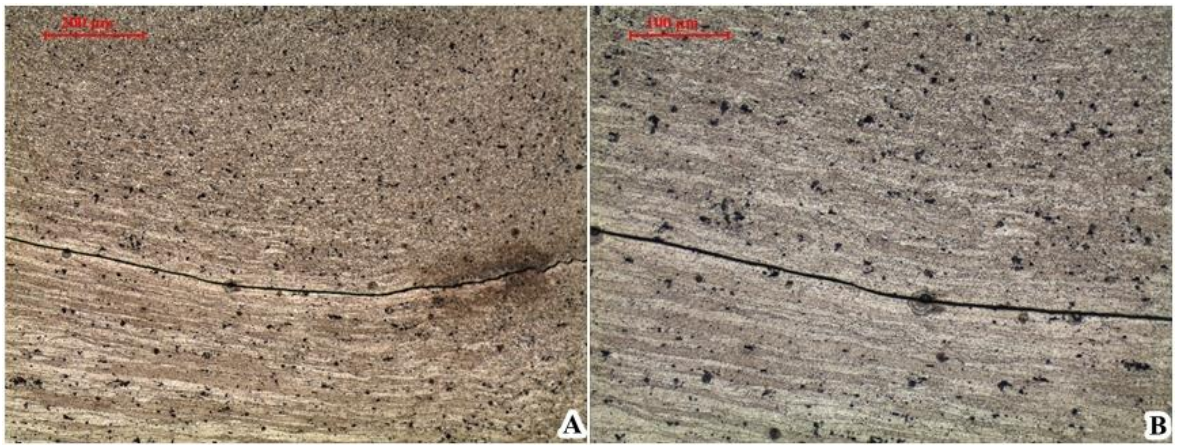


Şekil 6.24. A) S8 numunesi pim sol alt 10x, B) S8 numunesi pim sol alt 20x.

S8 numunesine ait Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 6.25. S8 numunesi pim sol üst 5x.



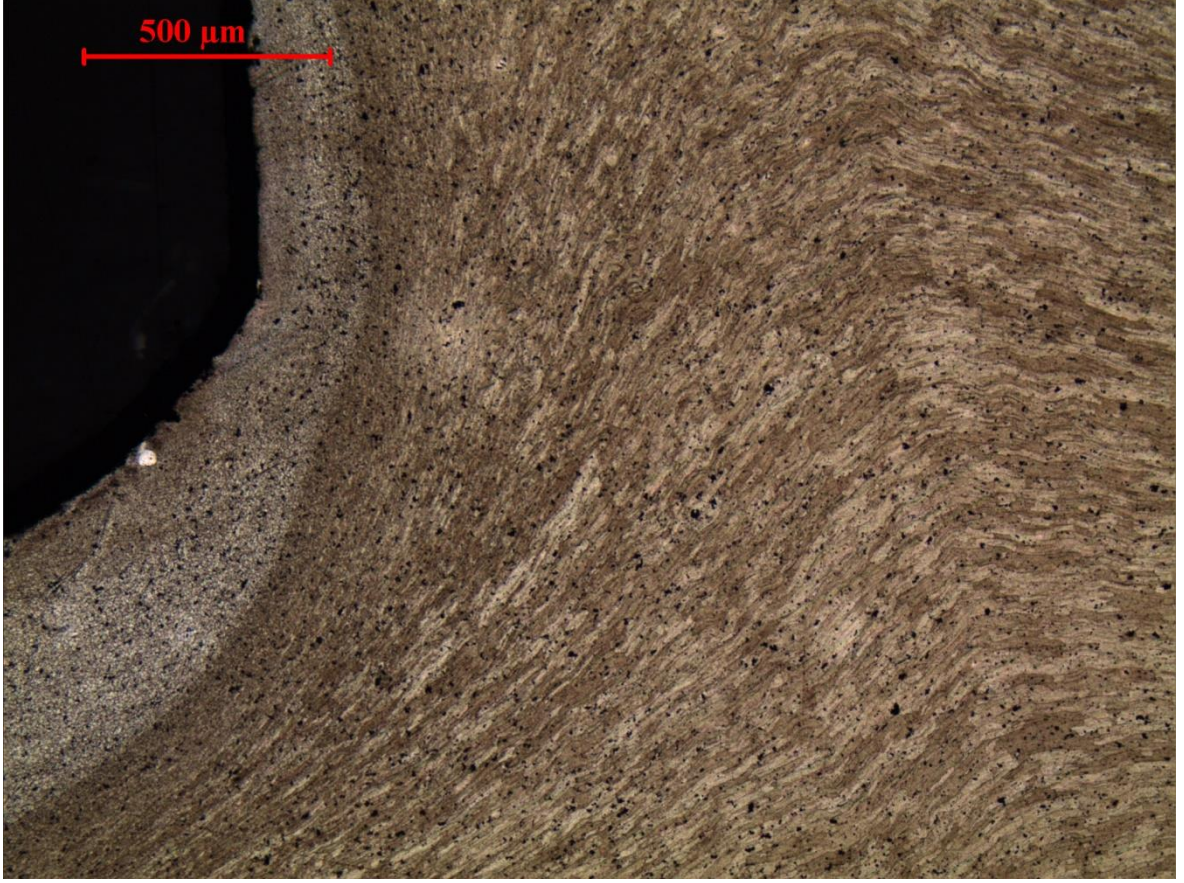
Şekil 6.26. A) S8 numunesi pim sol üst 10x, B) S8 numunesi pim sol üst 20x.

S8 numunesine ait Şekil 6.27’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere numunenin birleşme bölgesinden alınmış 5x büyütmedeki optik fotoğrafı bulunmaktadır.

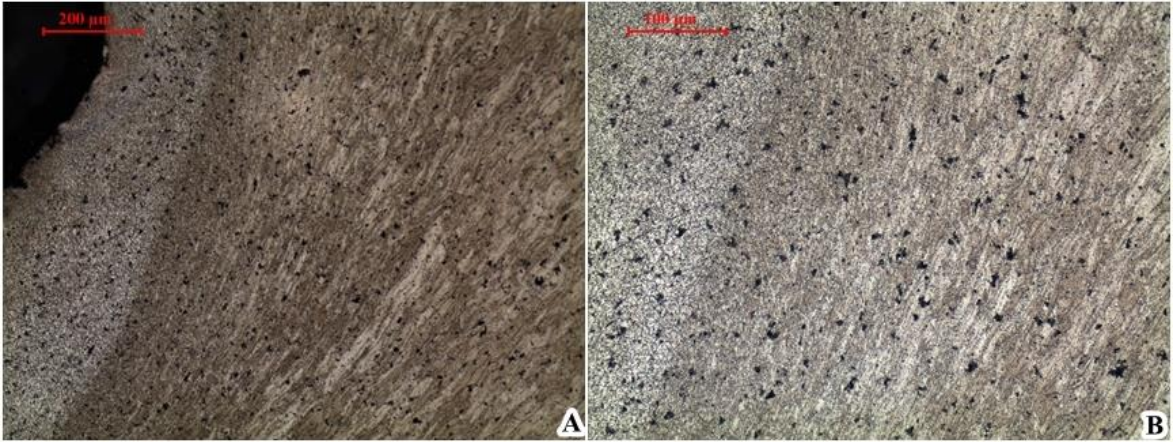


Şekil 6. 27. A) S8 numunesi orta sol 5x, B)S4 numunesi orta sağ 5x.

S10 numunesine ait Şekil 6.28 ve Şekil 6.29’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sağ bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 6.28. S10 numunesi omuz sağ 5x.

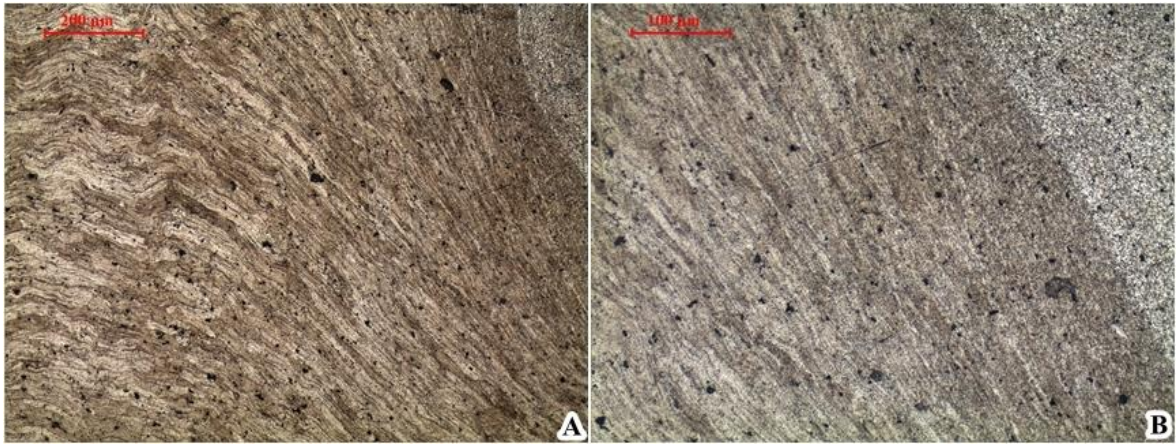


Şekil 6.29. A) S10 numunesi omuz sağ 10x, B) S10 numunesi omuz sağ 20x.

S10 numunesine ait Şekil 6.30 ve Şekil 6.31’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sol bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır. Şekil 6.30 üzerinde deformasyon bandı oklarla gösterilmiştir.

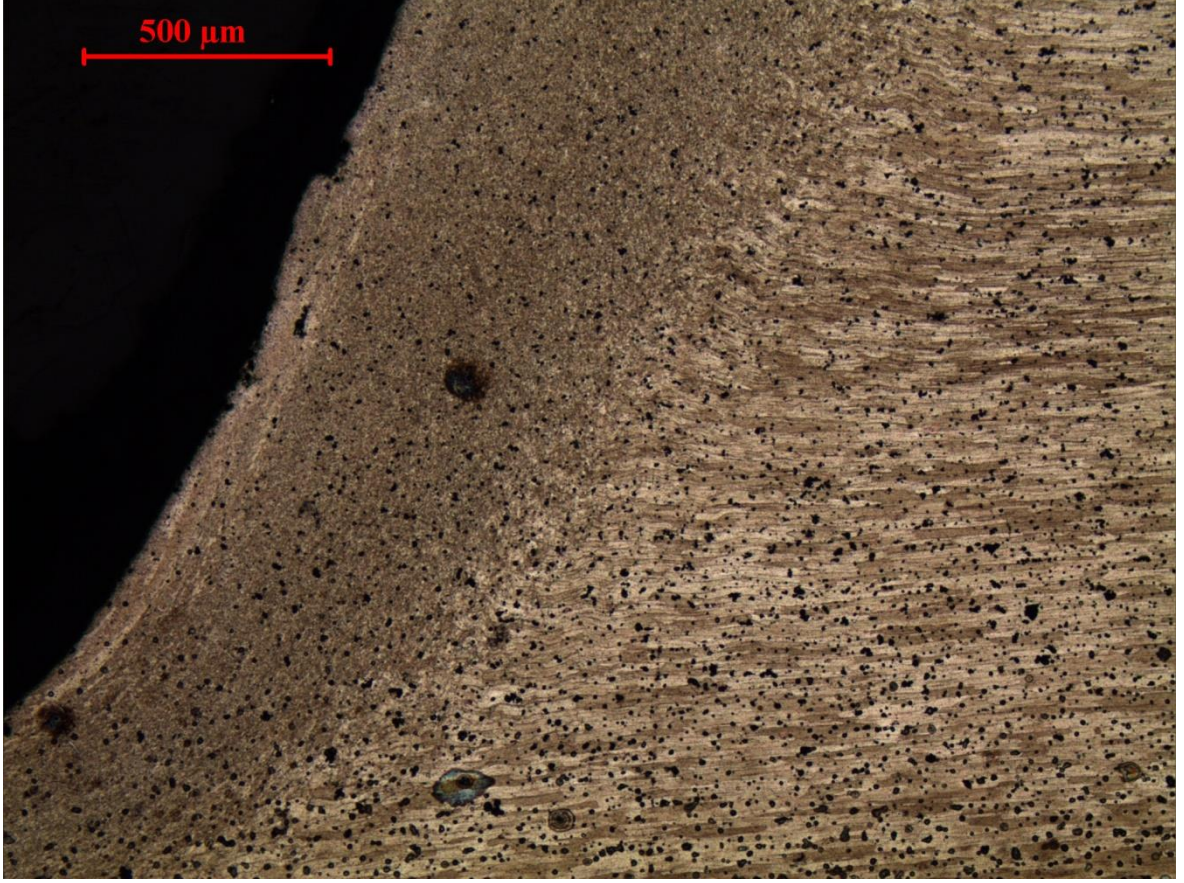


Şekil 6.30. S10 numunesi omuz sol 5x.

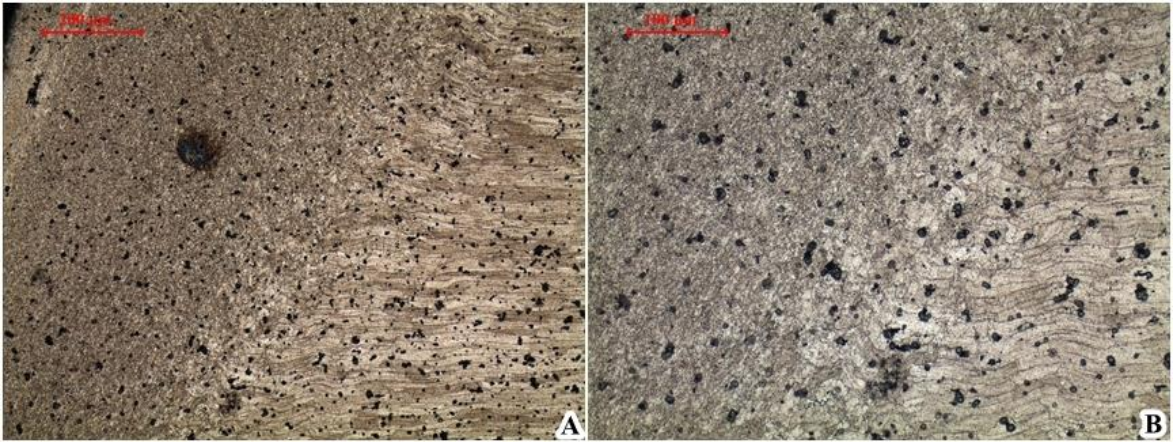


Şekil 6.31. A) S10 numunesi omuz sol 10x, B) S10 numunesi omuz sol 20x.

S10 numunesine ait Şekil 6.32 ve Şekil 6.33'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere pim sağ alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

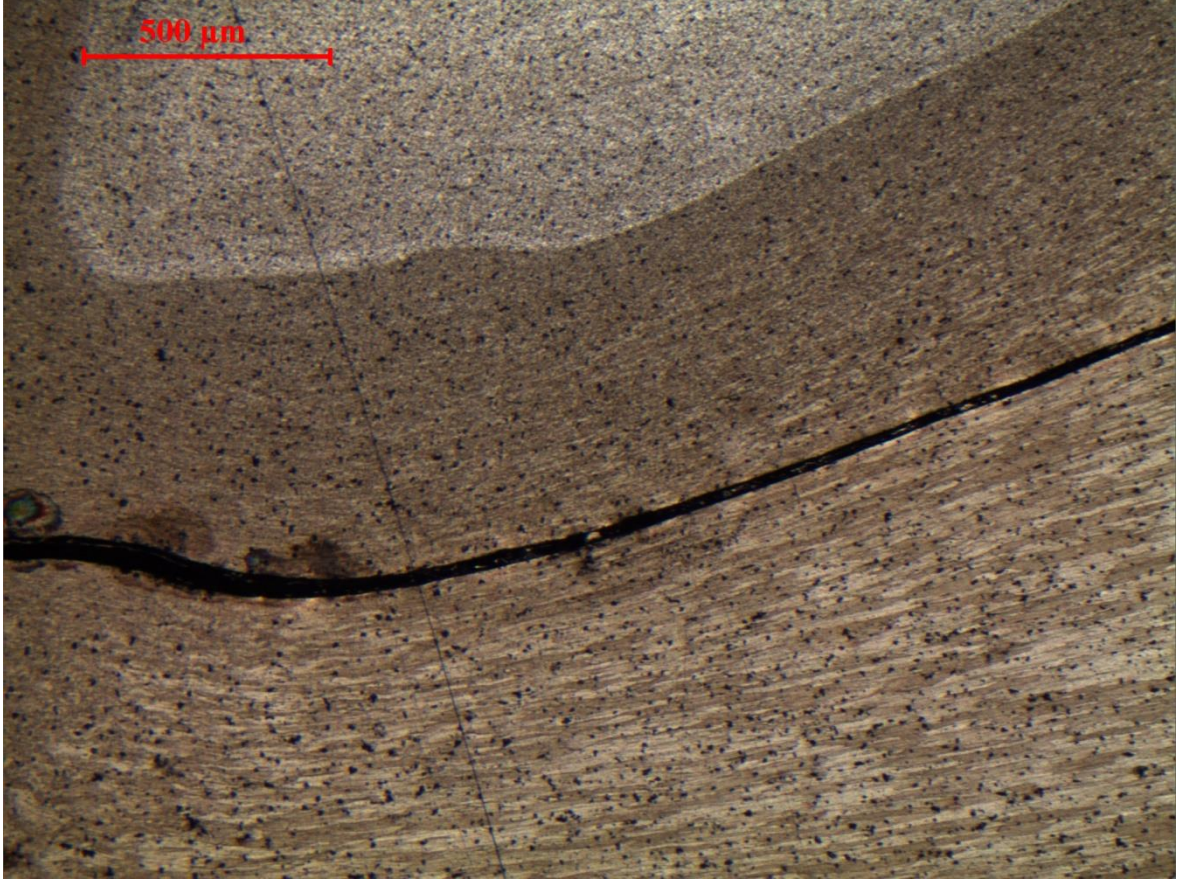


Şekil 6.32. S10 numunesi pim sağ alt 5x.

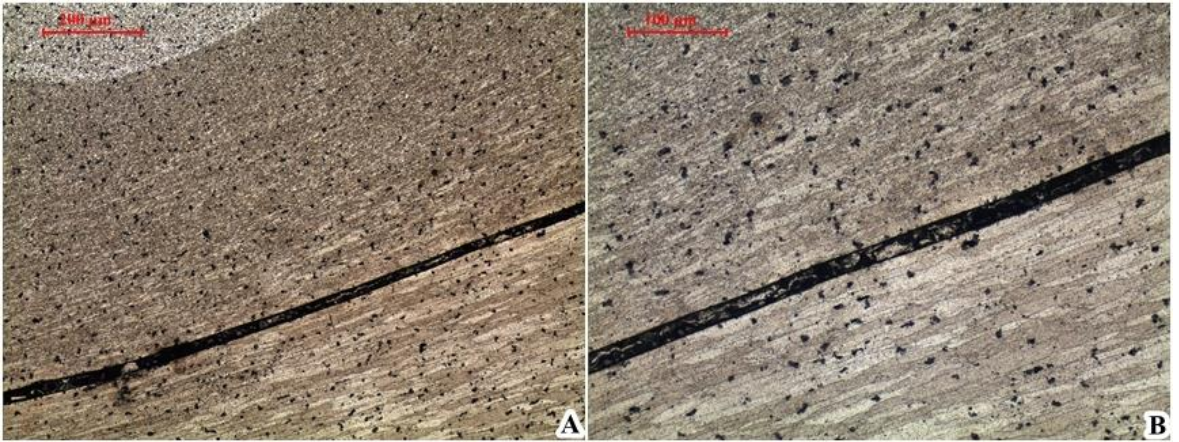


Şekil 6.33. A) S10 numunesi pim sağ alt 10x, B) S10 numunesi pim sağ alt 20x.

S10 numunesine ait Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere pim sağ üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

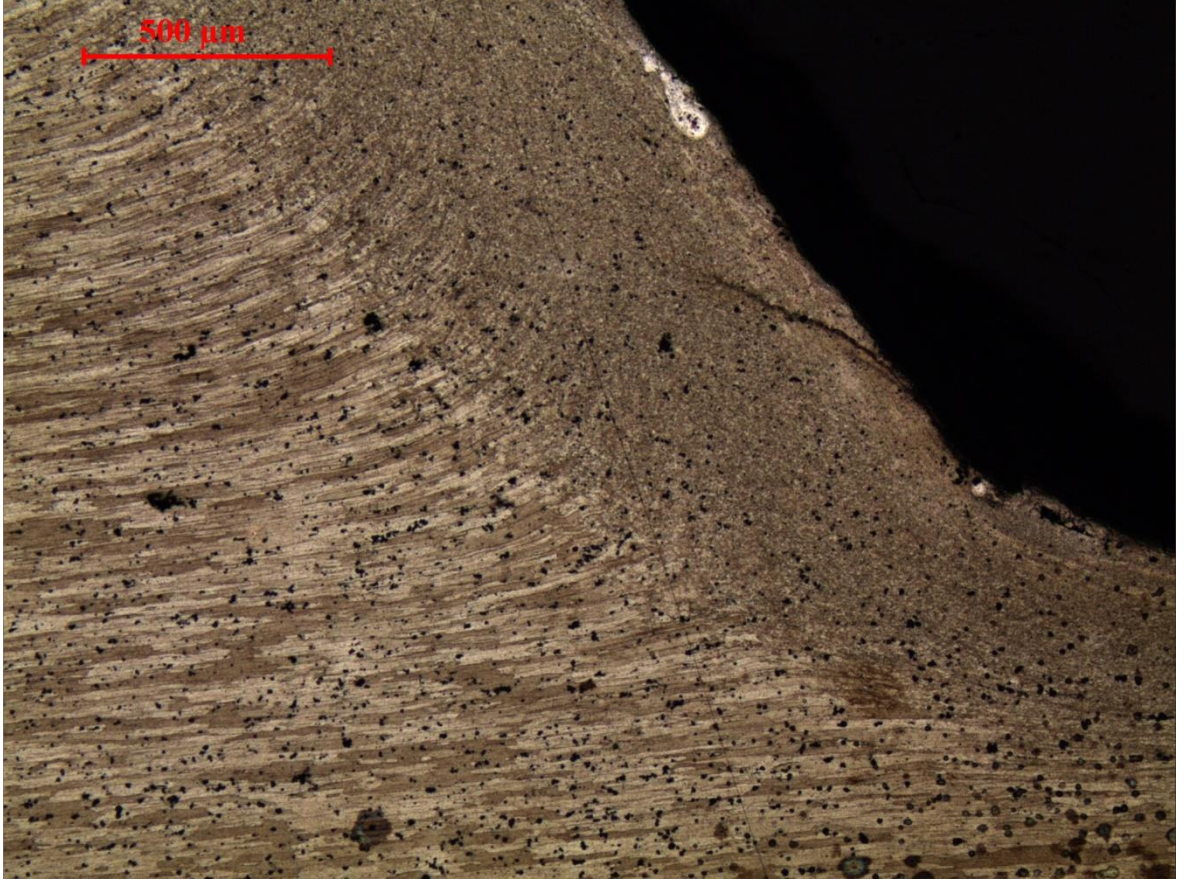


Şekil 6.34. S10 numunesi pim sağ üst 5x.

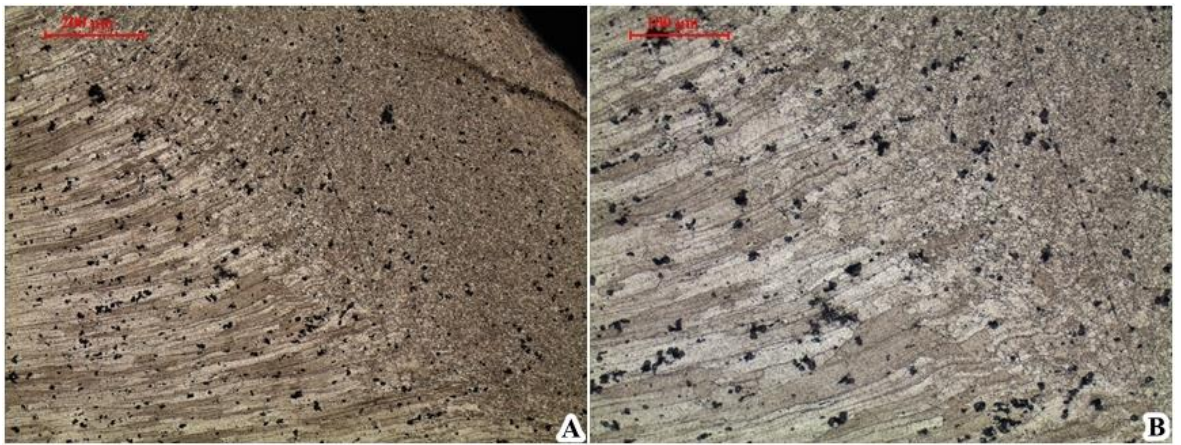


Şekil 6.35. S10 numunesi pim sağ üst 10x, B) S10 numunesi pim sağ üst 20x.

S10 numunesine ait Şekil 6.36 ve Şekil 6.37’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

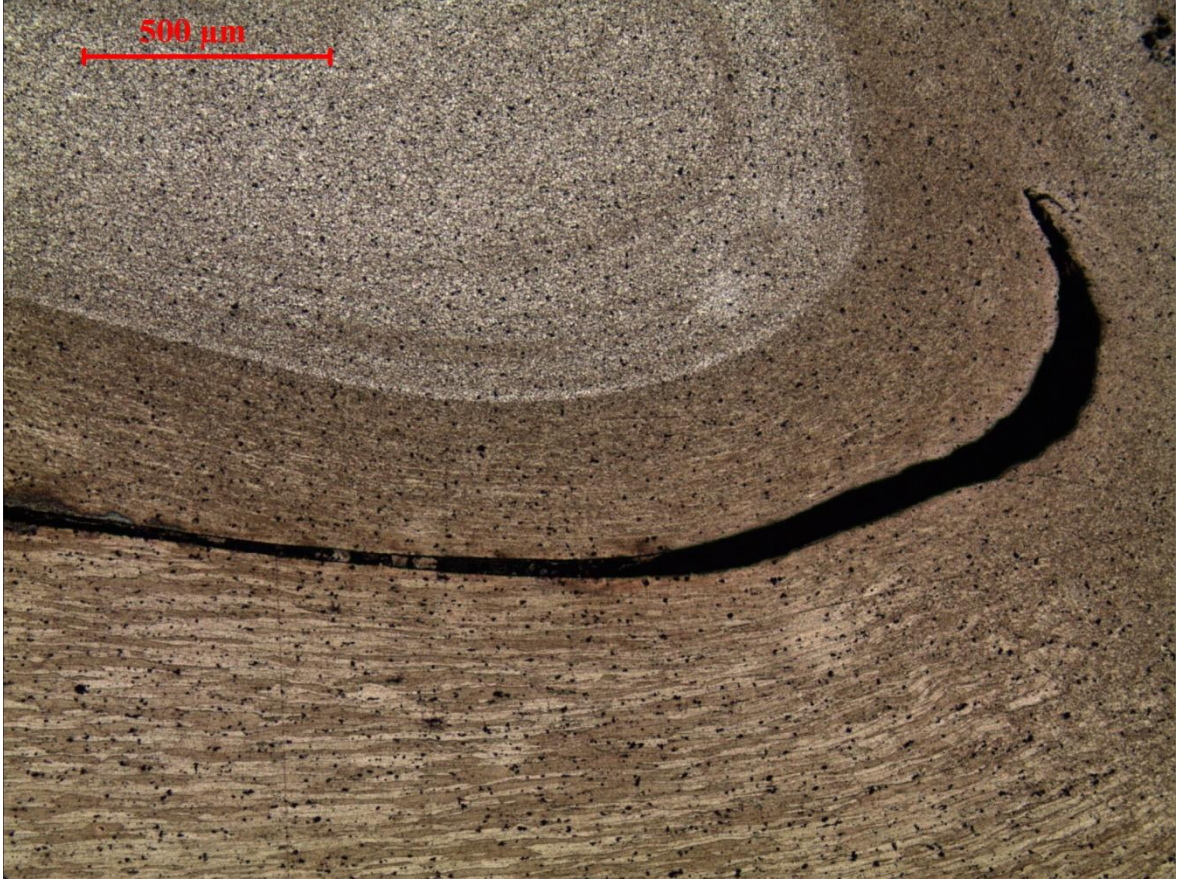


Şekil 6.36. S10 numunesi pim sol alt 5x.

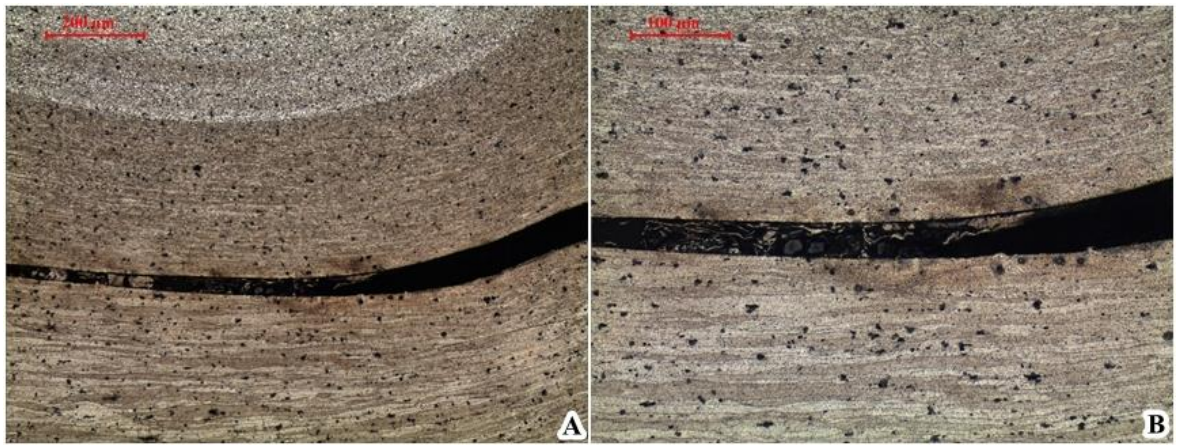


Şekil 6.37. S10 numunesi pim sol alt 10x, B) S10 numunesi pim sol alt 20x.

S10 numunesine ait Şekil 6.38 ve Şekil 6.39’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

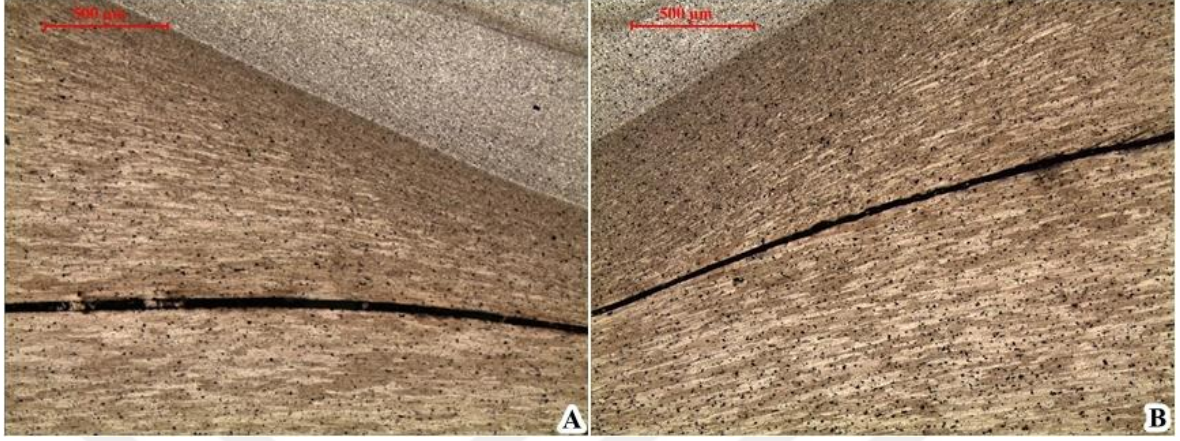


Şekil 6.38. S10 numunesi pim sol üst 5x.



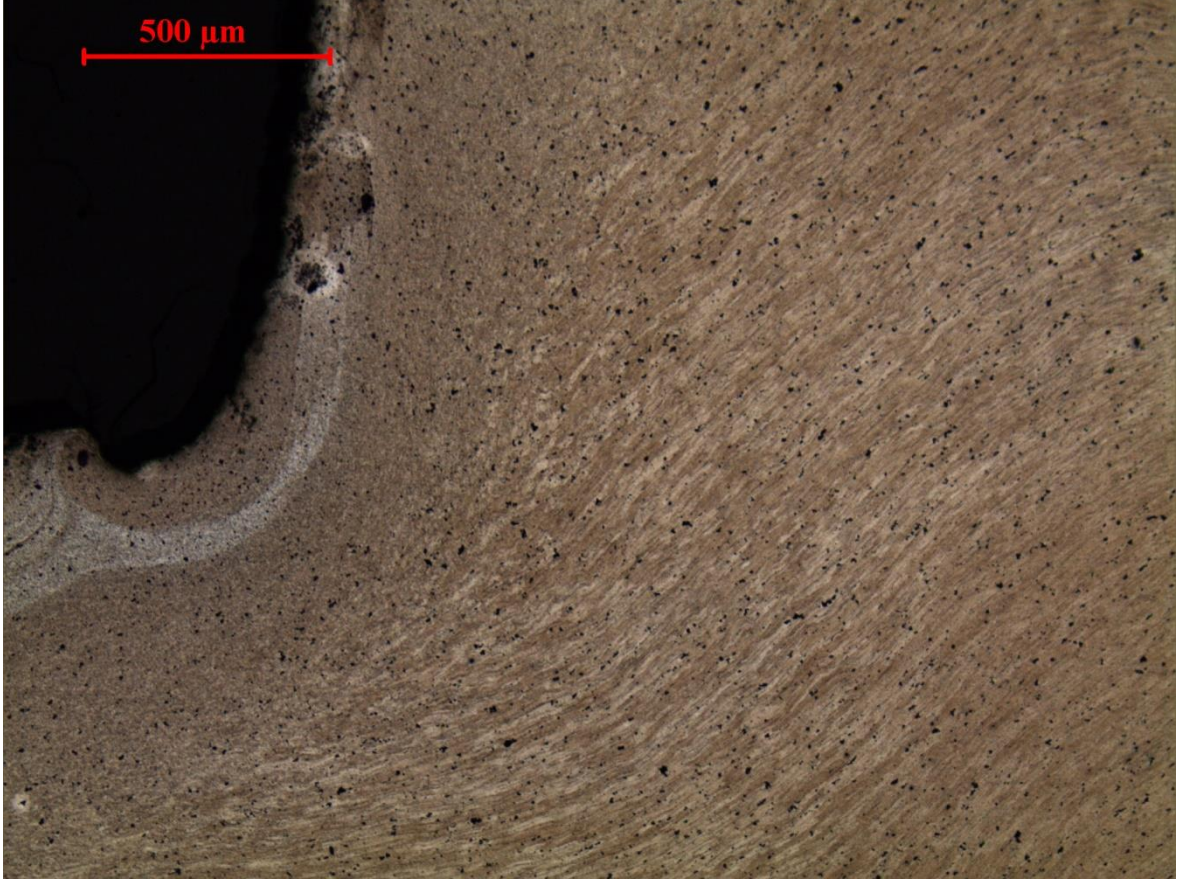
Şekil 6.39. S10 numunesi pim sol üst 10x, B) S10 numunesi pim sol üst 20x.

S10 numunesine ait Şekil 6.40’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere numunenin birleşme bölgesinden alınmış 5x büyütmedeki optik fotoğrafı bulunmaktadır.

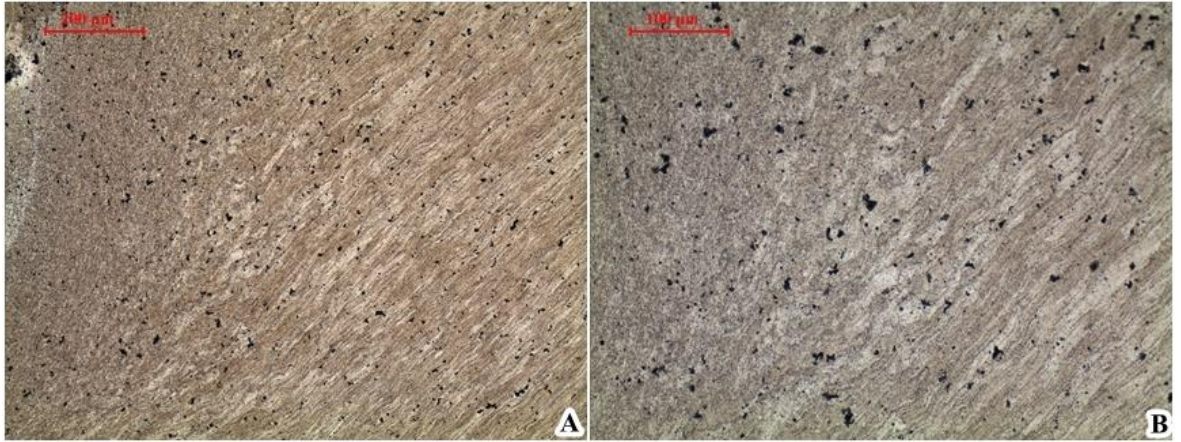


Şekil 6.40. A) S10 numunesi orta sol 5x, B) S10 numunesi orta sağ 5x.

S11 numunesine ait Şekil 6.41 ve Şekil 6.42’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sağ bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

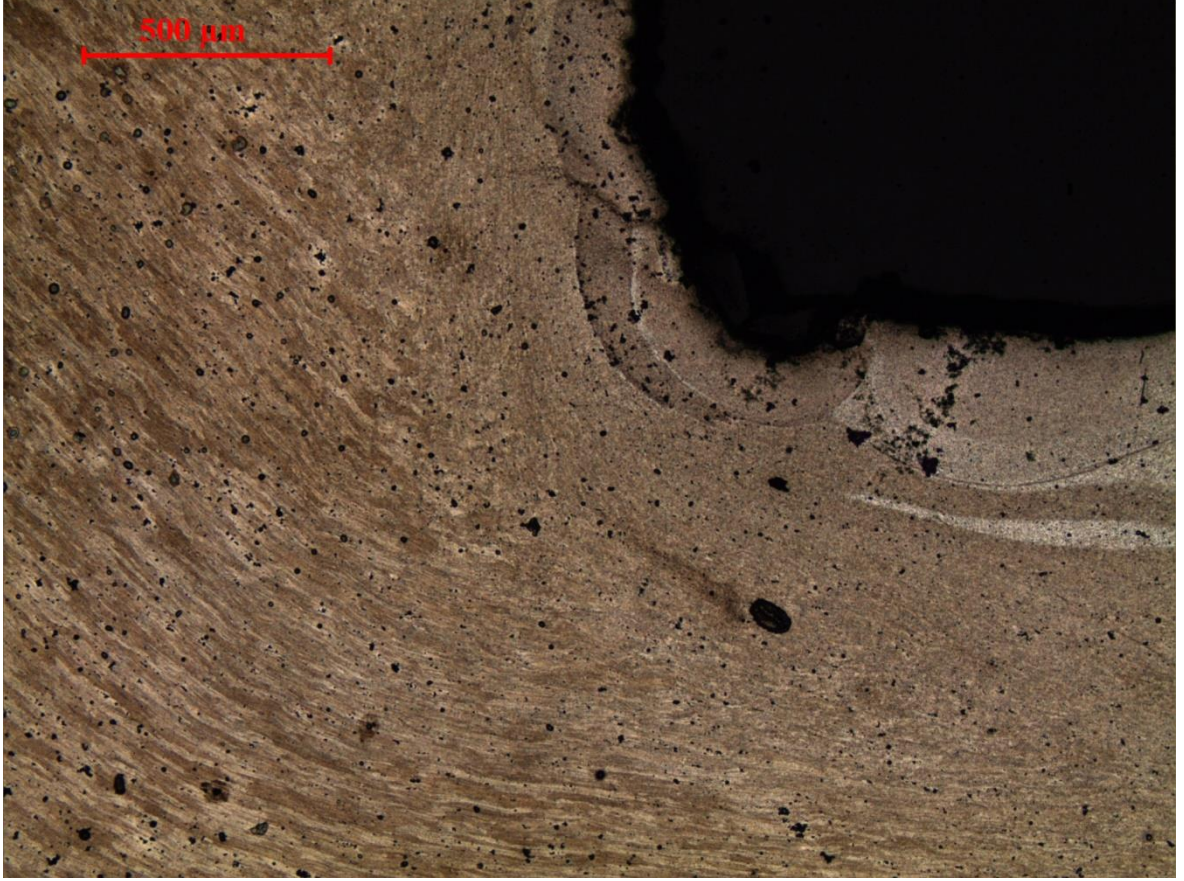


Şekil 6.41. S11 numunesi omuz sağ 5x.

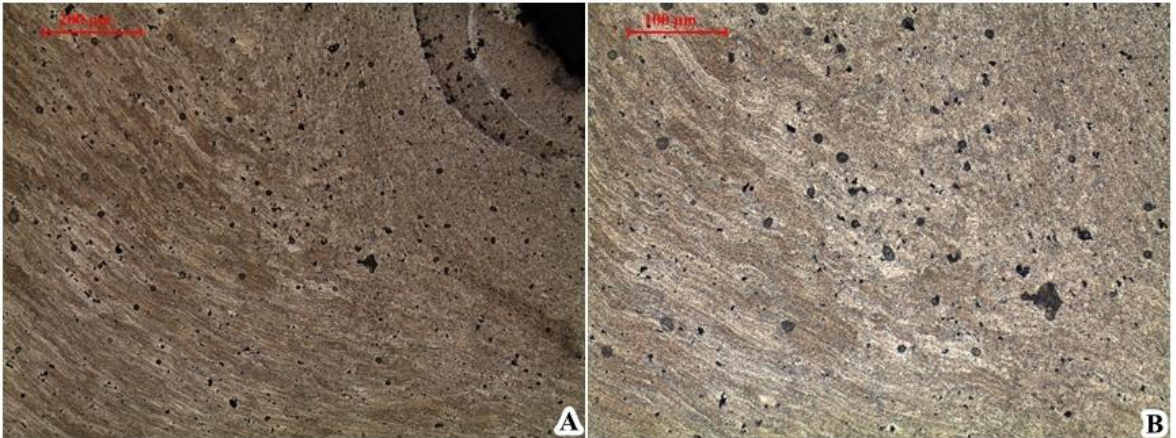


Şekil 6.42. A) S11 numunesi omuz sağ 10x, B) S11 numunesi omuz sağ 20x.

S11 numunesine ait Şekil 6.43 ve Şekil 6.44'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere omuz sol bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

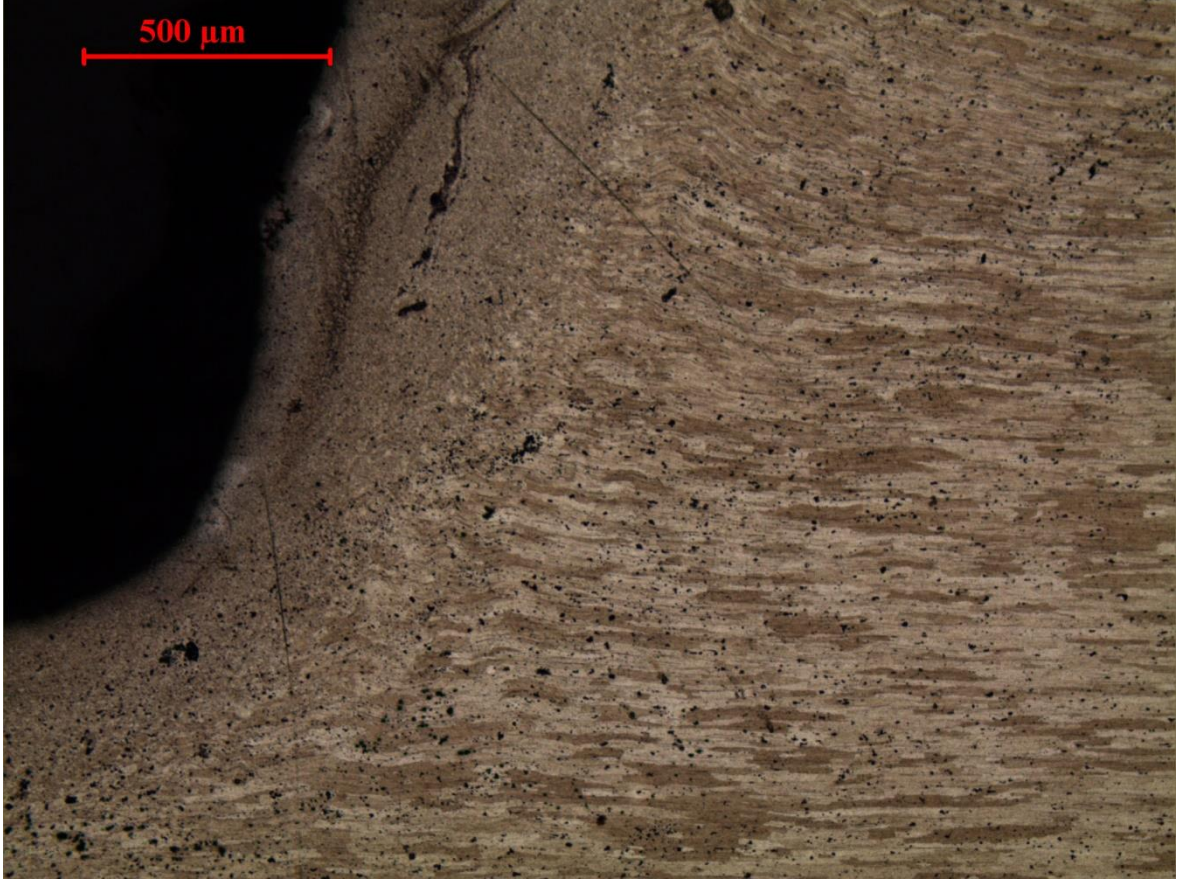


Şekil 6.43. S11 numunesi omuz sol 5x.

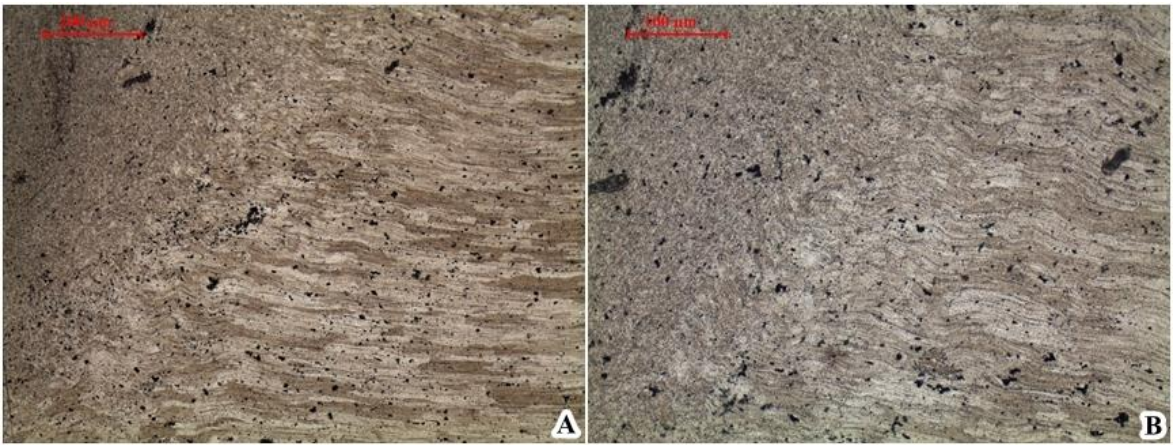


Şekil 6.44. A) S11 numunesi omuz sol 10x, B) S11 numunesi omuz sol 20x.

S11 numunesine ait Şekil 6.45 ve Şekil 6.46’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

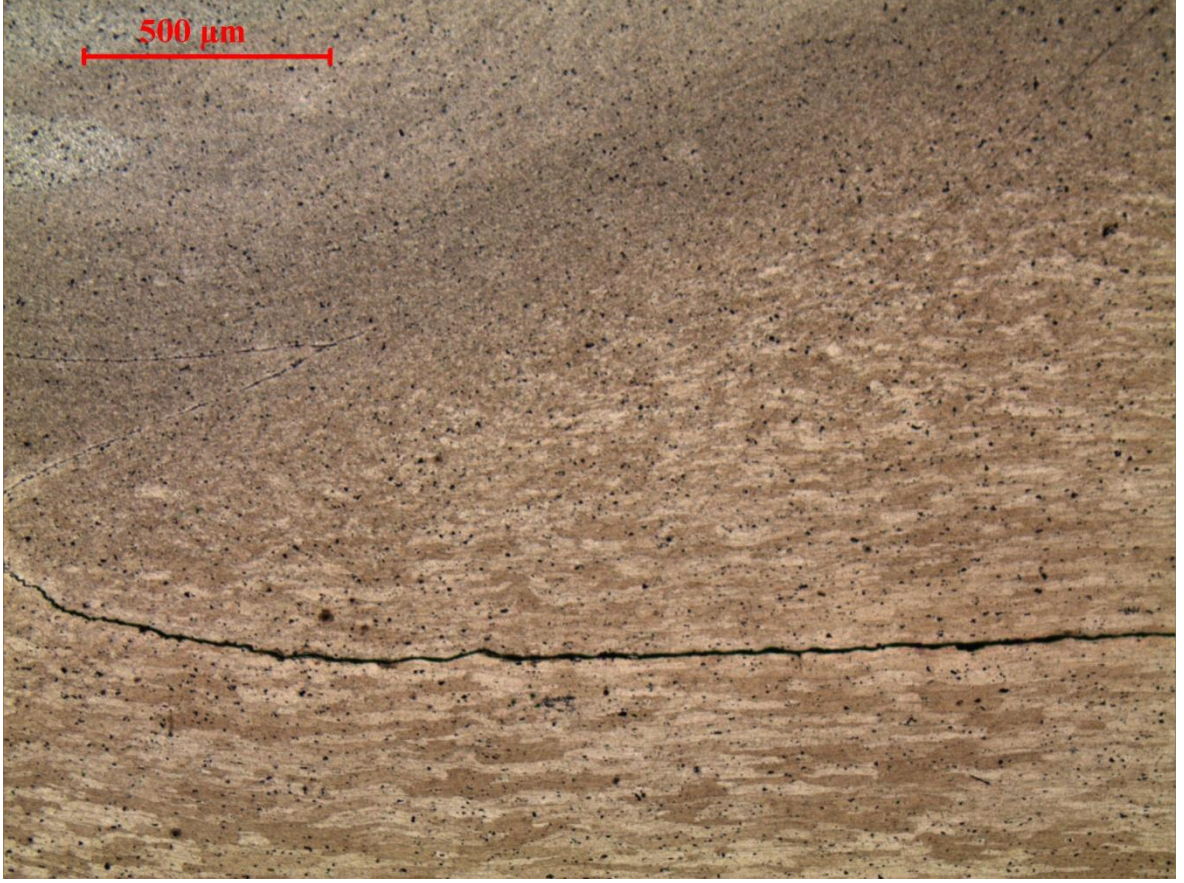


Şekil 6.45. S11 numunesi pim sağ alt 5x.

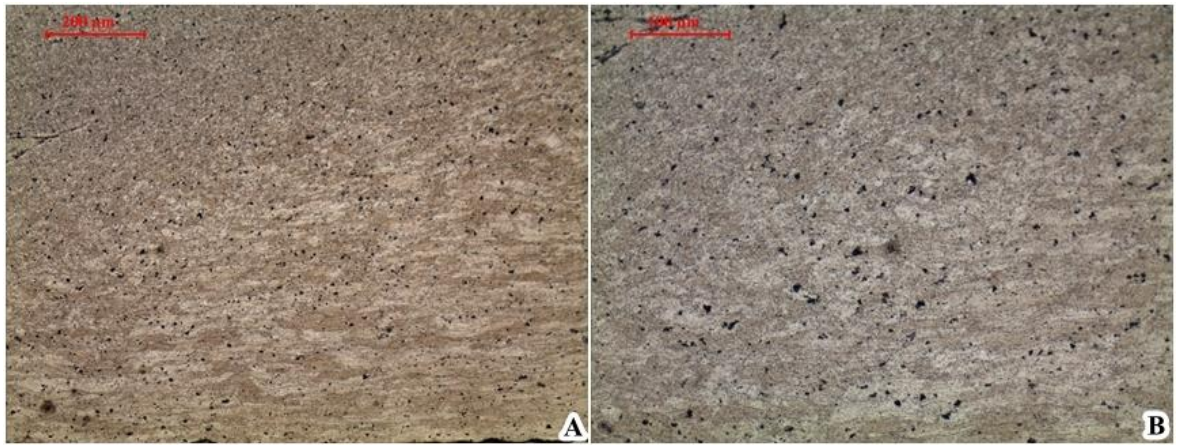


Şekil 6.46. A) S11 numunesi pim sağ alt 10x, B) S11 numunesi pim sağ alt 20x.

S11 numunesine ait Şekil 6.47 ve Şekil 6.48’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

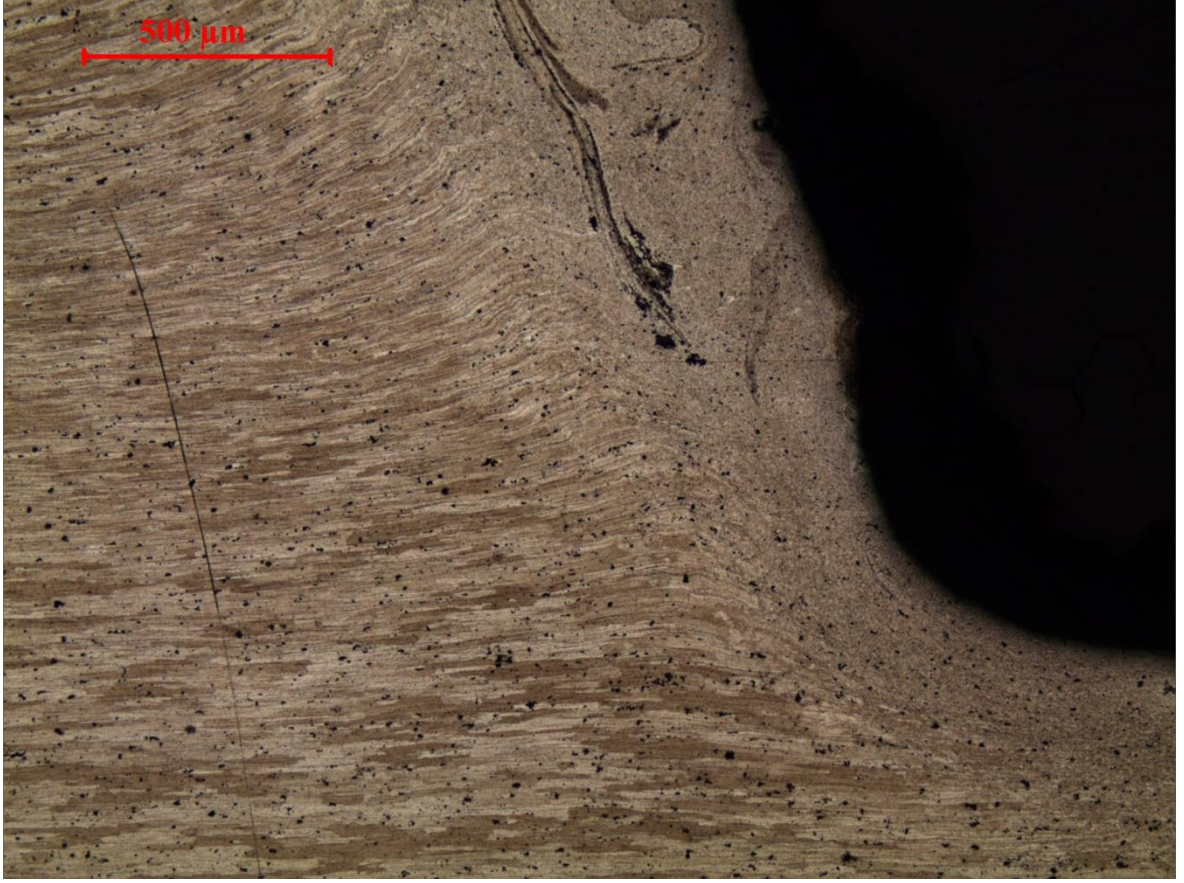


Şekil 6.47. S11 numunesi pim sağ üst 5x.

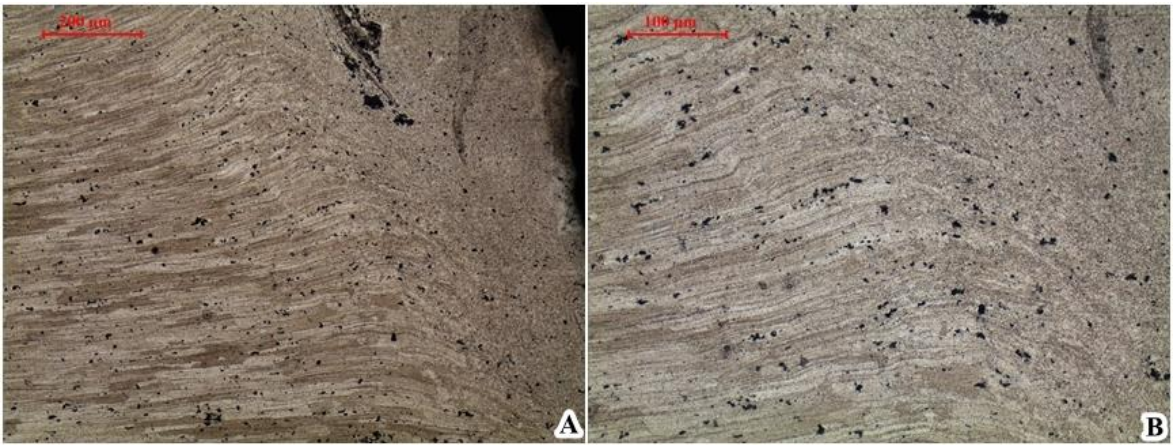


Şekil 6.48. A) S11 numunesi pim sağ üst 10x, B) S11 numunesi pim sağ üst 20x.

S4 numunesine ait Şekil 6.49 ve Şekil 6.50’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 6.49. S11 numunesi pim sol alt 5x.

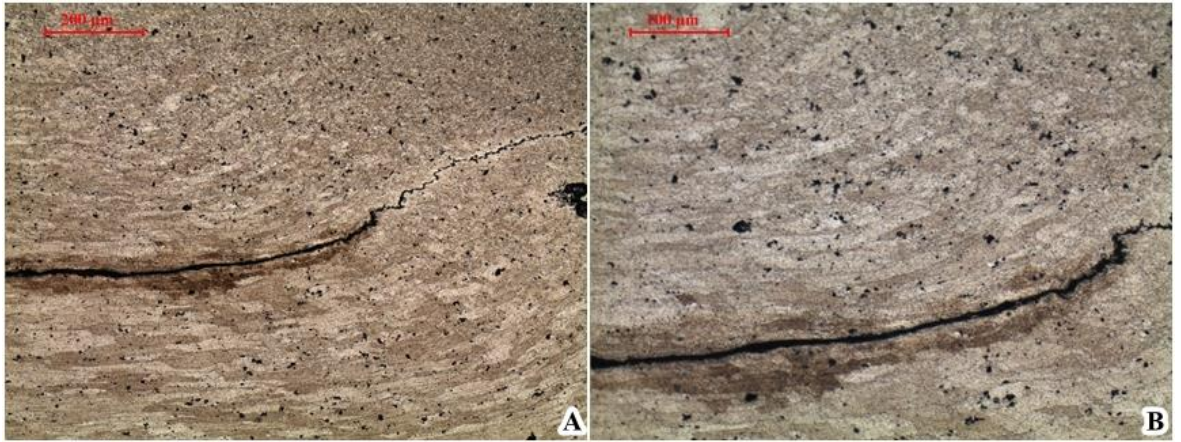


Şekil 6.50. A) S11 numunesi pim sol alt 10x, B) S11 numunesi pim sol alt 20x.

S11 numunesine ait Şekil 6.51 ve Şekil 6.52’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

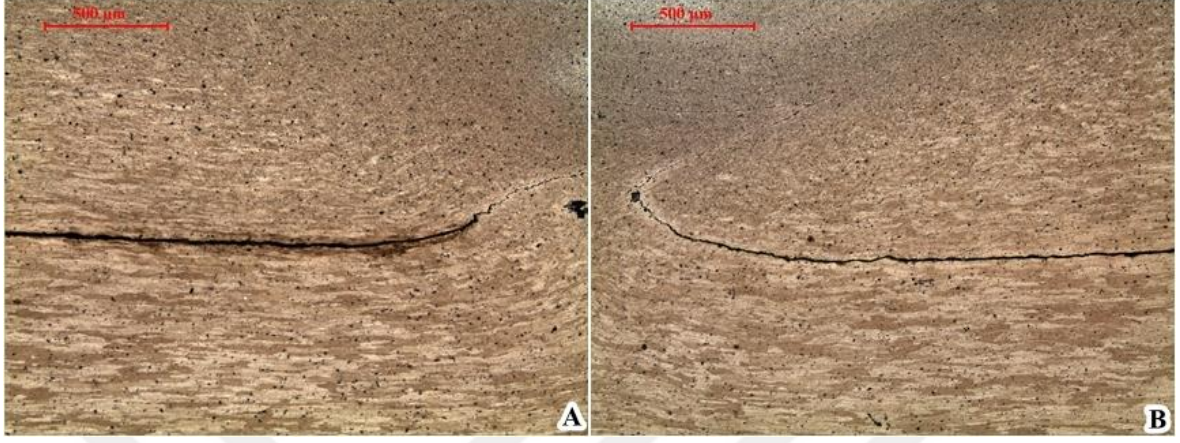


Şekil 6.51. S11 numunesi pim sol üst 5x.



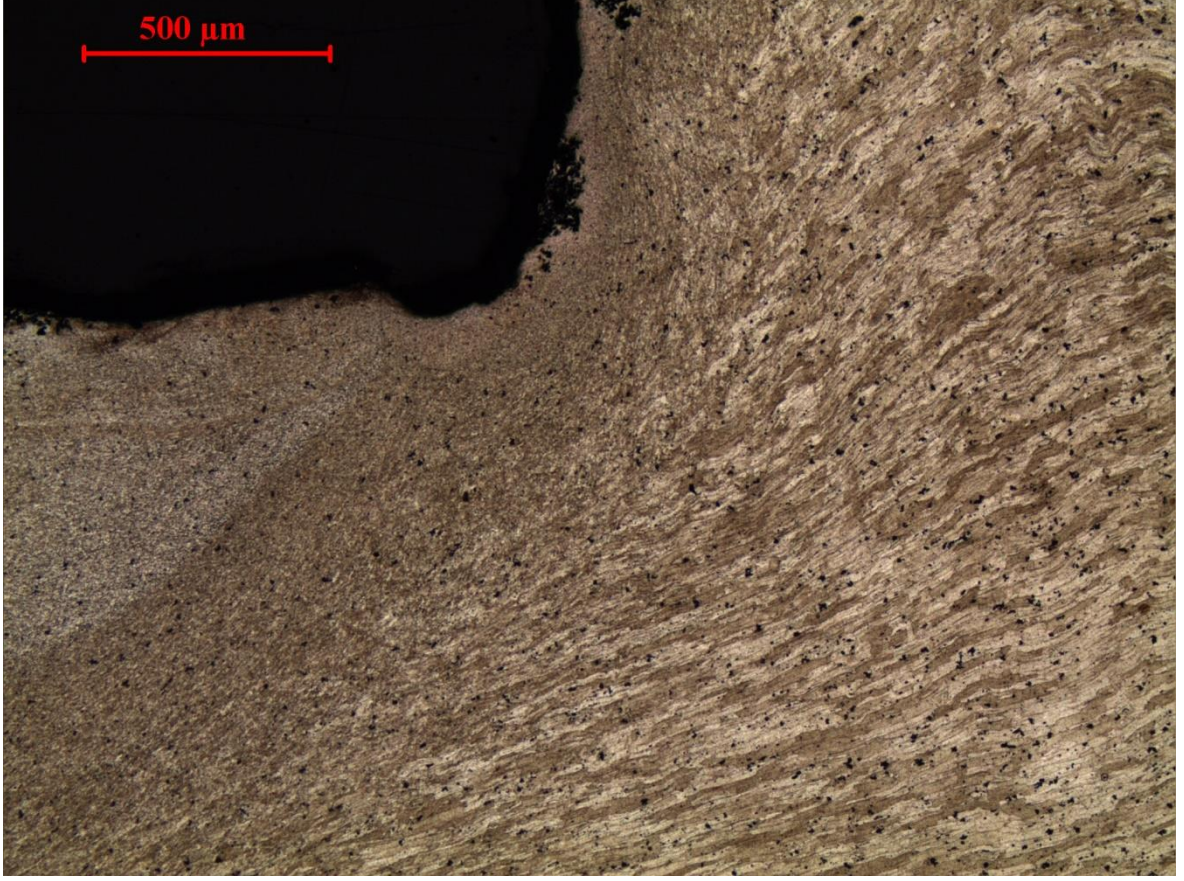
Şekil 6.52. A) S11 numunesi pim sol üst 10x, B) S11 numunesi pim sol üst 20x.

S11 numunesine ait Şekil 6.53'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere numunenin birleşme bölgesinden alınmış 5x büyütmedeki optik fotoğrafı bulunmaktadır.

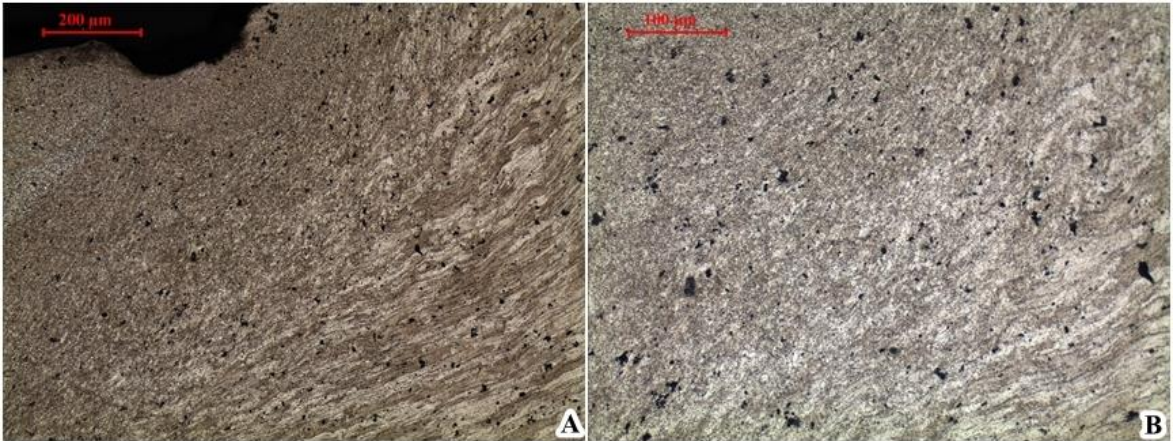


Şekil 6.53. A) S11 numunesi orta sol 5x, B) S11 numunesi orta sağ 5x.

S13 numunesine ait Şekil 6.54 ve Şekil 6.55'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere omuz sağ bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 6.54. S13 numunesi omuz sağ 5x.

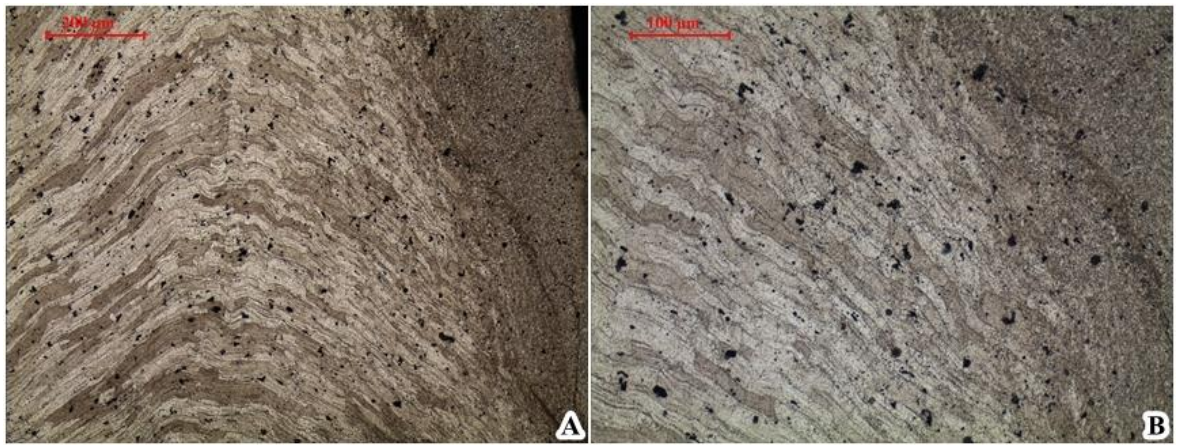


Şekil 6.55. A) S13 numunesi omuz sağ 10x, B) S11 numunesi omuz sağ 20x.

S13 numunesine ait Şekil 6.56 ve Şekil 6.57’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sol bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

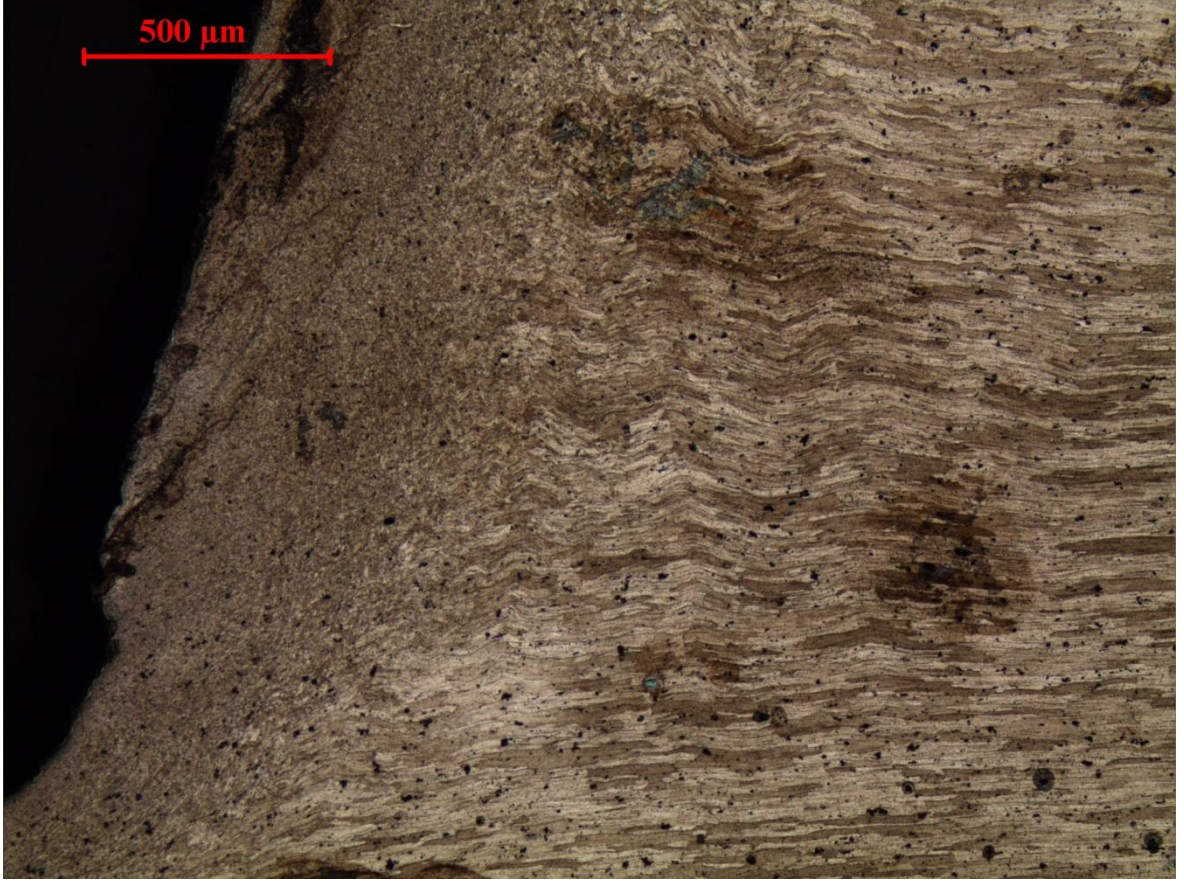


Şekil 6.56. S13 numunesi omuz sol 5x.

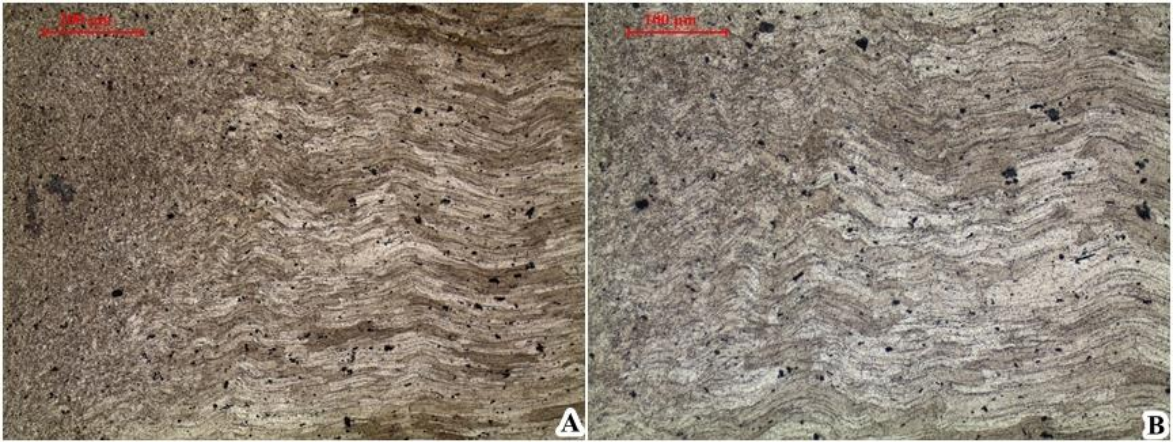


Şekil 6.57. A) S13 numunesi omuz sol 10x, B) S11 numunesi omuz sol 20x.

S13 numunesine ait Şekil 6.58 ve Şekil 6.59’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

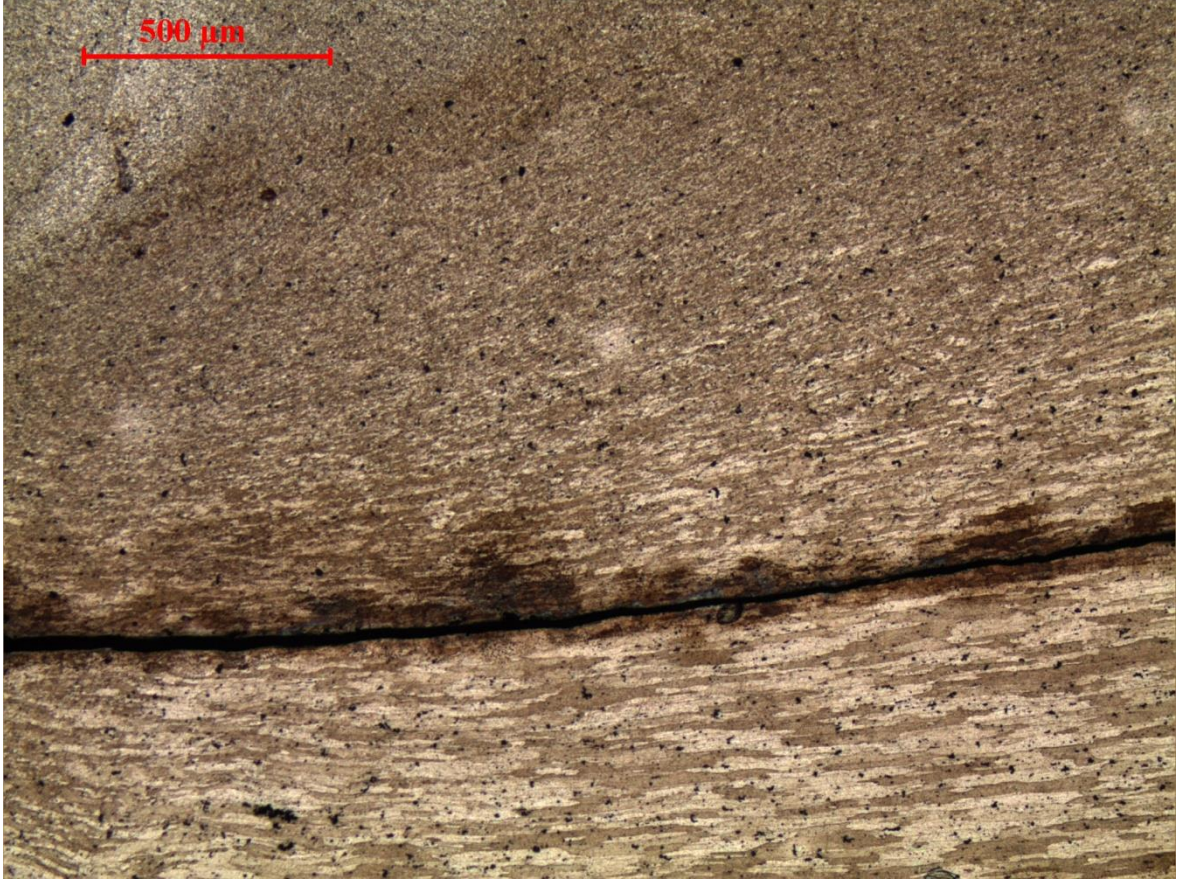


Şekil 6.58. S13 numunesi pim sağ alt 5x.

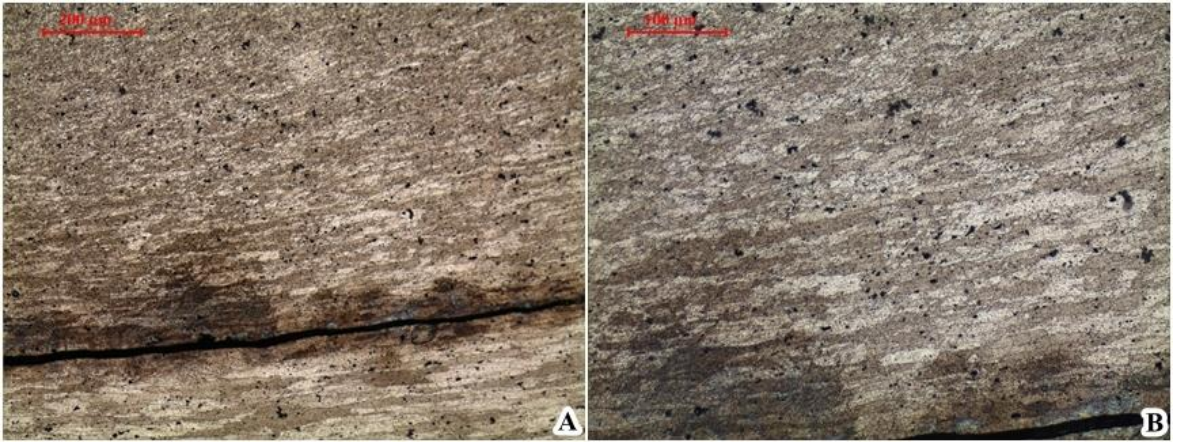


Şekil 6.59. A) S13 numunesi pim sağ alt 10x, B) S13 numunesi pim sağ alt 20x.

S13 numunesine ait Şekil 6.60 ve Şekil 6.61’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

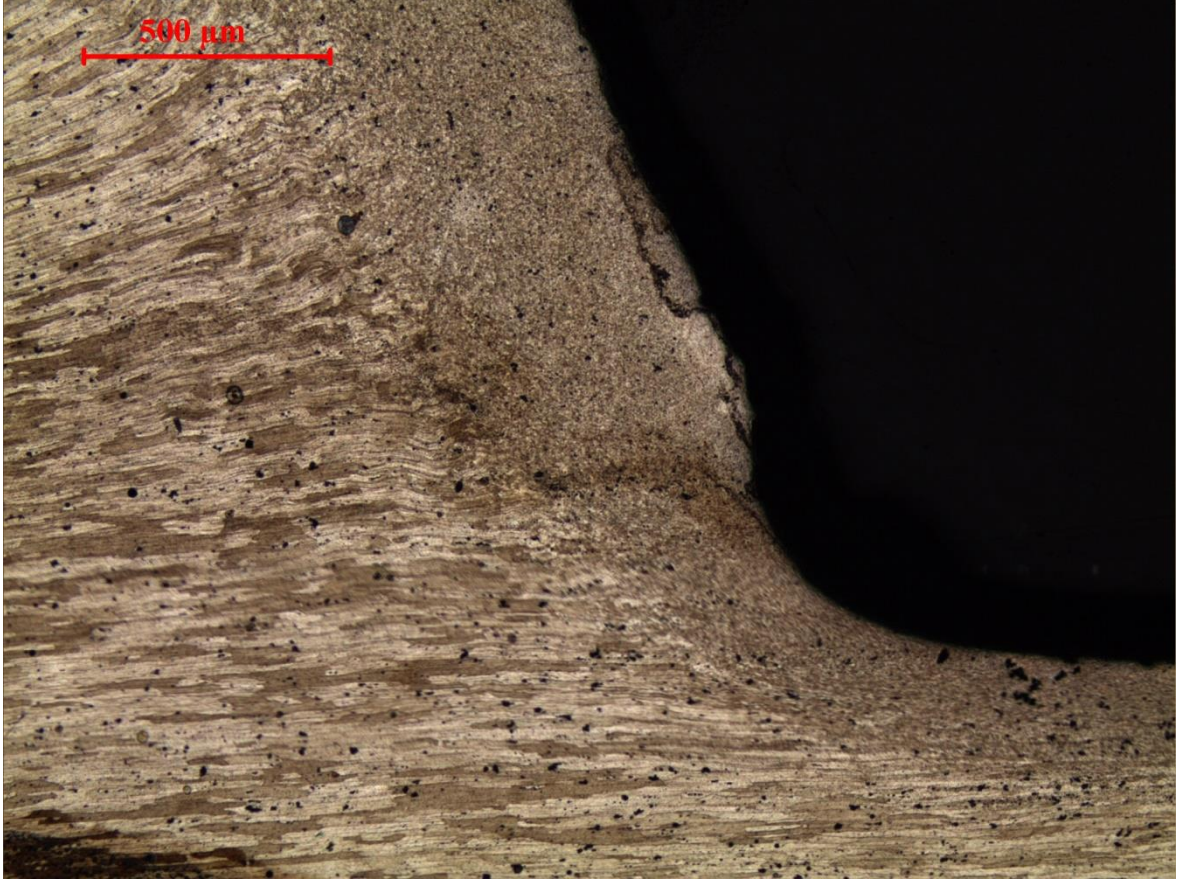


Şekil 6.60. S13 numunesi pim sağ üst 5x.

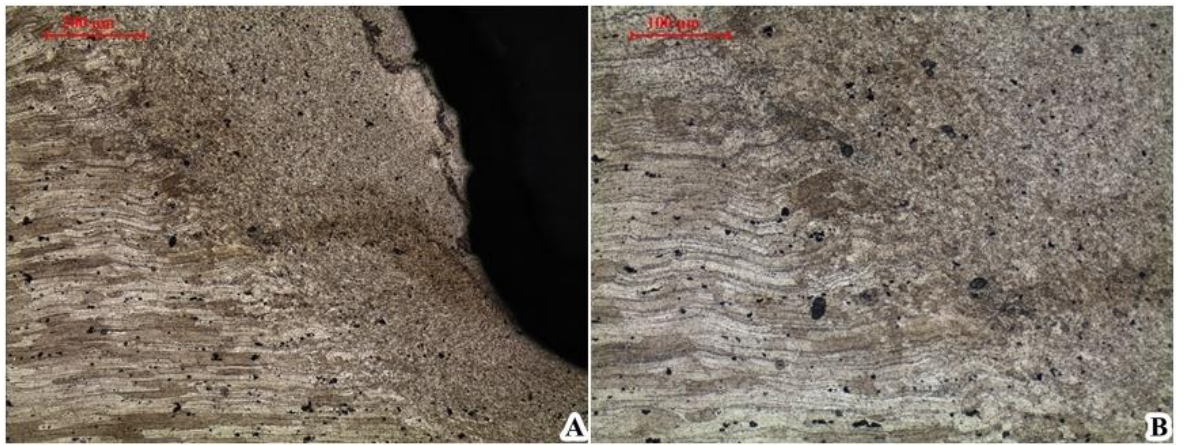


Şekil 6.61. A) S13 numunesi pim sağ üst 10x, B) S13 numunesi pim sağ üst 20x.

S13 numunesine ait Şekil 6.62 ve Şekil 6.63'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere pim sol alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

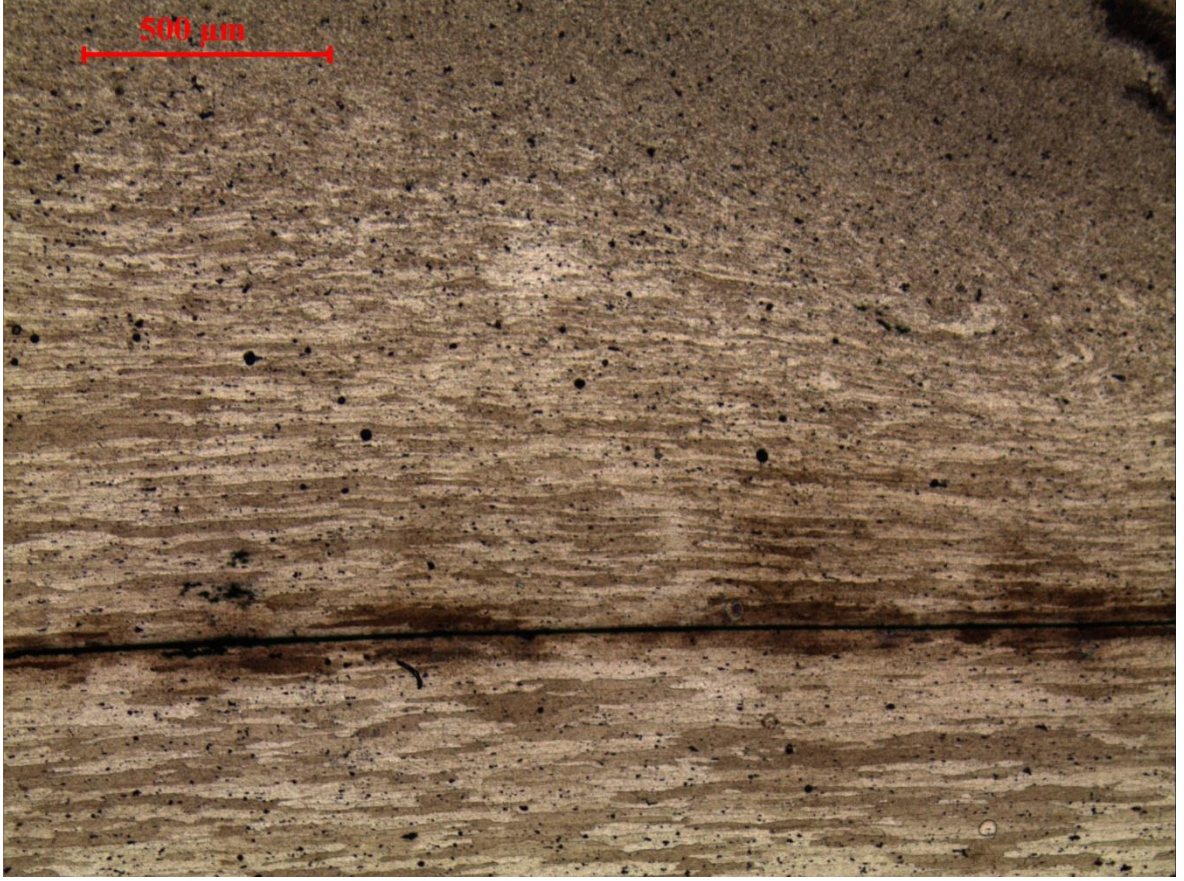


Şekil 6.62. S13 numunesi pim sol alt 5x.

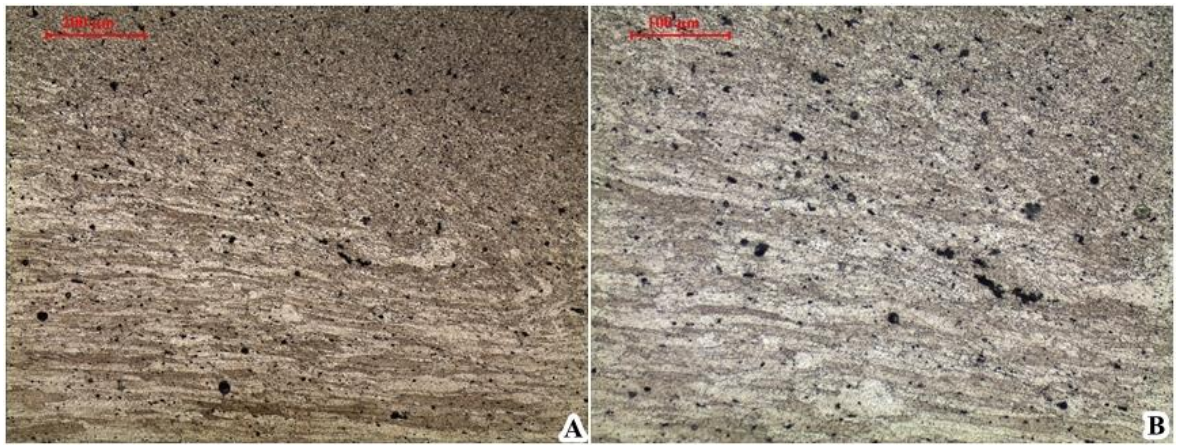


Şekil 6.63. A) S13 numunesi pim sol alt 10x, B) S13 numunesi pim sol alt 20x.

S13 numunesine ait Şekil 6.64 ve Şekil 6.65'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere pim sol üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 6.64. S13 numunesi pim sol üst 5x.



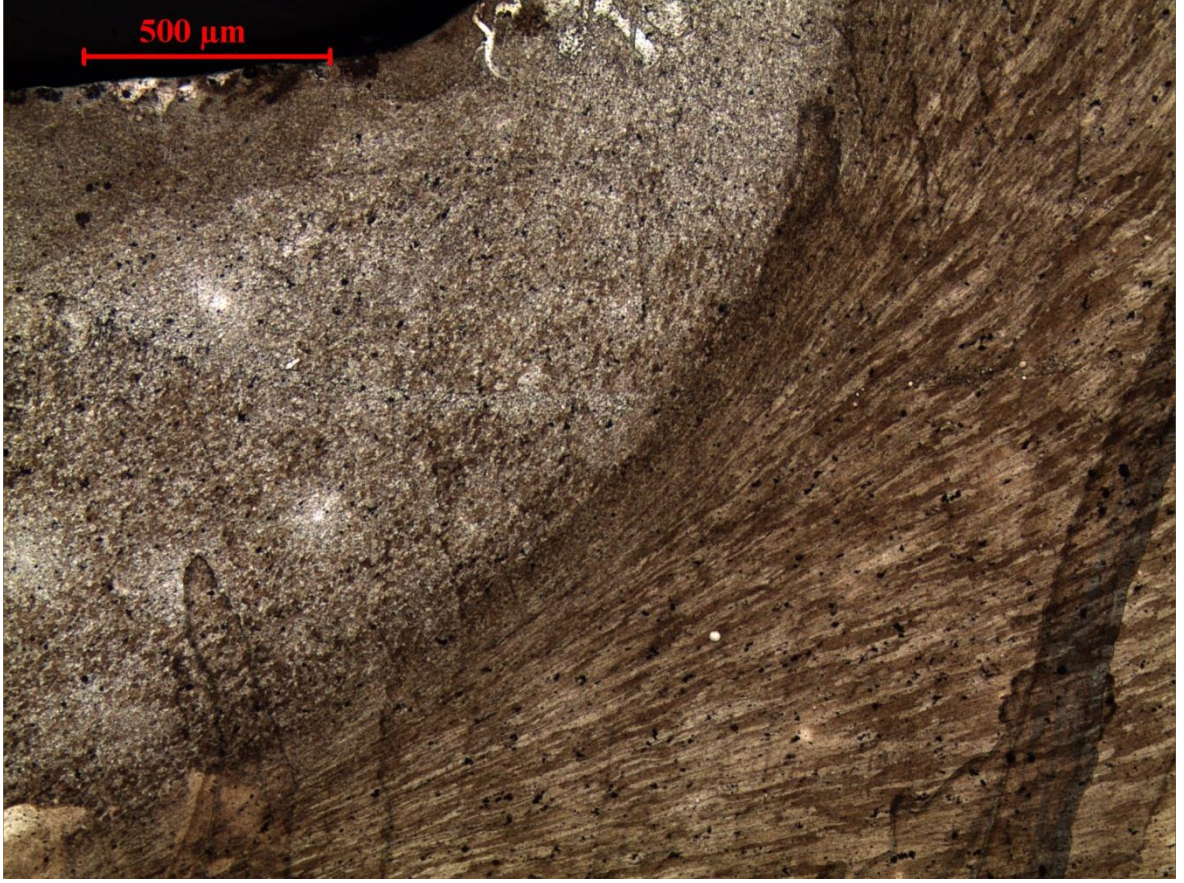
Şekil 6.65. A) S13 numunesi pim sol üst 10x, B) S13 numunesi pim sol üst 20x.

S13 numunesine ait Şekil 6.66'da, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere numunenin birleşme bölgesinden alınmış 5x büyütmedeki optik fotoğrafı bulunmaktadır.

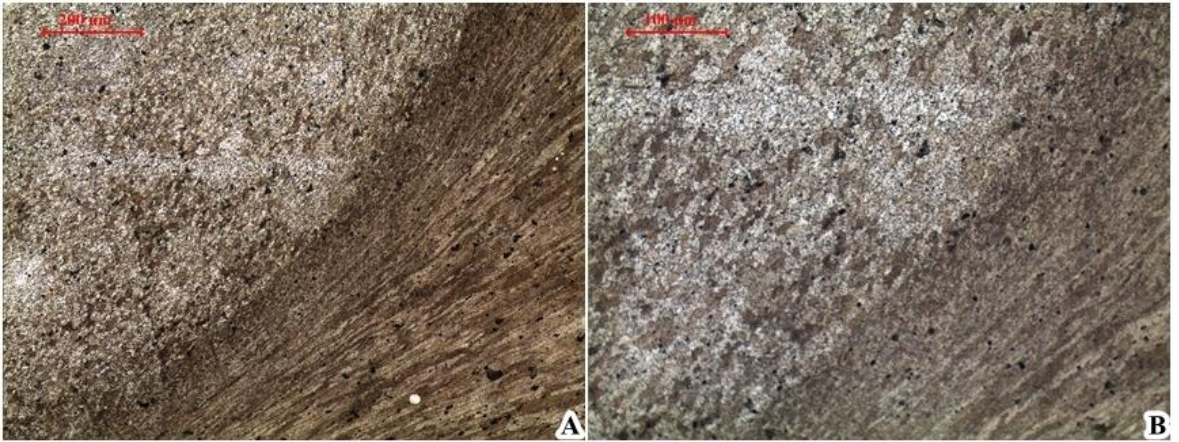


Şekil 6.66. A) S13 numunesi orta sol 5x, B) S13 numunesi orta sağ 5x.

S14 numunesine ait Şekil 6.67 ve Şekil 6.68’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sağ bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

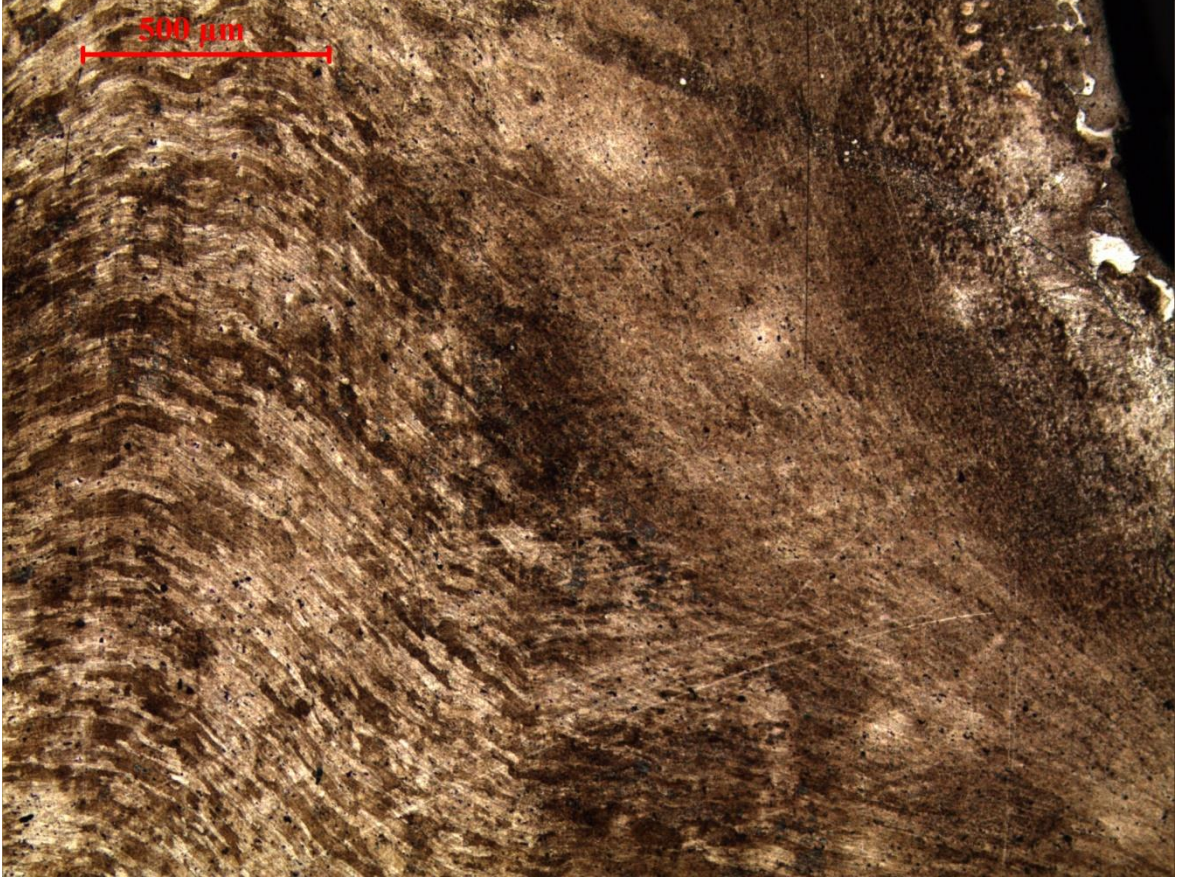


Şekil 6.67. S14 numunesi omuz sağ 5x.

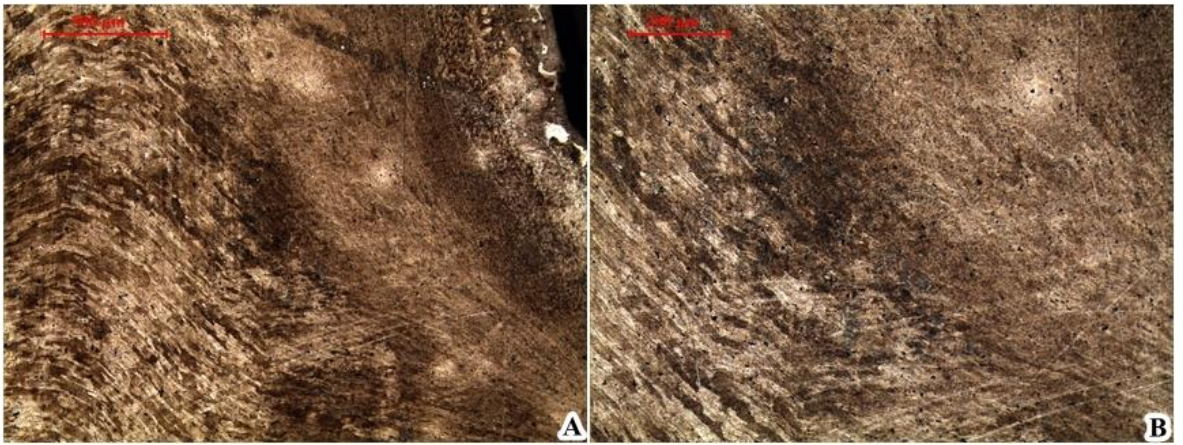


Şekil 6.68. A) S14 numunesi omuz sağ 10x, B) S14 numunesi omuz sağ 20x.

S14 numunesine ait Şekil 6.69 ve Şekil 6.70’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sol bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 6.69. S14 numunesi omuz sol 5x.

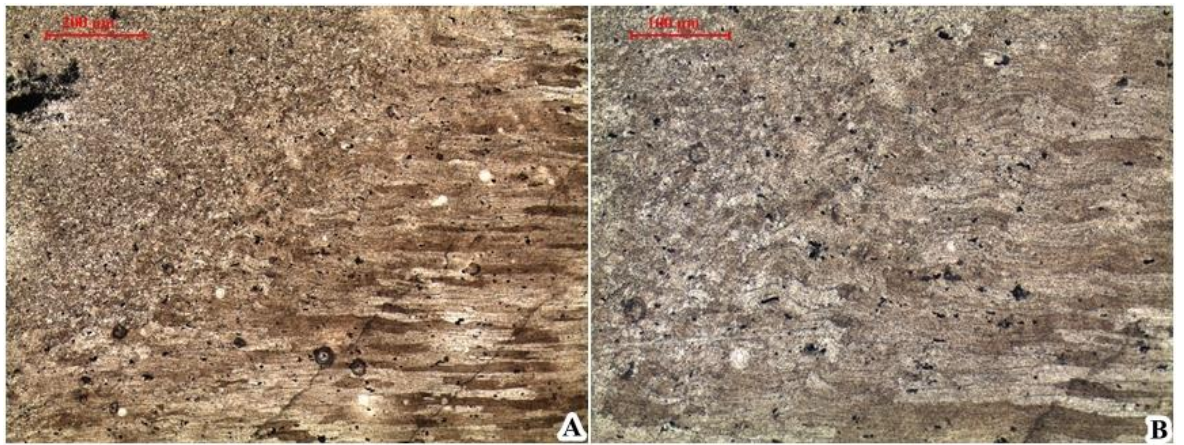


Şekil 6.70. A) S14 numunesi omuz sol 10x, B) S14 numunesi omuz sol 20x.

S14 numunesine ait Şekil 6.71 ve Şekil 6.72’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

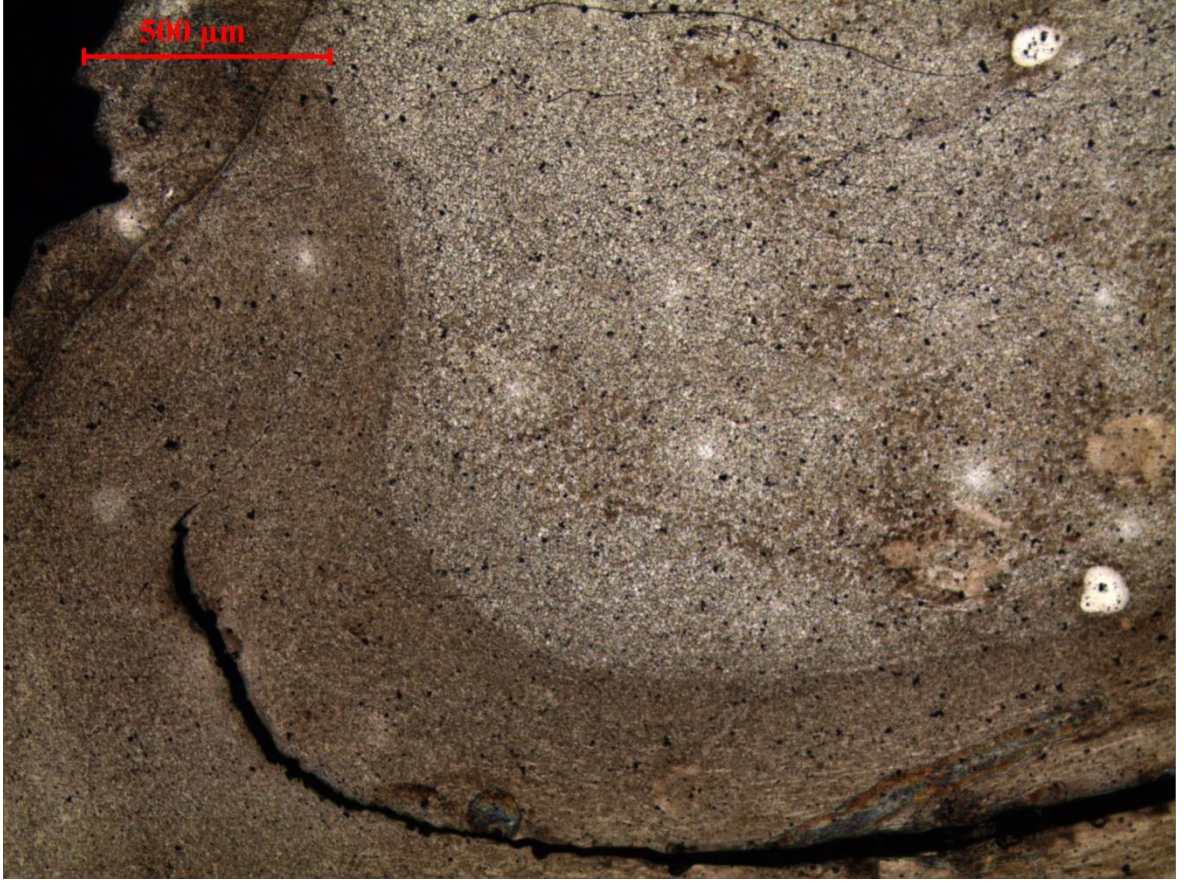


Şekil 6.71. S14 numunesi pim sağ alt 5x.

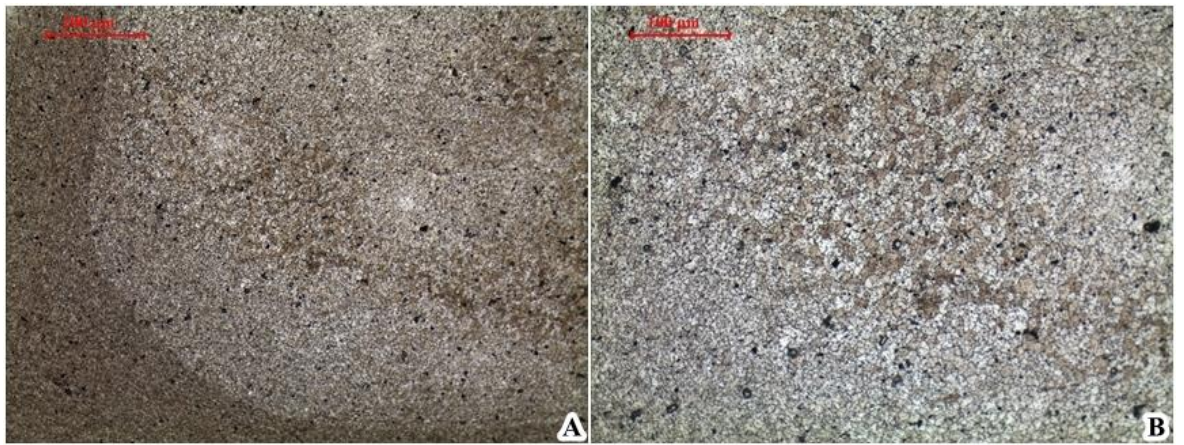


Şekil 6.72. A) S14 numunesi pim sağ alt 10x, B) S14 numunesi pim sağ alt 20x.

S14 numunesine ait Şekil 6.73 ve Şekil 6.74'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere pim sağ üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

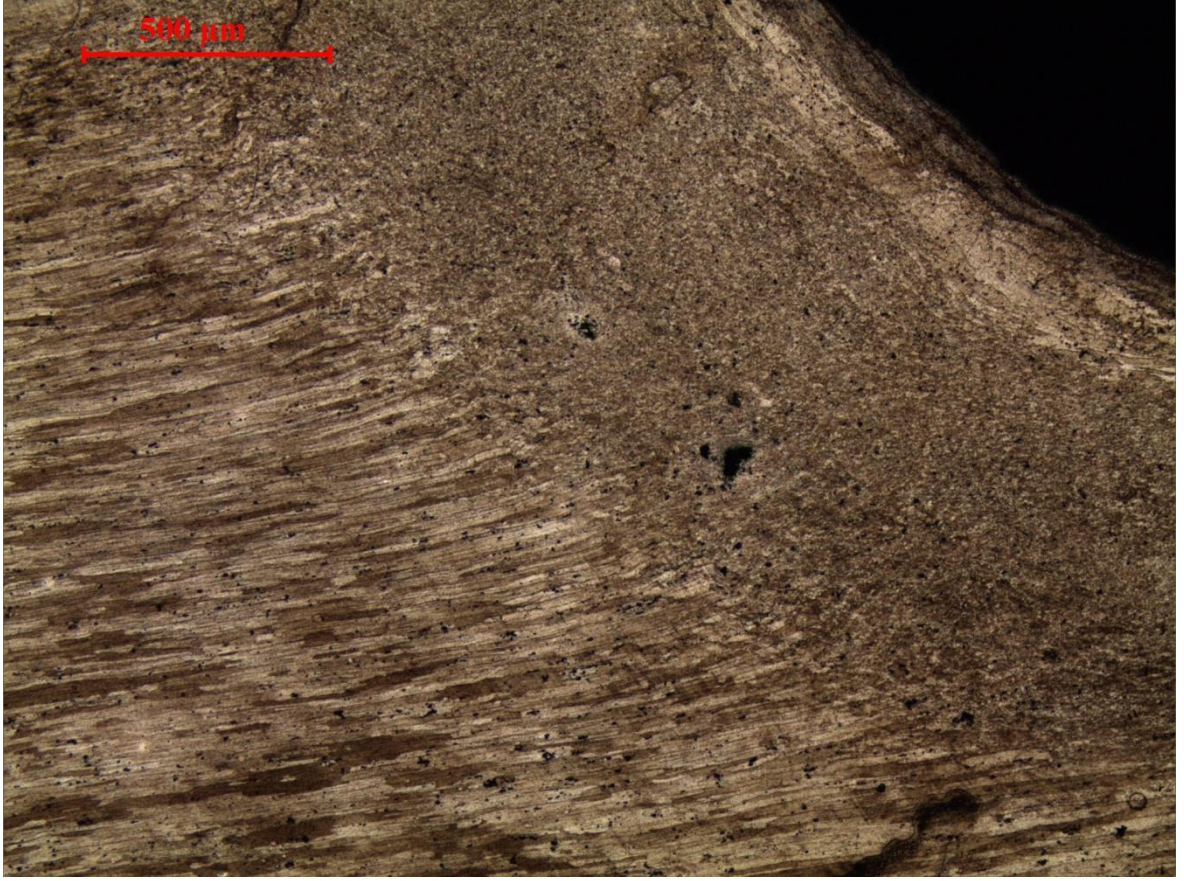


Şekil 6.73. S14 numunesi pim sağ üst 5x.

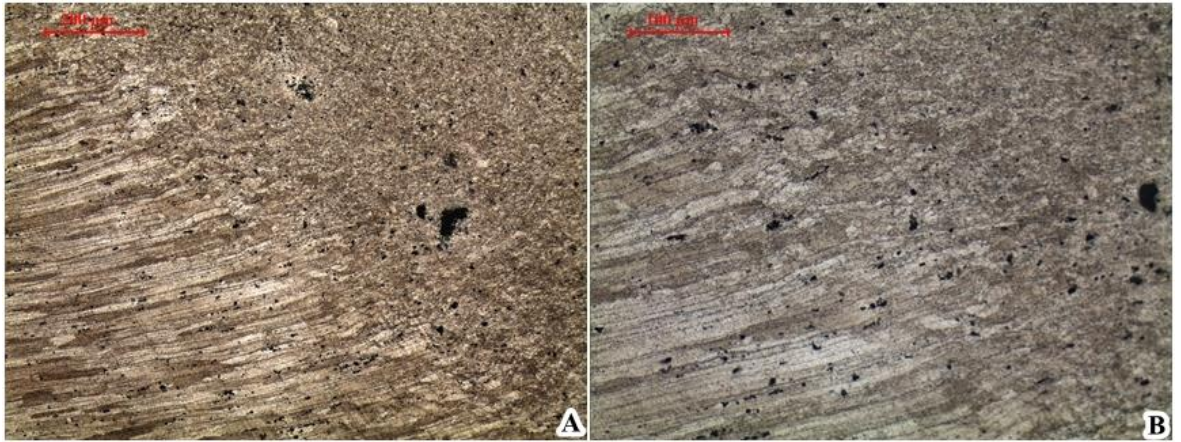


Şekil 6.74. A) S14 numunesi pim sağ üst 10x, B) S14 numunesi pim sağ üst 20x.

S14 numunesine ait Şekil 6.75 ve Şekil 6.76’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

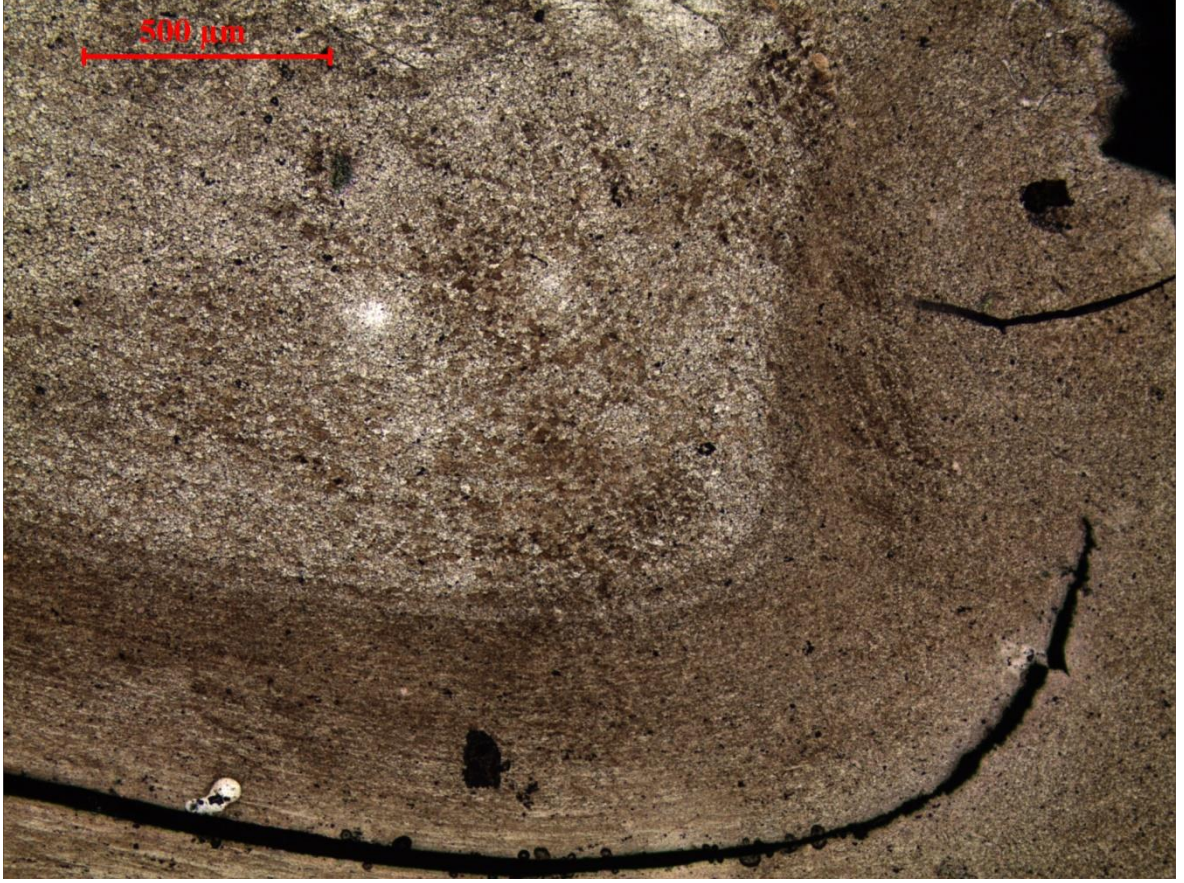


Şekil 6.75. S14 numunesi pim sol alt 5x.

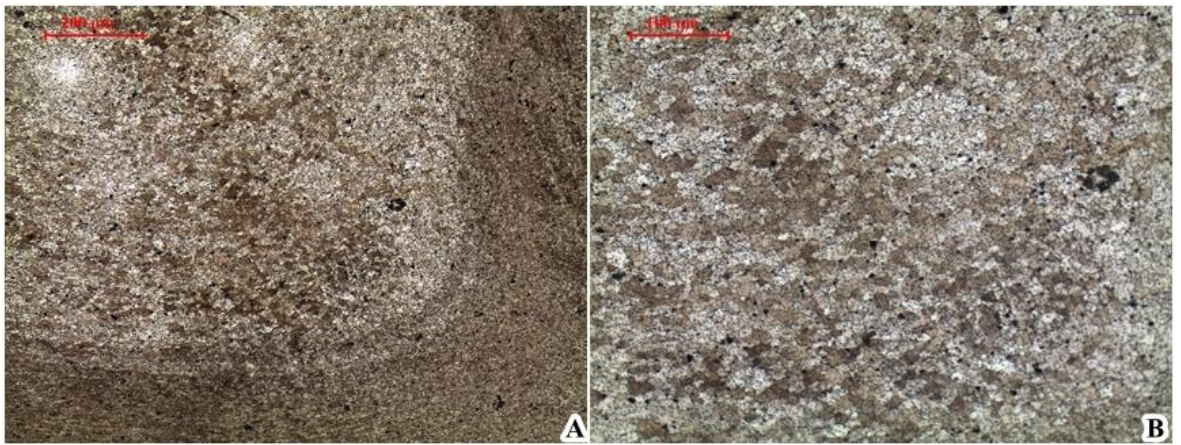


Şekil 6.76. A) S14 numunesi pim sol alt 10x, B) S14 numunesi pim sol alt 20x.

S14 numunesine ait Şekil 6.77 ve Şekil 6.78’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

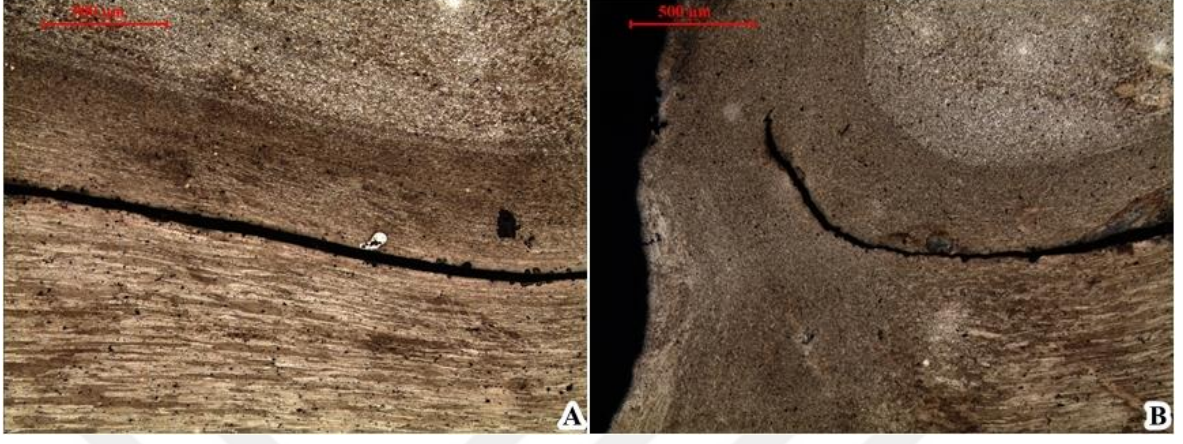


Şekil 6.77. S14 numunesi pim sol üst 5x.



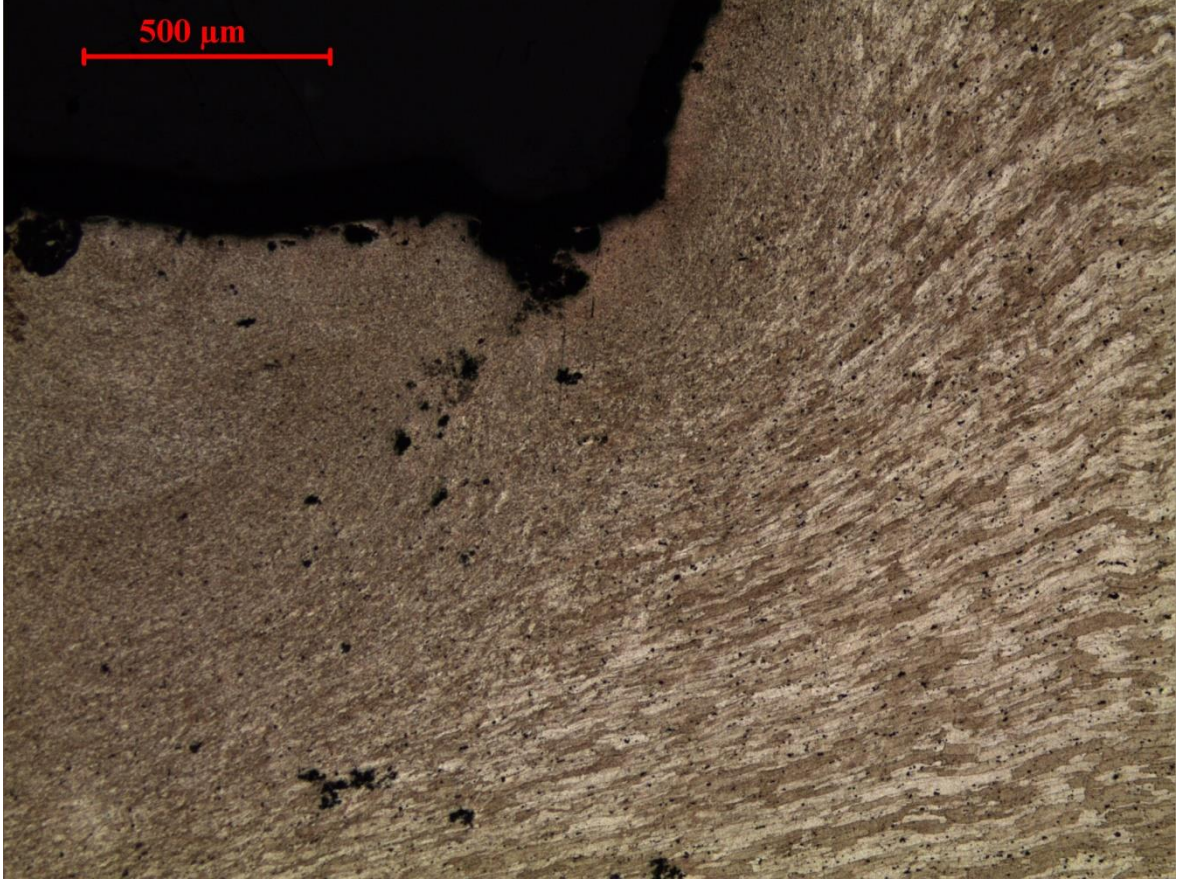
Şekil 6.78. A) S14 numunesi pim sol üst 10x, B) S14 numunesi pim sol üst 20x.

S14 numunesine ait Şekil 6.79’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere numunenin birleşme bölgesinden alınmış 5x büyütmedeki optik fotoğrafı bulunmaktadır.

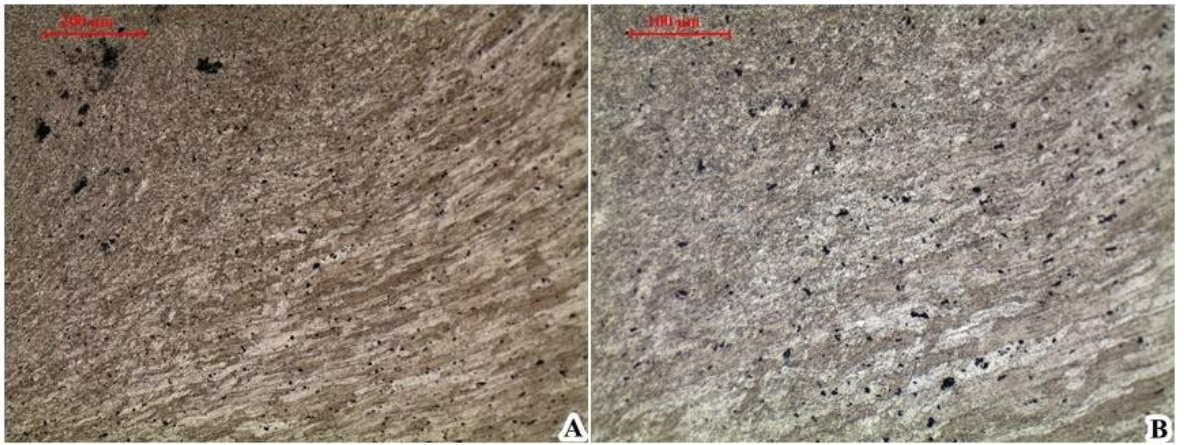


Şekil 6.79. A) S14 numunesi orta sol 5x, B) S14 numunesi orta sol 5x.

S15 numunesine ait Şekil 6.80 ve Şekil 6.81’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere omuz sağ bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

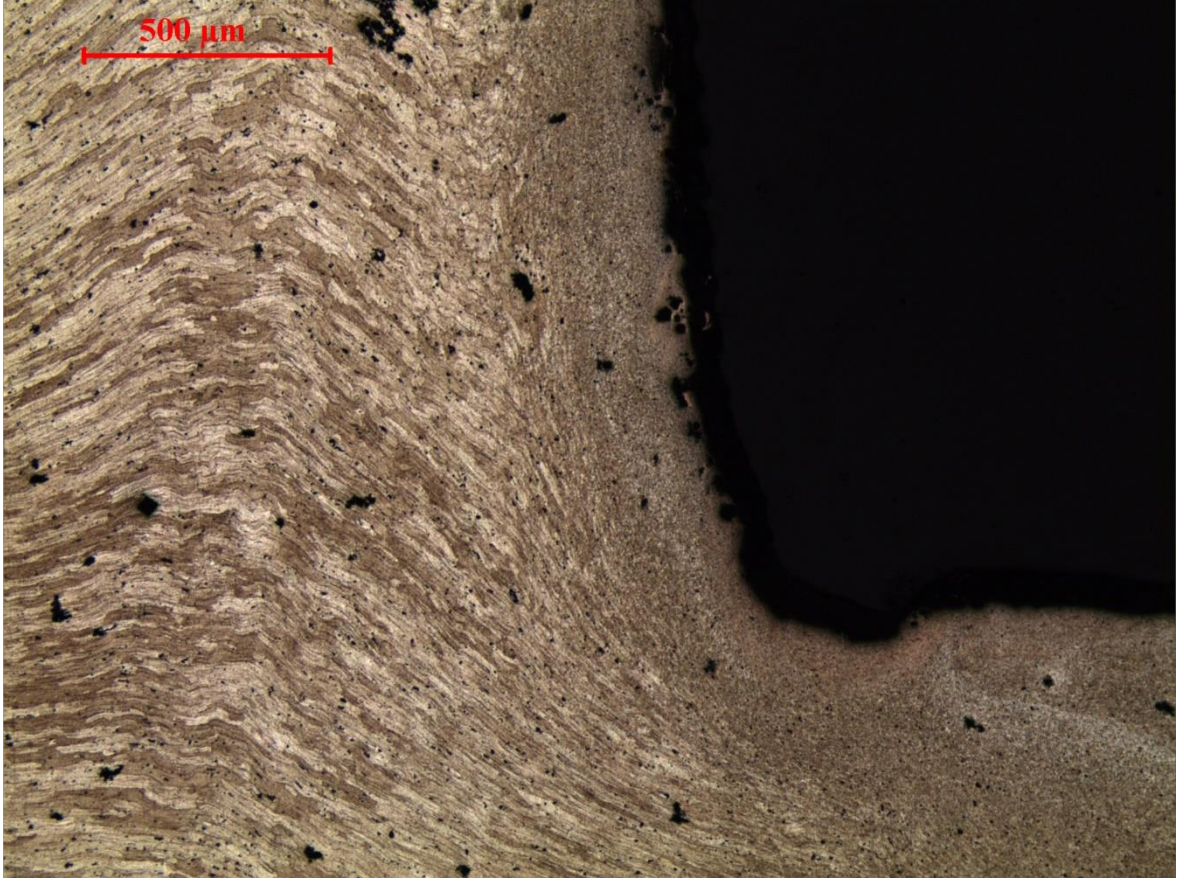


Şekil 6.80. S15 numunesi omuz sağ 5x.

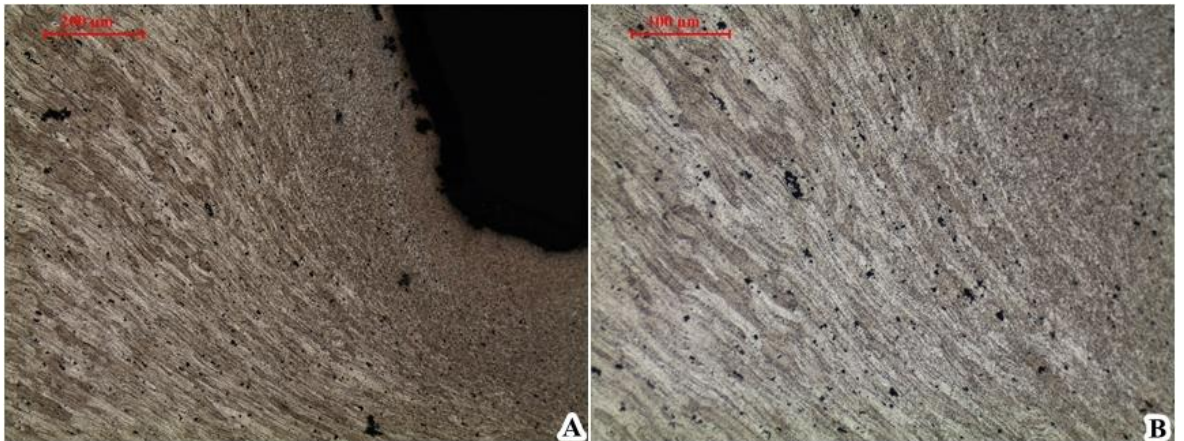


Şekil 6.81. A) S15 numunesi omuz sağ 10x, B) S15 numunesi omuz sağ 20x.

S15 numunesine ait Şekil 6.82 ve Şekil 6.83'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere omuz sol bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

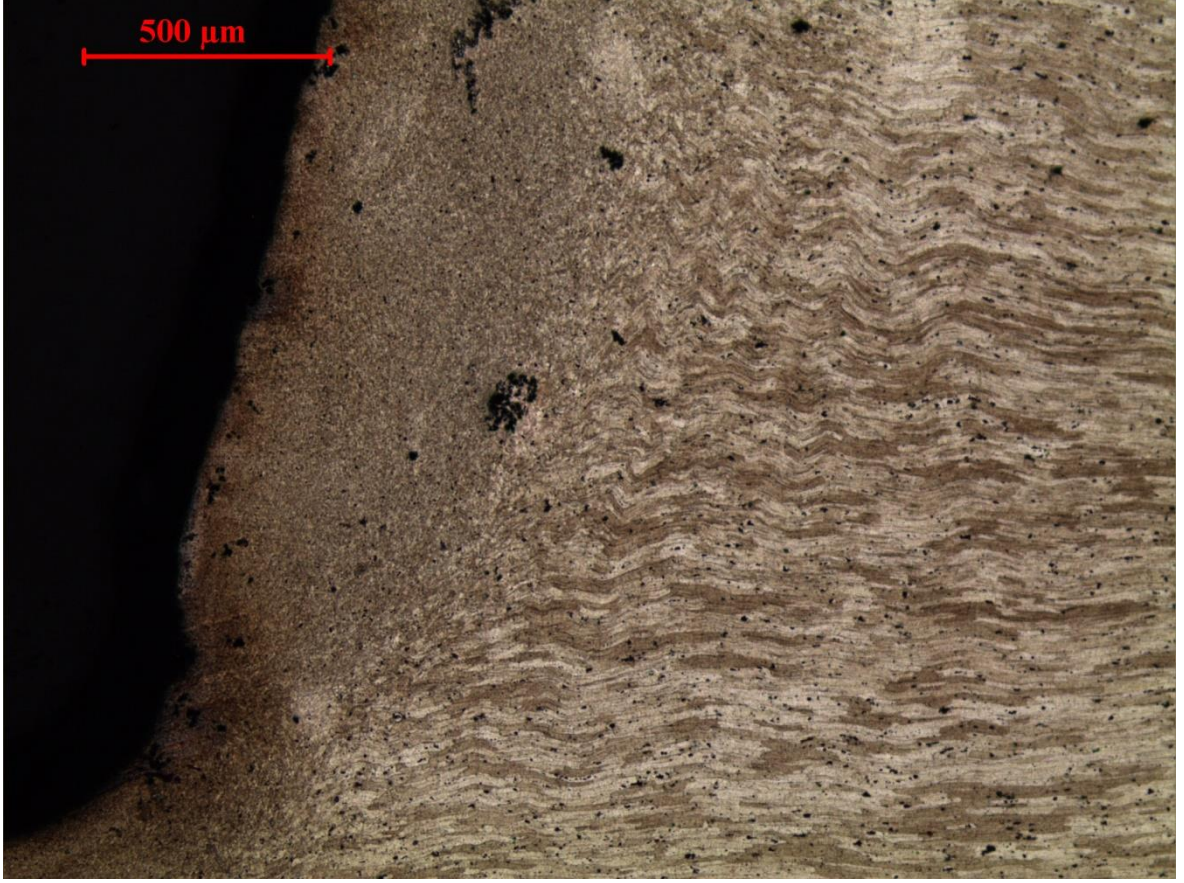


Şekil 6.82. S15 numunesi omuz sol 5x.

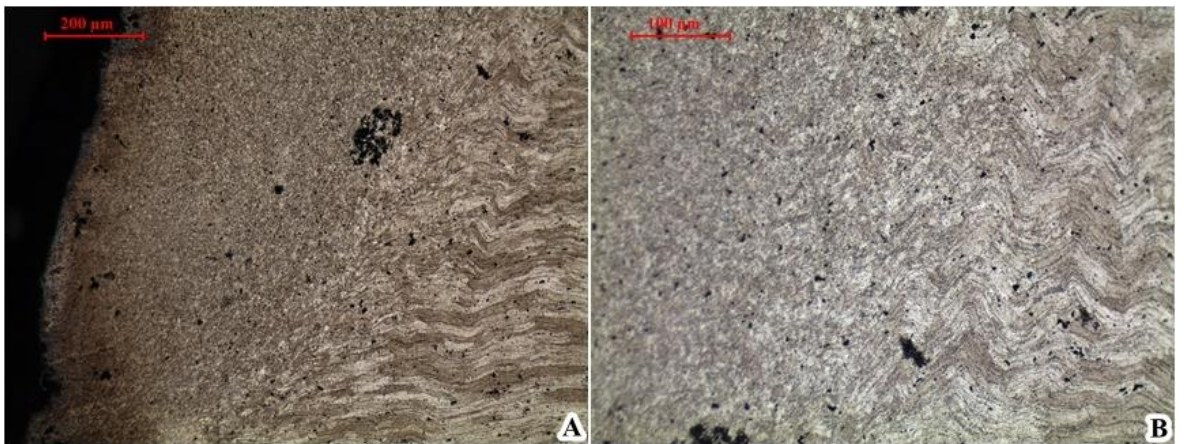


Şekil 6.83. A) S15 numunesi omuz sol 10x, B) S15 numunesi omuz sol 20x.

S15 numunesine ait Şekil 6.84 ve Şekil 6.85'te, Şekil 6.1'de belirtildiği üzere pim sağ alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

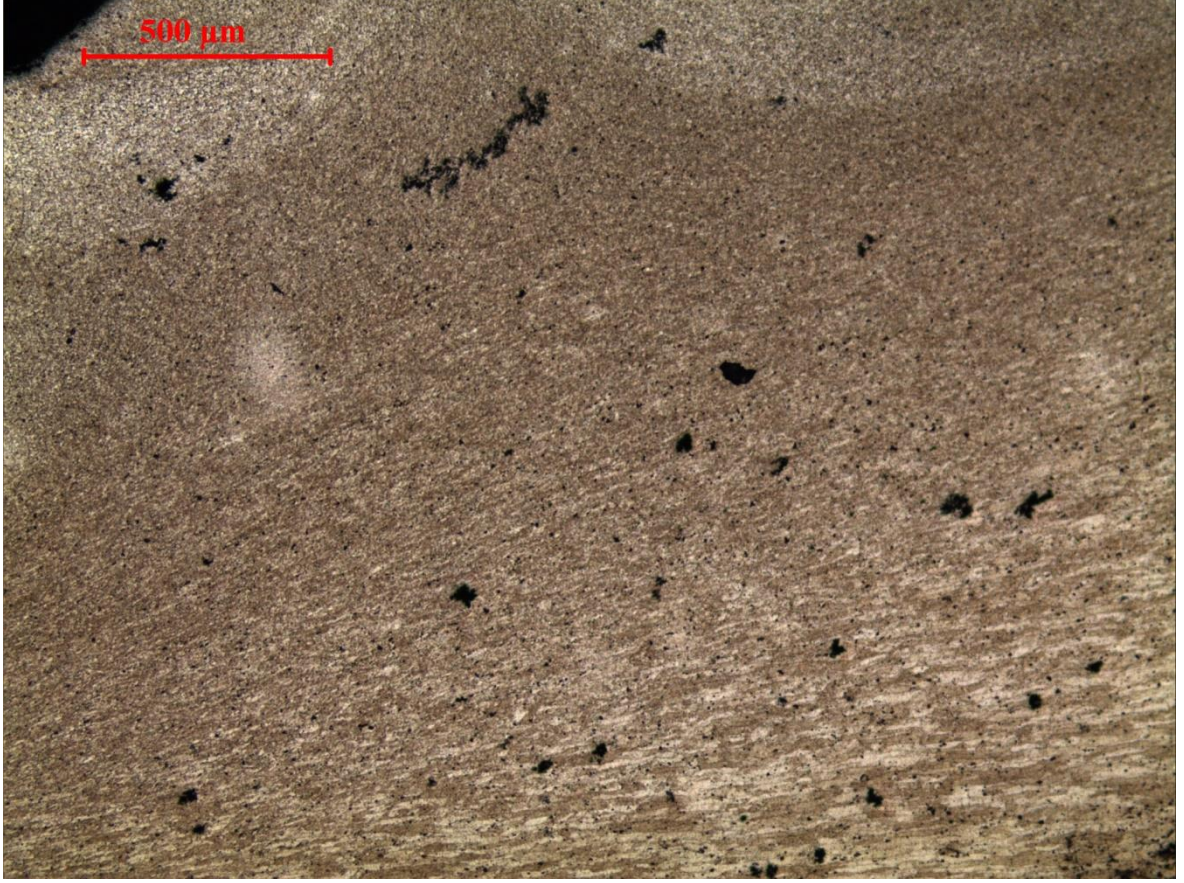


Şekil 6.84. S15 numunesi pim sağ alt 5x.

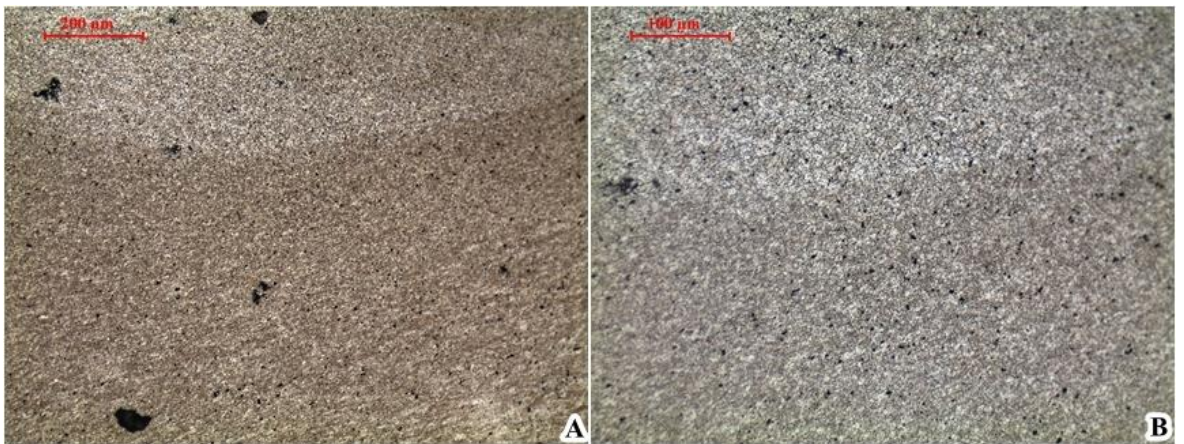


Şekil 6.85. A) S15 numunesi pim sağ alt 10x, B) S15 numunesi pim sağ alt 20x.

S15 numunesine ait Şekil 6.86 ve Şekil 6.87’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sağ üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

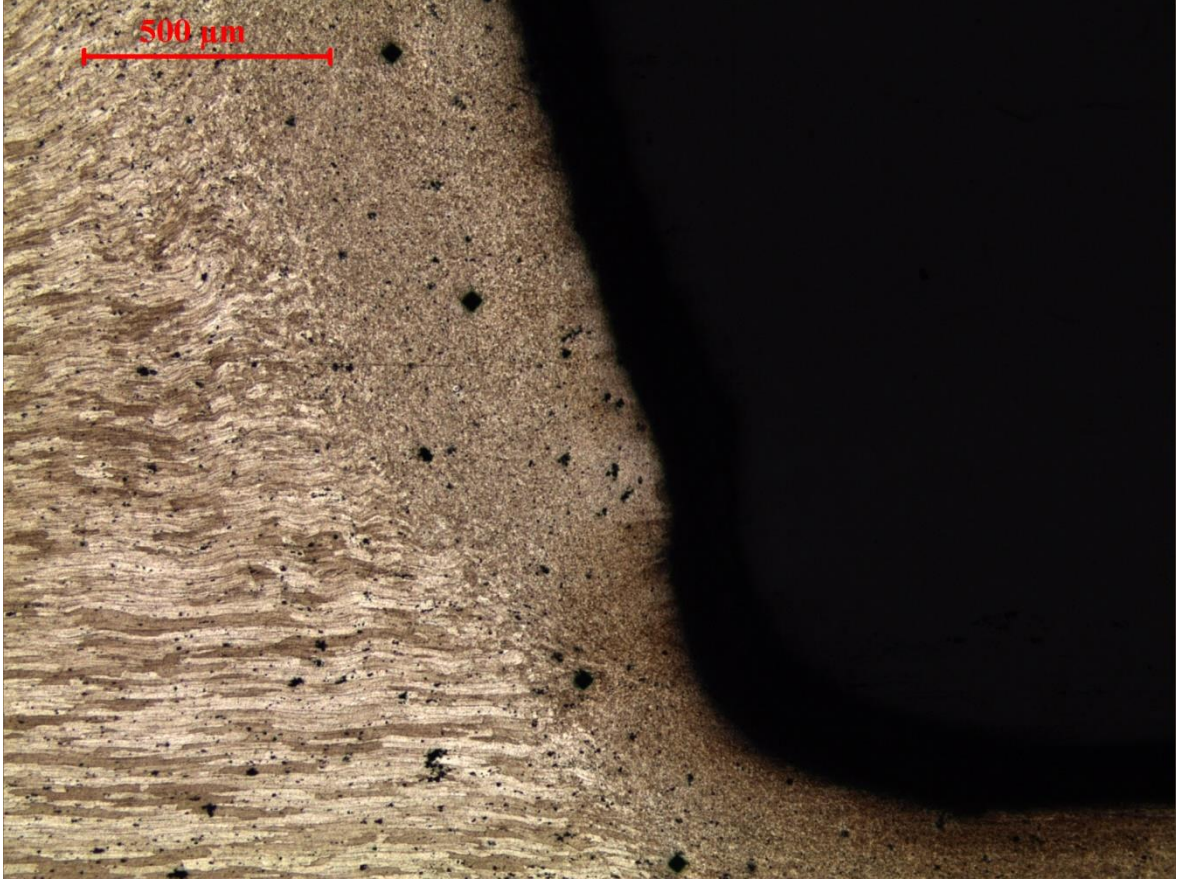


Şekil 6.86. S15 numunesi pim sağ üst 5x.

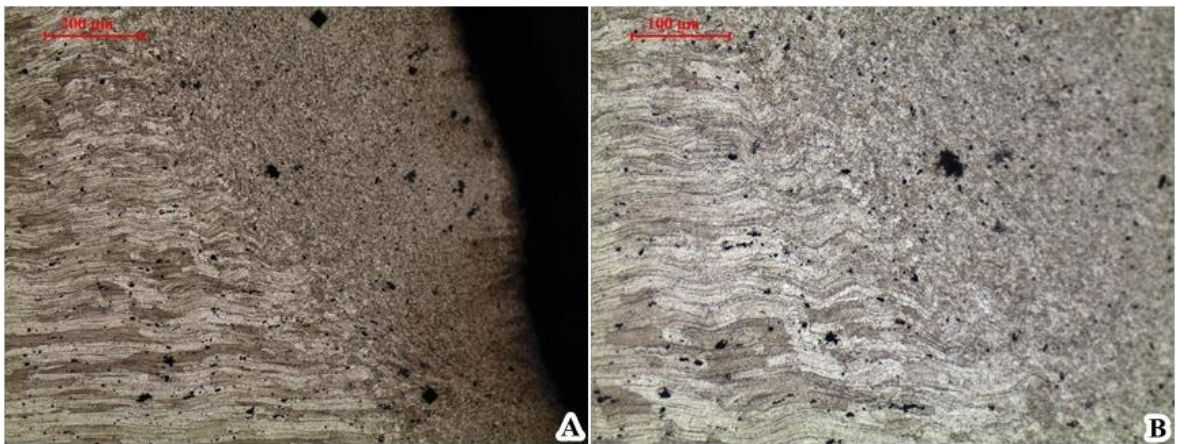


Şekil 6.87. A) S15 numunesi pim sağ üst 10x, B) S15 numunesi pim sağ üst 20x

S15 numunesine ait Şekil 6.88 ve Şekil 6.89’da, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol alt bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

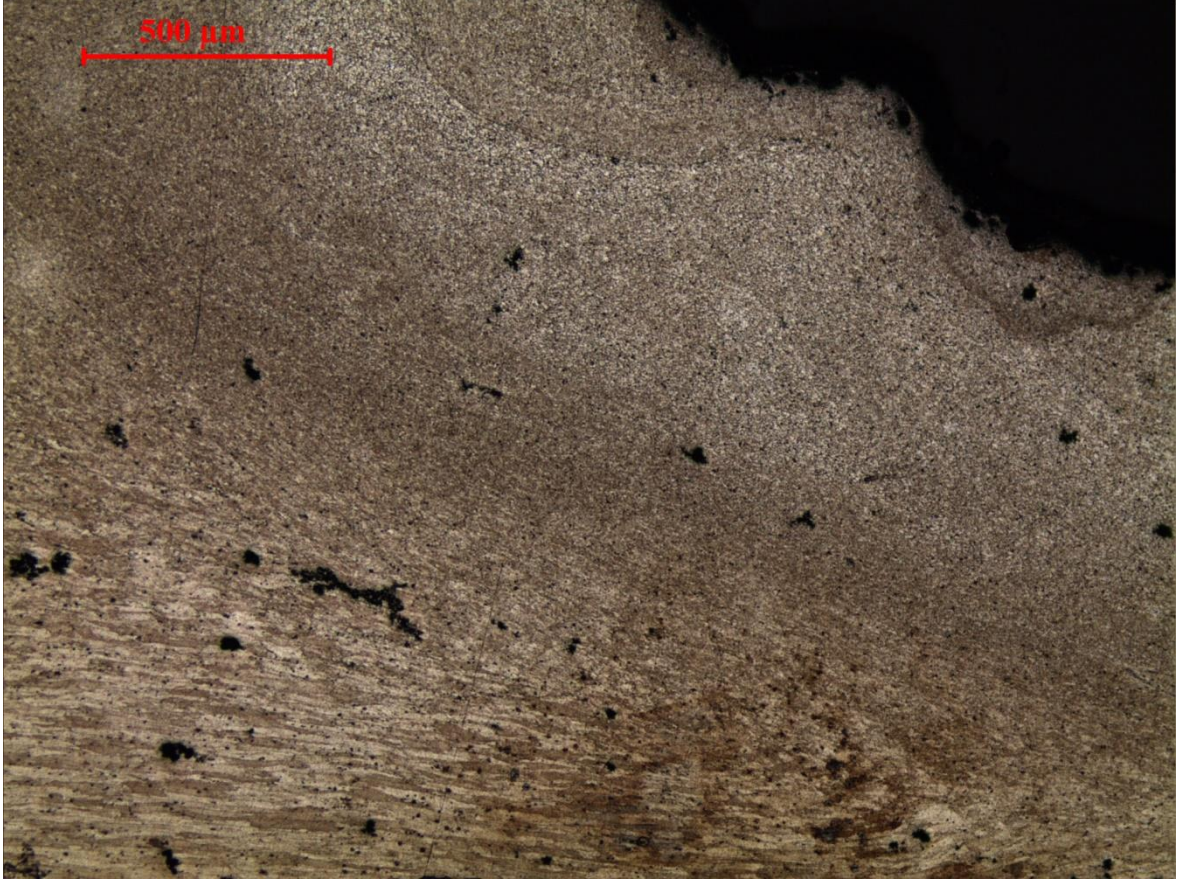


Şekil 6.88. S15 numunesi pim sol alt 5x.

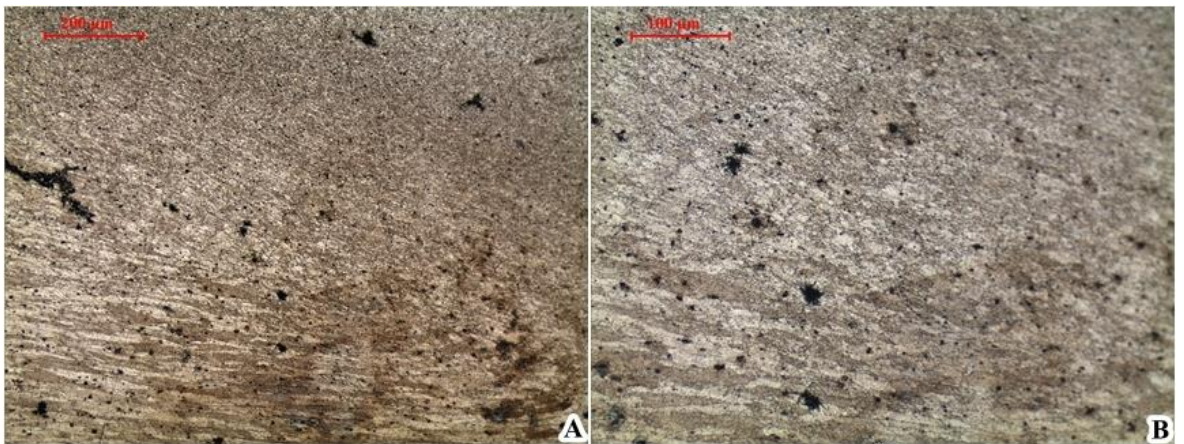


Şekil 6.89. A) S15 numunesi pim sol alt 10x, B) S15 numunesi pim sol alt 20x.

S15 numunesine ait Şekil 6.90 ve Şekil 6.91’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere pim sol üst bölgesinden alınmış 5x, 10x ve 20x büyütmelerdeki optik fotoğrafları bulunmaktadır.

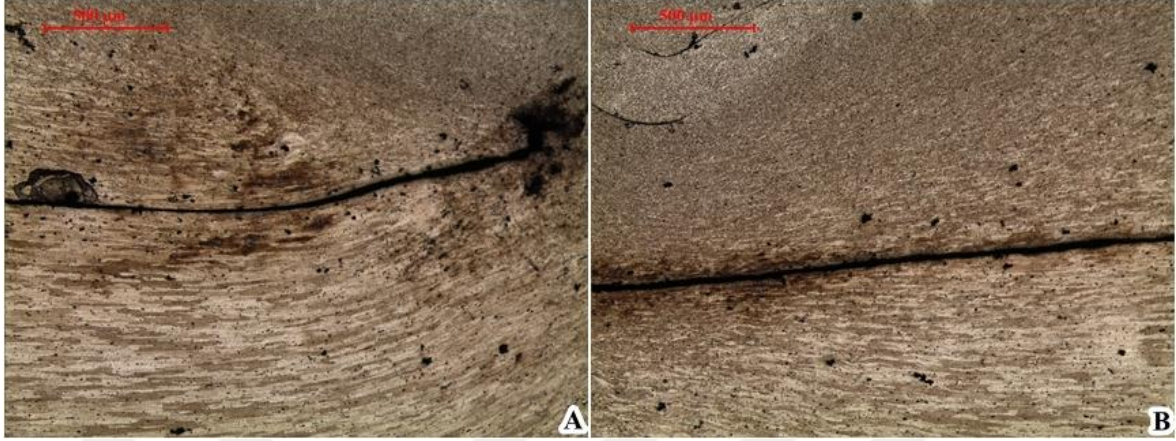


Şekil 6.90. S15 numunesi pim sol üst 5x.



Şekil 6.91. A) S15 numunesi pim sol üst 10x, B) S15 numunesi pim sol üst 20x.

S15 numunesine ait Şekil 6.92’de, Şekil 6.1’de belirtildiği üzere numunenin birleşme bölgesinden alınmış 5x büyütmedeki optik fotoğrafı bulunmaktadır.



Şekil 6.92. A) S15 numunesi orta sol 5x, B) S15 numunesi orta sağ 5x.

Bütün kaynak işlemleri değerlendirildiğinde; malzemenin omuz ile pimin temas ettiği bölgelerden alınan fotoğrafların birbirinden farklı olduğu ve birbirleriyle karşılaştırıldığında mikroyapısal dönüşümün farklı olduğu görülmüştür. İki farklı dalma mesafesi karşılaştırıldığında ise daha derin dalma mesafesine sahip olan numunelerde omuzun oluşturduğu sürtünme ısısı artışına paralel takım malzemeyi daha çok ısıtıp daha fazla deformasyona maruz bırakmıştır. Buna bağlı olarak malzemeye ait fotoğraflar incelendiğinde malzemenin omuz ile temas ettiği noktada KB bölgesi daha geniş ve TEB bölgesindeki taneler daha fazla yönelmiştir.

Aynı şekilde yönelmiş taneler de KB bölgesi bitişiğinde deformasyon bandı olarak S10 numunesine ait Şekil 6.30’da çok net bir şekilde görülmektedir.

6.1.1 Devir Sayısının Etkisi

Şekil 6.2’den Şekil 6.14’e kadar S4 numunesine ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. Şekil 6.15’den Şekil 6.27’e kadar ise S8 numunesine ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. İncelenen görseller doğrultusunda 2mm dalma mesafesi, 2500 dev/dk, üçgen piramit uç profiline sahip S4 numunesi ile 2mm dalma mesafesi, 2000 dev/dk, üçgen piramit uç profiline sahip S8 numunesi kıyaslandığında, değişken olan devir sayısının kaynak kalitesi üzerindeki etkisinin çok önemli olduğu görülmüştür.

Devir sayısı yüksek olan S4 ve S8 numunelerinde KB bölgesi sınırları çok değişmemekle birlikte, S4 için KDB ve TEB bölgeleri S8'e göre daha geniş olduğu görülmüştür. S4 numunesinin tane yapıları daha yassı ve yönlenmeler S8'e kıyasla mevcuttur. Pimin temas ettiği bölgeden omuz bölgesine ilerledikçe S4 ve S8 numunesinde TEB bölgesi sınırları ısı girdisine paralel iri ve yönlenmiş taneler görülmüştür.

Şekil 6.41'den Şekil 6.53'e kadar S11 numunesine ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. Şekil 6.54'den Şekil 6.66'ya kadar ise S13 numunesine ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. İncelenen görseller doğrultusunda 2.25mm dalma mesafesi, 1500 dev/dk ve konik vida uç profiline sahip S11 numunesi ile 2.25mm dalma mesafesi, 2000 dev/dk ve konik vida uç profiline sahip S13 numunesi kıyaslandığında, yukarıda vurgulandığı gibi artan devir sayısı numuneler üzerinde aynı değişimlere yol açmıştır. Devir sayısının artmasıyla tanelerde irileşmeler meydana gelmiştir. Artan devir sayısı ile yüzeyde oluşan ısı enerjisi de artmaktadır. Devir sayısının mikroyapısal bozunumlarda önemli rol oynadığı düşünülmektedir.

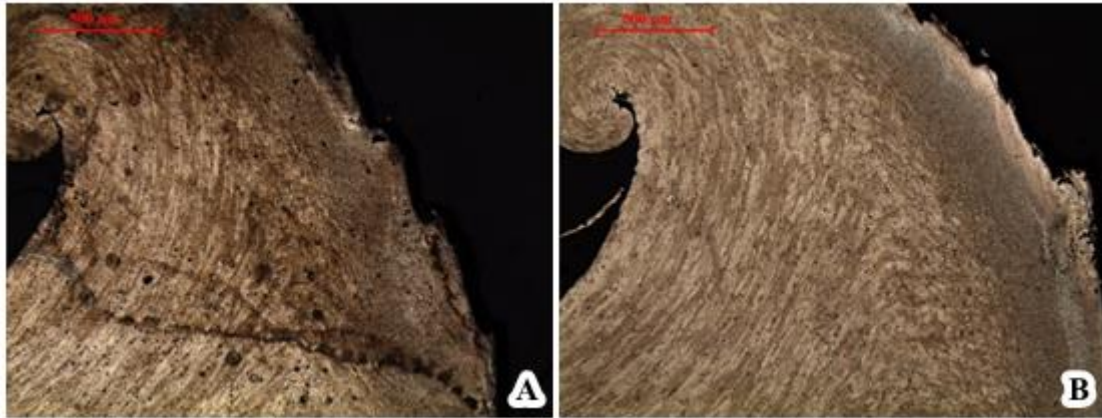
6.1.2 Uç Profilinin Etkisi

Şekil 6.28'den Şekil 6.40'a kadar S10 numunesine ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. Şekil 6.80'den Şekil 6.92'ye kadar ise S15 numunesine ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. İncelenen görseller doğrultusunda 2.25mm dalma mesafesi, 2500 dev/dk ve üçgen piramit uç profiline sahip S10 numunesi ile 2.25mm dalma mesafesi, 2500 dev/dk ve konik vida uç profiline sahip S15 numunesini değişen uç profiline göre kıyaslandığında; üçgen piramit uç profilinin daha ince taneli bir yapı gösterdiği görülmektedir. Uç profili üzerine yapılan çalışmalarda farklı profildeki uçların sürtünme sıcaklığı üzerinde etkisi sınırlı oranda olduğu bildirilmiştir [32]. Farklı geometrilerde karıştırıcı uç profilleri, kaynak kalitesi üzerinde önemli rol oynamaktadır. Çalışmada imal edilen iki profildeki uçlarla yapılan kaynak işlemlerinde başarılı birleştirmeler elde edilmiştir. Üçgen piramit ve konik vida ile gerçekleştirilen kaynaklar kendi parametrelerinde karşılaştırıldığında; Karışma bölgesinde (KB) görsel bir farklılık tam ortaya çıkmamasına karşın, diğer bölgeler üzerinde özellikle vida profiliyle gerçekleştirilen kaynakların daha fazla sıcaklık üretmesine bağlı olarak düşünülen bölgesel genişlemeler ve şiddetli deformasyonlar tespit edilmiştir.

6.1.3 Dalma Mesafesinin Etkisi

Şekil 6.15'ten Şekil 6.27'e kadar ise S8 numunesine ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. Şekil 6.67'den Şekil 6.79'a kadar ise S14 numunesine ait mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. İncelenen görseller doğrultusunda 2mm dalma mesafesi, 2000 dev/dk ve üçgen piramit uç profiline sahip S8 numunesi ile 2.25mm dalma mesafesi, 2000 dev/dk ve üçgen piramit uç profiline sahip S14 numunesini artan dalma mesafesine göre kıyaslayacak olursak; dalma derinliği arttıkça nüfuziyet ve ısı artışı meydana gelir. Artan nüfuziyete bağlı olarak TEB bölgesinde tanelerde sıcaklığın etkisiyle tanelerde daha fazla yönlennmeler mevcuttur. Dalma mesafesinin artışına bağlı olarak malzemeye daha fazla nüfuz eden takım KB bölgesi sınırlarında önemli bir değişim olmazken, S8 ve S14 numunesine ait fotoğraflar incelendiğinde artan dalma mesafe değerine göre kaynak dikişinde genişlemeler mevcuttur.

Ayrıca 2mm dalma mesafesi, 2500 dev/dk ve üçgen piramit uç profiline sahip S4 numunesi ile 2.25mm dalma mesafesi, 2500 dev/dk ve üçgen piramit uç profiline sahip S10 numuneleri artan dalma mesafesine göre kıyaslandığında, taşan malzeme miktarında (flash miktarı) ciddi değişimler gözlenmiştir. Şekil 7.93 A'da 2mm dalma mesafesi ile birleştirilen S10'nun Şekil 7.93 B'de bulunan 2.25mm dalma mesafesi ile birleştirilen S4 numunesine kıyasla artık flash miktarları artmıştır.

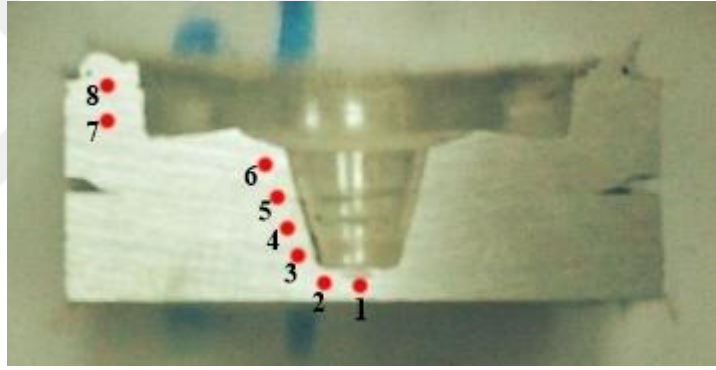


Şekil 6.93. A) S4 numunesine ait flash miktarı B) S10 numunesine ait flash miktarı.

6.2 Mekanik İncelemeler

6.2.1 Mikro Sertlik Özellikleri

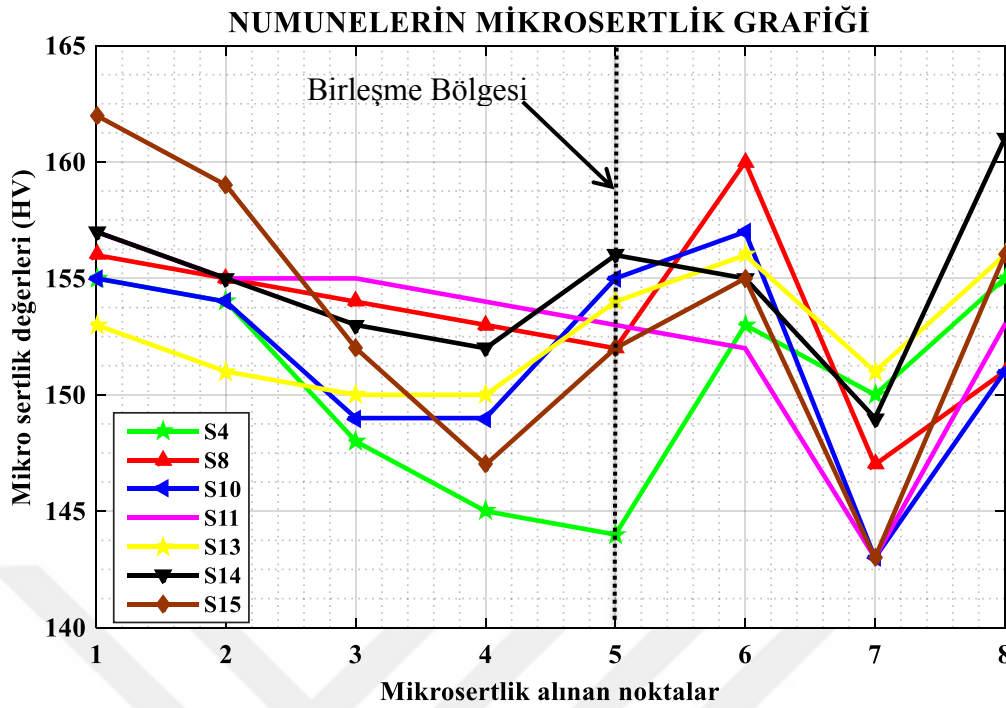
Optik fotoğrafları alınan numunelerde ara geçiş bölgeleri referans alınarak Şekil 6.94'te belirtilen noktalardan sertlik ölçümleri alınmıştır. Parametre değişimlerine bağlı olarak bölgeler üzerinde sertlik artışları belirlenerek yorumlanmıştır. Her numune için 8 noktadan alınan ölçümler ile sertlik değerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Daha sonra S15 numunesi üzerinde daha önceden belirlenen 3 farklı bölge dikkate alınarak kendi içindeki bölgesel değişimler de incelenmiştir. Tablo 6.1'de her numune için belirlenen noktalardan alınan mikro sertlik değerleri mevcuttur. Şekil 6.95'te ise sertlik değerleri ölçülen noktaların her numuneye ait grafiği verilmiştir.



Şekil 6.94. Mikro sertlik alınan noktalar.

Tablo 6.1. Her numune için belirlenen noktalardan alınan mikro sertlik değerleri (HV).

Numune	1	2	3	4	5	6	7	8
S4	155	154	148	145	144	153	150	155
S8	156	155	154	153	152	160	147	151
S10	155	154	149	149	155	157	143	151
S11	153	150	155	153	153	152	143	153
S13	157	155	150	153	157	155	149	161
S14	153	151	150	150	154	156	151	156
S15	162	159	152	147	152	155	143	156



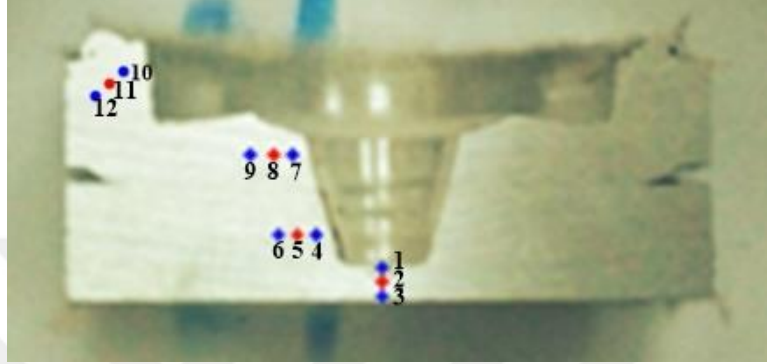
Şekil 6.95. 7 numune için mikro sertlik grafiği.

Tablo 6.1 deki değerlere bağlı grafiği çizilmiş Şekil 6.95 incelenirse, genel olarak bütün numunelerde sertlik ölçümünün alındığı 6. Noktada sertlik artışı mevcuttur. Bu artışın sebebi o bölgenin hem omuzun hem de karıştırıcı pimin etkisi ile ayrı deformasyona uğraması ve bunun sonucunda plastik deformasyon sertliğinin yüksek çıkmasına neden olmuştur.

Değinilmesi gereken bir diğer noktada sertlik ölçümü alınan 1 noktasından 4 noktasına doğru azalan bir eğri söz konusudur. 1 noktasından diğer noktalara gidildikçe kesitin daralması ve deformasyona maruz kalan alanın yoğun olması sertliğin yüksek değerlerde seyretmesine neden olmuştur. 5 noktasından sonra numunelerin çoğunluğu esas alınırsa sertlik değerlerinde az bir artış söz konusudur. Bu artışın sebebi önceden de bahsedildiği üzere 6 noktasına yaklaşıldıkça malzemenin maruz kaldığı deformasyon ve dövme etkilerinin artmasından dolayıdır.

Son olarak 8 noktası 7 noktasına kıyasla sertlik değeri daha yüksektir. 8 noktasının 7 noktasına kıyasla flash oluşum bölgesine yakın olması alttan karıştırılan malzemenin yukarıya taşınması ile dövme ve deformasyon etkilerinin şiddetindeki artış bu noktalarda (8 noktası) sertlik artışına yol açmıştır.

Şekil 6.96’da S15 numunesi üzerinden sertlik alınan diğer noktalar belirtilmiştir. Bu noktalardan alınan sertlik değerleri ile mikro yapı incelemelerinde değinilen yapısal değişimlerin etkilerini görmek amaçlanmıştır. Önceden tanımlanan farklı karakterdeki yapısal bölgelerde sertlik değerlerinde ne tür değişimlerin olduğunu görmek amaçlanmıştır. Tablo 6.2’de Şekil 6.96’da belirtilen noktalardan alınan sertlik değerleri mevcuttur.

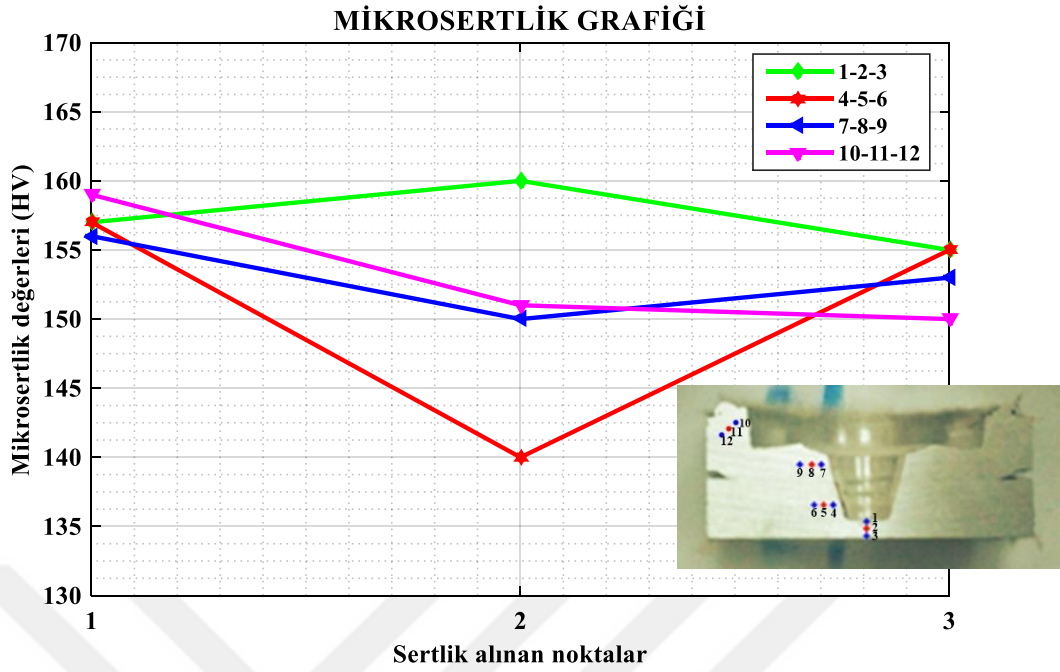


Şekil 6.96. S15 numunesi üzerinden mikro sertlik alınan diğer noktalar.

Tablo 6.2. S15 numunesi için belirlenen noktalardan alınan sertlik değerleri (HV).

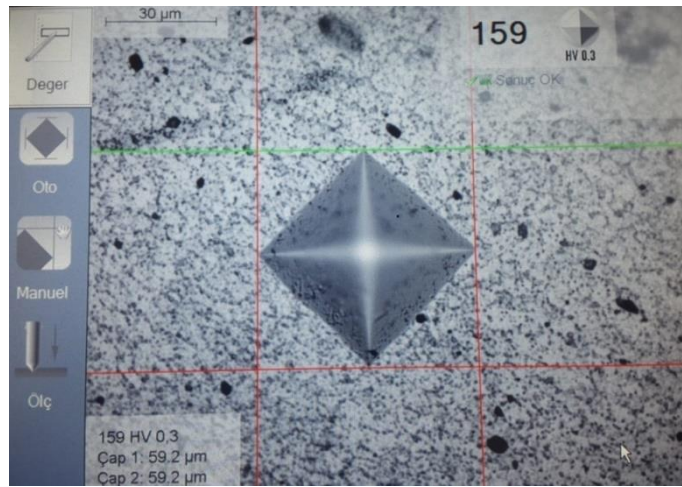
Numune	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S15	157	160	155	157	140	155	156	150	153	159	151	150

Şekil 6.96’da belirtilen noktalardan elde edilen sonuçların mikro sertlik grafiği Şekil 6.97’de verilmiştir.

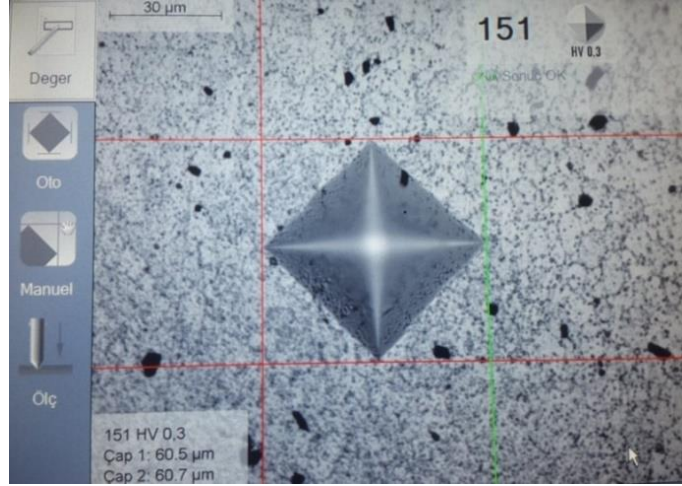


Şekil 6.97. S15 numunesi mikro sertlik grafiği 2.

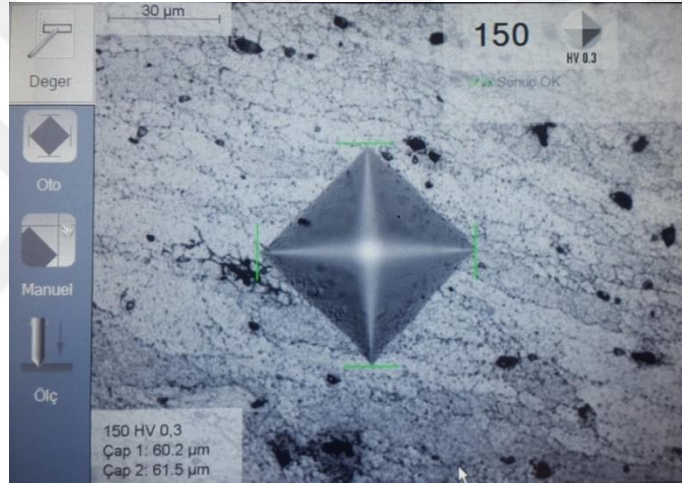
Şekil 6.98’de 10. Noktaya ait iz çapı, Şekil 6.99’da 11. Noktaya ait iz çapı ve Şekil 6.100’de 12. noktaya ait iz çapı gösterilmektedir. Görsellerden de anlaşılacağı üzere tanelerin ince olduğu bölgelerde sertlik değeri daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ise ölçümün yapıldığı noktalardaki taneler ısıdan dolayı deformasyona uğrar ve uğradığı deformasyon sonrasında artan tane sınırları sertlik ölçümünün yapıldığı elmas uca karşı diğer büyük yassı tanelere göre daha yüksek bir direnç gösterir.



Şekil 6.98. 10. Noktanın batıcı uç izi.



Şekil 6.99. 11. Noktanın batıcı uç izi.



Şekil 6.100. 12. Noktanın batıcı uç izi.

Malzemenin 3 mikroyapısal bölgeden alınan sertlik ölçümleri 4 farklı bölge için uygulanmıştır. 1-2-3 noktalarının mikro sertlik değerleri göz önüne alındığında en alt tabanda 1 noktasında pimin oluşturduğu ısı ve dövme etkisine bağlı olarak bölgede deformasyona bağlı sertleşmeler mevcuttur, plastik deformasyon sertliği diğerlerine göre maksimum değerlere ulaşmıştır. 2 noktasında 1 bölgesine nazaran kısmi bir artış söz konusudur. Bunun sebebi ısı ve dövme etkisi pimin olduğu bölgede dar bir alana etki etmektedir. 1 noktasındaki dövme etkisi dar bir alana hapsedildiğinde 2 noktasında alınan mikro sertlik değeri de deformasyonun fazla olmasına karşın artış göstermiştir. 3 noktası incelendiğinde ise 2 noktasına kıyasla sertlik değerinde bir düşüş söz konusudur. Bu nokta TEB bölgesini içermektedir. En alt taban noktadan alınan 1-2-3 noktalarının sonuçları diğer noktalara göre bir miktar yüksektir. 4-5-6 noktası incelendiğinde pimin tam orta

hizasında ısı etkisi yüksek olacağından ısıya maruz kalan malzemede sertlik düşüşleri maksimuma ulaşmıştır. 7-8-9 noktaları ve 10-11-12 noktalarında en alt taban bölgeye göre sertlik bir miktar düşük olmasına karşın mevcut deformasyon 4-5-6 noktasına kıyasla daha yüksek görülmüştür

6.2.2 Çekme Testi Performansı

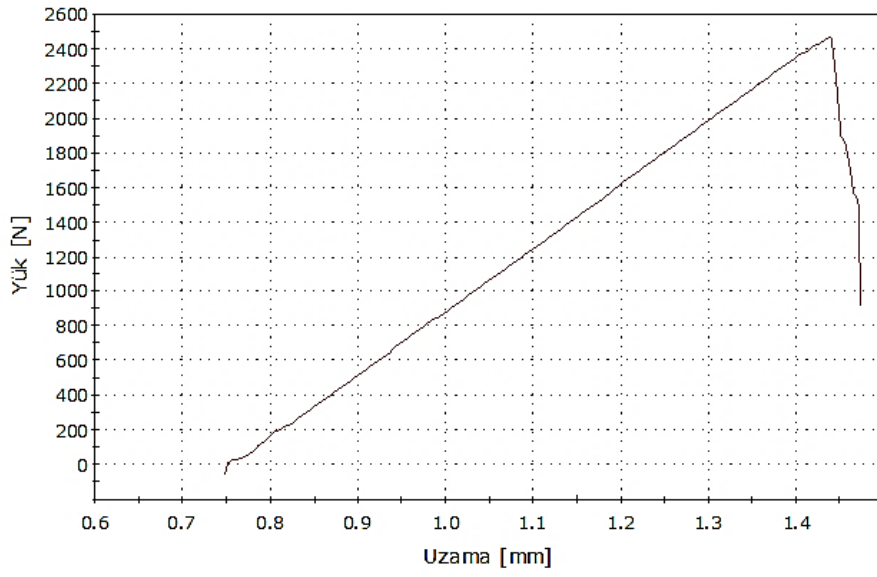
Kaynak performansını belirlemek için yapılan çekme testi toplamda 7 adet numune için gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.3'te çekme testi uygulanan numuneler verilmiştir.

Tablo 6.3. Çekme testi uygulanan numuneler.

Deney	Takım Dalma Mesafesi (mm)	Takım Devri (mm/dk)	Kaynak Süresi (sn)	Takım Ucu Profili	Numune
1	2	1500	5	Konik vida	S1
2	2	1500	5	Üçgen piramit	S2
3	2	2500	5	Konik vida	S3
5	2	2000	5	Konik vida	S5
7	2.25	1000	5	Konik vida	S7
9	2	1000	5	Konik vida	S9
12	2.25	1000	5	Üçgen piramit	S12

Her bir numune için gerçekleştirilen çekme testi sonuçları ve çekme testi sonrası kırılan numunelere ait görseller şu şekildedir;

Şekil 6.101'de S1 numunesine ait yük-uzama eğrisi bulunmaktadır. Eğri incelendiğinde numunenin dayandığı maksimum yük 2450 N'dur. Bu noktadan sonra eğri yaklaşık 0.05 mm'lik bir uzamadan sonra kaynak bölgesinden kırılmıştır. Şekil 6.102'de analiz sonucunda kırılan S1 numunesi verilmiştir. Tablo 6.4'de ise çekme testi sonrasında S1 numunesine ait akma değeri, maksimum yük, kırılma değeri (%), modül değeri, kırılma değeri (mm) ve kırılan numunenin alanı verilmektedir.



Şekil 6.101. S1 numunesi için yük-uzama eğrisi.

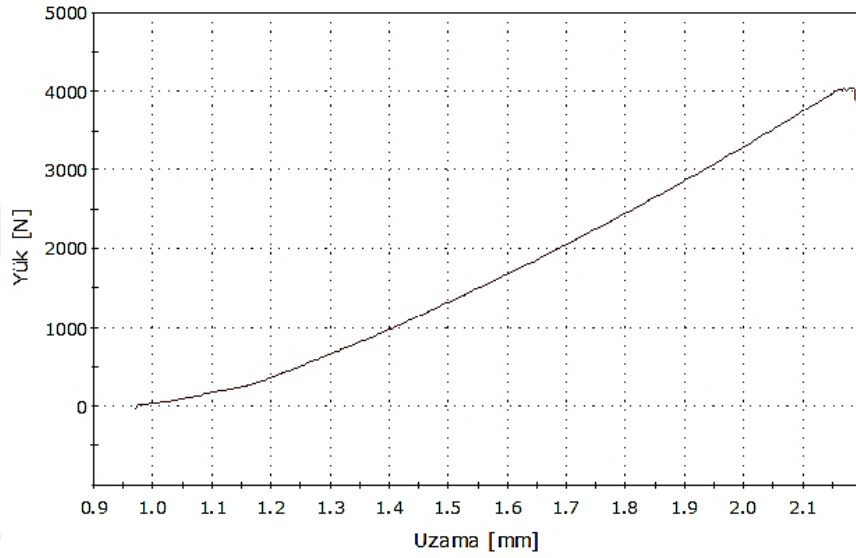


Şekil 6.102. Çekme testi sonrası kırılan S1 numunesi.

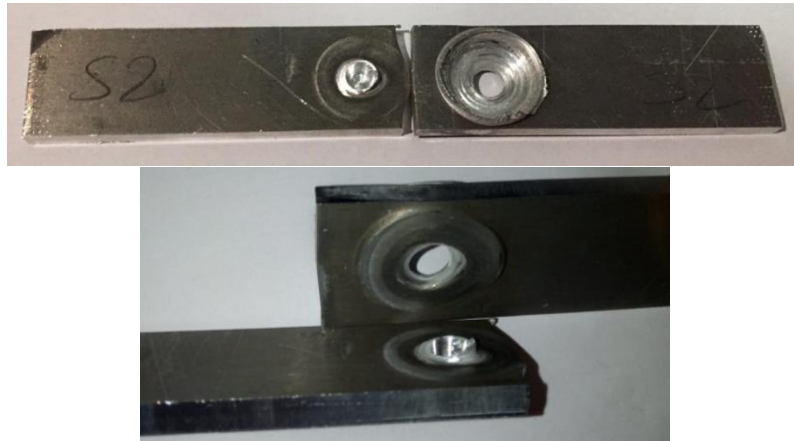
Tablo 6.4. S1 numunesinin çekme testi sonuçları.

	Çekme gerilmesinde Akma (Ofset 0,2 %) [MPa]	Çekme gerilmesinde Maksimum Yük [MPa]	Çekme gerilmesinde (Uzama) Kırılma (Standart) [%]	Modül (Otomatik) [MPa]	Çekme uzamasında Kırılma (Standart) [mm]	Alan [mm ²]
S1	72,23476	12,30396	1,10097	1,26688	0,72386	200,000

Şekil 6.103'te S2 numunesine ait yük-uzama eğrisi bulunmaktadır. Eğri incelendiğinde numunenin dayandığı maksimum yük 4000 N'dur. Bu noktadan sonra eğri uzamadan kaynak bölgesinden kırılmıştır. Şekil 6.104'te analiz sonucunda kırılan S2 numunesi verilmiştir. Tablo 6.5'te ise çekme testi sonrasında S1 numunesine ait akma değeri, maksimum yük, kırılma değeri (%), modül değeri, kırılma değeri (mm) ve kırılan numunenin alanı verilmektedir.



Şekil 6.103. S2 numunesi için yük-uzama eğrisi.

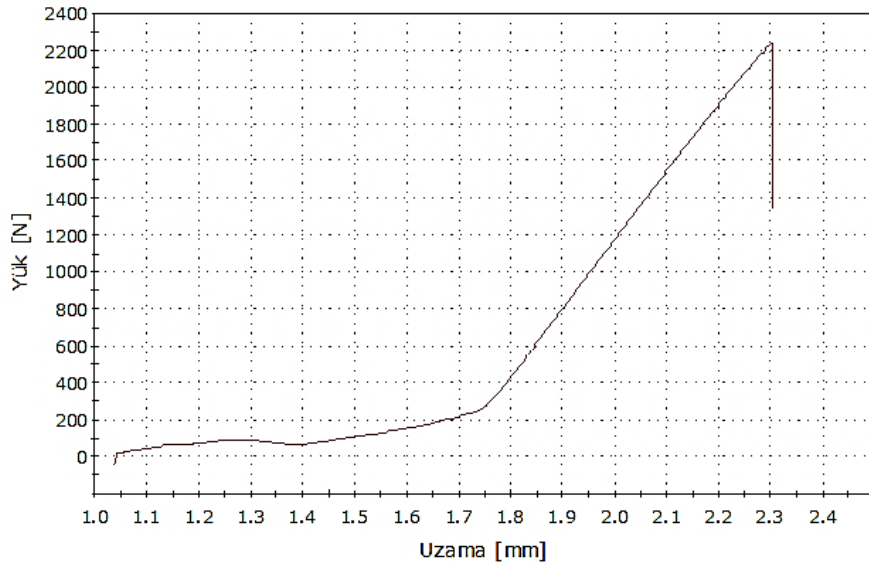


Şekil 6.104. Çekme testi sonrası kırılan S2 numunesi.

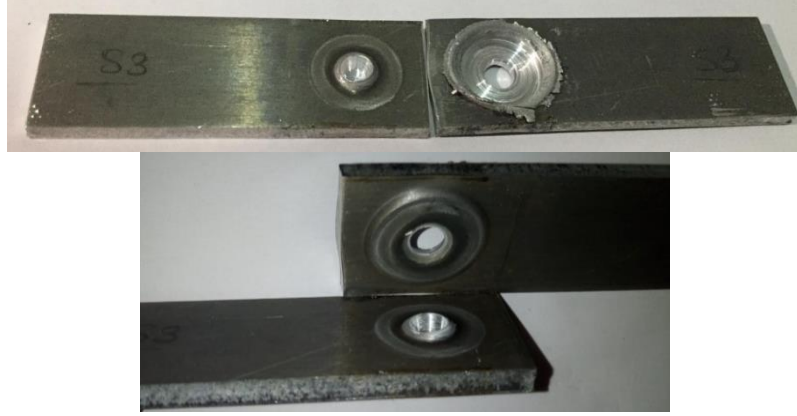
Tablo 6.5. S2 numunesinin çekme testi sonuçları.

	Çekme gerilmesinde Akma (Ofset 0,2 %) [MPa]	Çekme gerilmesinde Maksimum Yük [MPa]	Çekme gerilmesinde (Uzama) Kırılma (Standart) [%]	Modül (Otomatik) [MPa]	Çekme uzamasında Kırılma (Standart) [mm]	Alan [mm ²]
S2	17,48230	20,22792	1,85981	1.301,5677	1,22691	200,000

Şekil 6.105'te S3 numunesine ait yük-uzama eğrisi bulunmaktadır. Eğri incelendiğinde numunenin dayandığı maksimum yük 2225 N'dur. Bu noktadan sonra eğri uzamadan kaynak bölgesinden kırılmıştır. Şekil 6.106'da analiz sonucunda kırılan S3 numunesi verilmiştir. Tablo 6.6'da ise çekme testi sonrasında S3 numunesine ait akma değeri, maksimum yük, kırılma değeri (%), modül değeri, kırılma değeri (mm) ve kırılan numunenin alanı verilmektedir.



Şekil 6.105. S3 numunesi için yük-uzama eğrisi.

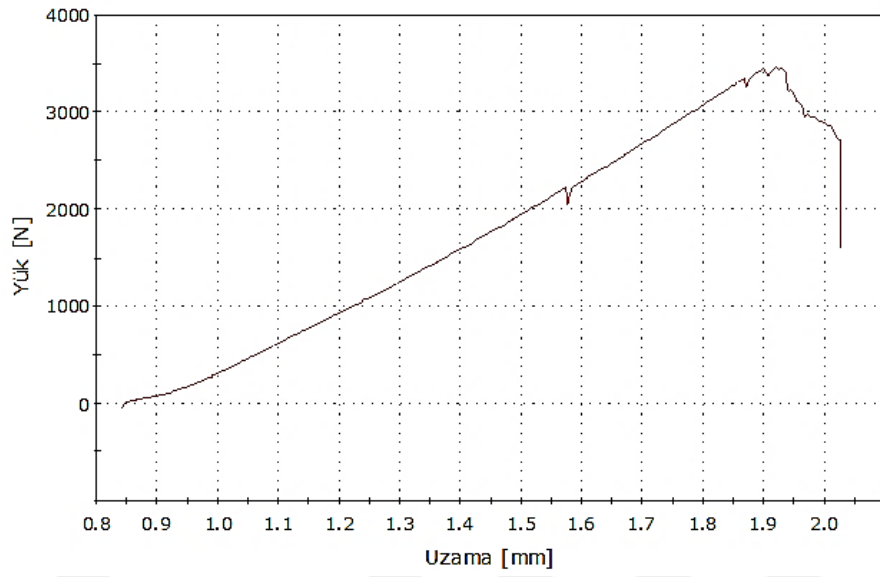


Şekil 6.106. Çekme testi sonrası kırılan S3 numunesi.

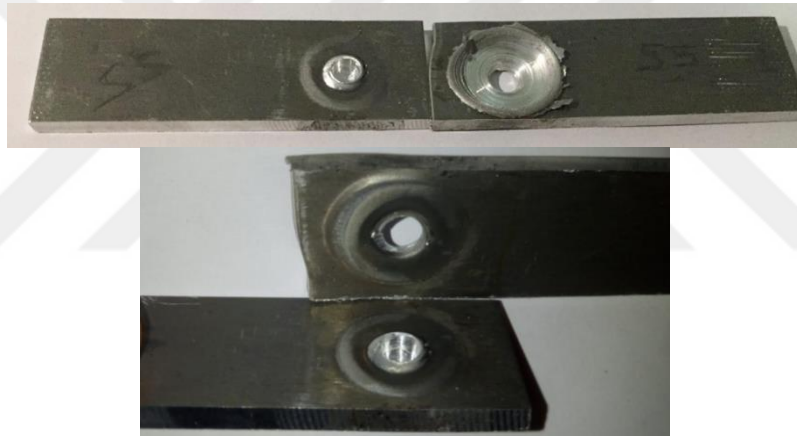
Tablo 6.6. S3 numunesinin çekme testi sonuçları.

	Çekme gerilmesinde Akma (Ofset 0,2 %) [MPa]	Çekme gerilmesinde Maksimum Yük [MPa]	Çekme gerilmesinde (Uzama) Kırılma (Standart) [%]	Modül (Otomatik) [MPa]	Çekme uzamasında Kırılma (Standart) [mm]	Alan [mm ²]
S3	72,23679	89,68781	1,91849	9.682,3217	1,26690	25,00000

Şekil 6.107’de S5 numunesine ait yük-uzama eğrisi bulunmaktadır. Eğri incelendiğinde numunenin dayandığı maksimum yük 3500 N’dur. Bu noktadan sonra eğri yaklaşık 0.15 mm’lik bir uzamadan sonra kaynak bölgesinden kırılmıştır. Şekil 6.108’de analiz sonucunda kırılan S5 numunesi verilmiştir. Tablo 6.7’de ise çekme testi sonrasında S5 numunesine ait akma değeri, maksimum yük, kırılma değeri (%), modül değeri, kırılma değeri (mm) ve kırılan numunenin alanı verilmektedir.



Şekil 6.107. S5 numunesi için yük-uzama eğrisi.

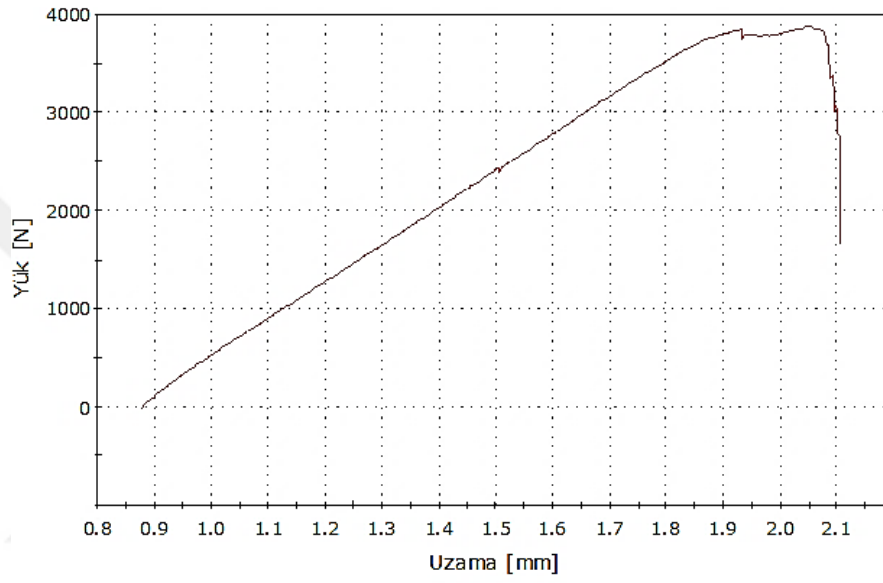


Şekil 6.108. Çekme testi sonrası kırılan S5 numunesi.

Tablo 6.7. S5 numunesinin çekme testi sonuçları.

	Çekme gerilmesinde Akma (Ofset 0,2 %) [MPa]	Çekme gerilmesinde Maksimum Yük [MPa]	Çekme gerilmesinde (Uzama) Kırılma (Standart) [%]	Modül (Otomatik) [MPa]	Çekme uzamasında Kırılma (Standart) [mm]	Alan [mm ²]
S5	15,37828	17,28291	1,79890	1.127,72163	1,18443	200,000

Şekil 6.109’da S7 numunesine ait yük-uzama eğrisi bulunmaktadır. Eğri incelendiğinde numunenin dayandığı maksimum yük 3900 N’dur. Bu noktadan sonra eğri yaklaşık 0.05 mm’lik bir uzamadan sonra kaynak bölgesinden kırılmıştır. Şekil 6.110’da analiz sonucunda kırılan S7 numunesi verilmiştir. Tablo 6.8’de ise çekme testi sonrasında S7 numunesine ait akma değeri, maksimum yük, kırılma değeri (%), modül değeri, kırılma değeri (mm) ve kırılan numunenin alanı verilmektedir.



Şekil 6.109. S7 numunesi için yük-uzama eğrisi.

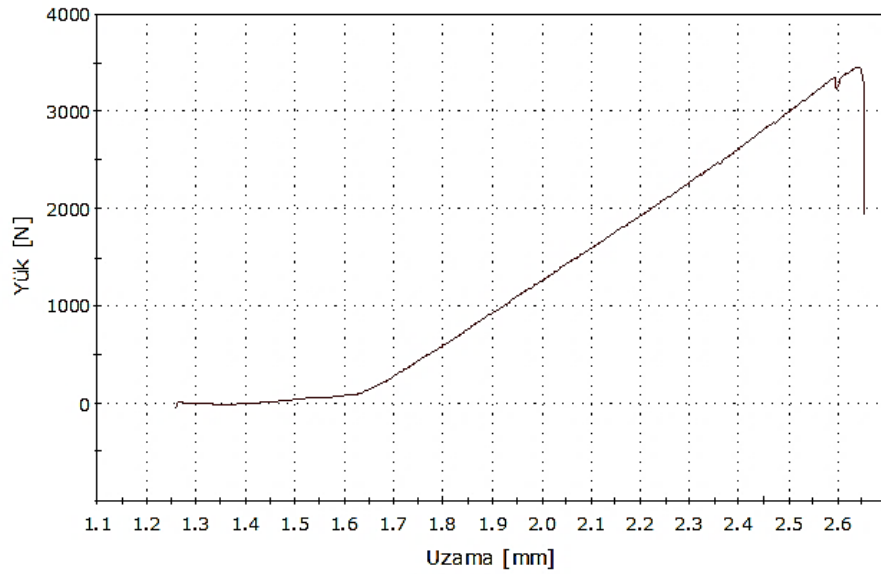


Şekil 6.110. Çekme testi sonrası kırılan S7 numunesi.

Tablo 6.8. S7 numunesinin çekme testi sonuçları.

	Çekme gerilmesinde Akma (Ofset 0,2 %) [MPa]	Çekme gerilmesinde Maksimum Yük [MPa]	Çekme gerilmesinde (Uzama) Kırılma (Standart) [%]	Modül (Otomatik) [MPa]	Çekme uzamasında Kırılma (Standart) [mm]	Alan [mm ²]
S7	19,09123	19,34189	1,86244	1.231,509	1,22694	200,000

Şekil 6.111’de S9 numunesine ait yük-uzama eğrisi bulunmaktadır. Eğri incelendiğinde numunenin dayandığı maksimum yük 3500 N’dur. Bu noktadan sonra eğri uzamadan kaynak bölgesinden kırılmıştır. Şekil 6.112’de analiz sonucunda kırılan S9 numunesi verilmiştir. Tablo 6.9’da ise çekme testi sonrasında S9 numunesine ait akma değeri, maksimum yük, kırılma değeri (%), modül değeri, kırılma değeri (mm) ve kırılan numunenin alanı verilmektedir.



Şekil 6.111. S9 numunesi için yük-uzama eğrisi.

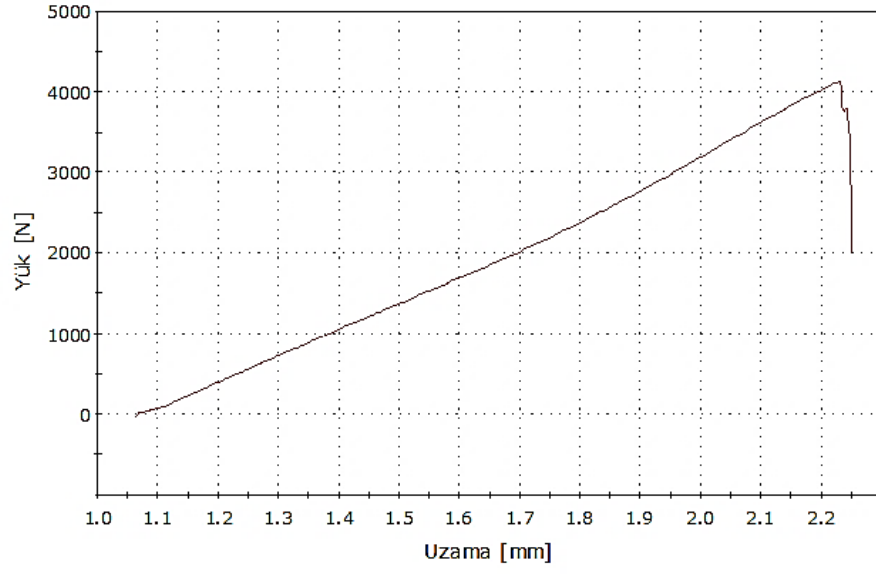


Şekil 6.112. Çekme testi sonrası kırılan S9 numunesi.

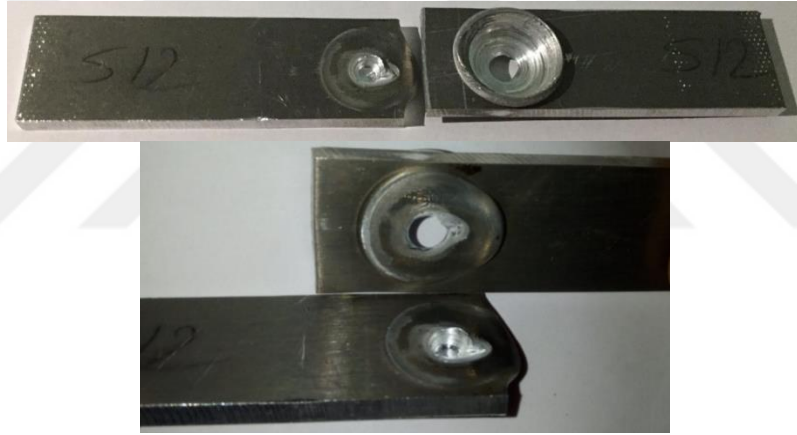
Tablo 6.9. S9 numunesinin çekme testi sonuçları.

	Çekme gerilmesinde Akma (Ofset 0,2 %) [MPa]	Çekme gerilmesinde Maksimum Yük [MPa]	Çekme gerilmesinde (Uzama) Kırılma (Standart) [%]	Modül (Otomatik) [MPa]	Çekme uzamasında Kırılma (Standart) [mm]	Alan [mm ²]
S9	20,93583	22,98466	3,87855	1.030,9919	1,77914	150,000

Şekil 6.113'te S12 numunesine ait yük-uzama eğrisi bulunmaktadır. Eğri incelendiğinde numunenin dayandığı maksimum yük 4050 N'dur. Bu noktadan sonra eğri uzamadan kaynak bölgesinden kırılmıştır. Şekil 6.114'te analiz sonucunda kırılan S12 numunesi verilmiştir. Tablo 6.10'da ise çekme testi sonrasında S12 numunesine ait akma değeri, maksimum yük, kırılma değeri (%), modül değeri, kırılma değeri (mm) ve kırılan numunenin alanı verilmektedir.



Şekil 6.113. S12 numunesi için yük-uzama eğrisi.



Şekil 6.114. Çekme testi sonrası kırılan S12 numunesi.

Tablo 6.10. S12 numunesinin çekme testi sonuçları.

	Çekme gerilmesinde Akma (Ofset 0,2 %) [MPa]	Çekme gerilmesinde Maksimum Yük [MPa]	Çekme gerilmesinde (Uzama) Kırılma (Standart) [%]	Modül (Otomatik) [MPa]	Çekme uzamasında Kırılma (Standart) [mm]	Alan [mm ²]
S12	17,80616	20,65116	1,79289	1.245,193	1,18443	200,000

Çekme grafikleri incelendiğinde; S1 numunesinin 12,3 MPa, S2 numunesinin 20,2 MPa, S3 numunesinin 89,6 MPa, S5 numunesinin 17,2 MPa, S7 numunesinin 19,3 MPa, S9 numunesinin 22,9 MPa ve S12 numunesinin 20,6 MPa maksimum gerilme değerleri sergilemiştir. Bütün numunlerin eğrileri incelendiğinde, analizin başladığı ilk aşamalarda eğrilerde bir stabilite söz konusudur. Bunun sebebi malzeme kaynak sırasında eğilmelere maruz kalmıştır. Bu durumla bağlantılı olarak cihaza yerleştirilen numune eğriliği nötrleyecek yönde bir etki gösterir ve malzeme bu sırada herhangi bir yüke maruz kalmaz. Durağan geçen bu aşamadan sonra yüke binen malzemede, kaynak sonrası elde edilen bağlantılarda olduğu düşünülen yerel boşluklar sebebiyle yükselen ve alçalan kararsız dalgalanmalar göstermiştir. Dolayısıyla düşük mukavemet değerleri elde edildiği düşünülmektedir. Elde edilen max gerilme yük değerleri göz önüne alındığında S3 numunesi diğer numunelere göre daha iyi olduğu sonuç sergilemektedir. Bunun sebebi olarak malzemede meydana gelen kaynak sırasındaki çarpılmaların mekanik testleri olumsuz etkileyeceği sonucuna varılabilir.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bütün analizlerden sonra çalışmada kullanılan SKNK yöntemi üzerine fikir sahibi olunmuştur. SKNK işlemi karakteristiği gereği belirlenen parametreler doğrultusunda malzeme üzerinde mikroyapısal değişmelere sebep olduğu saptanmıştır. Bütün numunelerde birbirinden farklı karakterde 4 bölgenin varlığı ortaya çıkmıştır. Bunlar sırasıyla ucun temas ettiği sıcaklığın ve dövmenin en fazla görüldüğü karıştırma bölgesi (KB) onun hemen bitişiğinde kısmen dövülmüş bölge (KDB) ve bu bölgeye komşu termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve son olarak temel malzeme (TM) olarak tanımlayabiliriz. Şiddetli ekstrüzyon ve tanelerin dövülmesi sonucu oluşan ısının etkisi ile tanelerde irileşme ve bitişik bölgelerin şiddetli plastik deformasyonu sonucu tane yönelmeleri ve deformasyon bantlarının oluşumu görülmüştür. Bu durum tanelerin irileşerek deforme olmasına ve yassılaşmasına sebep olmaktadır.

Devir sayısı parametresinin artış ve azalış durumuna göre şu sonuçlara varılmıştır; Devir sayısı yüksek olan numunelerde KB bölgesi sınırları çok değişmemekle birlikte, KDB ve TEB bölgeleri daha geniş olduğu görülmüştür. Pimin temas ettiği bölgeden omuz bölgesine ilerledikçe TEB bölgesi sınırları ısı girdisine paralel iri ve yönelmiş taneler görülmüştür. Devir sayısının mikroyapısal bozunumlarda önemli rol oynadığı düşünülmektedir.

Farklı geometrilerde karıştırıcı uç profilleri ile gerçekleştirilen kaynaklar kendi parametreleri içerisinde karşılaştırıldığında şu sonuçlara varılmıştır; Karışma bölgesinde (KB) görsel bir farklılık tam ortaya çıkmamasına karşın, diğer bölgeler üzerinde özellikle vida profiliyle gerçekleştirilen kaynakların daha fazla sıcaklık üretmesine bağlı olarak düşünülen bölgesel genişlemeler ve şiddetli deformasyonlar tespit edilmiştir.

Dalma derinliğinin değişmesine bağlı olarak; dalma derinliği arttıkça nüfuziyet, flash miktarlarında artış ve ısıda artış meydana gelir. Artan nüfuziyete bağlı olarak TEB bölgesinde tanelerde sıcaklığın etkisiyle tanelerde daha fazla yönelmeler görülmüştür.

Malzeme üzerinde uygulanan 8 ayrı nokta için elde edilen veriler yorumlandığında şu sonuçlara varılmıştır; Bütün numuneler için ölçüm alınan 6. Noktada sertlik artışı mevcuttur. 1 noktasından 5 noktasına doğru azalan bir eğri söz konusudur. 1 noktasından diğer noktalara gidildikçe kesitin daralması ve deformasyona maruz kalan alanın yoğun olması sertliğin yüksek değerlerde seyretmesine neden olmuştur.

8 noktası 7 noktasına kıyasla sertlik değeri daha yüksektir. 8 noktasının 7 noktasına kıyasla flash oluşumlarına yakın olması alttan karıştırılan malzemenin yukarıya taşınması ile dövme ve deformasyon etkilerinin şiddetindeki artış bu noktalarda sertlik artışına yol açmıştır.

Çekme grafikleri incelendiğinde; S1 numunesinin 12,3 MPa, S2 numunesinin 20,2 MPa, S3 numunesinin 89,6 MPa , S5 numunesinin 17,2 MPa, S7 numunesinin 19,3 MPa, S9 numunesinin 22,9 MPa ve S12 numunesinin 20,6 MPa maksimum gerilme değerlerine sahiptir. Eğriler incelendiğinde numuneler kararsız dalgalanmalar göstermiştir. Bunun temel nedeninin kaynak sırasında numunelerin yük altında çarpılması ve dolayısıyla daha düşük mukavemet değerlerinin elde edildiği düşünülmektedir. Maksimum mukavemet yük değerleri göz önüne alındığında S3 numunesi diğer numunelere göre daha iyi sonuç sergilemiştir.

SKNK yönteminin uygulanması aşamasında malzeme karıştırma işlemine maruz kalmaktadır. Bu işlem malzemeye hem ısı girdisine hem de takım tarafından uygulanan bir miktar basınca sebep olmaktadır. Bu girdiler malzemeye belirli bir kaynak süresiyle uygulandığında malzemelerde eğilmeler meydana gelmektedir. Bunun olmaması adına SKNK işlemi uygulanmadan önce kaynak işleminin yapılacağı malzemeye uygun şekilde bir kalıp tasarlanabilir. Bu şekilde yapılacak çalışmalarda eğilmeler minimum seviyeye çekilebilir ve daha sağlıklı çekme mukavemeti değerleri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, and B. Zou, 2011, “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy”, *Mater. Des.*, vol. 32, no. 8–9, s. 4461–4470.
- [2] T. Weinberger and N. Enzinger, 2010, “Thermo-Mechanical Investigations,” s. 134–146.
- [3] M. Awang, 2007, “Simulation of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process : Study of Friction Phenomena”, West Virginia University, Mechanical Engineering, doktora tezi.
- [4] Uematsu Y., Tokaji K., Tozaki Y., Kurita T., Murata S., 2008, “Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al–Mg–Si alloy”, *International Journal of Fatigue* 30, s. 1956–1966.
- [5] Mert Ş., Mert S., 2013, “Sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin incelenmesi”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, Cilt2, Sayı1, s. 26-35.
- [6] Ashwani K. and RS Jadoun, 2014, “Friction Stir Welding of dissimilar materials/alloys: A review”, *int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.*, vol: 1, No: 1.
- [7] A. Gerlich, G. Avramovic-Cingara, and T. H. North, 2006, “Stir zone microstructure and strain rate during Al 7075-T6 friction stir spot welding,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol: 37, no: 9, s. 2773–2786.
- [8] Merzoug M., Mazari M., Lahcene B., Abdellatif I., 2010, “Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys” *Materials and Design* 31, s. 3023–3028.
- [9] Zhaohua Z., Xinqi Y. , Jialong Z., Guang Z., Xiaodong X., Binlian Z., 2011, “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy”, *Materials and Design* 32, s. 4461–4470.
- [10] Zhikang S., Xinqi Y., Zhaohua Z., Lei C., Tielong L., 2013, “Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints”, *Materials and Design* 44, s. 476–486.
- [11] Zhikang S. , Xinqi Y. , Zhaohua Z. , Lei C. , Yuhuan Y., 2013, “ Mechanical properties and failure mechanisms of friction stir spot welds of AA 6061-T4 sheets”, *Materials and Design* 49, s. 181–191.

- [12] Yasunari T., Yoshihiko U., Keiro T., 2007, “Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, s. 2230–2236.
- [13] Badarinarayan, H., Q. Yang, and S. Zhu, 2009, ‘Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy’, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, s142-148.
- [14] Wang D.A., Lee S.C., 2007, “Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets”, *Journal of Materials Processing Technology* 186, s. 291–297.
- [15] Buffa G., Fratini L., Piacentini M., 2008, “On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys”, *journal of materials processing technology* 208, s. 309–317.
- [16] Dung-An W., Chia-Wei C., Pai-Chen L., Jun-Yen U., 2010, “Mechanical characterization of friction stir spot microwelds”, *Journal of Materials Processing Technology* 210, s.1942–1948.
- [17] Yuan W., R.S. Mishra, S. Webb, Y.L. Chen, B. Carlson, D.R. Herling, G.J. Grant, 2011, “Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds”, *Journal of Materials Processing Technology* 211, s. 972–977.
- [18] Srinivasa D. Thoppul, Ronald F. Gibson, 2009, “Mechanical characterization of spot friction stir welded joints in aluminum alloys by combined experimental/numerical approaches Part I: Micromechanical studies”, *Materials Characterization* 60, s. 1342-1351.
- [19] Su P., Gerlich A., North T.H., and Bendzsak G.J., 2007, “Intermixing in Dissimilar Friction Stir Spot Welds”, *Metallurgical and materials transactions*, Vol 38A.
- [20] Babu S., Sankar V.S., Janaki Ram G.D., Venkitakrishnan P.V., Madhusudhan Reddy G., and Prasad Rao K., 2013, “Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Aluminum Alloy AA2014”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol: 22(1), s. 71.
- [21] Pathak N., Bandyopadhyay K., Sarangi M., and Sushanta Kumar Panda, 2013, “Microstructure and Mechanical Performance of Friction Stir Spot-Welded Aluminum-5754 Sheets”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol: 22(1).

- [22] Suhuddin U.F.H., Fischer V. and dos Santos J.F., 2013, “The thermal cycle during the dissimilar friction spot welding of aluminum and magnesium alloy”, *Scripta Materialia*, s. 87–90.
- [23] Chowdhury S.H., Chen D.L., Bhole S.D., Cao X., Wanjara P., 2012, “Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys”, *Materials Science & Engineering*, s. 500–509.
- [24] Chowdhury S.H., Chen D.L., Bhole S.D., Cao X., Wanjara P., 2013, “Lap shear strength and fatigue behaviour of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive”, *Materials Science & Engineering*, s. 53–60.
- [25] Don-Hyun C. , Byung-Wook A. , Chang-Yong L. , Yun-Mo Y. , Keun S. , Seung-Boo J., 2011, “Formation of intermetallic compounds in Al and Mg alloy interface during friction stir spot welding”, *Intermetallics*, s. 125-130.
- [26] Chen Y.C., Gholinia A., Prangnell P.B., 2012, “Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet”, *Materials Chemistry and Physics*, s. 459– 463.
- [27] Sun Y.F., Fujii H., Takaki N., Okitsu Y., 2013, “Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique”, *Materials and Design*, s. 350–357.
- [28] Bozzi S., Helbert-Etter A.L., Baudin T., Criqui B., Kerbiguet J.G., 2010, “Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds”, *Materials Science and Engineering*, s. 4505–4509.
- [29] Özdemir U., Sayer S., Yeni Ç., 2012, “Effect of Pin Penetration Depth on the Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Aluminum and Copper”, *Materials Testing IN Joining Technology*, s. 233-239.
- [30] Kaçar R., Ertek E.H., Demir H. ve Gündüz S., 2011, “Al-Cu-Al malzeme çiftinin sürtünme karıştırma nokta kaynak kabiliyeti”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fakültesi Dergisi*, Cilt:26, No: 2, s. 349-357,
- [31] Heideman R., Johnson C., Kou S., 2010, “Metallurgical analysis of Al/Cu friction stir spot welding”, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol: 15 , No:7, s. 597-604.

- [32] Sarsılmaz F., 2008, “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik özelliklerinin Araştırılması”, FÜ, Metalurji eğitimi, Doktora Tezi.
- [33] KAHRAMAN B., 2009, “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alasımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı (Rsw) Ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (Fssw) Yöntemleri İle Birleştirilmesi”, Kocaeli Ün., Makine Müh., yüksek lisans tezi.
- [34] Akin M., 2017, “Otomotiv İmalat Sektöründe Kullanılan Çelik İle Alüminyum Alasımı Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (Sknk) Tekniği İle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi,” Mersin Ün., İmalat Müh., yüksek lisans tezi.
- [35] Sudağ M., 2011, “Alüminyum Alasımı Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı İle Birleştirilmesi Ve Dayanım Özelliklerinin Araştırılması”, Gazi Ün., Endüstriyel teknoloji eğitimi, yüksek lisans tezi.
- [36] Vural M., “ EÜT 231 Üretim Yöntemleri”, kaynak yöntemleri sunum pdf.
- [37] Çakır G., 2018, “Polipropilen Levhaların Cnc Tezgahında Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı İle Birleştirilmesi”, Düzce Ün., İmalat Müh., yüksek lisans tezi.
- [38] P. Fanelli, F. Vivio, and V. Vullo, 2012, “Experimental and numerical characterization of Friction Stir Spot Welded joints”, *Eng. Fract. Mech.*, vol:81, s. 17–25.
- [39] Tutar M., Aydın H., Yuce C., Yavuz N., ve Bayram A., 2014, “The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array,” *Mater. Des.*, Vol:63, s. 789–797.
- [40] Yılmaz S.S., Ünlü B.S., Uzkut M., Ertürk D., “Alüminyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları”, *Mühendis ve makine*, Cilt:50, s. 676, 2016
- [41] Sönmez F., Başak H., 2017, “Al-7075-T6 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin etkisi”, *Mühendislik Der.*, cilt:8, sayı:3, s. 599-608.
- [42] URL 1, https://www.researchgate.net/figure/Sekil-2-Termoplastiklerin-SKK-ile-birlestirilmesinin-ve-olusan-mikroyapilarin-sematik_fig1_321257782, Sürtünme karıştırma kaynağı hakkında.
- [43] Gürel Ç., Cemal M., 2009, “Çeliklerin sürtünme Karıştırma Kaynağı”, *Mühendis ve Makina*, Cilt:50, sayı:599.

- [44] Mert Ş., Mert S., 2013, “ Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yönteminde Kullanılan Makine Ve Ekipmanların İncelenmesi”, İleri teknoloji bilimler dergisi, Vol: 2, No: 3, s. 121-129.
- [45] Şık A., 2005, “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum Levhaların Eğme ve Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi,” Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sakarya Üniversitesi, cilt:9, sayı:2, s. 12-17.
- [46] Külekci M.K., Er O., 2012, “Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynaklı En AW -5005 (Al Mg1) Alüminyum alaşımı için optimum kaynak parametre seviyelerinin belirlenmesi”, Gazi Üniv. Müh. Fak. Dergisi, Cilt:27, No:3, s. 537-545.
- [47] Tunçel O., 2015, “ Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı İle Birleştirilen Aa6082-T6 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Uludağ Üniv., Makine Müh., yüksek lisans tezi.
- [48] Baydoğan M., Çimenoglu H., ve Kayalı E. S., 2004, “RRA işleminin 7075 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi”, İTÜ Derg., No:212, s. 108–116.
- [49] URL 2, <http://web.gtu.edu.tr/aluminyum/2016/02/08/aluminyum-alasimlarin-mekanik-ozellikleri/>, Alüminyumun özellikleri hakkında.
- [50] URL 3, <http://www.kutlultd.com.tr/tr/content.asp?PID=%7B668DA599-1B82-47C9-B4E7-CD0FA6B62CA5%7D>
- [51] URL 4, http://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/DuraScan_EN3023.pdf
- [52] URL 5, <https://www.instron.com.tr/tr-tr/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/5900-series/5980-floor-model>

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Büşra GÜROCAK

Uyruğu : T.C.

Doğum Yeri ve Tarihi : ELAZIĞ-1995

e-mail : grck.busraa@gmail.com

Gsm: 0538 036 8578

EĞİTİM

Derece	Bölüm/ Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Mekatronik Mühendisliği	Fırat Üniversitesi	2012-2016
Y. Lisans	Mekatronik Mühendisliği	Fırat Üniversitesi	2017-2019

İŞ DENEYİMİ

2014 Yaz stajı : Silah Fabrikası -Makine ve Kimya Endüstrisi / Kırıkkale

Stajda yapılanlar : Fabrikanın Tam Tesviye Bölümünde yaptığım stajımda CATIA programını öğrenip uygulamalar yaptım ve kullanılan tezgahları öğrendim. Operatörlerle, Mühendislerle bir arada olup üretim ilerleyişi hakkında ve fabrika işleyişi hakkında bilgi edindim.

2015 Yaz stajı : Anot Makina Kalıp Plastik San.ve Tic Ltd Şti / Eskişehir

Stajda yapılanlar : CATIA ve Solid Works programlarını kullanarak uygulamalar yaptım ve şirketin yapmış olduğu 2 özel makinanın imalatında yer aldım.

Bitirme projesi : İKON Tabela ve Reklam Şti: 2016 Bitirme Projemi (Vakum Pres Makinası) ve yıl içi (Sıkıştırılmış hava ile çalışan reklam aracı) projemi İKON da gerçekleştirdim. (www.ikontabela.com)

PROJELER

2016 Bitirme Projem: Vakum Pres Makinası

Yıl içi projem : Sıkıştırılmış hava ile çalışan araba

(Her iki proje de Sanayi odaklı olup İKON Tabela ve Reklam Şirketinin desteği ile gerçekleştirildi.)

Yıl içi projem : 3 eksenli CNC Tezgah Projesi

YABANCI DİLLER

İngilizce

Seviye: Upper intermediate

Okuma: İyi, Yazma: İyi, Konuşma: İyi, Dinleme: İyi